

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
SECCIONAL TUNJA**

FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



**Interfaz gráfica para la medición del tamaño
de burbujas en procesos de flotación basada
en imágenes**

Trabajo de grado que presenta

Jonathan Ernesto Rodriguez Fonseca

Para obtener el título profesional de

INGENIERO ELECTRÓNICO

Tunja, Colombia

2026

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
SECCIONAL TUNJA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



**Interfaz gráfica para la medición del tamaño
de burbujas en procesos de flotación basada
en imágenes**

Trabajo de grado que presenta

Jonathan Ernesto Rodriguez Fonseca

Director del trabajo de grado:

Ingeniero Camilo Ernesto Pardo Beainy

Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia

Codirectores del trabajo de grado:

Ingeniero Edgar Andrés Gutiérrez Cáceres

Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia

Dr. Leopoldo Gutiérrez B.

Universidad de Concepción, Chile

Tunja, Colombia

2026

Dedicatoria

Para empezar, le debo la existencia de este proyecto a mis padres, que han sido la máxima fuente de mi inspiración a través de su amor incondicional, compromiso y sacrificio. Gracias por enseñarme la importancia del esfuerzo, la tenacidad y la integridad; por confiar en mis habilidades incluso cuando yo tenía mis dudas, y por ofrecerme siempre el respaldo necesario para lograr mis objetivos.

A mi hermana, por su cariño, su apoyo silencioso pero constante y por creer en mí incluso en los momentos en que el camino parecía más difícil. Sus palabras, su compañía y su ejemplo han sido un impulso fundamental para seguir avanzando.

A mi pareja, por su amor, paciencia y comprensión en cada etapa de este proceso. Gracias por acompañarme en los días de cansancio, por celebrar cada pequeño logro y por recordarme siempre que valía la pena continuar. Tu presencia ha sido un pilar esencial en este camino.

A mis demás familiares, que con sus muestras de afecto, mensajes de ánimo y confianza en mis capacidades han contribuido a que nunca me sintiera solo en este recorrido. Cada gesto de apoyo ha tenido un lugar importante en la culminación de este proyecto.

A mis amigos, colegas y maestros, quienes compartieron conmigo ideas, lecciones y experiencias que enriquecieron mi educación y desarrollo personal. Sus aportaciones, críticas constructivas y constante motivación fueron clave para culminar este proyecto con éxito.

A todos los que de una u otra forma han ayudado a mi crecimiento intelectual y emocional, dedico este trabajo como un homenaje a la influencia positiva que han tenido en mi vida. Que este logro no solo sea un reflejo de mis esfuerzos, sino también de todos aquellos que me han acompañado en este camino.

Por último, dedico este trabajo a la educación y al conocimiento, fuerzas que transforman y me han permitido soñar, aprender y crecer. Que este proyecto sea un testimonio de que, con dedicación, pasión y apoyo mutuo, cualquier objetivo es alcanzable.

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron viable la realización de este proyecto de grado y en términos generales, mi desarrollo como ingeniero.

En primer lugar, estoy muy agradecido con mis padres, por su amor, paciencia y apoyo constante. La confianza que tienen en mí y las lecciones que me han impartido me han guiado en cada etapa de mi trayectoria académica, proporcionándome la fuerza y la motivación necesarias para enfrentar los retos y cumplir mis objetivos. Agradezco su ejemplo de esfuerzo, compromiso y tenacidad.

A mi hermana y mis familiares, que siempre me animaron y me brindaron palabras de aliento en los momentos difíciles, su apoyo ha sido crucial para mantener mi enfoque y seguridad en mis habilidades.

A mi pareja, quiero expresarle mi profundo agradecimiento por su amor, paciencia y apoyo constante. Gracias por acompañarme en cada desafío, por comprender mis momentos de tensión y por celebrar conmigo cada logro. Tu presencia ha sido un pilar fundamental en mi vida, y este logro también es fruto de tu confianza y motivación.

Quisiera reconocer la valiosa labor de mis docentes y mentores, quienes, mediante su orientación, conocimientos y consejos, han ejercido una influencia notable en mi desarrollo profesional. Sus enseñanzas no solo han enriquecido mis competencias académicas, sino también mi capacidad de análisis crítico y mi pasión por el aprendizaje constante.

A mis colegas y amistades, gracias por su ayuda, motivación y compañía a lo largo de este proceso. Los momentos vividos, las ideas compartidas y los desafíos que hemos enfrentado juntos, han sido experiencias enriquecedoras que guardaré con cariño.

De forma especial, deseo agradecer a la Universidad de Concepción, Chile, por la oportunidad de descubrir un nuevo lugar, por abrirme sus puertas y por hacer posible que alcanzara este significativo objetivo académico. La experiencia de estudiar en un entorno diferente me permitió desarrollarme tanto personal como profesionalmente, y siempre atesoraré los conocimientos y experiencias adquiridos.

Por último, agradezco a todas las personas que de alguna forma contribuyeron a que este logro se hiciera posible: instituciones, compañeros de prácticas y aquellos que proporcionaron información, apoyo o motivación. Cada aporte, sin importar cuán pequeño sea, fue fundamental para concluir este proyecto. Este trabajo es un reflejo no solo de mi esfuerzo, sino también del apoyo, la confianza y el acompañamiento de todos ustedes.

Índice general

Resumen	9
Abstract	11
1. Introducción	13
1.1. Planteamiento del problema	14
1.2. Objetivos	14
1.2.1. Objetivo general	14
1.2.2. Objetivos específicos	15
1.3. Propuesta Metodológica	15
1.3.1. Metodología para el análisis de principios de flotación y espuma	17
1.3.2. Diseño del sistema experimental de adquisición de imágenes . .	18
1.3.3. Preprocesamiento y segmentación de burbujas	19
1.3.4. Desarrollo de la interfaz gráfica y análisis de datos	20
1.4. Estructura del documento	21
2. Estado del Arte y Análisis de Vigilancia Tecnológica	23
2.1. Panorama general del proceso de flotación y el rol de la espuma	23
2.2. Evolución tecnológica y mercado de equipos de flotación	24
2.3. Caracterización de espumas de flotación mediante análisis de imágenes	25
2.3.1. Herramientas texturales para la calificación de espuma	25
2.3.2. Algoritmos de segmentación en Python para espumas de flotación	26
2.4. Síntesis crítica y vigilancia tecnológica	27
3. Resultados y Discusión	30
3.1. Fundamentos de flotación y criterios de adquisición	31
3.1.1. Criterios y especificaciones definidas	32
3.1.2. Discusión técnica	32
3.2. Montaje experimental y adquisición de videos	33
3.2.1. Descripción del montaje en la columna piloto	33

3.2.2.	Configuración de cámara e iluminación	36
3.2.3.	Ejemplos de registros obtenidos y criterios de selección de fotografías	38
3.3.	Preprocesamiento, segmentación y detección de burbujas	40
3.3.1.	Preprocesamiento: mejora de contraste y reducción de ruido	41
3.3.2.	Segmentación: umbralización y detección de contornos	42
3.3.3.	Validación visual y criterios de filtrado geométrico	46
3.3.4.	Discusión de desempeño bajo condiciones variables	47
3.3.5.	Relación entre el flujo de aire ingresado y el flujo estimado en espuma	48
3.4.	Fundamento matemático del modelo de estimación volumétrica	49
3.4.1.	Diámetro equivalente a partir del área proyectada	50
3.4.2.	Conversión de unidades píxel–milímetro	50
3.4.3.	Estimación del volumen de una burbuja	51
3.4.4.	Definición del caudal volumétrico estimado	51
3.4.5.	Alcance y limitaciones de las aproximaciones empleadas	52
3.4.6.	Ejemplo ilustrativo del cálculo de Q_{est}	52
3.5.	Resultados experimentales por condición de flujo	54
3.5.1.	Comparación del flujo estimado entre condiciones	54
3.6.	Interfaz gráfica y análisis cuantitativo	56
3.6.1.	Flujo de uso de la interfaz	56
3.6.2.	Métricas calculadas y visualización	57
3.6.3.	Exportación y organización de resultados	58
4.	Conclusiones y Recomendaciones	60
4.1.	Conclusiones	60
4.2.	Recomendaciones	61
4.3.	Divulgación y socialización de resultados	62
	Referencias Bibliográficas	64
A.	Anexo A: Código fuente del sistema de análisis de burbujas.	66
A.1.	Archivo principal de la aplicación (GUI)	66
A.2.	Módulo de detección y segmentación de burbujas	67
A.3.	Exportación y trazabilidad de resultados	67
B.	Anexo B: Estructura de la interfaz gráfica y flujo de uso	68
B.1.	Componentes principales de la GUI	68
B.2.	Flujo general de operación	69

B.3. Estructura recomendada de carpetas del proyecto	69
C. Anexo C: Videos de prueba para validación de la interfaz	70

Índice de figuras

1.1.	<i>Esquema general para el análisis de la espuma en la columna de flotación.</i>	16
1.2.	<i>Esquema del sistema de flotación y observación óptica</i>	17
1.3.	<i>Esquema del sistema experimental de adquisición de imágenes en la salida de espuma de la columna de flotación piloto.</i>	19
1.4.	<i>Flujo general de preprocesamiento y segmentación de imágenes de espuma.</i>	20
1.5.	<i>Esquema operativo de la interfaz gráfica creada para la observación, medición y exportación de datos relacionados con el tamaño de burbujas provenientes de vídeos de la región de espuma.</i>	21
3.1.	<i>Columna de flotación piloto instalada en el laboratorio de Metalurgia, Universidad de Concepción, Chile.</i>	34
3.2.	<i>Tanque utilizado para la mezcla de agua dulce y reactivos de flotación (MIBC y DF250) antes de la alimentación en la columna piloto.</i>	35
3.3.	<i>Panel de control de la columna de flotación piloto, utilizado para la operación y regulación de las condiciones experimentales durante los ensayos.</i>	36
3.4.	<i>Configuración experimental del sistema de adquisición visual, mostrando la disposición de la cámara Nikon D5100 y del sistema de iluminación utilizados durante los ensayos en la columna de flotación piloto.</i>	38
3.5.	<i>Vista superior de la zona de espuma obtenida directamente desde la cámara Nikon D5100.</i>	39
3.6.	<i>Interfaz gráfica del sistema de análisis de burbujas.</i>	41
3.7.	<i>Flujo de preprocesamiento aplicado a un fotograma representativo de la espuma, mostrando la transición desde la imagen original hasta la imagen binaria utilizada para la detección y segmentación de burbujas.</i>	42
3.8.	<i>Ejemplo del proceso de segmentación y detección de burbujas.</i>	43
3.9.	<i>Interfaz gráfica principal del sistema de análisis, donde se observa la selección del video de entrada, el caudal de operación y el resumen de resultados de la última corrida.</i>	57

3.10. Pestaña de análisis de la interfaz gráfica, donde se muestran las tablas de resultados y los gráficos estadísticos asociados, ilustrando la tendencia del flujo estimado en función del tiempo.	58
3.11. Archivo Excel generado automáticamente por la interfaz, con hojas organizadas por caudal de operación y métricas resumidas de cada corrida.	59
4.1. Presentación del trabajo relacionado con el análisis de burbujas en espuma de flotación durante el Congreso Nacional de Metalurgia (CONAMET) 2025.	63

Índice de cuadros

3.1. <i>Criterios técnicos definidos para el análisis visual de espuma y su procesamiento digital.</i>	32
3.2. Resultados obtenidos para la condición de 3 L/min.	54
3.3. Resultados obtenidos para la condición de 4 L/min.	55
3.4. Resultados obtenidos para la condición de 5 L/min.	55
3.5. Resultados obtenidos para la condición de 6 L/min.	55
3.6. Relación entre flujo nominal ingresado y flujo estimado en la zona de espuma.	56

Resumen

El método de flotación juega un papel crucial en la minería para concentrar los materiales valiosos mediante la adhesión de partículas a burbujas de aire en un entorno acuoso. La zona de espuma, donde se agrupan estas burbujas, proporciona información vital acerca de la eficacia del procedimiento, especialmente a través del análisis de la distribución de tamaños de burbujas. Sin embargo, la observación visual directa es limitada y subjetiva, lo que dificulta obtener mediciones cuantitativas y repetibles del comportamiento de la espuma.

El propósito de este proyecto es desarrollar una metodología basada en procesamiento digital de imágenes que permita la captura, el preprocesamiento, la segmentación y la caracterización de burbujas en la región de espuma de una columna de flotación, utilizando algoritmos de visión por computadora en Python y bibliotecas como OpenCV. La herramienta propuesta, de carácter no invasivo y de bajo costo, busca facilitar a futuro una evaluación precisa de parámetros operativos relevantes, mejorando la estabilidad del proceso y la recuperación de minerales. El trabajo se desarrollará en conjunto con la Universidad de Concepción (Chile), combinando capacidades técnicas y académicas para avanzar hacia sistemas de monitoreo automatizado en contextos de laboratorio y, potencialmente, en la industria minera.

La flotación de espumas es una de las operaciones más utilizadas en el procesamiento de minerales, ya que permite separar las partículas valiosas de la ganga mediante su adhesión a burbujas de aire en un medio acuoso. En este contexto, la zona de espuma de una columna de flotación constituye un indicador visual fundamental del desempeño del proceso, pues características como el tamaño, la forma, la estabilidad y la distribución de las burbujas se relacionan directamente con la recuperación de mineral y la calidad del concentrado obtenido. Sin embargo, en muchos entornos académicos e industriales la evaluación de la espuma continúa realizándose de manera predominantemente visual y cualitativa, lo que introduce subjetividad, dificulta la comparación entre ensayos y limita el desarrollo de estrategias de control más avanzadas.

En este trabajo se presenta el desarrollo de una metodología basada en el procesamiento digital de imágenes para la identificación y análisis de burbujas en la región de espuma de una columna de flotación en condiciones de laboratorio. La propuesta se implementa en Python utilizando bibliotecas de código abierto, con el objetivo de construir una herramienta no invasiva y de bajo costo que permita obtener información cuantitativa sobre parámetros tales como el área y la distribución de tamaños de burbujas. El estudio se realiza en colaboración con el laboratorio de metalurgia de la Universidad de Concepción (Chile), donde se dispone de una columna piloto y de las condiciones experimentales necesarias para la captura controlada de imágenes y video

de la espuma.

La metodología considera, en primer lugar, un análisis de los principios físicos y operacionales del proceso de flotación y de la formación de espuma, con el fin de establecer los criterios que orientan el diseño del sistema de adquisición de imágenes. Posteriormente, se desarrolla el arreglo experimental compuesto por una cámara digital de alta definición, un sistema de iluminación LED regulable y una estructura de soporte ajustable que permite fijar la posición y el ángulo de captura. A partir de los videos obtenidos se extraen fotogramas representativos de la zona de espuma, los cuales son sometidos a una etapa de preprocesamiento que incluye filtrado, mejora de contraste y corrección de condiciones de iluminación, buscando resaltar los contornos de las burbujas y reducir la influencia del ruido.

En una siguiente fase se implementan técnicas de segmentación para separar las burbujas del fondo y de la columna, evaluando diferentes estrategias de umbralización y operaciones morfológicas. Sobre las imágenes segmentadas se identifican las burbujas individuales y se calculan propiedades geométricas como el área y un diámetro equivalente, a partir de las cuales se construyen distribuciones de tamaño para distintas condiciones de operación. Estos resultados se integran en una interfaz gráfica de usuario que permite cargar videos o imágenes, visualizar el proceso de segmentación, ajustar parámetros básicos y obtener de manera automatizada tablas y gráficos con la caracterización de la espuma.

Los resultados experimentales obtenidos en la columna piloto muestran la viabilidad de la metodología propuesta para detectar y cuantificar burbujas en condiciones de laboratorio, proporcionando una base objetiva para el análisis de la zona de espuma. La herramienta desarrollada se proyecta como un apoyo para la investigación y la docencia en flotación de minerales, pues facilita la comparación de ensayos y la evaluación de cambios en las condiciones de operación. Asimismo, el enfoque adoptado abre la posibilidad de futuras extensiones hacia sistemas de monitoreo en línea e integración con estrategias de control avanzado, contribuyendo al desarrollo de soluciones accesibles, reproducibles y adaptables para el análisis de espuma en la industria minera.

Abstract

The flotation method plays a crucial role in mining to concentrate valuable materials by adhering particles to air bubbles in an aqueous environment. The foam zone, where these bubbles are grouped, provides vital information about the effectiveness of the procedure, especially through the analysis of the bubble size distribution. However, direct visual observation is limited and subjective, making it difficult to obtain quantitative and repeatable measurements of foam behavior.

The purpose of this project is to develop a methodology based on digital image processing that allows the capture, preprocessing, segmentation and characterization of bubbles in the foam region of a flotation column, using computer vision algorithms in Python and libraries such as OpenCV. The proposed tool, of a non-invasive and low-cost nature, seeks to facilitate an accurate evaluation of relevant operating parameters in the future, improving the stability of the process and the recovery of minerals. The work will be developed in conjunction with the University of Concepción (Chile), combining technical and academic capabilities to move towards automated monitoring systems in laboratory contexts and, potentially, in the mining industry.

Foam flotation is one of the most widely used operations in mineral processing, as it allows valuable particles to be separated from gangue by adhering to air bubbles in an aqueous medium. In this context, the foam zone of a flotation column is a fundamental visual indicator of process performance, as characteristics such as size, shape, stability and bubble distribution are directly related to ore recovery and the quality of the concentrate obtained. However, in many academic and industrial settings, foam evaluation continues to be performed predominantly visually and qualitatively, introducing subjectivity, making it difficult to compare between trials, and limiting the development of more advanced control strategies.

This paper presents the development of a methodology based on digital image processing for the identification and analysis of bubbles in the foam region of a flotation column under laboratory conditions. The proposal is implemented in Python using open-source libraries, with the aim of building a non-invasive and low-cost tool that allows quantitative information to be obtained on parameters such as the area and distribution of bubble sizes. The study is carried out in collaboration with the metallurgy laboratory of the University of Concepción (Chile), where a pilot column and the necessary experimental conditions for the controlled capture of images and video of the foam are available.

The methodology considers, firstly, an analysis of the physical and operational principles of the flotation process and foam formation, in order to establish the criteria that guide the design of the image acquisition system. Subsequently, the experimental arran-

gement is developed, consisting of a high-definition digital camera, a dimmable LED lighting system and an adjustable support structure that allows the position and angle of capture to be fixed. From the videos obtained, representative frames of the foam area are extracted, which are subjected to a preprocessing stage that includes filtering, contrast enhancement and correction of lighting conditions, seeking to highlight the contours of the bubbles and reduce the influence of noise.

In the next phase, segmentation techniques are implemented to separate the bubbles from the bottom and the column, evaluating different thresholding strategies and morphological operations. Individual bubbles are identified on the segmented images and geometric properties such as area and equivalent diameter are calculated, from which size distributions are constructed for different operating conditions. These results are integrated into a graphical user interface that allows uploading videos or images, visualizing the segmentation process, adjusting basic parameters and obtaining tables and graphs with the characterization of the foam in an automated way.

The experimental results obtained in the pilot column show the feasibility of the proposed methodology to detect and quantify bubbles under laboratory conditions, providing an objective basis for the analysis of the foam zone. The tool developed is projected as a support for research and teaching in mineral flotation, as it facilitates the comparison of tests and the evaluation of changes in operating conditions. Likewise, the approach adopted opens the possibility of future extensions towards online monitoring systems and integration with advanced control strategies, contributing to the development of accessible, reproducible and adaptable solutions for foam analysis in the mining industry.

Capítulo 1

Introducción

La técnica de flotación es una de las operaciones más importantes en el procesamiento de minerales, ya que permite concentrar las partículas valiosas mediante su adherencia a burbujas de aire en un medio acuoso. En este contexto, la zona de espuma, ubicada en la parte superior de las celdas o columnas de flotación, se convierte en un indicador visible de las condiciones del proceso y de su eficiencia operativa.

Características como el tamaño, la forma y la distribución de las burbujas de aire en la espuma se relacionan directamente con la estabilidad del sistema y con la recuperación de minerales. No obstante, en muchas aplicaciones industriales y académicas, la evaluación de la espuma continúa realizándose de manera predominantemente visual, lo que introduce subjetividad y limita la obtención de mediciones cuantitativas consistentes.

Paralelamente, el avance de la visión por computador y del procesamiento digital de imágenes ha permitido desarrollar herramientas capaces de extraer información detallada a partir de registros visuales en tiempo real. En el ámbito minero, estas técnicas ofrecen la posibilidad de analizar la espuma de flotación de forma no invasiva, apoyando la supervisión y el control de los procesos sin necesidad de intervenir físicamente el sistema.

Sin embargo, la implementación de estas soluciones suele requerir equipos especializados y plataformas de alto costo, lo que dificulta su adopción en entornos académicos y en plantas piloto donde se prioriza la flexibilidad, el bajo presupuesto y la reproducibilidad experimental. De igual forma, muchos de los algoritmos existentes presentan dificultades cuando se enfrentan a condiciones reales, como variaciones de iluminación, presencia de reflejos o estructuras complejas de burbujas.

Ante esta situación, se propone el desarrollo de una interfaz gráfica basada en procesamiento digital de imágenes que permita identificar y analizar burbujas en la región de espuma de una columna de flotación en un entorno de laboratorio. Esta herramienta

se concibe como un sistema no invasivo, accesible y programable en Python, orientado a generar información cuantitativa sobre el tamaño y la distribución de burbujas, y a sentar las bases para futuros sistemas de monitoreo automatizado en la industria minera.

1.1. Planteamiento del problema

En la industria minera, la técnica de flotación es un paso fundamental para la extracción de minerales, ya que ayuda a separar las partículas deseadas mediante su captura por burbujas de aire en un medio acuoso. La zona de espuma, situada en la parte superior de las celdas o columnas de flotación, sirve como un indicador visible de las condiciones del proceso. Factores como el tamaño, la forma y la distribución de las burbujas permiten deducir la estabilidad de la espuma y la eficacia operativa del sistema.

En la actualidad, la evaluación de esta espuma se lleva a cabo principalmente de forma visual o mediante sistemas costosos y especializados, lo que limita su uso en investigaciones académicas o en plantas piloto, donde se necesita flexibilidad, presupuesto reducido y metodologías que se puedan repetir. Además, investigaciones recientes han demostrado que muchas técnicas actuales presentan problemas cuando se utilizan en condiciones de luz variable, presencia de distracciones visuales o configuraciones complicadas de burbujas, lo que pone en riesgo la precisión y adaptabilidad de los algoritmos utilizados.

Ante esta situación, el proyecto propone la creación de una interfaz basada en procesamiento digital de imágenes, diseñada para identificar y analizar burbujas en la espuma de flotación de manera no invasiva, exacta y asequible. Esta propuesta se implementará en la Universidad de Concepción, en Chile, utilizando ambientes de laboratorio controlados. El desarrollo no solo busca contribuir al seguimiento del proceso en tiempo real, sino también generar conocimiento técnico que permita avanzar hacia sistemas de control inteligentes en la industria minera, promoviendo una optimización sostenible de recursos y procedimientos sin sacrificar la calidad del producto final.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Desarrollar una interfaz gráfica basada en el procesamiento digital de imágenes que permita la identificación y análisis de burbujas en la región de espuma de una columna

de flotación, actuando como una herramienta de evaluación no invasiva para mejorar el control del proceso.

1.2.2. Objetivos específicos

- Analizar los principios fundamentales del proceso de flotación y su relación con la configuración, comportamiento y estructura de la espuma, integrando además los conceptos necesarios para su análisis mediante visión computacional.
- Diseñar e implementar un sistema experimental para la adquisición de imágenes en una columna de flotación, bajo condiciones de laboratorio controladas que permitan una adecuada captura para el análisis digital.
- Aplicar técnicas de preprocesamiento y segmentación de imágenes para identificar, extraer y delimitar los contornos de burbujas en la zona de espuma.
- Elaborar una interfaz gráfica de análisis automatizado que permita obtener parámetros cuantitativos y la distribución de tamaños de burbujas a partir de las imágenes procesadas.

1.3. Propuesta Metodológica

La propuesta metodológica aquí presentada se basa en un enfoque sistemático que combina el proceso físico de flotación con métodos para capturar y procesar imágenes digitales, posibilitando el análisis de la espuma como un sistema dinámico observable mediante herramientas de la ingeniería electrónica. El propósito principal de esta metodología es definir un procedimiento que una el fenómeno físico con el análisis por computadora, convirtiendo la información visual de la espuma en datos cuantitativos valiosos para caracterizar el proceso.

Como se ilustra en la Figura 1.1, la metodología se divide en cuatro etapas clave, organizadas de manera lógica y progresiva. En la primera fase, se toma en cuenta la columna de flotación como el sistema físico a examinar, donde se crean las condiciones indispensables para la generación de burbujas y espuma bajo parámetros controlados. Esta fase establece el entorno experimental en el que se realizarán las mediciones posteriores.

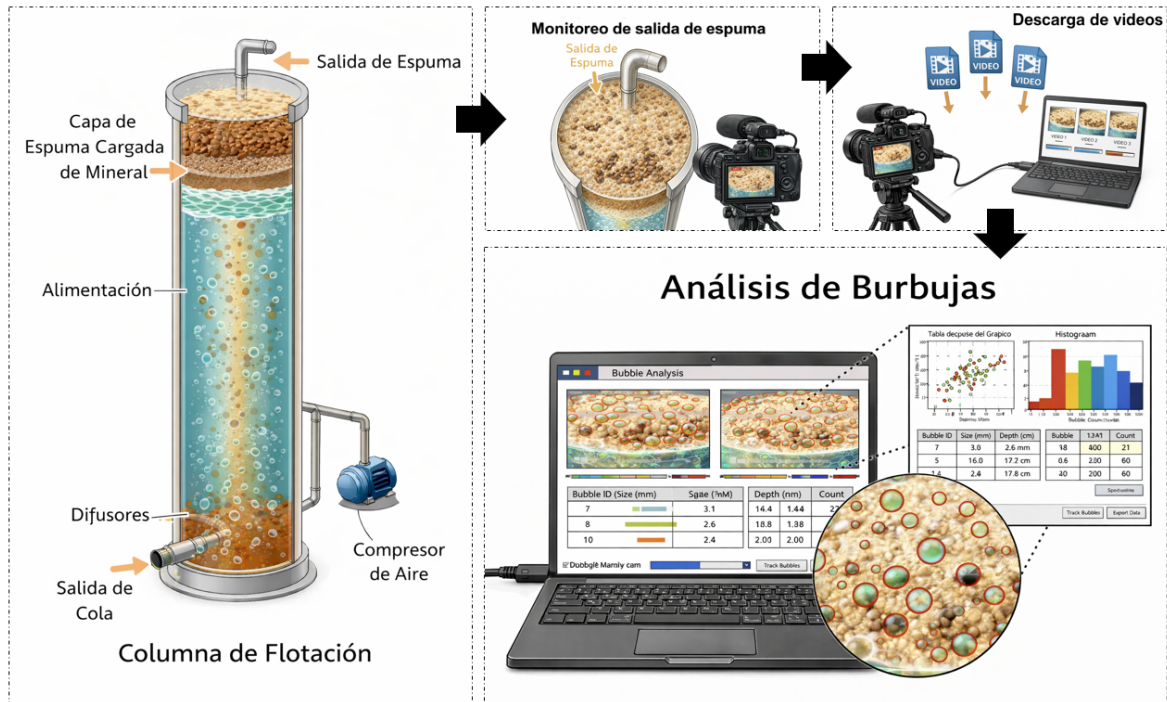


Figura 1.1: Esquema general para el análisis de la espuma en la columna de flotación.

Luego, se añade la observación de la salida de espuma mediante un sistema de captura visual que no interfiere, lo que permite ver directamente la superficie de la espuma durante el funcionamiento de la columna. En esta etapa se definen los parámetros para la captura de imágenes y videos, asegurando que haya una iluminación adecuada, un buen enfoque y un encuadre correcto que garantice una representación fiel del fenómeno.

Más adelante, el material audiovisual obtenido se organiza y guarda, formando una base de datos visual que se utiliza para el tratamiento digital. Esta etapa sirve como un vínculo entre el sistema experimental y el análisis computacional, permitiendo seleccionar fotogramas representativos para su posterior procesamiento.

Por último, la metodología finaliza con el análisis de burbujas, donde las imágenes capturadas se procesan usando técnicas de visión por computadora para la identificación, segmentación y caracterización geométrica de las burbujas presentes en la espuma. Esta fase final permite convertir la información visual en parámetros cuantitativos que describen el comportamiento del sistema, sentando las bases para el análisis experimental que se presentará en capítulos siguientes.

De esta forma, el capítulo se organiza en cuatro secciones que desarrollan cada una de estas etapas, manteniendo una separación clara entre la explicación metodológica y los resultados obtenidos.

1.3.1. Metodología para el análisis de principios de flotación y espuma

Para alcanzar el primer objetivo específico, se llevará a cabo un análisis teórico del método de flotación desde el punto de vista de la ingeniería electrónica, considerando la fase de espuma como un sistema dinámico cuya información puede ser obtenida a través de sensores ópticos y procesada con software digital. En este marco, la Figura 1.2 presenta de forma conceptual la columna de flotación y la incorporación de dispositivos ópticos destinados a la observación de la zona de espuma, subrayando su función como conexión entre el fenómeno físico y el análisis digital.

En esta etapa se examinarán los fundamentos fisicoquímicos que rigen la creación, el comportamiento y el colapso de las burbujas, así como las variables que afectan su visualización, tales como las condiciones de iluminación, la reflectancia de la superficie de la espuma, la nitidez de la imagen, el contraste y la existencia de ruido óptico. Estos factores, mostrados de manera esquemática en la Figura 1.2, ayudan a entender la importancia de un control adecuado del entorno de captura para asegurar la obtención de información visual de calidad.

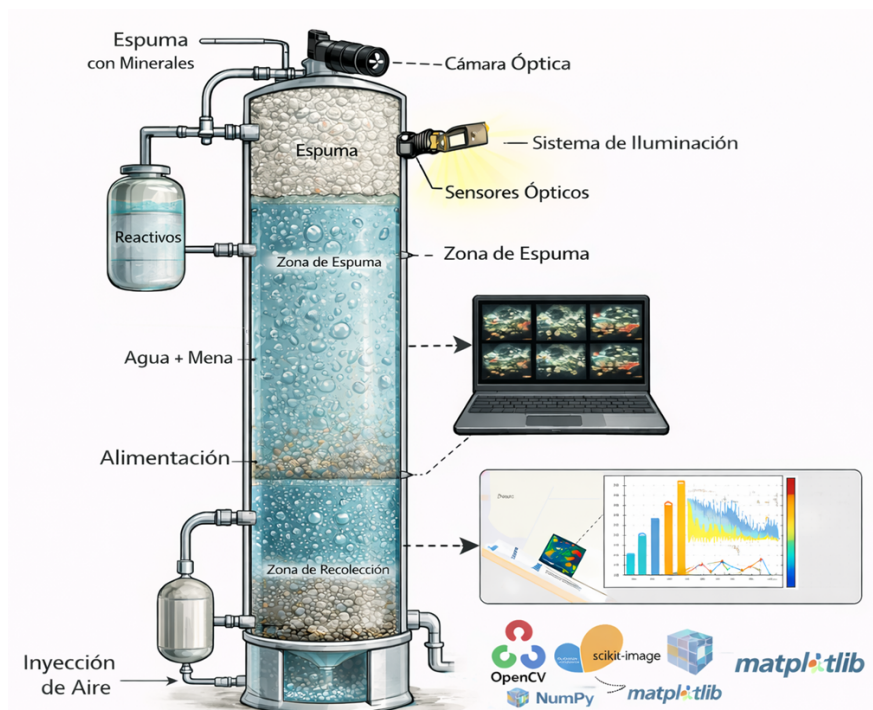


Figura 1.2: Esquema del sistema de flotación y observación óptica

A partir de este análisis se establecerán las características técnicas necesarias para la captura de imágenes, incluyendo criterios para elegir el sensor de imagen, la calibración del sistema de iluminación y la organización del entorno de registro. Así, se crea una

base conceptual para implementar el procesamiento digital de imágenes como técnica de monitoreo no invasivo de la espuma de flotación.

Adicionalmente, se realizará un examen de las técnicas de visión por computador utilizadas en la minería y, específicamente, en la evaluación de espumas. Esta revisión abarcará el análisis de técnicas de preprocesamiento, tales como el filtrado espacial, el aumento del contraste y la disminución del ruido, además de los métodos de segmentación utilizados para identificar burbujas. La eficacia de estas técnicas será analizada mediante una combinación de revisión bibliográfica y pruebas iniciales en entornos de desarrollo en Python, empleando bibliotecas como OpenCV, NumPy y Matplotlib, con el objetivo de identificar los métodos que presenten el mejor rendimiento y fiabilidad ante condiciones visuales cambiantes.

1.3.2. Diseño del sistema experimental de adquisición de imágenes

El segundo objetivo específico se llevará a cabo mediante la creación y puesta en marcha de un sistema experimental dedicado a la captura de imágenes en una columna de flotación piloto situada en un entorno de laboratorio. Esta columna servirá para producir espuma bajo condiciones controladas, mientras que se colocará una cámara digital de alta definición en el área donde se genera la espuma, asegurando un panorama adecuado para observar las burbujas. La configuración general del sistema de captura, junto con la disposición de la cámara, la iluminación y la superficie espumosa, se presentan en la Figura 1.3.

Se ejecutarán ensayos sistemáticos modificando el ángulo de la cámara, la distancia a la superficie de la espuma y la organización del sistema de iluminación, con el fin de minimizar reflejos y sombras, aumentar el contraste y optimizar la visibilidad de los contornos de las burbujas. Como se ilustra en la Figura 1.3, estos factores geométricos y ópticos pueden ser ajustados de forma autónoma mediante soportes ajustables y luces LED, permitiendo que el sistema de adquisición se adapte a varias condiciones de operación.

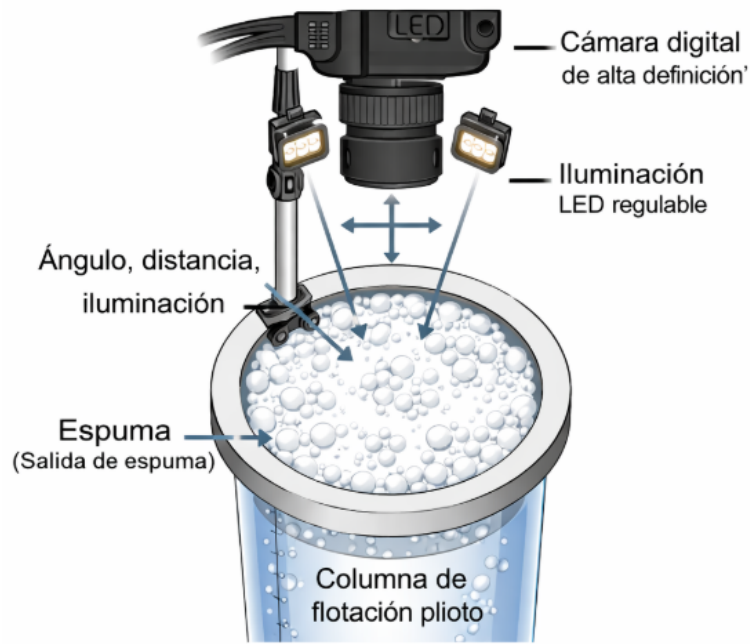


Figura 1.3: *Esquema del sistema experimental de adquisición de imágenes en la salida de espuma de la columna de flotación piloto.*

La grabación visual se realizará primordialmente en formato de video, del cual se seleccionarán fotogramas representativos para la siguiente fase de análisis. Esta estrategia facilita la captura continua de la dinámica de la espuma, asegurando que haya suficiente información visual disponible para las etapas de preprocesamiento y segmentación.

1.3.3. Preprocesamiento y segmentación de burbujas

El tercer objetivo específico se llevará a cabo a través de técnicas de procesamiento previo y segmentación aplicadas a las imágenes recolectadas de la zona de espuma. El proceso general de esta etapa, que va desde la captura de vídeos hasta la obtención de burbujas segmentadas y etiquetadas, se presenta en la Figura 1.4. Este esquema muestra cómo se pasa de la información visual inicial a representaciones adecuadas para el análisis computacional.

En primer lugar, se utilizarán filtros espaciales y técnicas para mejorar el contraste con el fin de aumentar la calidad de las imágenes, disminuir el ruido y acentuar los bordes de las burbujas. Algunas de las operaciones a considerar incluirán filtros de suavizado, refuerzo de bordes y ajustes de brillo y contraste que ayuden a diferenciar entre burbujas y el fondo, como se ilustra en la etapa intermedia de binarización presentada en la Figura 1.4.

Después de mejorar las imágenes, se aplicarán algoritmos de segmentación diseñados

para la detección y delimitación de las burbujas. Para esto, se explorarán métodos basados en umbrales y operaciones morfológicas, además de identificar contornos para reconocer burbujas individuales. La decisión sobre las técnicas a utilizar se basará en pruebas comparativas, evaluando criterios como la calidad de los contornos obtenidos, la capacidad de diferenciar burbujas cercanas y la consistencia ante variaciones en las condiciones de captura.

A lo largo de este proceso, se realizará una validación visual de los resultados, confrontando las imágenes segmentadas con los fotogramas originales para verificar la coincidencia entre los contornos detectados y las burbujas reales. Este procedimiento, ejemplificado en la Figura 1.4 mediante la superposición de etiquetas sobre las burbujas identificadas, permite asegurar la coherencia entre la información visual original y la producción del algoritmo.

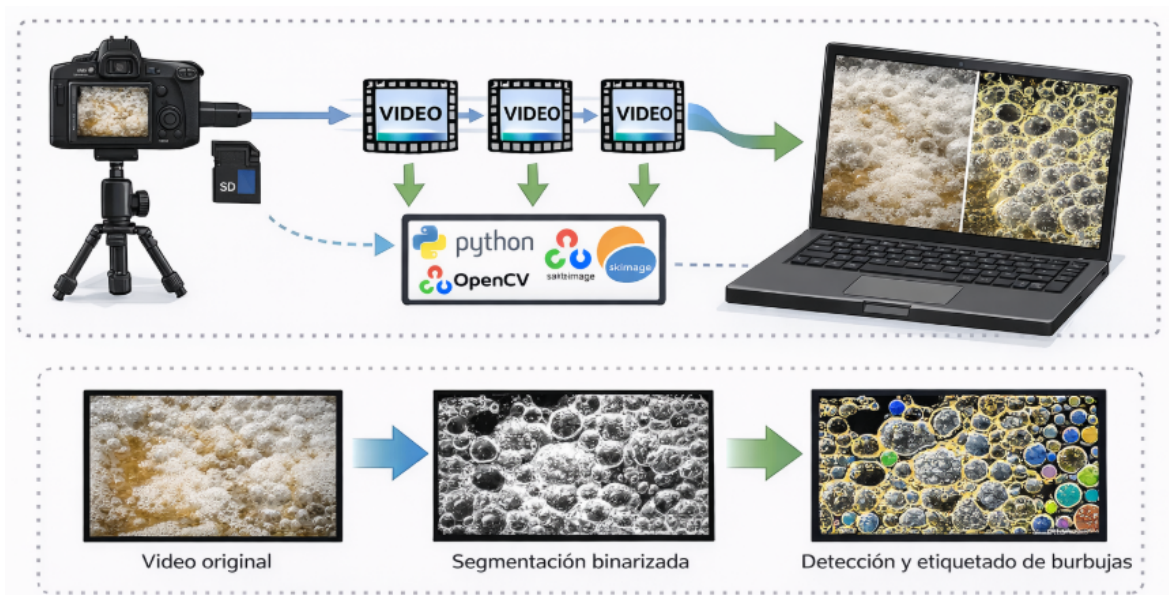


Figura 1.4: *Flujo general de preprocesamiento y segmentación de imágenes de espuma.*

1.3.4. Desarrollo de la interfaz gráfica y análisis de datos

El cuarto objetivo particular se enfocará en la creación de una interfaz gráfica que combine el proceso de captura, tratamiento y evaluación de burbujas, lo que permitirá la obtención automática de parámetros cuantitativos. Como se muestra en la Figura 1.5, la interfaz funciona como un espacio integrado donde se pueden visualizar y analizar simultáneamente los videos tomados en la columna de flotación y las imágenes que han sido segmentadas.

Gracias a los videos grabados y las imágenes analizadas, la interfaz facilitará la identificación de cada burbuja de manera individual y el cálculo de parámetros geomé-

tricos, como el área proyectada y un diámetro equivalente, considerando como primera aproximación una forma circular. Estos datos son esenciales para crear tablas y distribuciones del tamaño de las burbujas bajo diferentes condiciones experimentales, que se presentarán visualmente en la interfaz, como se indica en la Figura 1.5.

La interfaz incluirá funciones para generar gráficos analíticos. Según el diseño presentado en la Figura 1.5, los resultados que se obtengan podrán ser exportados en formatos comunes, como archivos CSV y gráficos en formato de imagen, lo que facilitará su uso en informes y análisis futuros.

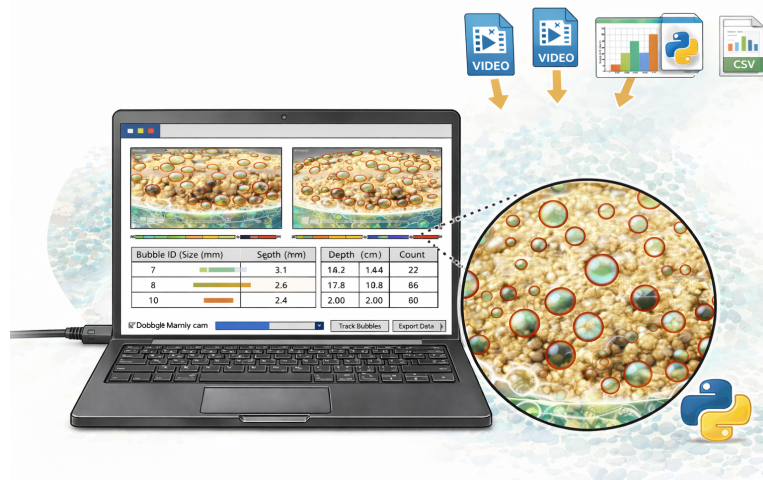


Figura 1.5: Esquema operativo de la interfaz gráfica creada para la observación, medición y exportación de datos relacionados con el tamaño de burbujas provenientes de vídeos de la región de espuma.

Estos análisis se adaptarán a las necesidades estipuladas por el laboratorio de la Universidad de Concepción, de forma que la herramienta desarrollada se pueda usar directamente para apoyar la evaluación del comportamiento de la columna de flotación.

1.4. Estructura del documento

El presente documento se divide en cuatro secciones principales, organizadas de manera coherente y progresiva. En cada una de ellas se aborda el contexto teórico del problema, la revisión del estado del arte, la implementación práctica de la metodología sugerida y las conclusiones resultantes del análisis realizado.

El **Capítulo 1** se dedica a la Introducción. En esta parte se expone el problema planteado, así como los objetivos generales y específicos, además de la metodología elegida. También se explican los conceptos que relacionan el proceso de flotación con el uso de técnicas de visión por computadora, estableciendo un marco que guía el diseño

del sistema experimental y el modelo de análisis que se ha implementado.

El **Capítulo 2** se centra en el Estado del Arte y el análisis de vigilancia tecnológica. En esta sección, se estudian los principios del proceso de flotación, cómo se comporta la espuma como indicador metalúrgico, y los avances en metodologías de procesamiento digital de imágenes enfocadas al análisis de burbujas. Además, se sitúa la propuesta en el contexto de las tendencias actuales de digitalización y monitoreo automático en el sector minero.

El **Capítulo 3** presenta los Resultados y la Discusión. Aquí se detalla la configuración experimental en la columna de flotación piloto, el sistema para la adquisición de imágenes, así como las fases de preprocesamiento, segmentación y detección de burbujas, junto con el fundamento matemático del modelo para la estimación volumétrica. También se discuten los resultados experimentales obtenidos bajo diferentes tasas de flujo (3 a 7 L/min), se compara el flujo nominal con el flujo estimado en la zona de espuma, y se evalúa la validez técnica del modelo implementado.

El **Capítulo 4** ofrece las Conclusiones y Recomendaciones. En esta parte se resumen las contribuciones más relevantes del estudio, se analiza el grado de cumplimiento de los objetivos definidos y se sugieren vías de mejora y posibles desarrollos futuros para optimizar la aplicación del sistema en contextos experimentales e industriales.

Capítulo 2

Estado del Arte y Análisis de Vigilancia Tecnológica

2.1. Panorama general del proceso de flotación y el rol de la espuma

La flotación de espumas constituye actualmente uno de los métodos de concentración de minerales más utilizados a nivel industrial, especialmente en la minería de cobre y otros metales no ferrosos [1]. Su principio se basa en aprovechar las diferencias de hidrofobicidad entre las partículas de mena y de ganga, promoviendo la adhesión selectiva de las partículas valiosas a burbujas de aire que ascienden en la celda y forman una fase de espuma en la superficie. En esta espuma se concentra gran parte del mineral recuperado, mientras que el relave se descarga por la zona inferior de la celda.

Diversos autores han destacado que el desempeño metalúrgico de una planta de flotación está fuertemente condicionado por las propiedades de la espuma: tamaño y distribución de burbujas, estabilidad, textura superficial, color y grado de carga sólida. Estos atributos están directamente relacionados con variables operacionales como el tipo y dosificación de reactivos, el flujo de aire, la geometría de las celdas, la granulometría de la pulpa y las condiciones hidrodinámicas. En consecuencia, la espuma se ha consolidado como una “ventana visual” del proceso, y su observación ha sido tradicionalmente una tarea clave del operador para tomar decisiones sobre la operación.

Un recurso ampliamente difundido para la comprensión de los fundamentos de la flotación es el material técnico desarrollado por 911Metallurgist, que describe de forma sistemática el funcionamiento del proceso, los tipos de reactivos (colectores, espumantes, modificadores de pH, activadores), así como las etapas de *rougher*, *cleaner* y *scavenger* y los diferentes tipos de máquinas (celdas mecánicas, columnas, celdas tipo

Jameson, entre otras) [2]. Este tipo de referencias pone de manifiesto que, aunque la flotación es una tecnología centenaria, su operación sigue siendo compleja, con gran cantidad de variables fuertemente acopladas que dificultan la construcción de modelos deterministas simples.

En este contexto, la espuma de flotación no solo importa como producto intermedio del proceso, sino también como fuente de información para estrategias modernas de monitoreo y control basadas en *machine vision* y análisis de imágenes. La vigilancia tecnológica en este campo muestra una tendencia clara hacia la integración de sistemas de cámaras, algoritmos de procesamiento digital de imágenes y plataformas de control avanzado para reducir la dependencia de la observación subjetiva del operador.

2.2. Evolución tecnológica y mercado de equipos de flotación

Desde la perspectiva de la gestión tecnológica y de negocios, la flotación ha sido estudiada no solo como proceso metalúrgico, sino también como segmento de mercado altamente competitivo. Núñez [3] realiza un diagnóstico y análisis estratégico del negocio de equipos de flotación, tomando como caso el mercado de Chile y Perú y considerando el posicionamiento de proveedores globales como Metso. El autor subraya que la tecnología de flotación ha alcanzado un alto grado de madurez en cuanto a diseño y comercialización de equipos, pero al mismo tiempo identifica que existe una cartera relevante de proyectos para la próxima década, lo que convierte a la región en un mercado estratégico.

En su trabajo, se destaca que la competencia entre proveedores ya no se limita únicamente a la venta de equipos físicos (celdas, columnas, bombas, instrumentación básica), sino que se orienta cada vez más hacia la oferta de soluciones integrales que combinan ingeniería, servicios de mantenimiento, monitoreo remoto y sistemas de control avanzado. En este escenario, los elementos diferenciales incluyen:

- Capacidad de integrar sensores y sistemas de adquisición de datos en línea.
- Desarrollo de algoritmos de optimización de proceso y diagnóstico temprano de fallas.
- Implementación de plataformas de supervisión que faciliten la toma de decisiones en tiempo real.

El análisis estratégico de Núñez concluye que, aun cuando los mercados de equipos de flotación puedan considerarse maduros en términos de hardware, existe un espacio

importante para innovaciones asociadas a digitalización, automatización y servicios basados en datos [3]. En particular, se resalta la necesidad de soluciones que permitan reducir la variabilidad operacional y mejorar la estabilidad del proceso, aspectos donde la información proveniente de la espuma y su caracterización mediante visión por computador se perfila como un activo de alto valor.

Para efectos de este trabajo de grado, este enfoque es especialmente relevante, ya que sitúa el desarrollo de herramientas de análisis de imágenes y de interfaces gráficas especializadas dentro de una tendencia más amplia de la industria: migrar desde un paradigma centrado en el equipo físico hacia uno orientado a la información, el control y la optimización continua del proceso.

2.3. Caracterización de espumas de flotación mediante análisis de imágenes

2.3.1. Herramientas texturales para la calificación de espuma

En el ámbito de la caracterización de espumas, Yantén [4] desarrolla una herramienta específica para evaluar la calidad de la espuma de flotación a partir de análisis textural de imágenes. El punto de partida de su trabajo es la constatación de que, en muchas plantas de flotación de cobre, la calificación de la espuma sigue dependiendo en gran medida de la observación visual del operador, quien debe examinar simultáneamente decenas o incluso cientos de celdas mediante sistemas de cámaras. Esta práctica, además de ser demandante, introduce una fuerte componente subjetiva y dificulta la estandarización de criterios de calidad.

El objetivo general de la memoria de Yantén es desarrollar una herramienta que permita caracterizar la espuma y clasificarla según su calidad a partir de parámetros cuantitativos extraídos de imágenes. Entre los objetivos específicos se incluyen: identificar las variables visuales que definen la calidad de la espuma (tamaño de burbujas, color, textura, estabilidad), generar una base de datos de imágenes representativas bajo diferentes condiciones operacionales y estudiar la relación entre la cinética de burbujas, la estabilidad dinámica de la espuma y el rendimiento metalúrgico [4].

Desde el punto de vista conceptual, el autor realiza una revisión detallada de los fundamentos de la flotación, describiendo las distintas zonas de la celda (zona de colección y zona de espuma), los tipos de celdas (convencionales y columnares) y los circuitos típicos *rougher-cleaner-scavenger*. Un aspecto relevante para este trabajo es que se reconoce explícitamente que la estructura y textura de la espuma varían según el tipo de celda y la etapa del circuito, por lo que cualquier herramienta de clasificación

debe considerar este contexto operativo.

En cuanto a la metodología, la herramienta propuesta se basa en la extracción de descriptores texturales a partir de imágenes de espuma capturadas en planta, los cuales se relacionan con categorías de calidad previamente definidas por expertos. Aunque los detalles específicos de los descriptores no se desarrollan aquí, el enfoque se alinea con técnicas clásicas de análisis de textura (por ejemplo, matrices de co-ocurrencia de niveles de gris, descriptores estadísticos y variográficos), aplicadas al dominio de la espuma de flotación. El resultado es una herramienta capaz de apoyar objetivamente la calificación de la espuma, reduciendo la dependencia de la percepción subjetiva del operador y generando indicadores cuantificables.

No obstante, la solución de Yantén se formula principalmente como una herramienta de caracterización y clasificación de calidad de espuma a nivel de planta, más orientada a la evaluación global que a la detección detallada de eventos locales específicos, como la ruptura de burbujas en una región de interés (ROI) definida por el usuario. Además, el enfoque se centra en texturas estáticas extraídas de imágenes individuales, mientras que el análisis dinámico de secuencias de video abre nuevas oportunidades de estudio que aún no están completamente exploradas.

2.3.2. Algoritmos de segmentación en Python para espumas de flotación

En el ámbito de algoritmos de procesamiento digital de imágenes, Zhang et al. proponen un método mejorado, implementado en Python, para el análisis de espuma de flotación, con énfasis en la segmentación precisa de burbujas [5]. Este trabajo se enmarca en la necesidad de medir con mayor exactitud el tamaño y la morfología de las burbujas, dado que estos parámetros influyen directamente en la eficiencia de recuperación de minerales en procesos industriales de flotación.

Los autores parten del problema de que las imágenes de espuma obtenidas en ambientes industriales suelen presentar iluminación no uniforme, sombras, ruido y variaciones de contraste que afectan la calidad de la segmentación. Para abordar este desafío, proponen el uso de un esquema de compensación de iluminación basado en el método Retinex adaptativo y multiescala, implementado en Python, cuyo objetivo es mejorar la uniformidad del brillo y realzar los detalles relevantes de la imagen [5]. Este preprocesamiento permite mitigar los efectos de iluminación desigual y aumentar la robustez del análisis posterior.

Posteriormente, el trabajo se centra en una versión mejorada del algoritmo de segmentación por *watershed* disponible en OpenCV. Mediante la combinación de técnicas de realce, selección de marcadores y ajustes en los criterios de separación de regiones,

Zhang et al. logran mejorar tanto la precisión de la segmentación como el tiempo de cómputo respecto al algoritmo estándar. Los resultados reportados indican un aumento de aproximadamente 3,3% en la precisión de segmentación y una reducción cercana al 9,9% en el tiempo de procesamiento en comparación con el *watershed* convencional, lo que evidencia el potencial de las optimizaciones propuestas para aplicaciones industriales en tiempo casi real [5].

Además de los resultados cuantitativos, el valor agregado de este trabajo radica en que la implementación se realiza en Python, utilizando bibliotecas de código abierto ampliamente difundidas (como OpenCV y otras librerías científicas), lo que facilita su adopción, modificación y extensión por parte de la comunidad académica e industrial. Desde la perspectiva de este trabajo de grado, este enfoque es especialmente atractivo, ya que demuestra que es posible construir cadenas de procesamiento de imágenes robustas y eficientes utilizando herramientas accesibles que pueden integrarse con interfaces gráficas y sistemas de adquisición de datos.

En síntesis, Zhang et al. representan un referente directo para el desarrollo de algoritmos de detección y análisis de burbujas en espumas de flotación, sobre todo en lo que respecta a estrategias de compensación de iluminación, segmentación robusta y evaluación cuantitativa del desempeño del algoritmo.

2.4. Síntesis crítica y vigilancia tecnológica

La revisión de los trabajos de Núñez [3], Yantén [4], Zhang et al. [5] y el material técnico de 911Metallurgist [2] permite trazar un panorama coherente del estado del arte y de la evolución tecnológica en torno a la flotación y al análisis de espumas:

- En el plano conceptual y operativo, la flotación se reconoce como una tecnología madura pero altamente compleja, donde la espuma actúa como indicador visual clave del desempeño del proceso.
- Desde la perspectiva del negocio, el mercado de equipos de flotación en regiones como Chile y Perú se considera estratégico y competitivo, con oportunidades de diferenciación centradas en servicios, digitalización y soluciones integrales de monitoreo y control [3].
- A nivel de instrumentación y análisis, se observa una transición progresiva desde la observación manual de la espuma hacia el uso de sistemas de visión por computador y herramientas de análisis de imágenes que buscan objetivar la evaluación de la calidad de la espuma y extraer parámetros cuantitativos relevantes [4].

- En el dominio de los algoritmos, los desarrollos recientes enfatizan la importancia de preprocesamiento avanzado (compensación de iluminación, filtrado y realce) y de técnicas de segmentación robustas para aumentar la precisión y eficiencia del análisis de burbujas, aprovechando el ecosistema de librerías científicas en Python [5].

Desde la óptica de la vigilancia tecnológica, estas evidencias muestran que:

1. Existe un interés sostenido en integrar *machine vision* al control de flotación, pero las soluciones suelen estar orientadas a contextos específicos (plantas industriales particulares, tipos de celdas o rangos de operación), lo que deja espacio para herramientas más flexibles y adaptables.
2. La mayoría de los trabajos se centran en medir tamaño, distribución y textura de burbujas en imágenes estáticas, mientras que el estudio detallado de fenómenos dinámicos, como la ruptura de burbujas dentro de regiones de interés definidas por el usuario, aún presenta un campo fértil para investigación y desarrollo.
3. Las soluciones basadas en Python y bibliotecas de código abierto representan una oportunidad para desarrollar plataformas experimentales y didácticas que permitan prototipar, validar y transferir nuevas metodologías hacia aplicaciones industriales, reduciendo barreras de entrada y facilitando la colaboración académica.

En este contexto, el presente trabajo de grado se posiciona en la intersección de estas tendencias. Por una parte, se apoya en los fundamentos del proceso de flotación y en la comprensión del mercado de equipos para justificar la relevancia de contar con sistemas de monitoreo visual. Por otra, toma como referencia las herramientas texturales y de clasificación de espuma desarrolladas por Yantén [4] y los algoritmos de segmentación mejorados propuestos por Zhang et al. [5] para plantear una solución centrada en:

- La adquisición de secuencias de video de espumas de flotación en condiciones controladas.
- El desarrollo de algoritmos en Python para el preprocesamiento, segmentación y análisis de burbujas, con énfasis en la detección de rupturas dentro de áreas de estudio personalizadas.
- La implementación de una interfaz gráfica que permita visualizar, ajustar parámetros y analizar resultados de manera intuitiva, apoyando tanto la experimentación como el aprendizaje de los principios de flotación y espuma.

De esta manera, el estado del arte revisado no solo contextualiza el problema, sino que orienta la propuesta metodológica y resalta el aporte específico del proyecto: avanzar hacia una herramienta integrada de adquisición y análisis de imágenes de espuma de flotación, basada en Python, que complemente las soluciones existentes y responda a necesidades concretas de investigación y formación en el área de procesamiento de minerales.

Capítulo 3

Resultados y Discusión

En este capítulo se detallan los hallazgos obtenidos a lo largo del desarrollo y aplicación de la metodología sugerida para el estudio de burbujas en la región de espuma de una columna de flotación. La presentación de los resultados está alineada de manera directa con los objetivos específicos del proyecto, de modo que cada apartado explica el resultado obtenido, los elementos utilizados para su validación y un análisis técnico de sus repercusiones en el proceso de flotación y en la solidez del sistema de visión por computadora creado.

Primero, se resumen los hallazgos más importantes que surgieron del análisis teórico del proceso de flotación y el establecimiento de criterios técnicos para la captura de imágenes en un entorno de laboratorio. En segundo lugar, se describe la configuración experimental llevada a cabo en la columna piloto, incluyendo detalles sobre el arreglo de la cámara, la iluminación y las condiciones de grabación utilizadas, respaldado por fotografías del montaje y ejemplos representativos de los videos grabados. En tercer lugar, se presentan los resultados del preprocesamiento y la segmentación de las burbujas, ilustrando el rendimiento del algoritmo ante cambios en la iluminación, la densidad de la espuma y las condiciones experimentales, así como los criterios elegidos para la selección de parámetros de procesamiento. Por último, se muestran los resultados de la interfaz gráfica desarrollada, destacando su operación en la visualización, cuantificación y exportación de métricas, además de su relevancia como herramienta auxiliar en el análisis experimental.

Así, el capítulo establece la conexión entre la propuesta metodológica y la evidencia experimental, integrando resultados tanto visuales como cuantitativos que avalan la viabilidad de la herramienta creada.

3.1. Fundamentos de flotación y criterios de adquisición

El primer objetivo específico fue examinar los principios básicos del proceso de flotación y su conexión con la estructura y comportamiento de la espuma, incorporando además los conceptos necesarios para su análisis mediante técnicas de visión por computador. A diferencia de los objetivos experimentales, el resultado principal de esta fase no se presenta como una medida directa en la columna piloto, sino como un conjunto de criterios técnicos y definiciones metodológicas que guiaron la creación del sistema de adquisición y el desarrollo del algoritmo para la segmentación y análisis.

Tras la revisión del proceso de flotación y el papel de la espuma como indicador operativo, se determinó que la zona de espuma representa una fuente de información visual importante para deducir estabilidad, la distribución del tamaño de burbujas y las variaciones superficiales relacionadas con las condiciones de operación y la dosificación de reactivos. En este contexto, se considera que la espuma actúa como una interfaz dinámica donde ocurren fenómenos de formación, fusión y ruptura de burbujas, lo cual respalda el uso de herramientas de observación no invasivas y el análisis de imágenes como base objetiva para la caracterización del sistema.

De manera complementaria, la revisión de estudios centrados en el análisis de espumas a través de visión por computadora permitió identificar dos aportes fundamentales para el futuro desarrollo: (i) las condiciones de luz y contraste son fundamentales para la eficacia de la segmentación, y (ii) la segmentación debe ajustarse a espumas con burbujas en contacto, la presencia de brillo especular y la variabilidad espacial en color y textura. En particular, se notó que las técnicas de preprocesamiento destinadas a estabilizar la iluminación y a enfatizar los bordes (por ejemplo, mejora del contraste y reducción de ruido) son habituales en aplicaciones de análisis de espuma, y que la selección del método de segmentación debe encontrar un equilibrio entre precisión y complejidad computacional para facilitar el análisis sistemático de secuencias de video.

Como resultado de esta fase, se establecieron criterios operativos y computacionales que guiaron la elaboración del dispositivo experimental (Objetivo 2) y el proceso de preprocesamiento y segmentación (Objetivo 3). La Figura 1.2 resume la lógica de conexión entre el fenómeno físico en la columna y la captura a través de un sistema óptico, marcando el vínculo entre la espuma observada y su posterior conversión en datos cuantitativos.

3.1.1. Criterios y especificaciones definidas

La tabla 3.1 sintetiza los criterios establecidos como resultados tangibles de esta fase. Estos aspectos se implementaron como guías técnicas para garantizar que los datos visuales capturados fueran coherentes y apropiados para el análisis computacional que se realizaría más adelante.

Cuadro 3.1: *Criterios técnicos definidos para el análisis visual de espuma y su procesamiento digital.*

Aspecto	Criterio definido (resultado)
Zona de interés (ROI)	Enfocar la parte superior relacionada con la generación de espuma, donde se notan burbujas típicas y eventos de ruptura, minimizando interferencias del borde de la columna.
Condiciones de iluminación	Evitar la luz lateral directa que produzca sombras marcadas; optar por una iluminación que se pueda regular y que sea uniforme para minimizar las variaciones en la intensidad y el brillo reflejado en el espacio.
Geometría de captura	Establecer un marco fijo y constante, asegurando una distancia y un ángulo uniformes para ayudar en la comparación de pruebas y minimizar variaciones visibles en la escala.
Calidad de imagen y contraste	Asegurar enfoque y nitidez suficientes para preservar bordes; dar prioridad al contraste entre burbujas y fondo usando modificaciones en la exposición y la luz para facilitar la identificación de los contornos.
Formato de adquisición	Utilizar el video como la principal fuente de datos para registrar el comportamiento de la espuma y permitir la obtención de imágenes representativas para su estudio.
Requerimientos de procesamiento	Implementar un proceso compatible con bibliotecas de código abierto (Python, OpenCV, NumPy y Matplotlib), priorizando técnicas que sean reproducibles y modificables a través de parámetros.

3.1.2. Discusión técnica

Los parámetros establecidos en esta fase facilitaron la organización del problema desde un enfoque de ingeniería electrónica: la espuma fue considerada como un sistema que se puede observar a través de sensores ópticos, cuya calidad informativa está in-

fluenciada por la disposición del entorno de captura (iluminación, encuadre, enfoque) y por la consistencia de las condiciones del experimento. Como resultado, esta fase creó un vínculo entre el fenómeno físico y las etapas computacionales siguientes, disminuyendo la necesidad de evaluaciones visuales subjetivas y permitiendo una metodología basada en datos.

3.2. Montaje experimental y adquisición de videos

3.2.1. Descripción del montaje en la columna piloto

La Figura 3.1 ilustra la columna de flotación piloto que se utilizó en el experimento de esta investigación, ubicada en el laboratorio de metalurgia. Este dispositivo constituye el sistema físico que permitió crear las condiciones controladas necesarias para la generación de espuma y la posterior recolección de registros visuales que se utilizarían para el análisis de burbujas.

La columna está diseñada con un cuerpo cilíndrico transparente, lo que facilita la observación directa del comportamiento del sistema a lo largo de toda su altura. Durante los experimentos, se utilizó únicamente agua dulce, a la cual se le añadieron reactivos típicos del proceso de flotación, como espumantes de metil isobutil carbinol (MIBC) y DF250. Estos reactivos se emplearon para favorecer la formación y estabilidad de la espuma, reproduciendo así condiciones representativas del proceso industrial sin la incorporación de mineral sólido.



Figura 3.1: *Columna de flotación piloto instalada en el laboratorio de Metalurgia, Universidad de Concepción, Chile.*

La creación de burbujas se llevó a cabo mediante un sistema que inyecta aire en la parte inferior de la columna, lo que permite ajustar tanto la presión como el flujo de aire proporcionado. El aire que se inyecta sube a través del agua, fomentando la aparición de burbujas que, al interactuar con los espumantes presentes, generan la zona de espuma en la parte superior de la columna. El control del flujo de aire fue una de las principales variables operativas del análisis, evaluándose diferentes modos de operación medidos en litros por minuto (L/min).

Antes de iniciar la operación de la columna, se prepararon el agua dulce y los reactivos de flotación en un tanque de mezcla auxiliar, desde donde la solución se dirigía al sistema. En la Figura 3.2 se presenta el tanque empleado para la preparación de la mezcla.



Figura 3.2: *Tanque utilizado para la mezcla de agua dulce y reactivos de flotación (MIBC y DF250) antes de la alimentación en la columna piloto.*

En la parte superior de la columna se encuentra la sección de mayor relevancia para esta investigación, que se relaciona con la salida de espuma. En esta zona se agrupan las burbujas que son características del proceso de flotación, por lo que es el lugar ideal para capturar imágenes. La espuma que se forma es recolectada por los lados a través de un sistema de descarga, y la superficie libre de esta espuma es la parte que se examina utilizando técnicas de procesamiento digital de imágenes.

La operación general de la columna y la regulación de sus variables operativas se llevan a cabo mediante un panel de control que se encuentra en un gabinete lateral. En la Figura 3.3 se observa dicho panel, el cual permite regular parámetros como el encendido del sistema, la alimentación eléctrica y el suministro de aire, garantizando condiciones de operación seguras y reproducibles durante los ensayos experimentales.

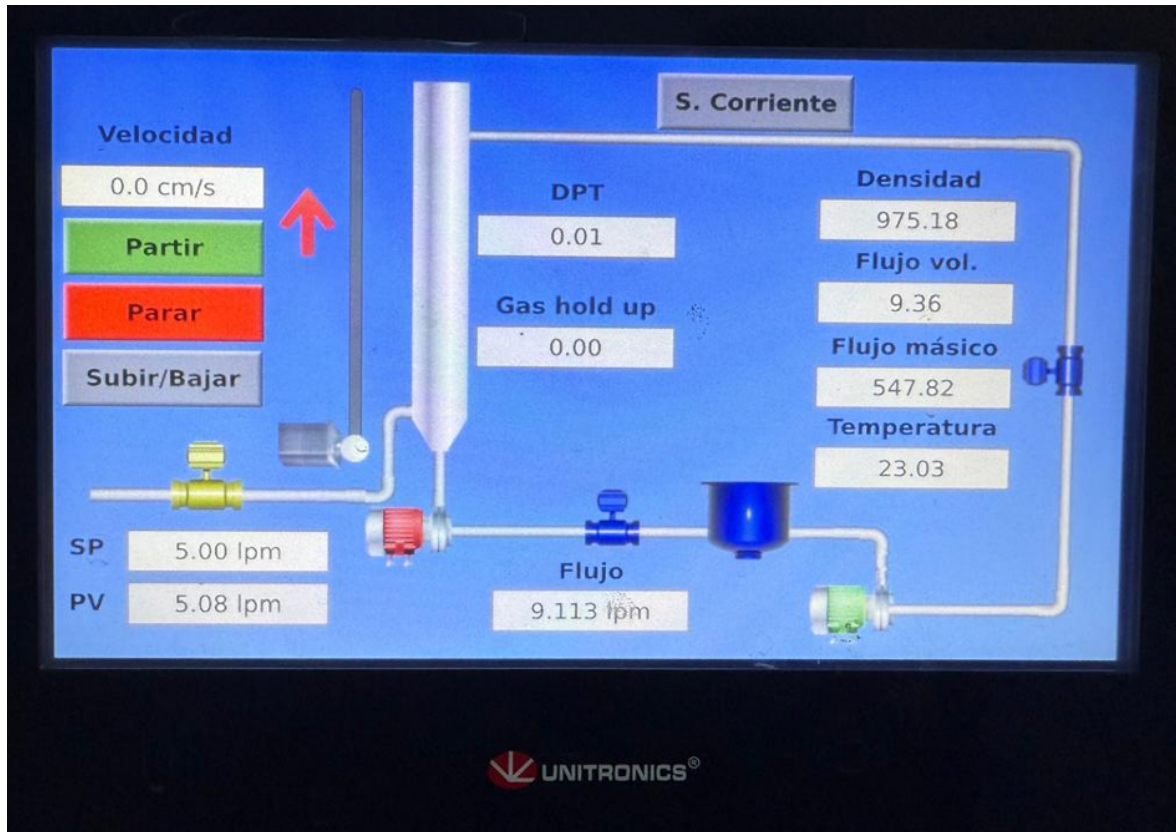


Figura 3.3: Panel de control de la columna de flotación piloto, utilizado para la operación y regulación de las condiciones experimentales durante los ensayos.

La disposición principal del experimento se creó con el fin de garantizar una operación estable, un control efectivo de las variables del proceso y la capacidad de repetir los ensayos, lo que facilita la recolección ordenada de videos en la área de espuma. Estas grabaciones visuales forman la base de la información utilizada después para el diseño y verificación del sistema de procesamiento digital de imágenes que se explicará en las próximas secciones.

3.2.2. Configuración de cámara e iluminación

La Figura 3.4 muestra la configuración experimental empleada para la adquisición de imágenes y videos de la zona de espuma durante los ensayos realizados en la columna de flotación piloto. El sistema de adquisición visual fue diseñado con el objetivo de garantizar estabilidad geométrica, adecuada resolución espacial y condiciones de iluminación controladas que permitieran una segmentación confiable de las burbujas.

Como puede observarse en la Figura 3.4a, se empleó una cámara digital Nikon D5100, montada sobre un soporte rígido que estaba conectado a la estructura de la columna. Esta configuración hizo posible establecer de manera firme el ángulo y la

distancia de toma en relación con la superficie de la espuma, minimizando alteraciones no deseadas entre pruebas sucesivas. La cámara se colocó de tal manera que apuntara directamente a la salida de espuma, asegurando que el campo visual abarcara la zona de interés señalada para el estudio de burbujas. En el dispositivo experimental, la cámara se situó a aproximadamente 46 cm del colchón de espuma, distancia que se mantuvo constante durante todas las pruebas para garantizar condiciones de captura consistentes.

Adicionalmente, la cámara estaba equipada con un lente macro de tipo Micro-Nikkor de la marca Nikon, que cuenta con tecnología Silent Wave Motor (SWM), elementos de baja dispersión (ED), un diseño de enfoque interno (IF) y un recubrimiento Nano Crystal Coat. Este objetivo permitió lograr un enfoque preciso en un área específica de la superficie de la espuma, lo que mejoró de manera notable la claridad y el contraste de los bordes de las burbujas que se observaron. Al usar un lente macro, se facilitó la captura de detalles finos en la estructura de la espuma, lo que ayudó a definir mejor las burbujas en las fases posteriores de segmentación y análisis.

En lo que respecta a la iluminación, se utilizaron dos paneles de luz LED situados a los lados y en un ángulo respecto al plano de la espuma, tal como se ilustra en la Figura 3.4b. Esta disposición permitió una iluminación bastante uniforme sobre la superficie de la espuma, minimizando la formación de sombras marcadas y reflejos brillantes que pudieran afectar la calidad de las imágenes obtenidas. La intensidad y la dirección de los paneles fueron ajustadas a través de experimentos hasta lograr un balance adecuado entre luminosidad, contraste y visibilidad de los bordes de las burbujas.



(a) *Cámara digital Nikon D5100.*



(b) *Sistema de iluminación LED.*

Figura 3.4: *Configuración experimental del sistema de adquisición visual, mostrando la disposición de la cámara Nikon D5100 y del sistema de iluminación utilizados durante los ensayos en la columna de flotación piloto.*

La unión de una cámara digital fija, un lente con enfoque ajustable y un sistema de iluminación LED regulable facilitó la obtención de imágenes visuales consistentes durante las pruebas experimentales. Como resultado, se generaron secuencias de video con condiciones de captura que podían reproducirse, las cuales eran idóneas para la extracción de fotogramas representativos y su posterior tratamiento mediante los algoritmos de preprocesamiento, segmentación y análisis que se describen en las secciones siguientes.

3.2.3. Ejemplos de registros obtenidos y criterios de selección de fotogramas

La Figura 3.5 muestra un ejemplo representativo de las imágenes capturadas directamente con la cámara Nikon D5100 durante el funcionamiento de la columna de flotación en escala piloto. La fotografía representa una vista desde arriba de la zona de espuma, donde se puede apreciar cómo están distribuidas las burbujas en la superficie, así como la forma circular de la sección donde la espuma sale.



Figura 3.5: Vista superior de la zona de espuma obtenida directamente desde la cámara Nikon D5100.

Este tipo de imagen sirve como base para el análisis posterior, ya que permite observar directamente las propiedades visuales de la espuma en condiciones operativas reales. En la fotografía se puede notar una variedad en la estructura de las burbujas, con diferencias en tamaños, densidades y contrastes, además de la existencia de bordes claros entre burbujas vecinas. También se aprecian áreas con acumulación de líquido y otras donde hay una mayor cantidad de burbujas pequeñas, aspectos que afectan de manera directa la complejidad del proceso de segmentación.

Dado que los registros visuales se capturaron en formato de video continuo, fue necesario establecer un criterio sistemático para el análisis de los fotogramas, de modo que se garantizara la coherencia y representatividad de la información procesada. En este trabajo, cada video fue analizado de manera automática durante un intervalo temporal fijo de 30 segundos, sin realizar una selección manual previa de imágenes.

El procedimiento de análisis considera la extracción secuencial de fotogramas a partir del video original, sobre las cuales se realizan pasos de preprocesamiento y filtrado para eliminar datos visuales irrelevantes. En este marco, los parámetros utilizados por el sistema para garantizar la calidad de las imágenes analizadas abarcan:

- Captura estable de la superficie de la espuma, minimizando el efecto de desenfoque asociado a movimientos transitorios.
- Condiciones de iluminación relativamente uniformes, evitando regiones saturadas o con sombras pronunciadas.

- Presencia de burbujas con contornos discernibles, que permitan una detección y segmentación confiables.
- Ausencia de interferencias externas significativas, tales como salpicaduras abruptas o perturbaciones momentáneas en la espuma.

Los cuadros que se ajustan a estos requisitos son gestionados de forma automática por el algoritmo, mientras que los que no cumplen con los estándares de calidad son eliminados en las fases tempranas de evaluación. Esta estrategia posibilita el uso de cualquier grabación obtenida bajo las circunstancias experimentales establecidas, asegurando que los resultados reflejen de manera fiel el comportamiento verdadero de la espuma durante el período de análisis indicado.

3.3. Preprocesamiento, segmentación y detección de burbujas

El siguiente apartado presenta los hallazgos obtenidos mediante la implementación de métodos de preprocesamiento, segmentación y detección de burbujas en las grabaciones visuales recopiladas en la zona de espuma de la columna de flotación. Estos hallazgos se basan en el uso de algoritmos creados en Python, que han sido ajustados específicamente para diversas condiciones operativas asociadas a flujos de aire de 3, 4, 5, 6 y 7 L/min. Para cada una de estas condiciones, se utilizó una versión del código con parámetros calibrados, manteniendo una estructura algorítmica común que asegura que los resultados sean comparables.

La Figura 3.6 ilustra la interfaz gráfica del sistema al comienzo del procesamiento, donde se muestran simultáneamente el fotograma original, la región de interés (ROI), la imagen segmentada y los indicadores cuantitativos calculados en tiempo real. Esta visualización integral permite comprobar el funcionamiento coordinado de las diferentes etapas del algoritmo y sirve como base para el análisis detallado que se presenta en las subsecciones siguientes.

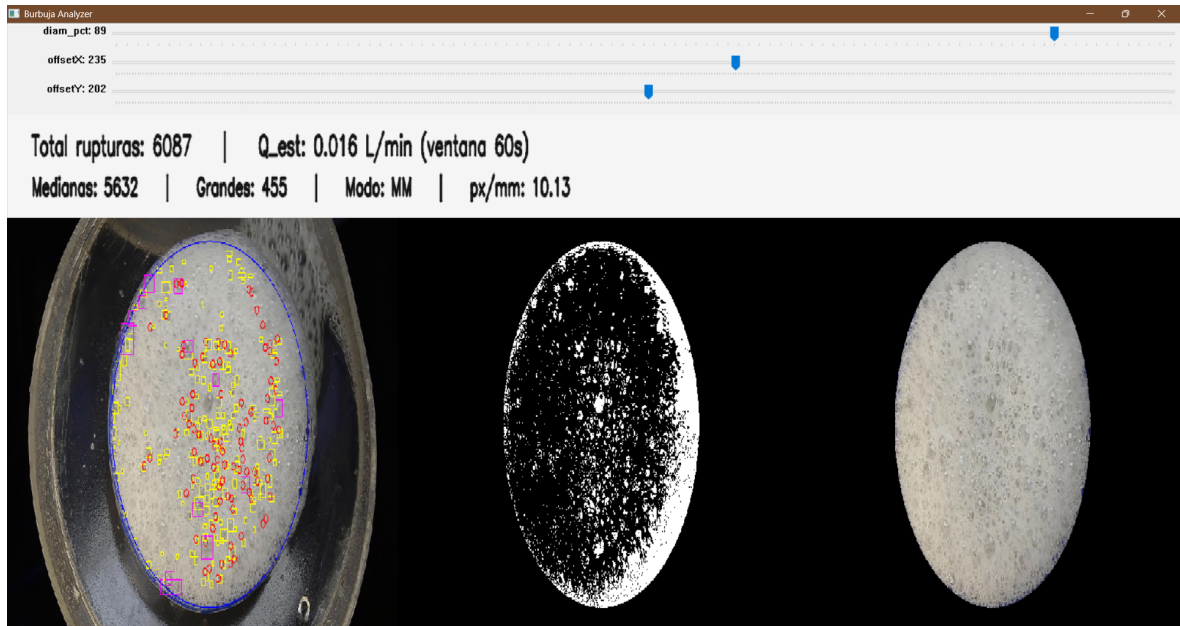


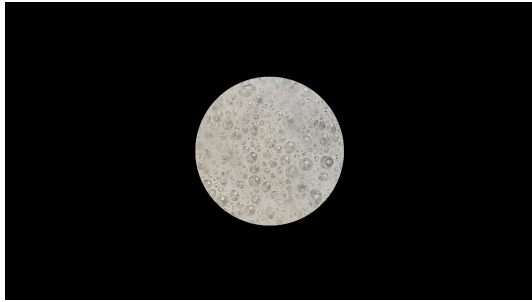
Figura 3.6: *Interfaz gráfica del sistema de análisis de burbujas.*

3.3.1. Preprocesamiento: mejora de contraste y reducción de ruido

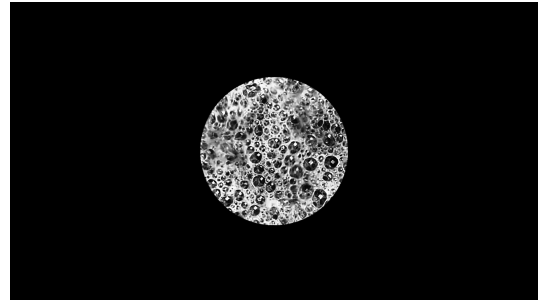
La etapa de preprocesamiento tiene como objetivo principal mejorar la calidad de los fotogramas extraídos de los videos originales, con el fin de facilitar la segmentación posterior de las burbujas. En esta fase se aplicaron operaciones de filtrado espacial y ajustes de contraste orientados a reducir el ruido visual, mitigar variaciones de iluminación y resaltar los bordes de las burbujas presentes en la espuma.

En la Figura 3.7 se muestra un ejemplo representativo del proceso de preprocesamiento aplicado a un cuadro típico de la zona de espuma. La subfigura 3.7a representa la imagen original tomada por la cámara digital, donde se observan las variaciones de luz y la textura compleja de la espuma. A continuación, la subfigura 3.7b ilustra el efecto de mejora en el contraste y la reducción del ruido, resultando en una imagen más uniforme y con una mejor definición de los contornos de las burbujas. Finalmente, la subfigura 3.7c muestra la imagen en blanco y negro que se utiliza como insumo para la fase de segmentación [6].

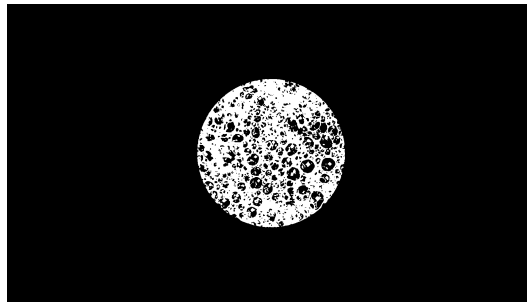
Este procedimiento permitió generar representaciones visuales más adecuadas para el análisis computacional, minimizando la influencia de reflejos, variaciones en la iluminación y estructuras no deseadas, y ofreciendo una base sólida para la identificación y segmentación de burbujas en las fases siguientes.



(a) *Imagen original capturada en la salida de espuma.*



(b) *Imagen preprocesada con mejora de contraste y reducción de ruido.*



(c) *Resultado de la binarización empleada para la segmentación de burbujas.*

Figura 3.7: *Flujo de preprocesamiento aplicado a un fotograma representativo de la espuma, mostrando la transición desde la imagen original hasta la imagen binaria utilizada para la detección y segmentación de burbujas.*

3.3.2. Segmentación: umbralización y detección de contornos

Una vez completada la fase de preprocesamiento, se inició la segmentación de las burbujas visibles en la superficie de la espuma a través de un método que utiliza *umbralización por rango* [7] y detección de contornos. El propósito fundamental de esta fase es convertir la imagen original en una forma binaria que posibilite reconocer de manera efectiva las áreas relacionadas con las burbujas y, posteriormente, obtener parámetros geométricos cuantitativos para su estudio.

Restricción espacial mediante región de interés (ROI)

El procesamiento se realiza únicamente dentro de un área circular de interés (ROI), que es definida de manera manual por el usuario en la imagen. Esta limitación espacial es crucial porque:

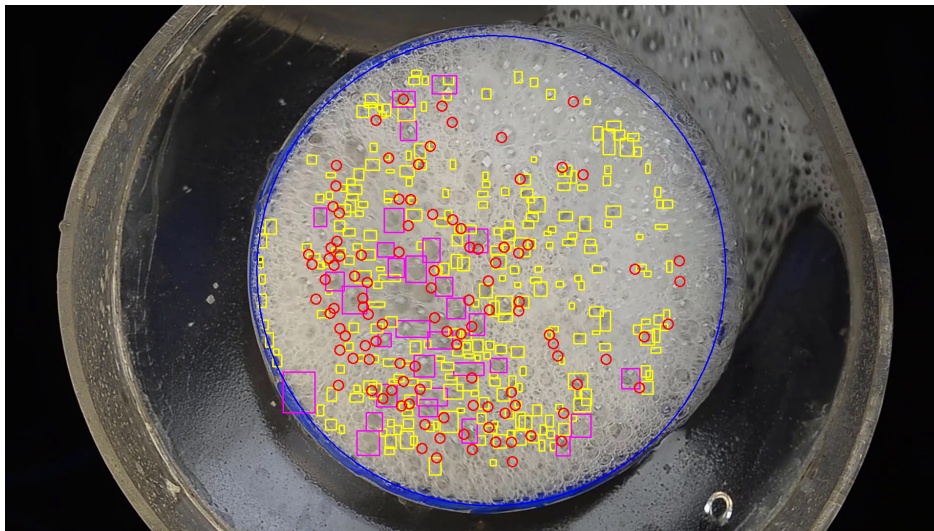
- Enfoca el análisis en la región efectiva donde sale la espuma.
- Minimiza la influencia de elementos externos al procedimiento (bordes, soportes o fondo).

- Reduce la aparición de falsos positivos y optimiza la eficiencia del procesamiento.

La Figura 3.8 presenta un ejemplo representativo del proceso, mostrando el fotograma original limitado a la ROI y el resultado final con las burbujas detectadas y marcadas a través de contornos.



(a) *Fotograma original de la espuma dentro de la región de interés (ROI).*



(b) *Resultado de la segmentación y detección de contornos con clasificación geométrica de burbujas.*

Figura 3.8: *Ejemplo del proceso de segmentación y detección de burbujas.*

Ajuste de intensidad previo a la binarización

Sea $I(x, y)$ la representación en escala de grises del fotograma. Antes de llevar a cabo la segmentación binaria, el procedimiento aplica un ajuste lineal de brillo y contraste para regular la intensidad de la zona de espuma ante cambios en la iluminación. Esta regulación puede representarse de la siguiente manera:

$$I'(x, y) = \text{sat}(\alpha I(x, y) + \beta), \quad (3.1)$$

donde α regula el contraste, β modifica el brillo general y la función $\text{sat}(\cdot)$ representa la saturación dentro del intervalo permitido de intensidades $[0, 255]$. Esta etapa optimiza la separabilidad entre burbujas y el fondo, facilitando una segmentación más estable.

Umbralización por rango de intensidades

La segmentación inicial se lleva a cabo utilizando un método de umbralización por rango, que se determina a través de un límite inferior $T_{\text{mín}}$ y un límite superior $T_{\text{máx}}$. A diferencia del método de umbralización convencional, este procedimiento permite mantener únicamente aquellos píxeles cuyo nivel de brillo queda dentro de un rango determinado, eliminando tanto las áreas oscuras como las zonas muy luminosas que se relacionan con reflejos.

La máscara binaria obtenida $B(x, y)$ se define como:

$$B(x, y) = \begin{cases} 1, & T_{\text{mín}} \leq I'(x, y) \leq T_{\text{máx}}, \\ 0, & \text{en otro caso.} \end{cases} \quad (3.2)$$

Desde una perspectiva práctica, $T_{\text{mín}}$ impide que el ruido de fondo o lo oscuro se confundan con burbujas, en tanto que $T_{\text{máx}}$ ayuda a descartar áreas saturadas que podrían ocasionar lecturas incorrectas.

Aplicación estricta de la región de interés

Con el propósito de asegurar que el análisis se concentre únicamente en la zona designada, la máscara binaria se une a la máscara circular de la ROI. Esta máscara $M(x, y)$ se establece como:

$$M(x, y) = \begin{cases} 1, & (x - c_x)^2 + (y - c_y)^2 \leq r^2, \\ 0, & \text{en otro caso,} \end{cases} \quad (3.3)$$

donde (c_x, c_y) representa el centro de la ROI y r es su radio. La máscara definitiva empleada para la detección se genera como:

$$B_{\text{ROI}}(x, y) = B(x, y) \cdot M(x, y). \quad (3.4)$$

Detección de contornos y cálculo de área

Sobre la imagen binaria restringida a la ROI se realiza la detección de contornos externos [8]. Cada contorno identificado representa un candidato a burbuja. Para cada contorno k , se calcula su área proyectada A_k en píxeles cuadrados:

$$A_k = \text{area}(\text{contorno}_k) \quad [\text{px}^2]. \quad (3.5)$$

Posteriormente, se utilizan filtros geométricos básicos para eliminar elementos que son muy pequeños o demasiado grandes, los cuales suelen estar relacionados con ruido, trozos de espuma o brillos.

Diámetro equivalente y conversión a unidades físicas

Dado que las burbujas no tienen una forma completamente redonda, se utiliza un método común en visión por computadora: representar cada burbuja con un círculo que tenga la misma área. Basándose en esta equivalencia, se determina el diámetro equivalente en píxeles de la siguiente manera:

$$D_{eq,px} = \sqrt{\frac{4A_k}{\pi}}, \quad (3.6)$$

donde A_k corresponde al área del contorno en píxeles cuadrados. Esta fórmula proviene de la relación geométrica que define el área de un círculo.

Para transformar este número a unidades físicas, se aplica un factor de escala píxel-milímetro S , que se establece experimentalmente a partir de una medida real conocida en el área de observación:

$$S = \frac{2r}{D_{ROI,mm}} \quad [\text{px}/\text{mm}], \quad (3.7)$$

donde $D_{ROI,mm}$ es el diámetro real asociado a la región circular observada. Finalmente, el diámetro equivalente en milímetros se obtiene como:

$$D_{eq,mm} = \frac{D_{eq,px}}{S}. \quad (3.8)$$

Clasificación por tamaño

Una vez que se ha establecido el diámetro equivalente en medidas físicas, las burbujas se agrupan en clases operativas de acuerdo a su tamaño (por ejemplo, burbujas grandes y medianas). Esta clasificación se utiliza más adelante para el análisis estadístico, el registro diferenciado de eventos y la comparación entre diversas condiciones operativas.

Resultado dentro del flujo del algoritmo

Como resultado de esta etapa, cada burbuja detectada queda caracterizada por un conjunto de parámetros geométricos cuantitativos, una categoría de tamaño y una representación visual superpuesta sobre el fotograma original. Esta información constituye la base para las métricas posteriores del sistema, tales como el análisis comparativo por condición de operación y las estimaciones volumétricas desarrolladas en secciones posteriores.

3.3.3. Validación visual y criterios de filtrado geométrico

Con el propósito de asegurar la fiabilidad de los resultados logrados en la fase de segmentación, se llevó a cabo una validación visual detallada del rendimiento del algoritmo. Esta técnica se basó en la superposición directa de los contornos identificados y de las marcas geométricas ligadas a cada burbuja sobre las imágenes originales de la espuma. Así, se pudo comprobar cualitativamente la relación entre las burbujas reales presentes en la fotografía y las que fueron detectadas automáticamente por el sistema.

La validación visual desempeña un papel crucial en la metodología, ya que ayuda a identificar errores potenciales en la segmentación que puedan surgir en situaciones reales, como cambios en la iluminación, reflejos en la superficie, superposición de burbujas o la presencia de formas irregulares en la espuma. Específicamente, la visualización conjunta de la imagen original y del resultado segmentado facilita el reconocimiento de falsos positivos y falsos negativos, ofreciendo retroalimentación inmediata para ajustar los parámetros del algoritmo.

Adicionalmente, se llevaron a cabo criterios de filtrado geométrico con el fin de eliminar detecciones erróneas que no correspondieran a burbujas físicamente válidas. Estos criterios se fundamentaron principalmente en los siguientes parámetros:

- **Área mínima y máxima:** se definieron límites inferiores y superiores para la superficie proyectada de los contornos identificados. Las formas con áreas muy reducidas a menudo corresponden a ruido o imperfecciones en la superficie de la espuma, mientras que las áreas muy grandes pueden estar ligadas a reflejos, acumulaciones de burbujas o zonas saturadas.
- **Circularidad:** dado que una burbuja tiene una proyección que se asemeja a un círculo, se analizó la proporción entre el área del contorno y su perímetro como un criterio de forma. Se eliminaron aquellos elementos con formas muy irregulares.
- **Ubicación dentro de la ROI:** únicamente se tomaron en cuenta las burbujas que se encontraban completamente dentro de la zona circular de interés que

definió el usuario. Esta condición evita contabilizar detecciones parciales en los bordes de la imagen o burbujas que entran o salen del campo visual.

La implementación conjunta de estos filtros geométricos contribuyó a reducir de manera considerable la cantidad de falsos positivos y a estabilizar el conteo de burbujas durante la edición continua de los videos. Como consecuencia, el sistema mostró un rendimiento sólido frente a perturbaciones visuales, asegurando una detección consistente a lo largo del tiempo y haciendo más fácil la interpretación posterior de los resultados.

3.3.4. Discusión de desempeño bajo condiciones variables

El rendimiento del algoritmo para la identificación y el análisis de burbujas fue analizado bajo diferentes condiciones operativas, abarcando flujos de aire que van de 3 a 7 L/min. Estos cambios en el flujo influyen de manera significativa en la dinámica del lecho de espuma, lo que se traduce principalmente en un aumento en la densidad de burbujas, una mayor frecuencia de rupturas y un panorama visual que se vuelve cada vez más complejo.

A medida que el flujo de aire aumenta, se nota un número creciente de burbujas que emergen de manera simultánea en la superficie de la espuma, lo que provoca superposiciones, deformaciones y rápidas alteraciones en la forma de las burbujas. Estas situaciones representan un desafío mayor para los algoritmos de segmentación, ya que elevan la probabilidad de errores en las detecciones o de pérdidas temporales de objetos.

A pesar del incremento en la complejidad visual, el sistema desarrollado logró operar de manera estable, gracias a la interacción de tres componentes esenciales: (i) la limitación espacial a través de la región de interés (ROI), (ii) el preprocesamiento adaptable de la imagen y (iii) el filtrado geométrico de las detecciones. Estas estrategias en conjunto permitieron que el algoritmo se ajustara a cambios considerables en las condiciones operativas sin sacrificar la coherencia de los resultados.

Un hallazgo cuantitativo importante que surge de esta fase es la estimación de un flujo de aire equivalente relacionado con la ruptura de burbujas en la superficie de la espuma. Este valor se determina a partir de la suma del volumen equivalente de las burbujas identificadas en un intervalo de tiempo constante, según la fórmula:

$$Q_{est} = \frac{1}{\Delta t} \sum_{i=1}^N V_i \quad (3.9)$$

donde V_i representa el volumen equivalente de la i -ésima burbuja detectada dentro del intervalo de tiempo Δt , y N corresponde al número total de eventos registrados en

dicha ventana.

El volumen equivalente de cada burbuja se obtiene a partir de su diámetro equivalente D_{eq} , asumiendo una geometría esférica como primera aproximación:

$$V_i = \frac{\pi}{6} D_{eq}^3 \quad (3.10)$$

El flujo estimado se calcula a partir del volumen total de aire expulsado durante la ventana temporal de análisis (T), según la expresión:

$$Q = \frac{V_{total}}{T} \quad (3.11)$$

donde Q corresponde al flujo estimado en L/min , V_{total} es el volumen acumulado de aire expulsado y T es el tiempo efectivo de análisis.

3.3.5. Relación entre el flujo de aire ingresado y el flujo estimado en espuma

Desde la perspectiva de la metalurgia, la eficacia de una columna de flotación no se determina solamente por la cantidad total de aire inyectado, sino también por la proporción de ese aire que realmente se libera en la zona de la espuma. En condiciones operativas óptimas y estables, se prevé que solo una pequeña parte del aire inyectado ayude a formar y romper burbujas en la superficie, mientras que la mayor parte desempeña su rol en la zona de recolección sin ocasionar un exceso de arrastre ni provocar inestabilidad en la espuma.

Diversos criterios operacionales utilizados en la práctica metalúrgica para la evaluación del desempeño de columnas de flotación establecen que, en columnas que funcionan adecuadamente, el aire que se libera en la espuma suele estar alrededor del **5 % del flujo de aire total ingresado**. Este porcentaje no es un límite rígido, sino una referencia práctica comúnmente utilizada para valorar la estabilidad hidrodinámica de la columna y la eficacia del proceso: porcentajes bajos suelen estar vinculados a una espuma más estable y a un mejor rendimiento metalúrgico, mientras que aumentos importantes en esta proporción pueden señalar que el proceso es menos eficiente.

En el estudio actual, el flujo de aire estimado Q se determina mediante la observación visual de los eventos de ruptura de burbujas en la superficie de la espuma, sumando el volumen correspondiente de dichas burbujas en intervalos temporales fijados. Al comparar los datos de Q con el flujo de aire nominal que se inyecta en la columna, se puede notar que en condiciones operativas que van de 3 a 6 L/min el sistema implementado reconoce valores cercanos al 5 por ciento del flujo total. Por ejemplo, cuando el flujo está en 3 L/min, el valor estimado es de aproximadamente 0.15 L/min,

lo que coincide con las expectativas metalúrgicas para una operación estable.

Este comportamiento constante sugiere que la técnica que emplea el procesamiento digital de imágenes no solo logra identificar y cuantificar los eventos de ruptura de burbujas, sino que también muestra tendencias que son consistentes con principios metalúrgicos establecidos. Por lo tanto, el flujo estimado Q puede verse como un indicador visual cuantitativo del estado de operación de la columna, en lugar de ser una medición directa del caudal de aire.

En contraste, cuando se opera a 7 L/min, el porcentaje del flujo estimado en relación al flujo ingresado muestra un cambio considerable y se aleja del valor de referencia del 5 por ciento. Este resultado se alinea con la observación de una espuma muy densa y activa, caracterizada por un alto grado de superposición de burbujas y una frecuencia mayor de rupturas, lo que complica tanto la segmentación individual como la estabilidad del proceso. Así, la desviación observada bajo estas condiciones no se debe únicamente a limitaciones del algoritmo, sino que refleja un cambio real en el régimen hidrodinámico de la columna.

En general, estos hallazgos apoyan la efectividad del método sugerido, al demostrar que el análisis visual realizado reacciona a variaciones en las condiciones de operación y se alinea con los estándares metalúrgicos tradicionales, facilitando la detección de intervalos de operación en los que el funcionamiento de la columna es más favorable en términos de la estabilidad de la espuma.

3.4. Fundamento matemático del modelo de estimación volumétrica

En esta sección se presentan las bases geométricas y físicas de las expresiones matemáticas empleadas en el análisis de burbujas desarrollado a lo largo del presente trabajo. El objetivo de este apartado es justificar formalmente el uso de dichas expresiones, mostrando su origen y validez dentro del contexto del procesamiento digital de imágenes y del análisis experimental de espumas de flotación.

Las fórmulas aquí descritas no corresponden a modelos empíricos específicos propuestos por un único autor, sino que se derivan directamente de principios geométricos clásicos y definiciones físicas fundamentales ampliamente aceptadas en la literatura científica.

3.4.1. Diámetro equivalente a partir del área proyectada

Durante el proceso de segmentación, cada burbuja detectada se representa mediante un contorno cerrado cuya área proyectada A se calcula en unidades de píxeles. Dado que la proyección bidimensional de una burbuja real no es perfectamente circular, se adopta una aproximación estándar en análisis de imágenes: representar el objeto mediante un círculo de igual área, definido como *diámetro equivalente*.

El área de un círculo [9] de radio r está dada por:

$$A = \pi r^2 \quad (3.12)$$

Despejando el radio:

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (3.13)$$

Dado que el diámetro del círculo es $D = 2r$, el diámetro equivalente se expresa como:

$$D_{eq} = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (3.14)$$

Esta definición es ampliamente utilizada en análisis de partículas, gotas y burbujas, ya que permite caracterizar objetos irregulares mediante un único parámetro escalar de tamaño, facilitando comparaciones y análisis estadísticos.

3.4.2. Conversión de unidades píxel–milímetro

Las imágenes digitales capturadas por la cámara están discretizadas en píxeles, por lo que las dimensiones geométricas obtenidas inicialmente se expresan en esta unidad. Para convertir dichas magnitudes a unidades físicas reales (milímetros), es necesario realizar una calibración geométrica del sistema de adquisición.

Si una longitud real conocida L_{mm} corresponde en la imagen a una longitud L_{px} , se define el factor de escala como:

$$S = \frac{L_{px}}{L_{mm}} \quad [\text{px/mm}] \quad (3.15)$$

De esta manera, cualquier longitud medida en píxeles puede transformarse a milímetros mediante:

$$L_{mm} = \frac{L_{px}}{S} \quad (3.16)$$

En el presente trabajo, esta calibración se realizó utilizando dimensiones conocidas del área observada en la salida de la columna de flotación, asumiendo una geometría fija y una distancia cámara–espuma constante durante los experimentos.

3.4.3. Estimación del volumen de una burbuja

Para estimar el volumen asociado a cada burbuja detectada, se adopta una aproximación geométrica basada en una burbuja esférica. Aunque las burbujas reales presentan deformaciones, esta hipótesis es comúnmente empleada como primera aproximación cuando solo se dispone de información bidimensional.

El volumen de una esfera [10] de radio r está dado por:

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 \quad (3.17)$$

Expresando el radio en función del diámetro $D = 2r$:

$$V = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{D}{2}\right)^3 = \frac{\pi}{6}D^3 \quad (3.18)$$

En el contexto del presente trabajo, el diámetro D corresponde al diámetro equivalente expresado en milímetros, lo que permite obtener el volumen en unidades de mm^3 . Esta aproximación resulta adecuada para análisis comparativos entre diferentes condiciones de operación, aun cuando no se pretende una medición volumétrica absoluta.

3.4.4. Definición del caudal volumétrico estimado

El caudal volumétrico se define físicamente como la cantidad de volumen que atraviesa una sección por unidad de tiempo:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (3.19)$$

En este trabajo, el flujo de aire no se mide directamente mediante un sensor, sino que se estima a partir de eventos discretos observados visualmente: las rupturas de burbujas en la superficie de la espuma. Cada evento se asocia a un volumen equivalente V_i , calculado según la expresión anterior.

Considerando una ventana temporal de duración Δt en la cual se detectan N eventos, el caudal volumétrico estimado se define como:

$$Q_{est} = \frac{1}{\Delta t} \sum_{i=1}^N V_i \quad (3.20)$$

Esta expresión corresponde a un balance volumétrico discreto, donde el volumen total acumulado durante la ventana de observación se divide por el tiempo considerado.

El valor obtenido representa un *indicador equivalente* del comportamiento del sistema, útil para realizar comparaciones relativas entre distintos caudales de operación y condiciones experimentales.

3.4.5. Alcance y limitaciones de las aproximaciones empleadas

Es importante resaltar que las expresiones utilizadas se basan en aproximaciones geométricas y suposiciones simplificadas, tales como la circularidad proyectada de las burbujas y su representación como esferas. Estas aproximaciones son coherentes con el nivel de información disponible (imágenes bidimensionales) y con el objetivo del trabajo, que es analizar de forma comparativa y no invasiva el comportamiento de la espuma.

En consecuencia, los resultados obtenidos no deben interpretarse como mediciones absolutas de caudal de aire, sino como indicadores cuantitativos derivados del análisis visual del sistema, con validez experimental y utilidad para el estudio del proceso de flotación en condiciones de laboratorio.

3.4.6. Ejemplo ilustrativo del cálculo de Q_{est}

A modo de ejemplo, considérese una ventana temporal de $\Delta t = 60$ s (ventana de análisis empleada para la estimación). En dicha ventana, la interfaz registra los siguientes eventos de ruptura dentro de la ROI:

- $N_m = 73\,100$ burbujas medianas con diámetro equivalente $D_m = 1,5$ mm,
- $N_g = 5\,500$ burbujas grandes con diámetro equivalente $D_g = 2,5$ mm.

Bajo la aproximación esférica, el volumen equivalente de una burbuja se calcula como:

$$V = \frac{\pi}{6} D_{eq}^3.$$

Por tanto, el volumen de una burbuja mediana es:

$$V_m = \frac{\pi}{6} (1,5)^3 \approx 1,77 \text{ mm}^3,$$

mientras que el volumen de una burbuja grande es:

$$V_g = \frac{\pi}{6} (2,5)^3 \approx 8,18 \text{ mm}^3.$$

El volumen total acumulado de aire expulsado en la ventana (salida directa de la interfaz como volumen integrado en Δt) se obtiene sumando los aportes de cada clase:

$$V_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N V_i = N_m V_m + N_g V_g.$$

Sustituyendo valores:

$$V_{\text{total}} \approx 73,100(1,77) + 5,500(8,18) \approx 174,100 \text{ mm}^3.$$

Convirtiendo a litros ($1 \text{ mm}^3 = 10^{-6} \text{ L}$):

$$V_{\text{total}} \approx 174,100 \times 10^{-6} \text{ L} \approx 0,174 \text{ L}.$$

Finalmente, el flujo estimado (lo que la interfaz reporta como Q_{est} para esa ventana temporal) se calcula como:

$$Q_{est} = \frac{1}{\Delta t} \sum_{i=1}^N V_i.$$

Dado que $\Delta t = 60 \text{ s} = 1 \text{ min}$, puede expresarse directamente en L/min usando la relación:

$$Q = \frac{V_{\text{total}}}{T},$$

con $T = \Delta t$. Por tanto:

$$Q_{est} = \frac{0,174}{1} \approx 0,174 \text{ L/min}.$$

Este valor corresponde al caudal de aire equivalente asociado exclusivamente a los eventos de ruptura detectados dentro de la ventana temporal considerada, y constituye un punto de la curva $Q_{est}(t)$ cuando se evalúa en ventanas sucesivas a lo largo del video.

Este valor representa un caudal equivalente asociado a los eventos de ruptura de burbujas detectados por el sistema, y permite realizar comparaciones relativas entre distintas condiciones de operación.

En conjunto, estos resultados demuestran que la metodología implementada es capaz de adaptarse a variaciones significativas en el caudal de aire, proporcionando mediciones consistentes y reproducibles. El enfoque adoptado no pretende reemplazar sensores de caudal convencionales, sino ofrecer un indicador visual cuantitativo del comportamiento dinámico de la espuma, constituyendo una base sólida para el análisis experimental y comparativo del proceso de flotación.

3.5. Resultados experimentales por condición de flujo

3.5.1. Comparación del flujo estimado entre condiciones

El estudio conjunto de las Tablas 3.2 a 3.5, cuyas cifras fueron recopiladas a partir del análisis individual realizado en la interfaz gráfica para cada una de las tasas de flujo (3, 4, 5 y 6 L/min), junto con la relación porcentual mostrada en la Tabla 3.6, permite observar una reacción coherente del modelo ante el aumento gradual del caudal de aire inyectado.

Para cada litro por minuto evaluado, la interfaz llevó a cabo el proceso completo de segmentación, detección de fallas y estimación del volumen, produciendo los valores que se encuentran en las tablas. Se nota que, a medida que se incrementa el flujo nominal, el flujo estimado derivado de los eventos de ruptura muestra un comportamiento estable y proporcional, lo que valida la sensibilidad del sistema ante cambios en las condiciones de operación.

En el intervalo de 3 a 6 L/min, la relación entre el caudal estimado y el caudal que ingresa se mantiene prácticamente invariable, lo que sugiere que la metodología utilizada logra reflejar de manera efectiva la dinámica de la espuma en condiciones hidrodinámicas constantes. Este comportamiento respalda la solidez del modelo volumétrico planteado y su viabilidad como un indicador cuantitativo del estado operativo de la columna.

La condición correspondiente a 7 L/min no se toma en cuenta en esta comparación, ya que en ese régimen se observó una disminución considerable en la calidad de la segmentación debido a la alta densidad y superposición de burbujas. Por lo tanto, los resultados obtenidos en esa situación no son representativos de un régimen estable ni son adecuados para la validación cuantitativa del modelo.

Condición de 3 L/min

La Tabla 3.2 presenta los resultados obtenidos para la condición experimental de 3 L/min.

Cuadro 3.2: Resultados obtenidos para la condición de 3 L/min.

Rupt. Medianas	Rupt. Grandes	Rupt. Totales	Vol. Total (L)	Flujo Est. (L/min)
73157	5507	78664	0.174	0.166

Condición de 4 L/min

La Tabla 3.3 resume los resultados correspondientes a la operación de la columna bajo un flujo de 4 L/min.

Cuadro 3.3: Resultados obtenidos para la condición de 4 L/min.

Rupt. Medianas	Rupt. Grandes	Rupt. Totales	Vol. Total (L)	Flujo Est. (L/min)
10924	962	11886	0.116	0.224

Condición de 5 L/min

Los resultados experimentales obtenidos para 5 L/min se presentan en la Tabla 3.4.

Cuadro 3.4: Resultados obtenidos para la condición de 5 L/min.

Rupt. Medianas	Rupt. Grandes	Rupt. Totales	Vol. Total (L)	Flujo Est. (L/min)
9999	1207	11206	0.138	0.266

Condición de 6 L/min

La Tabla 3.5 muestra los valores registrados para la condición de 6 L/min.

Cuadro 3.5: Resultados obtenidos para la condición de 6 L/min.

Rupt. Medianas	Rupt. Grandes	Rupt. Totales	Vol. Total (L)	Flujo Est. (L/min)
8762	1067	9829	0.150	0.310

La Tabla 3.6 presenta de manera clara la relación porcentual entre el flujo de aire suministrado en la columna y el flujo calculado a partir de los eventos de ruptura observados en la región de espuma.

Se puede notar que, en los rangos entre 3 y 6 L/min, el porcentaje calculado se mantiene cerca del 5 %, con oscilaciones menores a 0.5 % entre diferentes condiciones. Este patrón muestra una relación constante entre el aire que entra y el volumen equivalente que se libera en la superficie de la espuma, lo cual se alinea con criterios metalúrgicos empleados para determinar la estabilidad operativa de las columnas de flotación.

La estabilidad del porcentaje dentro de este intervalo respalda la validez del experimento del modelo volumétrico utilizado y confirma que el sistema de visión por computador responde de manera lógica ante aumentos graduales del flujo de aire.

Cuadro 3.6: Relación entre flujo nominal ingresado y flujo estimado en la zona de espuma.

Flujo nominal (L/min)	Flujo estimado (L/min)	Porcentaje (%)
3	0.166	5.53
4	0.224	5.60
5	0.266	5.32
6	0.310	5.17

3.6. Interfaz gráfica y análisis cuantitativo

3.6.1. Flujo de uso de la interfaz

Con el fin de integrar el procesamiento automático de imágenes con una herramienta de análisis accesible para el usuario final, se desarrolló una interfaz gráfica de escritorio que permite gestionar de forma completa el flujo de trabajo, desde la carga del video hasta la visualización y exportación de resultados cuantitativos.

La Figura 3.9 muestra la ventana principal de la aplicación. En la sección de entrada, el usuario selecciona el archivo de video correspondiente al ensayo experimental y define el caudal nominal de operación (3, 4, 5, 6 o 7 L/min). Esta elección determina de manera automática el algoritmo de análisis que se ejecutará, ajustándose a las características dinámicas de cada condición en la que se opere.

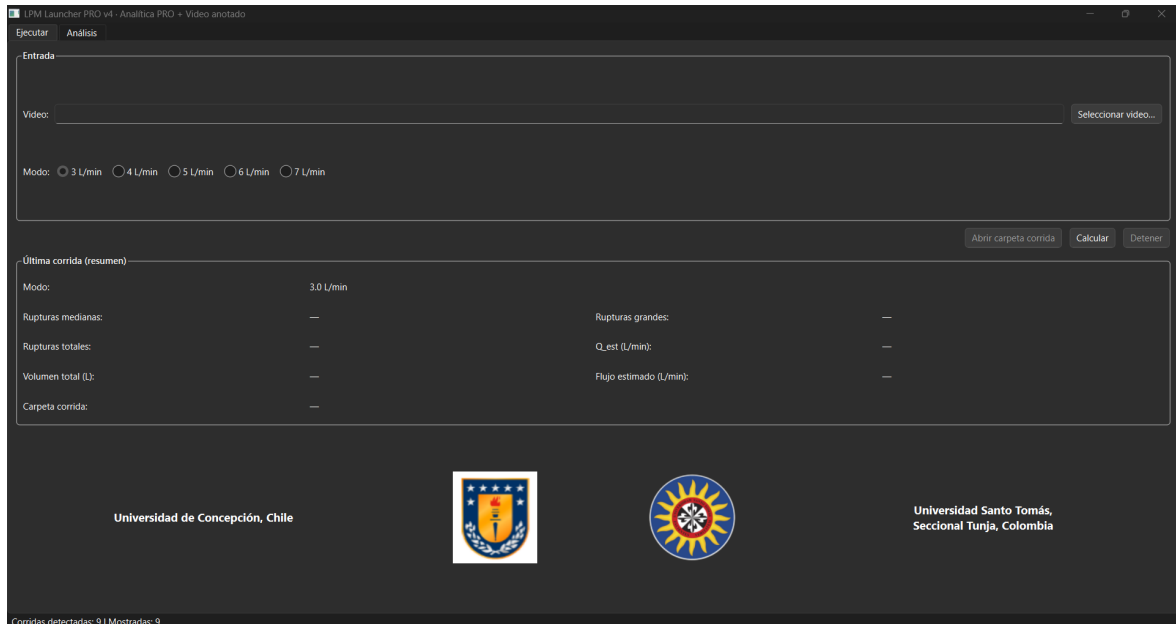


Figura 3.9: Interfaz gráfica principal del sistema de análisis, donde se observa la selección del video de entrada, el caudal de operación y el resumen de resultados de la última corrida.

Al comenzar el análisis, el sistema realiza de forma automática el procesamiento del video, guarda los resultados en una carpeta organizada por cada corrida y muestra en tiempo real un resumen de métricas importantes, como la cantidad de rupturas de burbujas, el volumen total expulsado y el flujo calculado.

3.6.2. Métricas calculadas y visualización

Basándose en la identificación y división de burbujas en cada imagen, el sistema determina medidas cuantitativas que ayudan a describir el comportamiento de la espuma a lo largo de la prueba. Entre las variables clave que se obtienen se incluyen:

- Número de rupturas de burbujas medianas.
- Número de rupturas de burbujas grandes.
- Rupturas totales.
- Volumen total de aire expulsado.
- Flujo de aire estimado (L/min).

La sección de análisis de la interfaz, presentada en la Figura 3.10, brinda al usuario la posibilidad de examinar estos resultados a través de diversas modalidades de visualización, como tendencias a lo largo del tiempo, comparativas de flujos, gráficos de

dispersión y resúmenes estadísticos. Esta versatilidad ayuda a comprender mejor los datos y a detectar patrones o anomalías que puedan surgir entre diferentes experimentos prácticos.

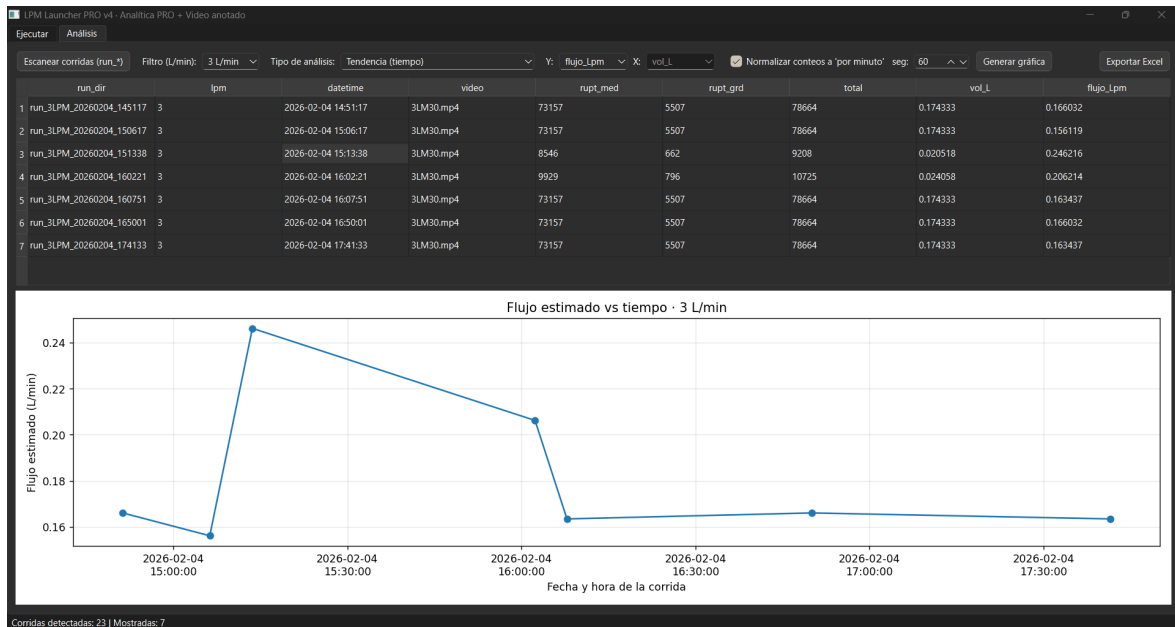


Figura 3.10: Pestaña de análisis de la interfaz gráfica, donde se muestran las tablas de resultados y los gráficos estadísticos asociados, ilustrando la tendencia del flujo estimado en función del tiempo.

En particular, observar la evolución del flujo estimado a través del tiempo ayuda a analizar la estabilidad del proceso de flotación y a contrastar la consistencia entre distintos ensayos llevados a cabo bajo las mismas condiciones operativas.

3.6.3. Exportación y organización de resultados

Con el objetivo de facilitar la trazabilidad y el análisis posterior de los datos, la interfaz incorpora un sistema automático de exportación y organización de resultados. Cada corrida genera una carpeta independiente que contiene:

- El archivo de video original.
- El video anotado con los resultados de la detección.
- Un archivo de resumen en formato JSON con las métricas calculadas.
- Un registro de ejecución del proceso.

Adicionalmente, el sistema permite exportar un archivo consolidado en formato Excel, donde los resultados se organizan automáticamente en hojas separadas según

el caudal de operación (Figura 3.11). Esta estructura facilita la comparación directa entre ensayos y su posterior uso en análisis estadísticos o reportes técnicos.

Resultados 3 L/min										
Carpeta corrida	Fecha/hora	Vídeo	Rupturas mediana	Rupturas grande	Rupturas totales	Volumen total (L)	Flujo estimado (L/min)	Q_est (L/min)	Exit cod.	Creado en
run_3LPM_20260204_145117	2026-02-04 14:51:17	3LM30.mp4	73157	5507	78664	0,174	0,166		0	2026-02-04T14:52:27
run_3LPM_20260204_150617	2026-02-04 15:06:17	3LM30.mp4	73157	5507	78664	0,174	0,156		0	2026-02-04T15:07:27
run_3LPM_20260204_151338	2026-02-04 15:13:38	3LM30.mp4	8546	662	9208	0,021	0,246		0	2026-02-04T15:13:46
run_3LPM_20260204_160221	2026-02-04 16:02:21	3LM30.mp4	9929	796	10725	0,024	0,206		0	2026-02-04T16:02:31
run_3LPM_20260204_160751	2026-02-04 16:07:51	3LM30.mp4	73157	5507	78664	0,174	0,163		0	2026-02-04T16:08:58
run_3LPM_20260204_165001	2026-02-04 16:50:01	3LM30.mp4	73157	5507	78664	0,174	0,166		0	2026-02-04T16:51:06
run_3LPM_20260204_174133	2026-02-04 17:41:33	3LM30.mp4	73157	5507	78664	0,174	0,163		0	2026-02-04T17:42:39

Figura 3.11: Archivo Excel generado automáticamente por la interfaz, con hojas organizadas por caudal de operación y métricas resumidas de cada corrida.

La exportación estructurada de resultados reduce significativamente el tiempo requerido para el procesamiento manual de datos y minimiza errores asociados a la manipulación externa de la información.

La interfaz creada desempeña un papel crucial al servir de conexión entre el procesamiento digital de imágenes y la interpretación experimental relacionada con la flotación. Desde la perspectiva del usuario, el sistema facilita la realización de análisis complejos sin requerir una manipulación directa del código, lo que lo hace adecuado para su uso en laboratorios.

Entre los beneficios más importantes del sistema se encuentran la automatización del proceso de trabajo, la uniformidad en el cálculo de métricas y la capacidad de verificar los resultados visualmente a través del video con anotaciones. Sin embargo, el rendimiento del sistema puede verse afectado por factores externos, como la calidad de la iluminación, la estabilidad de la cámara y la correcta delimitación de la región de interés, los cuales pueden tener un impacto en la exactitud de la detección de burbujas.

A pesar de estas restricciones, la herramienta representa una solución sólida y versátil para el análisis cuantitativo de espumas en columnas de flotación, cumpliendo con los objetivos establecidos en este estudio y proporcionando una base firme para futuras ampliaciones y mejoras.

Capítulo 4

Conclusiones y Recomendaciones

4.1. Conclusiones

En el desarrollo de este trabajo se diseñó e implementó un sistema integral para la adquisición, procesamiento y análisis de imágenes de espuma en una columna de flotación piloto, combinando técnicas de visión por computador con una interfaz gráfica orientada al usuario. A partir de los resultados obtenidos, se pueden establecer las siguientes conclusiones principales:

- El diseño del sistema para la captura visual mostró que la calidad de los datos está altamente influenciada por el control experimental. Factores como la luz, el ángulo de la toma y la estabilidad de la cámara fueron fundamentales, ya que mínimas alteraciones provocan variaciones notables en la visibilidad de los bordes de las burbujas. Esto llevó a la necesidad de establecer una configuración rígida y replicable como un requisito esencial para el análisis.
- Las etapas de preprocesamiento y segmentación enfrentaron el reto de trabajar con imágenes altamente variables, que estaban influenciadas por reflejos, ruido y contrastes irregulares. Se observó que optimizar la imagen no garantiza siempre una mejora en los resultados, ya que un filtrado excesivo puede eliminar datos importantes. Por lo tanto, la efectividad del algoritmo está sujeta a un equilibrio preciso entre la purificación de la imagen y la preservación de bordes significativos.
- La valoración de elementos como el tamaño de la burbuja, su volumen y el flujo de aire depende en gran medida de cuán precisa sea la segmentación. Se observó que ocurre que fenómenos como la unión de burbujas y la superposición generan fallos en la identificación de bordes, lo cual influye en la validez de las métricas obtenidas y pone de manifiesto una restricción fundamental del método geométrico empleado.

- La creación de la interfaz visual requirió abordar conflictos entre la flexibilidad y el control del procedimiento. Darle al usuario la opción de modificar parámetros aumenta la capacidad de adaptación del sistema, aunque también genera diversidad en los resultados. Esto demuestra que, si bien la herramienta ayuda en el análisis, su uso apropiado está determinado por la habilidad técnica del usuario y la correcta elección de parámetros.
- Los resultados obtenidos para caudales de operación comprendidos entre **3 y 6 L/min** mostraron una detección estable y consistente de burbujas, así como una adecuada repetibilidad en las métricas calculadas, lo que valida el desempeño del aplicativo dentro de este rango de operación; sin embargo, esta estabilidad está asociada a condiciones donde las burbujas mantienen separación suficiente para ser identificadas individualmente. Esto indica que el método no es universal, sino que su aplicabilidad está condicionada por la dinámica de la espuma y la densidad de burbujas presente en el sistema.
- Para condiciones de operación a **7 L/min**, se evidenció una degradación significativa en la calidad de la información visual registrada. La elevada densidad de burbujas, la superposición de contornos y la dinámica acelerada de la espuma dificultaron la segmentación individual de burbujas, limitando la confiabilidad de los resultados obtenidos bajo estas condiciones. Este comportamiento muestra que, bajo condiciones más complejas, es necesario migrar hacia técnicas más avanzadas de adquisición y procesamiento, como mayor resolución temporal o métodos basados en aprendizaje automático.

4.2. Recomendaciones

Con base en las conclusiones alcanzadas, se proponen las siguientes recomendaciones para trabajos futuros y posibles mejoras del sistema:

- Implementar sistemas de adquisición visual de mayor velocidad de captura (mayor *frame rate*) y resolución, que permitan abordar condiciones de operación con caudales elevados, como el caso de 7 L/min.
- Evaluar esquemas de iluminación más avanzados, tales como iluminación difusa anular o técnicas de retroiluminación, con el fin de reducir la superposición visual de burbujas y mejorar el contraste en condiciones de espuma altamente densa.
- Incorporar métodos de segmentación más avanzados, incluyendo enfoques basados en aprendizaje automático o redes neuronales convolucionales, que puedan

mejorar la separación de burbujas superpuestas en escenarios complejos.

- Extender el sistema para integrar variables metalúrgicas adicionales del proceso de flotación, permitiendo correlacionar directamente las características de la espuma con el desempeño metalúrgico.
- Realizar campañas experimentales adicionales que permitan validar el sistema bajo distintas configuraciones de columna, reactivos y condiciones operacionales, fortaleciendo su aplicabilidad en entornos industriales.

Finalmente, el sistema desarrollado constituye una base sólida para el uso de técnicas de visión por computador como herramienta de apoyo en la supervisión y análisis de procesos de flotación, aportando una alternativa no invasiva, reproducible y cuantitativa para el estudio del comportamiento de la espuma.

4.3. Divulgación y socialización de resultados

Como parte del proceso de desarrollo y validación académica del presente proyecto, se realizó la socialización de resultados preliminares en el Congreso Nacional de Metalurgia (CONAMET, CHILE), correspondiente al año 2025.

En dicho evento se presentó un trabajo en modalidad [póster/paper], cuyo contenido estuvo directamente relacionado con la metodología de análisis de burbujas en espuma de flotación mediante procesamiento digital de imágenes. La Figura 4.1 muestra la participación durante la presentación del trabajo en el evento.



Figura 4.1: Presentación del trabajo relacionado con el análisis de burbujas en espuma de flotación durante el Congreso Nacional de Metalurgia (CONAMET) 2025.

La participación en este congreso permitió someter la propuesta a discusión técnica con investigadores y profesionales del área de la metalurgia y procesamiento de minerales, obteniendo retroalimentación relevante para el refinamiento del sistema de adquisición y segmentación implementado posteriormente.

Esta experiencia fortaleció el enfoque metodológico del proyecto y aportó validación académica externa al trabajo desarrollado.

Referencias Bibliográficas

- [1] ScienceDirect, *Froth Flotation*, Consultado el 19 de marzo de 2026, 2025. dirección: <https://www.sciencedirect.com/topics/chemical-engineering/flotation-froth>.
- [2] 911 Metallurgist, *Froth flotation process*, <https://www.911metallurgist.com/blog/froth-flotation-process/>, Consultado en 2024, mayo de 2021.
- [3] R. Núñez, «Diagnóstico y análisis estratégico del negocio equipos de flotación,» Tesis de mtría., Universidad de Chile, Chile, 2014. dirección: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/129915>.
- [4] C. A. Yantén Vergara, *Desarrollo de herramienta de caracterización de espumas de flotación a partir de análisis textural de imágenes*, Chile, 2020. dirección: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/176993>.
- [5] W. Zhang et al., «An improved Python-based image processing algorithm for flotation foam analysis,» *Minerals*, vol. 12, n.º 9, pág. 1126, 2022. DOI: 10.3390/min12091126.
- [6] GeeksforGeeks, *Python - Grayscale of Images using OpenCV*, Consultado el 19 de marzo de 2026, 2024. dirección: <https://www.geeksforgeeks.org/python/python-grayscale-of-images-using-opencv/>.
- [7] ScienceDirect, *Global Thresholding*, Consultado el 19 de marzo de 2026, 2025. dirección: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/global-thresholding>.
- [8] Ultralytics, *Thresholding in Image Processing*, Consultado el 19 de marzo de 2026, 2024. dirección: <https://www.ultralytics.com/es/blog/thresholding-in-image-processing>.
- [9] Universidad Nacional Autónoma de México, *Área del círculo*, Consultado el 19 de marzo de 2026, 2024. dirección: <https://portalacademico.cch.unam.mx/matematicas2/circulo-circunferencia/area-circulo>.

- [10] CK-12 Foundation, *Volumen de las esferas*, Consultado el 19 de marzo de 2026, 2024. dirección: <https://flexbooks.ck12.org/cbook/ck-12-conceptos-de-matem%C3%A1ticas-de-la-escuela-secundaria-grado-8-en-espa%C3%B1ol/section/8.15/primary/lesson/volumen-de-las-esferas/>.

Apéndice A

Anexo A: Código fuente del sistema de análisis de burbujas.

Este anexo documenta la estructura del código fuente desarrollado para la adquisición, procesamiento y análisis de burbujas en la zona de espuma de una columna de flotación. El sistema fue implementado en Python y se organiza en módulos orientados a: (i) interfaz gráfica, (ii) preprocesamiento y segmentación y (iii) exportación de resultados (CSV/Excel e imágenes).

Por motivos de extensión, el código completo se incluye como archivos adjuntos dentro del repositorio/carpeta de anexos del proyecto. En el presente documento se describen los módulos principales y su función, junto con la estructura de carpetas utilizada para garantizar trazabilidad y reproducibilidad.

A.1. Archivo principal de la aplicación (GUI)

Archivo: Interfaz_LPM.py

Este archivo corresponde a la aplicación de escritorio desarrollada (GUI), desde donde el usuario ejecuta el flujo completo: carga del video, selección del caudal nominal (3, 4, 5, 6 o 7 L/min), definición de ROI, ajuste de parámetros de segmentación, ejecución del análisis y exportación automática de resultados. La interfaz integra visualización en tiempo real del fotograma original, la máscara/segmentación y el fotograma anotado con contornos y clasificación por tamaño.

Anexo: archivo principal de la GUI (Interfaz_LPM.py)

A.2. Módulo de detección y segmentación de burbujas

Archivos: `Contraste_3LM.py`, `Contraste_4LM.py`, `Contraste_5LM.py`, `Contraste_6LM.py`, `Contraste_7LM.py`

Estos scripts implementan el núcleo del procesamiento de video: lectura de fotogramas, recorte por región de interés (ROI), preprocesamiento (reducción de ruido, mejora de contraste y estabilización visual), binarización/umbralización, operaciones morfológicas, detección de contornos y filtrado geométrico (área mínima, circularidad y validación espacial dentro del ROI). Para cada caudal se utilizaron parámetros calibrados con el fin de adaptarse a variaciones en el tamaño y dinámica de las burbujas, manteniendo una estructura algorítmica común que permite comparar resultados entre condiciones operacionales.

Anexo: scripts de análisis por caudal (3 a 7 L/min)

A.3. Exportación y trazabilidad de resultados

Salidas típicas generadas por corrida:

- Archivo `.csv` con burbujas detectadas y métricas por evento.
- Resumen `.json` o `.txt` con indicadores agregados.
- Imágenes `.png` del ROI y fotogramas representativos.
- Video anotado con superposición de contornos, clases y métricas.
- Consolidado `.xlsx` organizado por caudal (si aplica).

La exportación se organiza por carpetas para mantener trazabilidad entre video de entrada, parámetros utilizados y resultados obtenidos.

Apéndice B

Anexo B: Estructura de la interfaz gráfica y flujo de uso

Este anexo describe la estructura funcional de la interfaz gráfica desarrollada para el sistema de análisis de burbujas. Se presentan los módulos visuales principales, la lógica de interacción del usuario y el flujo general de operación desde la carga del video hasta la exportación de resultados.

B.1. Componentes principales de la GUI

- **Carga de video:** selección del archivo de entrada y configuración del ensayo.
- **Selección de caudal:** elección del modo de análisis (3, 4, 5, 6 o 7 L/min) con parámetros asociados.
- **ROI (Región de Interés):** definición del área circular de análisis para limitar procesamiento a la zona efectiva de espuma.
- **Panel de parámetros:** controles de preprocesamiento/segmentación (umbral, filtros, área mínima, etc.).
- **Visualización en tiempo real:** fotograma original, segmentación/binaria y fotograma anotado.
- **Resultados:** conteos, distribución de tamaños y estimaciones agregadas (volumen y flujo).
- **Exportación:** guardado de CSV/Excel, imágenes y video anotado.

B.2. Flujo general de operación

1. Seleccionar el video del ensayo en la columna de flotación.
2. Elegir el caudal nominal del experimento (3 a 7 L/min).
3. Definir o ajustar la región de interés (ROI) sobre la salida de espuma.
4. Ajustar parámetros de segmentación (si aplica) y ejecutar el análisis.
5. Validar visualmente los contornos detectados sobre el fotograma anotado.
6. Exportar resultados (archivos y evidencias visuales) para análisis posterior y elaboración de informes.

B.3. Estructura recomendada de carpetas del proyecto

```
Proyecto_Burbujas/  
  codigos/  
    Interfaz_LPM.py  
    Contraste_3LM.py  
    Contraste_4LM.py  
    Contraste_5LM.py  
    Contraste_6LM.py  
    Contraste_7LM.py  
  Videos/  
  Datos/  
    Corridas_ejecutadas_LPM/  
      resultados/  
        3LPM/  
        4LPM/  
        5LPM/  
        6LPM/  
        7LPM/  
    Frames/  
    .xlsx/
```

Apéndice C

Anexo C: Videos de prueba para validación de la interfaz

Con el fin de facilitar la verificación del correcto funcionamiento de la interfaz desarrollada, así como permitir a otros usuarios reproducir y evaluar los resultados obtenidos, se incluyen un conjunto de videos de prueba correspondientes a diferentes condiciones de operación de la columna de flotación.

En total, se disponen cinco (5) videos experimentales, los cuales pueden ser utilizados para realizar pruebas funcionales de la aplicación, validar los módulos de detección y segmentación de burbujas, y comprobar la correcta generación de métricas, visualizaciones y exportación de resultados. Estos archivos permiten al usuario ejecutar la interfaz sin necesidad de adquirir nuevos datos experimentales.

Los videos incluidos corresponden a distintos caudales de aire, cubriendo el rango de operación analizado en este trabajo, y se listan a continuación:

- Video 1: Ensayo a 3 L/min (3LM30)
- Video 2: Ensayo a 4 L/min (4LM30)
- Video 3: Ensayo a 5 L/min (5LM30)
- Video 4: Ensayo a 6 L/min (6LM30)
- Video 5: Ensayo a 7 L/min (7LM30)

Estos videos están destinados exclusivamente a fines de prueba y validación de la interfaz, permitiendo que cualquier usuario pueda comprobar el desempeño del sistema bajo diferentes escenarios experimentales sin modificar el código fuente. A continuación

se proporciona un enlace de acceso a través de Google Drive donde se encuentran alojados los videos, facilitando su consulta y descarga para la verificación del funcionamiento del sistema.

https://drive.google.com/drive/folders/1ZZdh0Zpb0y5p70mQHAEZTt4PBWpnN_jH?usp=sharing