

Impacto de los floculantes de alto desempeño en la eficiencia de espesadores y clarificación del agua

E. D. Carrizales García¹, J.J. Arguijo López²

¹ Metalurgista, J5 Servicios y Productos para Minería, Torreón, Coahuila, México.

Correo electrónico: eduardo.carrizales@j5consultoria.com

² Consultor Principal, J5 Servicios y Productos para Minería, Torreón, Coahuila, México.

Correo electrónico: jesus.arguijo@j5consultoria.com

* eduardo.carrizales@j5consultoria.com

RESUMEN

El agua es un recurso cada vez más escaso, y su manejo inadecuado en las plantas de beneficio puede provocar pérdidas significativas para el medio ambiente y la industria. Este artículo presenta los resultados de investigaciones a nivel laboratorio, optimizaciones en campo y casos de éxito industrial, demostrando cómo el uso de floculantes de alto desempeño puede mejorar la calidad del agua de sobreflujo y reducir significativamente el consumo de floculantes comerciales, con reducciones del 15% al 60% en algunos casos.

Para optimizar la operación de los espesadores y reducir costos, se analizaron variables a nivel laboratorio, incluyendo diferentes tipos de floculantes y dosificaciones, tiempos de maduración, concentraciones de preparación y porcentajes de sólidos en la pulpa a tratar. En planta, fueron revisados parámetros operativos y equipos periféricos como puntos de dosificación, bombas dosificadoras, la instrumentación utilizada para monitorear los espesadores y los porcentajes de sólidos en alimentación y descarga.

Los resultados obtenidos en pruebas industriales indican que es posible mejorar la clarificación del agua de sobreflujo hasta en un 42% y reducir el consumo de floculantes entre un 15% y un 60%, lo que se traduce en ahorros económicos de hasta un 50%. Este proyecto muestra las experiencias obtenidas de pruebas en campo para reducir el consumo de floculante y obteniendo una gestión más efectiva y sostenible del manejo de aguas en plantas de beneficio teniendo un impacto significativo tanto en la eficiencia operativa como en los costos

PALABRAS CLAVE: *geometalurgia, lixiviación, flotación, molienda.*

ANTECEDENTES

El agua es un recurso cada vez más escaso, y su manejo inadecuado en las plantas de beneficio puede provocar pérdidas significativas para el medio ambiente y afecta severamente en las operaciones mineras.

El proceso de espesamiento en la minería es posible mediante la adición de sustancias denominadas floculantes, que aglomeran los sólidos presentes en el agua, facilitando de esta forma la sedimentación.

El presente trabajo es desarrollado con mineral de la zona de Zacatecas, México, mineral de composición comúnmente polimetálico.

En laboratorio medimos el desempeño de floculantes ajustando variables con el objetivo de optimizar y maximizar su comportamiento en los procesos industriales, estas variables son:

- Tipos de floculante: Existen diferentes tipos de floculantes, cada uno con propiedades específicas que los hacen adecuados para diferentes aplicaciones. Elegir y dosificar correctamente estos productos puede significar una gran diferencia en la eficiencia y sostenibilidad de las operaciones.
- Dosificaciones: Las cantidades de dosificación de floculante pueden variar según varios factores, como el tipo de pulpa-agua a tratar, la concentración de sólidos en suspensión, el tipo de floculante y las condiciones del proceso.
- Tiempos de maduración: Es referido al tiempo necesario para que el floculante, una vez preparado o diluido, alcance su máxima eficacia en el proceso de floculación.
- Concentración: La concentración adecuada varía según el tipo de floculante, el tipo de proceso, y las características del agua o la suspensión a tratar.
- % Sólidos: Es una medida que indica la cantidad de material sólido presente en una pulpa.

Los análisis estadísticos permiten identificar patrones operativos y evaluar condiciones experimentales a gran escala. Para realizar estos análisis, es necesario períodos mínimos de 3 meses, utilizando datos recopilados en intervalos de 5 minutos. Durante el proceso de análisis, agrupamos datos y excluimos aquellos valores que están fuera de rangos establecidos, tales como paros de planta o valores atípicos.

A continuación, como parte de los antecedentes del proyecto, mostraremos resultados de análisis estadísticos de 5 plantas, previo a ejecutarse los proyectos de optimización de floculante.

Un ejemplo es La Figura 1 que ilustra la frecuencia de consumo en la Planta 3. En esta figura observamos que más del 30% del consumo se sitúa en el rango de 40 a 44 g/t, en situaciones atípicas, el consumo puede alcanzar hasta 52 g/t. Esta información permite realizar un análisis detallado de los rangos operativos más frecuentes y de patrones de consumo asociados.

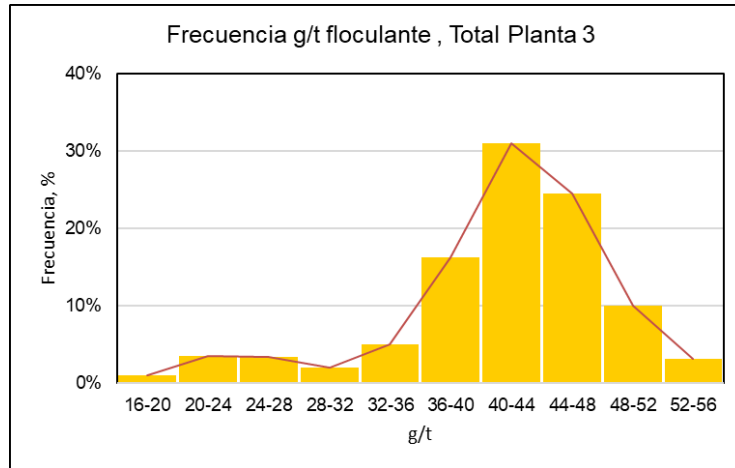


Figura 1: Gráfico de Frecuencia Consumo de Floculante en Planta 3

La Tabla 1 proporciona un **resumen operativo de las plantas analizadas, destacando los consumos** aproximados mensuales durante el período de operación. Aunque la tabla no incluye todos los parámetros relevantes, simplifica la información esencial sobre el consumo de floculante en cada planta, facilitando una visión general del consumo mensual.

Tabla 1: Caracterización de las plantas

Planta	Concentración %	Consumo g/t	Turbides NTU	Consumo t/mes
1	0.05	18	45	1.9
2	0.20	23	49	5.1
3	0.37	42	45	9.2
4	0.05	39	40	10.7
5	0.28	64	43	14.6

Los valores reflejan condiciones previas a la intervención en las operaciones de las plantas. A modo de resumen, presentamos los consumos antes de realizar cualquier ajuste. Es importante destacar que los objetivos específicos de cada planta pueden variar, lo que implica que las condiciones y resultados esperados también pueden diferir según los objetivos particulares de cada unidad minera.

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

El objetivo principal es reducir el consumo de floculante y mejorar la clarificación de las soluciones de sobreflujo de los espesadores de las plantas de beneficio, es decir, reducir costos operativos y mejorar la calidad de agua.

Esto es posible seleccionando un floculante compatible con la pulpa, que mejore la velocidad de sedimentación y maximice la recuperación de agua. Adicional es necesario ajustar parámetros operativos en campo que permitan que el floculante seleccionado obtenga el mejor rendimiento posible.

Pruebas laboratorio – Selección de floculante

El proceso de selección de floculante inicia en laboratorio realizando rigurosas pruebas de sedimentación, utilizando muestras de pulpa específicas de la operación. Este procedimiento asegura la selección correcta de floculante, adaptándose a las características de la pulpa de la planta de beneficio. Los pasos generales para realizar una prueba de sedimentación son los siguientes:

- Recolección de pulpa.
- Medición del % sólidos de la pulpa.
- Preparación de diferentes floculantes a diferentes concentraciones.
- Realizar prueba de sedimentación, con diferentes % sólidos.
- Recabar evidencia en video de pruebas de sedimentación.
- Medición de clarificación de agua (NTU).
- Elaboración de curvas de velocidad de sedimentación.

Una vez realizadas las pruebas de sedimentación, elaboradas las curvas de velocidad de sedimentación y por medio de la evidencia de video, es necesario seleccionar el floculante óptimo para la muestra de pulpa, es decir, quien obtuvo mayor velocidad de sedimentación y mejor clarificación de agua, menor NTU.



Figura 2: Prueba de sedimentación.

Análisis operativos y evaluación de resultados

Una vez seleccionado el floculante por medio de pruebas de sedimentación en laboratorio es necesario realizar un análisis histórico de datos de la operación, abarcando un período mínimo de 3 meses en intervalos de 5 minutos, con el objetivo de identificar patrones recurrentes en conductas operativas. Este análisis permite determinar valores que se presentan con mayor frecuencia, proporcionando una visión integral del desempeño operativo. Los datos analizados son los siguientes:

- Torque espesador.
- Altura de las rastras.
- Interfaz de agua clara
- Turbidez de los sobreflujos
- % sólidos a la descarga del espesador.
- Flujos volumétricos en descargas de los espesadores
- Flujos de adición de floculante
- Tonelaje de alimentación
- Concentración del floculante

Este enfoque metódico proporciona una base sólida para evaluar detallada del rendimiento operativo y la optimización de procesos.

Desempeño Operativo.

Una revisión en campo es necesaria para evaluar condiciones actuales en planta antes de realizar la prueba industrial. Este proceso incluye analizar exhaustivamente las instalaciones y condiciones operativas existentes, además de realizar una revisión manual de datos y comparar lecturas proporcionadas por instrumentos de medición en línea. La validación de lecturas de instrumentos en línea frente a los datos manuales es esencial para asegurar la precisión del análisis histórico de datos. Esta comparación permite identificar y corregir posibles errores, garantizando así la fiabilidad de resultados y adecuación de condiciones operativas para la prueba industrial, la revisión en campo incluye:

1. Puntos de dosificación.
2. Tiempos de maduración.
3. % sólidos en alimentación y descarga de los espesadores.
4. Concentración en preparador de floculante.
5. Colocación de espumas para espumas sobrenadantes.
6. Comparación de instrumentos de control vs lecturas manuales
 - a. Flujo de floculante
 - b. % sólidos
 - c. Concentración de floculante

- d. Medición de NTU.
- 7. Seguimiento en campo variables del proceso.
 - a. Torque
 - b. Altura de Rastras
 - c. Espejo de agua.

Un ejemplo de las desviaciones encontrada en campos es La Figura 3, mostrando una incorrecta dosificación de floculante, la solución es redireccionar el floculante dentro de la canaleta de auto dilución.



Figura 3: Modificación de puntos de dosificación de floculante.

Inicio de Prueba Industrial

Durante el inicio de la prueba industrial para el cambio de un nuevo floculante, es necesario vaciar y limpiar los tanques y llenar con nuevo floculante. Es necesario registrar el tiempo de entrada del floculante y monitorear los parámetros clave, como torque, % sólidos en alimentación y descarga del espesador, además de la calidad del agua clarificada en el sobreflujo.

Durante todo el proceso, desde las pruebas de laboratorio hasta la implementación industrial, nuestro equipo de ingenieros especializados brinda un soporte técnico integral y seguimiento continuo. Estamos comprometidos a estar a su lado en cada paso, resolviendo dudas y optimizando el proceso en tiempo real. Los periodos de prueba pueden variar dependiendo de las necesidades de los clientes, pueden ser desde 15 días hasta 2 meses de prueba para generar una base de datos solida con la cual poder evaluar más a detalle los resultados.



Figura 4: Monitoreo de las pruebas y colocación de sistemas de esparido.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados Pruebas de Laboratorio

La Tabla 1 muestra resultados de velocidades de sedimentación y clarificación de soluciones de sobreflujo de pruebas realizadas a diferentes dosificaciones con el floculante estándar y el floculante J5. Los resultados indican que a menor dosificación con el "Floculante J5", 10 g/t, las velocidades de sedimentación obtenidos son similares a las velocidades de sedimentación obtenidas con el "Floculante Estándar" pero a mayor dosificación de floculante 25 g/t. Sin embargo, a dosificaciones de floculante tan bajas la clarificación no es la mejor posible.

Tabla 2. Resultados pruebas de sedimentación a diferentes dosificaciones, nivel laboratorio.

Dosificación, g/t	Velocidad de sedimentación, m/h		Clarificación solución sobreflujo, NTU	
	Floculante Estándar	Floculante J5	Floculante Estándar	Floculante J5
10.0	16.4	30.0	197.0	130.0
15.0	23.2	25.7	129.0	80.0
20.0	33.8	35.1	62.0	49.0
25.0	33.8	36.0	48.0	27.6

La Figura 5 indica que aumentar la dosificación del Floculante J5 no incrementa significativamente las velocidades de sedimentación, por lo cual no es necesario dosificar grandes cantidades de floculante, sin embargo, pero sí es requerimiento de la unidad mejora la calidad del agua si es posible incrementando la dosificación de floculante. Esto sugiere que pueden lograrse buenos rendimientos de velocidad con bajas

dosificaciones, siempre y cuando se encuentre una dosificación adecuada que no comprometa la claridad de los sobreflujos.

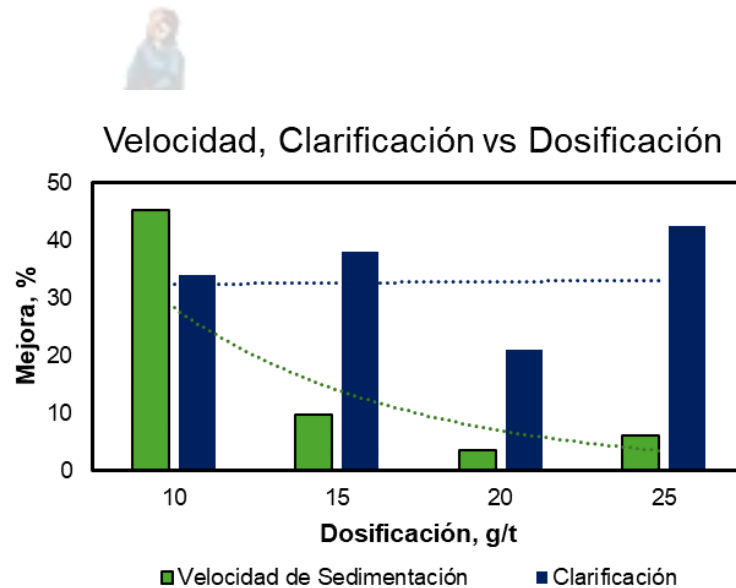


Figura 5. Velocidad y clarificación vs dosificación de floculante.

Resultados de Pruebas Industriales – Cambio de floculante

Durante las pruebas industriales, los Floculantes J5 han mostrado un excelente desempeño corroborando de manera precisa los resultados obtenidos durante las pruebas de laboratorio. En condiciones operativas a escala industrial, se registró una mejora significativa en la eficiencia de sedimentación, acompañada de una mayor claridad en la solución clarificada. Los parámetros operativos clave, como el torque promedio, el porcentaje de sólidos en alimentación y descarga del espesador, así como la turbidez del sobreflujo, se mantuvieron dentro de los rangos óptimos predefinidos, lo que asegura un rendimiento confiable del proceso.

La prueba industrial permitió optimizar y validar los puntos de dosificación del floculante en el espesador, lo que derivó en una reducción del consumo de floculante sin comprometer la eficiencia global del sistema. Esta optimización en la dosificación no solo garantiza un uso más eficiente de los floculantes J5, sino que también contribuye a una operación más sostenible económicamente, manteniendo al mismo tiempo la calidad y el rendimiento operativo del proceso.

Durante las pruebas industriales, se evidenció una mejora notable en la reducción del consumo de floculante y en la calidad de la clarificación del agua. *Este impacto positivo puede atribuirse a dos factores principales, la calidad de los floculantes J5 y mejoras operativas ejecutadas entre el equipo con supervisión de plantas y el soporte técnico de J5.*

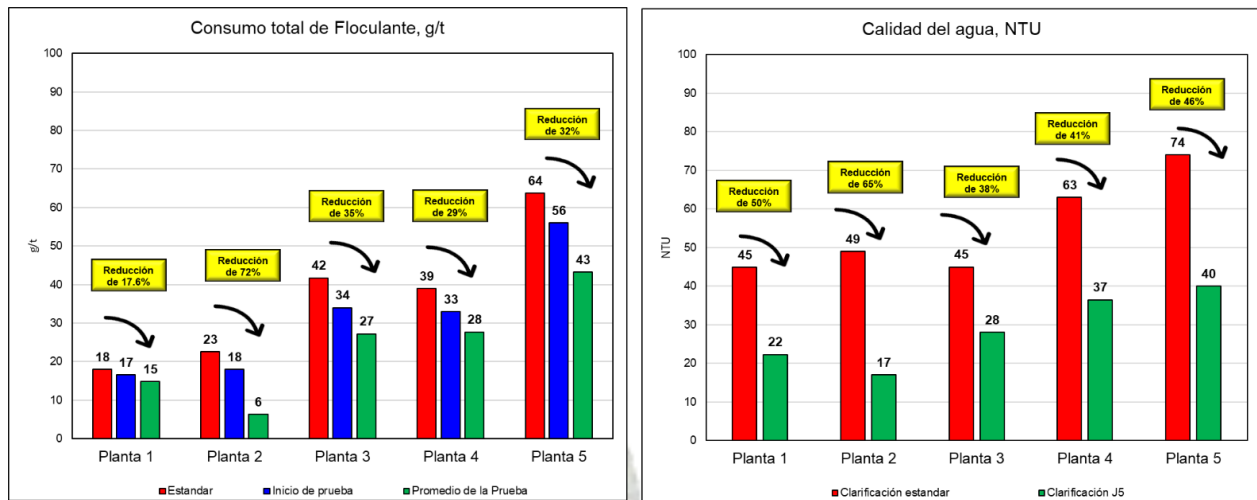


Figura 6: Gráfico de consumo de floculante en las plantas antes y después.

Mejoras Operativas:

- **Optimización de los puntos de dosificación:** Ajustes precisos en los puntos de adición del floculante para asegurar una distribución uniforme y eficiente.
- **Ajuste en la concentración del floculante:** Modificaciones en la concentración para maximizar la eficiencia sin sobrecargar el sistema.
- **Monitoreo constante de los espesadores:** Implementación de un sistema de monitoreo continuo para evaluar y ajustar los parámetros operativos a tiempo

La combinación de estas mejoras operativas contribuye en un 13% a la mejora total observada del 33%. Esto indica que, aunque las mejoras operativas son importantes, su impacto por sí solo representa una porción significativa pero menor de la mejora total.

Optimización del Floculante:

- **Cambio a un floculante de alta eficiencia:** La selección de un floculante con mejores características y rendimiento puede resultar en una reducción más significativa del consumo.

El cambio a un floculante de alta eficiencia representa 20% de reducción en el consumo total. Este cambio contribuye de manera considerable al total de **33% en la mejora observada**.

La Figura 7 muestra el resumen de este análisis, mientras que las mejoras operativas proporcionan una mejora de 13%, el cambio a un floculante más eficiente ofrece una reducción del 20%, destacando la importancia de ambos enfoques en la optimización del proceso y la eficiencia en el uso del floculante J5.

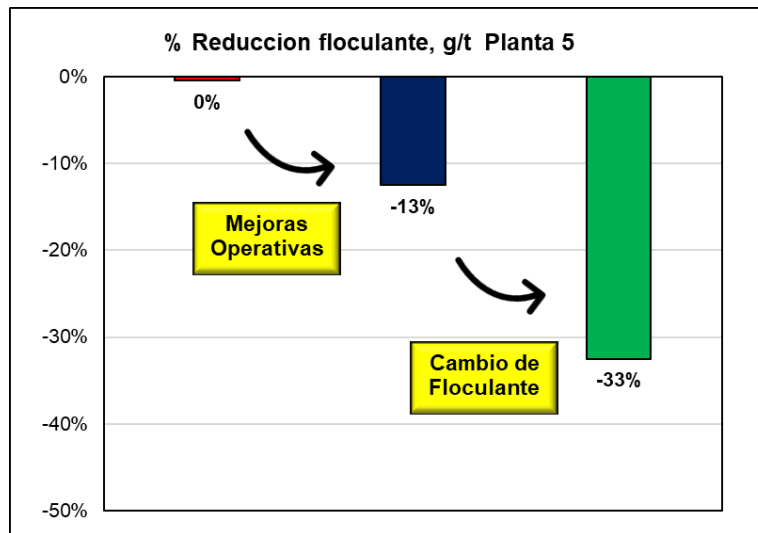


Figura 7: Gráfico de consumo de floculante en las plantas antes y después.

La Figura 8 muestra el antes de un espesador con un floculante estándar y el después del cambio a un floculante J5.



Figura 8: Fotografías antes y después con floculante J5.

La Figura 9 presenta los resultados del cambio de floculante implementado en cinco plantas. La correcta selección del floculante ha permitido lograr ahorros significativos en el consumo, que oscilan entre un 20% y un 30%. En situaciones particulares, los ahorros pueden llegar hasta un 72% en la reducción del consumo total de floculante, sin que ello implique una disminución en la calidad del agua.

Es crucial tener en cuenta que el impacto de estos cambios puede variar ampliamente dependiendo de factores tales como la calidad del agua, el tamaño de las partículas y los sistemas de dilución utilizados en los espesadores. Estos factores pueden influir en la magnitud de los ahorros y en la eficiencia general del floculante.

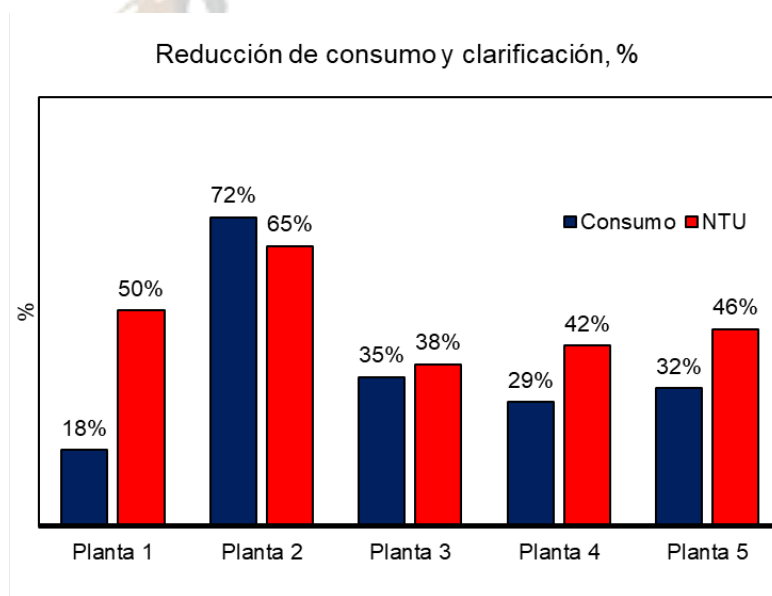


Figura 9. Reducción de consumo y mejora en clarificación con Floculante J5

Es posible mejorar significativamente las operaciones de sedimentación en los espesadores mediante la utilización de floculantes de alta eficiencia y el servicio al cliente con el que J5 se ha caracterizado. Con base en un producto de calidad, logramos reducir el consumo de floculante de 18 a 72% y mejorar la clarificación de solución de sobreflujo hasta 65%. Además, analizar exhaustivamente la información y usar equipos especializados permiten implementar mejoras operativas que pueden llevar a una reducción adicional del consumo de 13%. En conjunto, estas optimizaciones pueden resultar en un ahorro promedio de 33% para las unidades mineras.

La combinación de floculantes eficientes y ajustes operativos precisos no solo mejora la eficiencia del proceso de sedimentación, sino que también contribuye a una gestión más sostenible de los recursos, reduciendo costos y mejorando la calidad del agua clarificada. Estas mejoras subrayan la importancia de un enfoque integrado que combine tecnología avanzada y prácticas operativas óptimas para maximizar los beneficios en la industria minera.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados de los estudios analizados se puede concluir que los principales atributos a considerar para la definición de unidades geometalúrgicas que permitan correlacionar la información para la predicción de la recuperación del metal o mineral de interés son la litología, el tipo de roca, la textura mineral, tipo de intercrecimiento, tamaño de partícula, contenido de materia carbonosa y mineralogía.

Los atributos geológicos o mineralógicos afectan directamente en la etapa de molienda tanto en el consumo de energía, como en el grado de liberación alcanzado; en la interacción entre reactivos y minerales en los procesos de flotación y lixiviación ya que pueden incrementar el consumo de reactivos y reducir la recuperación.

AGRADECIMIENTOS

Quisiéramos expresar nuestro más sincero agradecimiento a las plantas de beneficio del estado de Zacatecas por su invaluable apoyo y colaboración. Extendemos nuestro reconocimiento a superintendentes, supervisores y asesores que nos brindan las facilidades para llevar a cabo pruebas de laboratorio y pruebas industriales. Su disposición y compromiso son fundamentales para el éxito de este proyecto.

Agradecemos profundamente al equipo de J5 por su apoyo constante: Fernando Amaro, Fernando Esquivel, Paloma Ramos y Juan Pablo Paz. Su presencia incondicional en las pruebas y su dedicación al servicio al cliente reflejan los valores que J5 busca compartir con el mundo entero. Sin su esfuerzo y trabajo en equipo, nada de esto habría sido posible.

También queremos agradecer a los organizadores del XXI Encuentro sobre Procesamiento de Minerales, en particular al Instituto de Metalurgia (UASLP) y a la empresa SYENSQO, por permitirnos presentar este artículo.

Finalmente, expresamos nuestra profunda gratitud a nuestras familias, que siempre nos apoyan a pesar de que gran parte del tiempo no estamos con ellas. Su comprensión y respaldo son el motor que nos impulsa a seguir adelante.

REFERENCIAS

Miranda, M., Chambers, D., & Coumans, C. (2005). *Framework for Responsible Mining: A Guide to Evolving Standards*. Center for Science in Public Participation.

Tao, D., & Parekh, B. K. (2002). *Enhanced Sedimentation of Fine Coal Tailings Using Flocculants and Surfactants*. *Fuel*, 81(9), 1133-1140.