

## Un cambio radical en la recuperación mediante la implementación de inyección de microburbujas en circuitos de flotación y lixiviación

Martin Rios<sup>1</sup>, Oscar Lopez<sup>2\*</sup>, Nee San Yap<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Eriez Flotation Canada, Delta, British Columbia, Canada

<sup>2</sup>GoalTek S.A. de C.V., Hacienda la Pila 104, Hacienda de bravo, 78175, San Luis Potosí, S.L.P., México

\*[oscar.lopez@goaltekmx.com](mailto:oscar.lopez@goaltekmx.com)

### RESUMEN

Los generadores de burbujas finas se están utilizando en diversas aplicaciones debido al rendimiento superior que generalmente se logra con tamaños de burbuja más pequeños. En el procesamiento de minerales, los spargers se utilizan en los circuitos de flotación para separar los minerales valiosos de la ganga; y se usan para inyectar el oxígeno necesario para la reacción de lixiviación con cianuro.

Eriez ofrece varias tecnologías de sparging para diferentes aplicaciones. Este documento cubre dos aplicaciones en las que los spargers SlamJet™ de Eriez se incorporaron en circuitos existentes para proporcionar un valor añadido.

**PALABRAS CLAVE:** *sparger; lixiviación; flotación, SlamJet™*

## ANTECEDENTES

Eriez desarrolló el sparger SlamJet™ como un método eficaz para generar burbujas en los procesos de flotación. El sistema de sparging fue diseñado para: (1) crear un flujo constante de burbujas de diámetro pequeño, independientemente del flujo de aire; (2) proporcionar una distribución uniforme de las burbujas de aire dentro y a través del recipiente; (3) incluir un mecanismo a prueba de fallos para evitar el retorno de fluidos; y (4) simplificar su mantenimiento y operación (Eriez, 2024).

Históricamente, los spargers SlamJet™ se han instalado con gran éxito en celdas de flotación tipo columna. Al contar con diferentes longitudes de tubo y tamaños de boquillas disponibles, se han adaptado para la flotación de diversos minerales. Gracias a su diseño y rendimiento de confianza, el SlamJet™ también ha sido considerado para aplicaciones alternativas. Este documento revisará dos casos en los que el SlamJet™ se utilizó como fuente auxiliar en la inyección de aire.

En el primer caso de estudio, los spargers SlamJet™ se instalaron en celdas tanque convencionales de agitación mecánica en los circuitos primarios y agotativos de una planta de flotación de oro y plata en México. En el segundo caso de estudio, los spargers SlamJet™ se utilizaron en una planta de lixiviación de oro en México.

### **SlamJet™ Sparger Technology**

La flotación depende de la generación de burbujas de tamaño uniforme y su distribución homogénea en la celda de flotación. Estas burbujas proporcionan una superficie a la que las partículas hidrofóbicas se adhieren, para ser transportadas a la parte superior de la celda y hacia un canal de recolección. Añadir más aire a una celda de flotación generalmente se traduce en una mayor recuperación de minerales valiosos, siempre que la estabilidad general de la celda no se vea afectada negativamente. Demasiada inyección de aire puede provocar erupciones, o la ruptura de la fase de espuma, lo que disminuirá el rendimiento de recuperación.

En el proceso de lixiviación con cianuro para la mayoría de los minerales de oro, el oro metálico debe oxidarse durante el proceso de disolución según la siguiente reacción:



La tasa de disolución puede estar limitada por el transporte de cualquiera de los reactivos, cianuro u oxígeno, dependiendo de sus concentraciones relativas. En la práctica, es común operar el circuito de lixiviación con un exceso de cianuro, simplemente porque los niveles de oxígeno disuelto (OD) son demasiado bajos como resultado de un sistema de aireación ineficiente.

Por lo tanto, el tamaño de las burbujas es un factor importante tanto en el rendimiento de la flotación como en la lixiviación con cianuro. Al reducir el diámetro de las burbujas generadas, se aumenta significativamente la superficie total y, en consecuencia, aumenta la probabilidad de que una partícula entre en contacto con una burbuja en el proceso de flotación. De manera similar, las microburbujas generadas en un proceso de lixiviación aseguran una rápida transferencia de masa de oxígeno a la fase de pulpa. Sin embargo, con la mayoría de los generadores de burbujas, las burbujas producidas son considerablemente más grandes cuando se incrementa el flujo de aire.

El flujo de aire en los spargers SlamJet™ se ve principalmente afectado por la presión de entrada de aire y la restricción de la boquilla. Un estudio realizado por Verdugo et al. (2022) ha demostrado que la mayoría de los modelos de SlamJet™ (que varían en tamaños de boquilla) generan una distribución unimodal consistente de burbujas con un tamaño medio de 0.8 mm, excepto por la boquilla más pequeña SLJ-13 (1.3 mm), que produce una alta proporción de burbujas de más de 1 mm bajo condiciones de baja presión. También se observó que la distribución del tamaño de las burbujas se ve mínimamente afectada por la presión de entrada de aire ejercida sobre el sparger SlamJet™.

El sparger SlamJet™ diseñado por Eriez fuerza el aire a través de un orificio con un disparo de aire a alta presión. Para prevenir el retorno de fluidos hacia el sparger y la línea de suministro de aire, el sparger SlamJet™ está equipado con un mecanismo de autoajuste que acciona una válvula de aguja montada en una varilla. A medida que la presión de aire aumenta más allá del punto denominado 'presión de ruptura', la varilla se retrae, permitiendo un mayor flujo de aire a través del sparger. En caso de pérdida de presión de aire, la varilla se empuja hacia atrás para sellar el orificio de la boquilla.

El sparger SlamJet™ está diseñado para ofrecer simplicidad, durabilidad y fácil mantenimiento. Su diseño enfatiza los componentes reemplazables, incluyendo partes de alto desgaste como la punta de la varilla y la boquilla. Su puerto de inserción permite retirar el sparger mientras la celda está en operación, ahorrando tiempo valioso que normalmente se perdería al drenar la celda antes de la extracción del sparger.

## **METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

### ***Estudios de caso del Sparger SlamJet™***

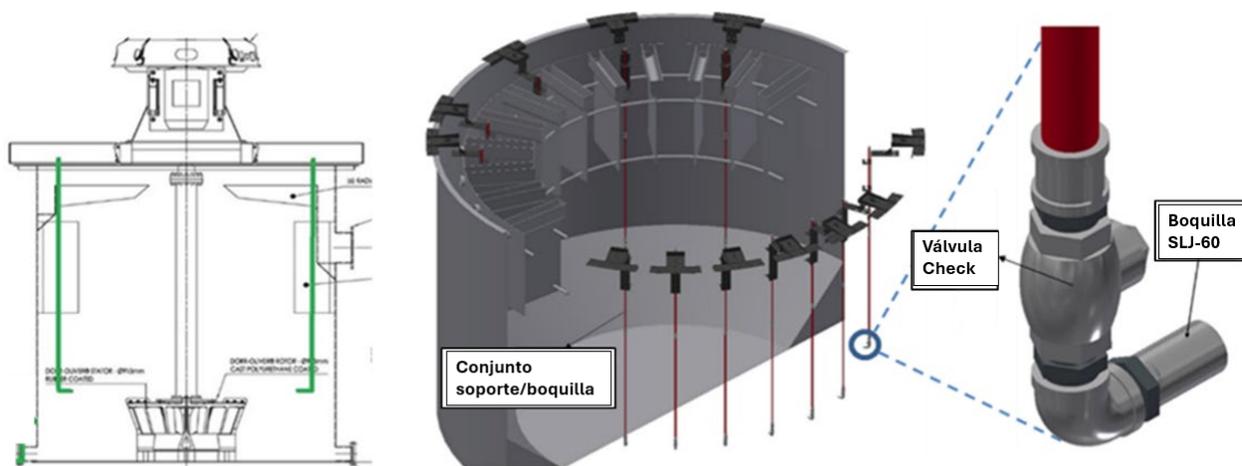
En este documento se presentan dos casos de estudio que destacan cómo se utilizaron los spargers SlamJet™ en diferentes aplicaciones, demostrando un cambio positivo en el rendimiento operativo.

#### ***Estudio de Caso 1 - Aumentos en la Recuperación en Celdas de Flotación Convencionales (Leños G, 2023)***

Se llevó a cabo una prueba en una planta de concentrado de oro y plata en México para aumentar la recuperación de minerales valiosos mediante la inyección de microburbujas de aire en las celdas de

flotación mecánica existentes en los circuitos de flotación primarios (Primarios y Agotativos) y secundarios (de Limpia). La planta procesa un mineral complejo que contiene tanto minerales oxidados de oro y plata como minerales sulfuros a aproximadamente 2,000 tpd. El circuito primario (Primarios y Agotativos) solo pudo alcanzar un máximo de 40% de recuperación de oro y 35% de recuperación de plata con 20 minutos de tiempo de residencia. Más del 50% de las pérdidas de oro y plata se encontraban en las fracciones finas de menos de 75  $\mu\text{m}$ .

Las pruebas en la planta se llevaron a cabo utilizando inyector de aire temporales, como se muestra en la Figura 1, para emular el diseño básico y el flujo de aire de un sparger SlamJet™. La configuración temporal permitió determinar los rangos de aire que se podían inyectar en las celdas tanque. Además, los inyector de aire eran fácilmente reubicables en otras celdas, lo que permitió evaluar diferentes configuraciones y determinar en qué puntos se podían lograr los mejores resultados.



**Figura 1** – Configuración e instalación de los inyectores de aires temporales en una celda de flotación convencional

### **Estudio de Caso 2 - Reducción en el Consumo de Oxígeno en la Aplicación de Lixiviación**

Una planta de lixiviación de oro y plata en México investigó el uso de spargers SlamJet™ en uno de sus tanques de lixiviación, después de experimentar problemas recurrentes de obstrucción con su colector de inyección de oxígeno existente, lo que causaba un suministro inconsistente de oxígeno debido a la falta de control de flujo. Además, el tanque de lixiviación existente utilizaba un colector en forma de octágono instalado en el fondo del tanque con 16 boquillas de un tamaño de agujero de  $\frac{1}{4}$ ". Estos agujeros de boquilla no tienen una válvula de aislamiento o de retención individual; por lo tanto, es necesario inyectar oxígeno de manera continua en el tanque para evitar la entrada de pulpa en el colector de octágono, incluso durante los paros de mantenimiento.

En este ensayo en planta, se instalaron ocho inyectores temporales a lo largo del perímetro de uno de los

tanques de lixiviación (Figura 2), con una configuración similar a la mostrada en la Figura 1.



**Figura 2** - Colector de gas existente y configuración temporal de las boquillas SlamJet™ dentro del tanque de lixiviación

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### ***Resultados del Estudio de Caso 1 - Aumentos en la Recuperación en Celdas de Flotación Convencionales (Leños G, 2023)***

Las pruebas del ensayo se llevaron a cabo durante un período de 26 días y en dos fases. En la fase 1, se añadieron cuatro spargers SlamJet™ a cada celda tanque primaria. En la fase 2, se añadieron tres spargers SlamJet™ a cada celda tanque primario y un sparger a cada celda tanque de limpia. Se recolectaron y equilibraron muestras de los concentrados y colas finales para calcular las recuperaciones. Los resultados arrojaron una desviación estándar razonable y estadísticamente concluyente, los cuales se resumen en la (Tabla 1) a continuación.

**Tabla 1** - Resumen de los resultados de recuperación con y sin SlamJet™

		Sin SlamJet™		Con SlamJet™ (Fase 1)				Con SlamJet™ (Fase 2)			
		Pérdidas en las colas(%)		Pérdidas en las colas (%)		Recuperación incremental (%)		Pérdidas en las colas [%]		Recuperación incremental [%]	
Malla	Tamaño (µm)	Plata	Oro	Plata	Oro	Plata	Oro	Plata	Oro	Plata	Oro
70	212	-	-	0.12	0.43	-	-	0.13	0.26	-	-
100	150	0.71	0.69	0.47	1.64	-	-	0.47	0.32	0.39	0.37
140	106	1.08	1.25	1.33	2.28	-	-	1.42	0.96	0.12	0.29
200	75	2.29	2.50	4.27	3.71	-1.98	-1.21	2.29	1.84	0.45	0.67
270	54	1.41	1.96	1.50	1.70	-0.09	0.27	1.18	1.35	0.06	0.61
325	45	0.39	0.41	0.45	0.75	-0.06	-0.34	0.21	0.34	0.05	0.07
400	38	0.81	1.42	0.70	0.79	0.11	0.63	0.56	0.78	0.03	0.65
-400	-38	10.73	11.84	7.72	8.34	3.01	3.50	7.29	8.15	2.58	3.68
<b>SUM (Recuperación Incremental)</b>						<b>1</b>	<b>3</b>			<b>4</b>	<b>6</b>

Las figuras 3a y 3b muestran las recuperaciones de oro y plata por tamaños de partículas en el circuito de flotación con y sin los spargers SlamJet™. Los mejores resultados se lograron en la fase 2 de las pruebas en planta, evidenciando un aumento en la recuperación en todos los tamaños de partículas, y notablemente en la fracción de tamaño -75 µm.

Basado en el exitoso ensayo en planta, que demostró aproximadamente un aumento del 6 % en la recuperación de oro y del 4 % en la recuperación de plata, la operación decidió implementar los spargers SlamJet™ de Eriez siguiendo la configuración utilizada en la fase 2 del ensayo, como se muestra en la Figura 4 a continuación.

### **Resultados del Estudio de Caso 2 - Reducción en el Consumo de Oxígeno en la Aplicación de Lixiviación**

Se llevaron a cabo pruebas de ensayo en planta, con y sin la configuración temporal de los spargers SlamJet™, para recopilar datos estadísticos de dos poblaciones emparejadas durante un período de 50 días por prueba. Los resultados de las pruebas se evaluaron utilizando un análisis estadístico de prueba-T para determinar los beneficios de los spargers SlamJet™.

Las Figuras 5, 6 y 7 ilustran la extracción de oro, la extracción de plata y el consumo de oxígeno durante los períodos de prueba, con y sin los inyectoros temporales SlamJet™.

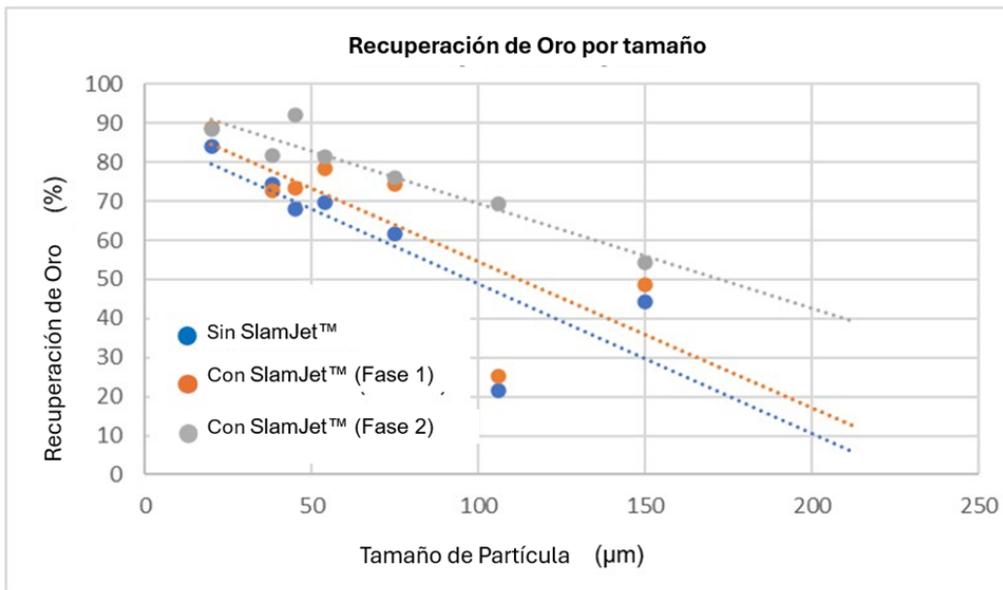


Figura 3a – Recuperación de oro por tamaño con y sin los spargers SlamJet™

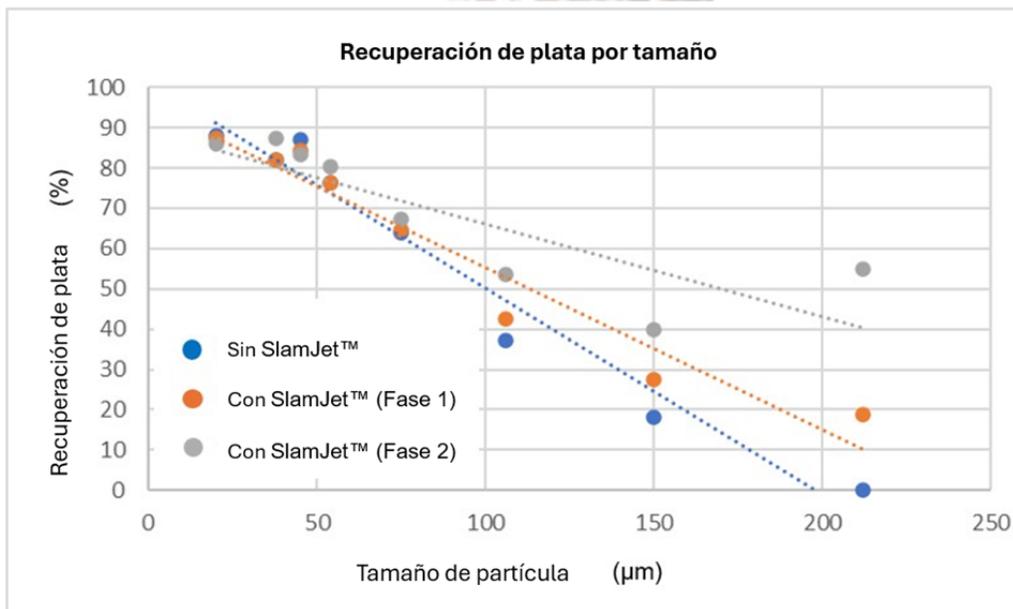


Figura 3b – Recuperación de plata por tamaño con y sin los spargers SlamJet™

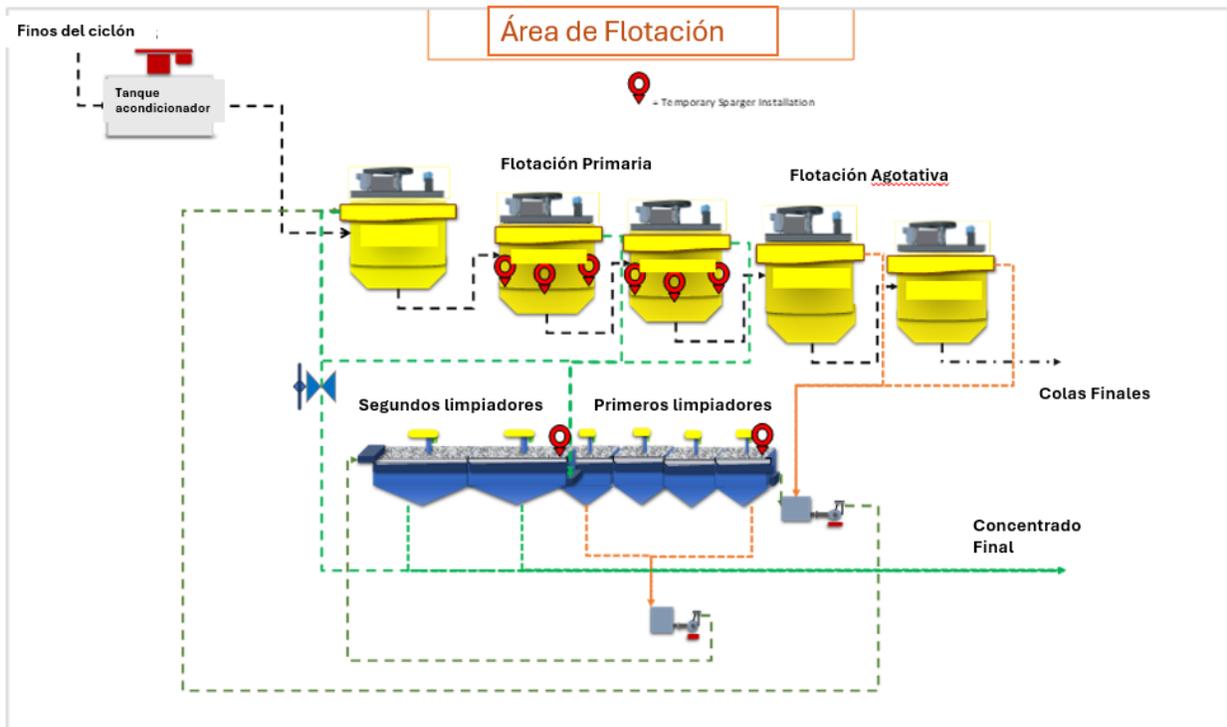


Figura 4 - Diagrama de flujo del circuito de flotación y ubicación de instalación de los spargers SlamJet™

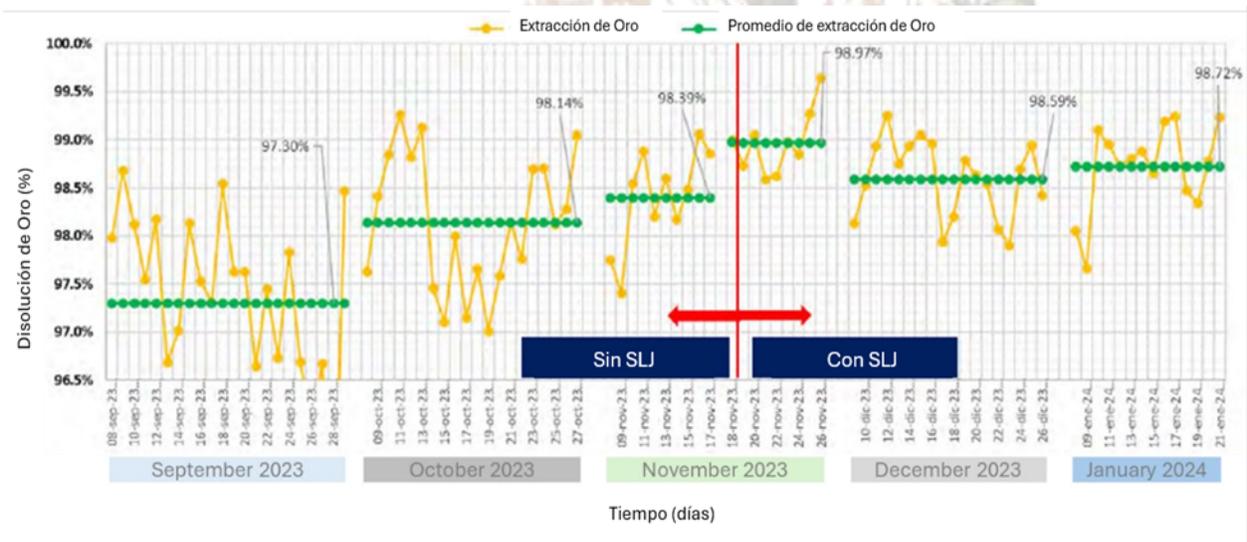


Figura 5 - Extracción de oro con y sin la configuración SlamJet™

La extracción promedio de oro (Figura 6) fue más alta en todos los períodos con los spargers SlamJet™ en comparación con aquellos sin ellos. Se observó un aumento significativo del 0.9% el 18 de noviembre, cuando los spargers SlamJet™ estaban en funcionamiento, lo que se tradujo en una recuperación de oro del 98.7% en su punto máximo.



Figura 6 - Extracción de plata con y sin la configuración SlamJet™

Por el contrario, la Figura 7 muestra que la extracción de plata se redujo en un 0.8% cuando se utilizaron los spargers SlamJet™.

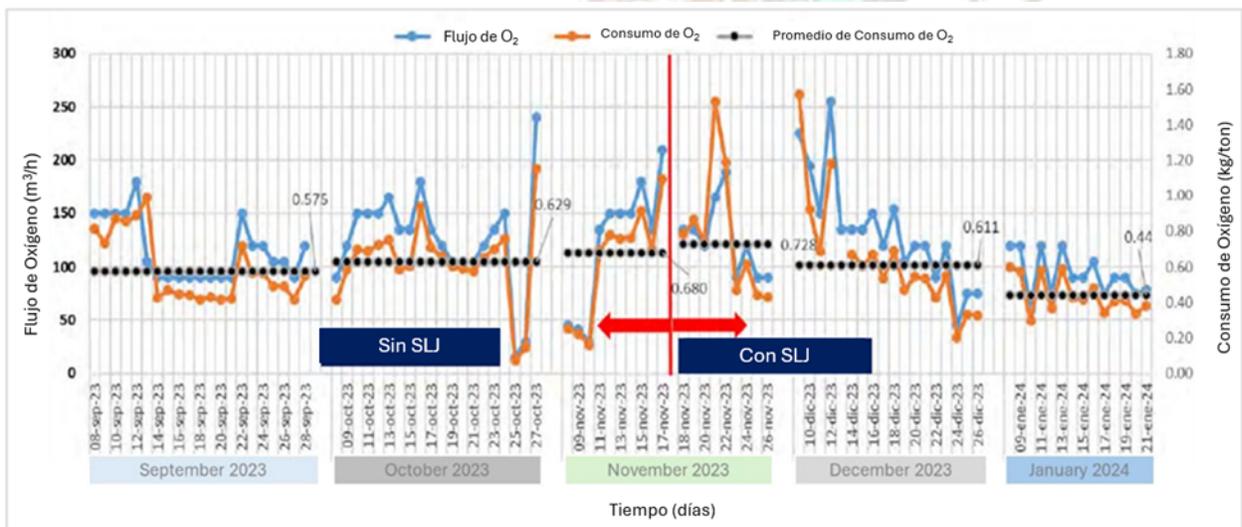


Figura 7 - Caudal de gas y consumo de oxígeno con y sin la configuración SlamJet

TM

El consumo promedio de oxígeno mostró una tendencia a la baja en cada período de prueba sucesivo con los spargers SlamJet™. El consumo más bajo de oxígeno logrado con el uso de SlamJet™ fue de 0.44 kg/ton, en comparación con 0.58 kg/ton sin SlamJet™. Sin embargo, el análisis estadístico de la prueba-T pareada muestra que no hay una diferencia significativa en el consumo de oxígeno con o sin SlamJet™.

Además de las extracciones de oro y plata y el consumo de oxígeno, se recopilaron y evaluaron otras variables del proceso, como las toneladas de concentrado producidas, el consumo de NaCN, el pH y el nivel de oxígeno disuelto, utilizando el análisis de la prueba t pareada. La Tabla 2 resume los resultados del análisis estadístico y muestra que hubo varias mejoras estadísticamente significativas al utilizar los spargers SlamJet™ en el tanque de lixiviación.

**Tabla 2 - Significancia estadística de los resultados de la prueba con y sin spargers SlamJet™**

#	Parámetro	Unidad	Promedios		Cambio (%)	Probabilidad t- Test	Estadísticamente significativo (Y/N)
			Sin SlamJet™	Con SlamJet™			
5.1	Concentrado	tpd	279.32	255.25	-8.62	> 0.06961	N
5.2	NaCN	ppm	15,684.33	14,187.38	-9.54	< 0.0001	Y
5.3	pH	-	11.63	11.67	0.34	> 0.59802	N
5.4	Oxígeno disuelto	ppm	15.14	16.85	11.29	> 0.31413	N
5.5	Consumo de Oxígeno	kg/ton	0.60	0.62	2.66	> 0.76119	N
5.6	Extracción de Oro	%	97.82	98.73	0.93	< 0.0001	Y
5.7	Extracción de Plata	%	97.29	96.45	-0.84	> 0.00241	Y

Las mejoras más significativas fueron (1) la reducción en la dosificación de NaCN y (2) el aumento en la extracción de oro. Se estimó que estos beneficios tienen un valor superior a 500,000 USD por año.

Otro valor añadido para esta planta al implementar los spargers SlamJet™ es el diseño de su mecanismo de cierre automático. Durante los paros programados, el operador generalmente se veía obligado a mantener el flujo de aire a través del colector octagonal para evitar que el fluido ingresara al colector y obstruyera sus boquillas. Al reemplazar el método actual de inyección de gas con el SlamJet™, se estima que se ahorran aproximadamente 100,000 USD al año al no tener que mantener el flujo de aire durante estos períodos de paro.

## CONCLUSIONES.

El sparger SlamJet™ de Eriez ha desarrollado una reputación de confiabilidad y rendimiento en operaciones de procesamiento de minerales a nivel global. El SlamJet™ se utiliza comúnmente en celdas

columna de flotación, pero su diseño permite también adaptarlo a las necesidades específicas de otras aplicaciones.

Cómo se cubrió en este documento, los spargers SlamJet™ demostraron su capacidad para proporcionar beneficios y mejoras significativas en el rendimiento al usarse como inyector de gas suplementarios y/o alternativos en circuitos de flotación y lixiviación. La generación de burbujas de aire finas mejoró la recuperación de oro y plata en una planta de flotación en México, y también mostró una mejor disolución de oro y una disminución en el consumo de NaCN en una planta de lixiviación también ubicada en México.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a los organizadores del XXI Encuentro sobre Procesamiento de Minerales, a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, al Instituto de Metalurgia y SYENSQO, por la oportunidad que nos brindan de compartir estos avances. Agradecemos a las empresas Goal Tek y Eriez por su compromiso con la innovación en el desarrollo de tecnologías de separación y concentración de minerales.

## REFERENCIAS

Eriez (2024), *SlamJet™ Spargers website*, accessed 29 February 2024, <https://www.eriez.com/NA/EN/Flotation/SlamJet-Spargers.htm>

Leaños G, N., Valenzuela, S., & Lopez, O., (2023, October 23-27). *Inyección de Microburbujas para Incrementar la Recuperación de valores en un Circuito de Flotación Convencional* [Poster presentation]. XXXV International Mining Convention Mexico 2023, Acapulco, Mexico.

Verdugo, T., Valdés, F., Meléndez, M., Maldonado, M., & Baeza, J. (2022, October 5-7). *Gas dispersion characterization of Eriez SlamJet™ sparging technology* [Paper presentation]. 2022 Procemin Geomet – 18th International Conference on Mineral Processing and Geometallurgy, Online Conference.

