

## INFLUENCIA DE LA ALTURA DEL AIREADOR EN COLUMNAS DE FLOTACIÓN

Víctor Ciribeni<sup>1</sup>; Juan Yianatos<sup>2</sup>; Pedro Sarquís<sup>1</sup>; Leonardo Borella<sup>1</sup>

1-Instituto de Investigaciones Mineras - Departamento de Ingeniería de Minas  
Universidad Nacional de San Juan, Av. Libertador San Martín 1109 (oeste)  
(5400) San Juan, Argentina, T.E. 0264 4220556  
[ciribeni@unsj.edu.ar](mailto:ciribeni@unsj.edu.ar) [psarquis@unsj.edu.ar](mailto:psarquis@unsj.edu.ar)

2-Depto. de Procesos Químicos - Universidad Técnica Federico Santa María - Valparaíso –  
Chile.  
[juan.yianatos@usm.cl](mailto:juan.yianatos@usm.cl)

### RESUMEN

Se estudió la influencia en la cinética de la flotación en columnas, de la variación de la altura de colección de 1,5 m. a 2,5 m., mediante el desplazamiento del aireador con respecto al fondo. En estos equipos de flotación se detecta habitualmente una proporción importante de aire arrastrado en el flujo de colas y por lo tanto de mineral flotable.

Se obtuvieron las distribuciones de tiempo de residencia (DTR) y los respectivos coeficientes de dispersión de las diferentes configuraciones, mediante la técnica de estímulo respuesta, empleando KCl como trazador. Estos ensayos se hicieron en una columna de 82 mm de diámetro, empleando agua como fase líquida y aire como fase gaseosa.

Los índices cinéticos y las recuperaciones, obtenidos con los ensayos de flotación realizados con un mineral de fluorita, se emplearon para relacionar los tiempos de residencia y coeficientes de dispersión de las determinaciones de DTR.

Se presentan los resultados obtenidos y se hace el análisis de las relaciones que vinculan los parámetros hidrodinámicos, cinéticos y metalúrgicos determinados experimentalmente.

**Palabras claves** flotación, columnas, cinética, DTR.

## 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los temas más críticos es la altura de las columnas. Si fuera posible disminuir substancialmente ese parámetro, se lograría un importante ahorro en costos de operación y mantenimiento.

Autores como Ityokumbul y otros (1995; 1996) opinan que, en muchos casos, no se justifica la altura de la zona de colección. Se basan en experiencias realizadas en columnas industriales donde se modificó la altura de la zona de colección subiendo los inyectores de aire hasta las proximidades de la entrada de alimentación, observando que la recuperación no variaba en forma significativa. Sin embargo, no se puede afirmar que el tiempo de residencia, que determina la recuperación, se deba exclusivamente al volumen del segmento de columna que se encuentra por encima de los inyectores de aire, sin tener en cuenta lo que ocurre debajo de estos por efecto de mezclado.

Además, en trabajos anteriores de Yianatos y otros (1994), determinó la presencia de cantidades importantes de burbujas de aire en el flujo de colas, mostrando indicios que debajo de los inyectores de aire, en algunas condiciones, se podría obtener un tiempo de residencia adicional por transporte de burbujas y pulpa asociado al mezclado y arrastre.

Los aireadores se encuentran ubicados en la parte inferior de las columnas, a la zona comprendida entre estos y el fondo de la celda denominaremos en adelante "zona de inyección de aire". Esta no ha sido objeto de estudios que pongan de manifiesto su influencia en la zona de colección.

Durante el estudio se obtuvieron las curvas de distribución de tiempos de residencia mediante las que se estiman los parámetros característicos: tiempo de residencia media y el número de dispersión, variando la altura de un aireador de tela con respecto al fondo y se estableció su relación con los resultados mineralúrgicos, bajo las mismas condiciones, mediante ensayos de flotación para determinar los índices cinéticos de un mineral de fluorita, completando los parámetros necesarios para simular los resultados obtenidos experimentalmente.

## 2. PARTE EXPERIMENTAL

El diagrama de la figura 1 muestra el equipo utilizado para las mediciones de las curvas DTR con la columna de 82 mm. de diámetro. El agua se alimenta desde un tanque de acero inoxidable de 100 lts., con una bomba peristáltica, Masterflex WZIR051 y un caudalímetro electrónico marca Kobold modelo KFG 1008 mide el caudal.

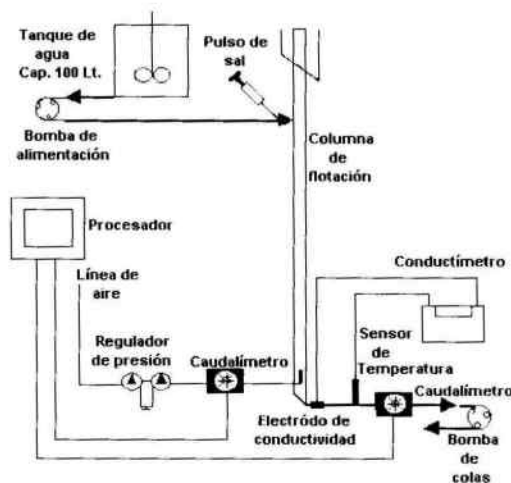


Figura 1. Diagrama de flujo de la columna para la medición de curvas DTR.

El aire comprimido se controla mediante un regulador de presión, manómetro, caudalímetro electrónico Kobold KFF 1000 y válvula, ingresando a la columna mediante aireador de tela de filtro de 20 mm de diámetro por 200 mm de longitud. Las colas se manejan con una bomba peristáltica Masterflex WZIR051 y variador de velocidad.

Se utiliza un sistema compuesto por una PC equipada con plaqueta de adquisición de datos ADQ12 para registrar los caudales de aire y agua. La conductividad se mide con un electrodo para caudales continuos, (Cte. = 1.0 rango óptimo 10 a 2000 Micro-siemens) conectado a un conductímetro Accumet model 50, para 60 registros.

## 2.1. Determinación de las curvas de distribución de tiempos de residencia (DTR)

Se empleó el método de impulso-respuesta para las configuraciones de columna mostradas en la figura 2. Este consiste en inyectar, en forma idealmente instantánea, una dosis de sustancia de comportamiento similar al medio que circula en el recipiente y que pueda medirse a la salida. Según Xu y Finch (1991), se supondrá que: 1. La inyección del trazador no provoca disturbios en la corriente; 2. La circulación es uniforme en todo el eje de la columna tal que la velocidad del trazador es constante; 3. La concentración del trazador es una función de la posición en el eje y el tiempo; 4. El trazador se comporta igual que la fase con que circula (p.e. no hay segregación) y 5. El coeficiente de dispersión axial, es constante para las condiciones de operación.

Se utilizó una solución concentrada de 200 g/l. de KCl, calidad pro-análisis. En el pulso se emplearon solo 5 ml conteniendo 1000 mg de KCl, aplicados en el conducto de alimentación de la columna.

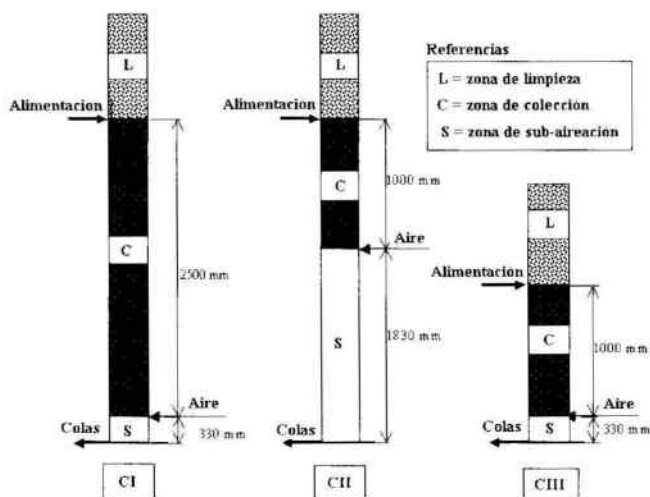


Figura 2. Configuraciones estudiadas en los ensayos DTR y de cinética de flotación.

## 2.2. Procesamiento de datos

Con la conductividad absoluta y el factor del electrodo (1,7665) se obtiene la concentración de KCl en mg/l y con la ecuación (1) se determina la cantidad de sal de la curva.

$$C = \sum_0^t c(t) * \Delta t, \text{ luego: } CS = C * Q \quad (1)$$

donde: C = Área bajo la curva de concentraciones

c(t) = concentraciones de sal en el momento t. [mg/l]

t = tiempo [m]  
 CS = cantidad de sal calculada, [mg]  
 Q = caudal del líquido, [l/m]

El tiempo medio de residencia ( $\tau$ ) se determina de las concentraciones y los tiempos mediante la ecuación (2).

$$\tau = \frac{\sum_0^t C(t) * t}{\sum_0^t C(t)} \quad (2)$$

Finalmente, con los valores experimentales se calcula la varianza de E con la ecuación:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_0^t C(t) * t^2}{\sum_0^t C} - \left( \frac{\sum_0^t C(t) * t}{\sum_0^t C} \right)^2 \quad (3)$$

que permite determinar Nd, número de dispersión, mediante la varianza relativa calculada con la ecuación (4).

$$\sigma_r^2 = \frac{\sigma^2}{\tau_m^2} \quad (4)$$

y se procede a realizar cálculos iterativos con la ecuación (5) considerando el recipiente de extremos cerrados:

$$\sigma_r^2 = 2N_d - 2N_d^2 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{1}{N_d}\right) \right] \quad (5)$$

### 2.3. Condiciones de operación de los ensayos de flotación

La velocidad superficial de gas Jg (aire) se varió entre 1,1 cm/s y 1,9 cm/s, mediante caudales de aire de 2,5 lt/m y 4,0 lt/m a 1,5 kg/cm<sup>2</sup> de presión para dar 3,6 l/m y 6,0 l/m respectivamente a presión atmosférica.

La velocidad superficial de agua, se varió entre 0,6 cm/s y 0,7 cm/s con caudales registrados a la salida de colas con el caudalímetro, luego del electrodo de conductividad y el sensor de temperatura, no se utilizó agua de lavado.

Se acondicionó durante 5 minutos con 300 g/t de oleato de sodio como colector de fluorita. Se utilizó 15 ppm de espumante 2147 de Cytec, para conservar un tamaño uniforme de burbujas entre 1 y 2 mm de diámetro.

### 2.4. Determinación de los índices cinéticos

Se sigue el procedimiento sugerido por Dobby y Finch (1986) y Finch and Dobby (1990), en columnas cortas (Hc = 2 a 4 m) en ciclos de flotación, iniciando el primero con la mena preparada y estabilizada la operación, se extraen muestras simultaneas de concentrado y colas. El equipo es el mismo de las determinaciones DTR de la figura 1.

Con la recuperación acumulada ( $R$ ) y una estimación de la recuperación máxima posible, denominada  $RI$ , se grafica la ecuación (6) respecto al tiempo de flotación cuya pendiente es  $k$ , la constante de velocidad específica de flotación.

$$\ln \frac{RI}{RI - R} \quad (6)$$

Finalmente, la ecuación (7) permite simular la recuperación. Instantánea.

$$R = RI * [1 - \exp(-k * t)] \quad (7)$$

### 3. RESULTADOS OBTENIDOS

La información de las curvas DTR fue procesada para obtener los parámetros: Tiempo medio de residencia ( $\tau_i$ ) y Número de dispersión ( $Nd_i$ ) del líquido. En la tabla I, se muestran las condiciones de operación de los ensayos: gas holdup ( $\epsilon_g$ ) y las velocidades superficiales del gas ( $J_g$ ) y el líquido ( $J_l$ ).

**Tabla I.** Condiciones de operación de la columna para las determinaciones DTR.

Condición	$J_g$ [cm/s]	$J_l$ [cm/s]	Configuración I		Configuración II y III	
			$\epsilon_g$ [%]	$u_i$ [cm/s]	$\epsilon_g$ [%]	$u_i$ [cm/s]
1	1,1	0,6	8,5	0,69	11,7	0,71
2	1,6	0,6	11,1	0,71	18,0	0,77
3	1,9	0,6	15,3	0,75	21,8	0,81
4	1,1	0,7	9,0	0,76	12,1	0,79
5	1,6	0,7	13,2	0,80	18,3	0,85
6	1,9	0,7	15,7	0,83	22,1	0,89

En la tabla II, se muestran los números de dispersión obtenidos con el modelo de extremos cerrados a partir de los datos experimentales de las curvas DTR, para todas las condiciones estudiadas y las tres configuraciones.

**Tabla II.** Números de dispersión determinados con el modelo de extremos cerrados.

Configuración	$J_l$ [cm/s]	$J_g$ [cm/s]		
		1,1	1,6	1,9
CI	0,6	0.31550	0.32473	0.38330
	0,7	0.32240	0.29950	0.26710
CII	0,6	0.05600	0.07110	0.06005
	0,7	0.04442	0.05263	0.05696
CIII	0,6	0.86100	1.11750	1.29780
	0,7	0.57800	0.49170	0.55030

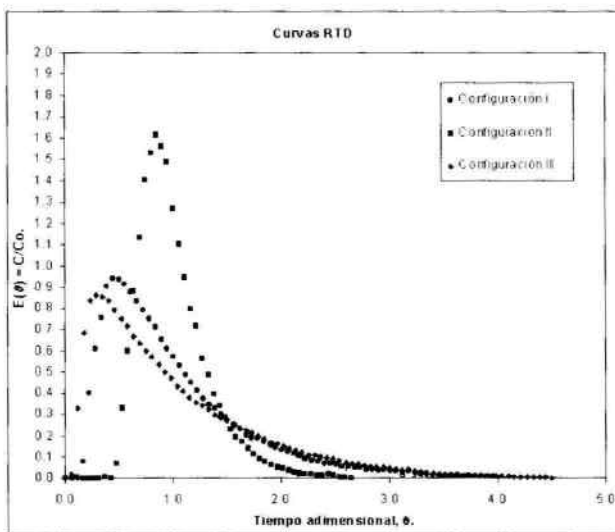


Figura 3. Curvas DTR para todas las configuraciones para  $J_g = 0.7 \text{ cm/s}$  y  $J_l = 1.6 \text{ cm/s}$ .

Los tiempos de residencia, descontado los tiempos de retardo de la zona de sub-aireación, obtenidos de los datos, se muestran en la tabla III. En la misma se ve la semejanza entre tiempos de residencia de la zona de colección en las configuraciones CII y CIII.

Tabla III. Tiempos de residencia en minutos obtenidos de las determinaciones DTR.

Configuración	$J_l$ [cm/s]	$J_g$ [cm/s]		
		1,1	1,6	1,9
CI	0,6	5,92	5,61	5,30
	0,7	5,42	5,18	4,78
CII	0,6	2,20	2,12	2,05
	0,7	2,02	1,90	1,83
CIII	0,6	2,33	2,14	2,00
	0,7	2,18	2,09	1,97

Para determinar los índices cinéticos ( $k$  y  $RI$ ), necesarios para simular el funcionamiento en las tres configuraciones, se realizaron ensayos de flotación de una mena de fluorita. Las condiciones de operación se dan en tabla IV y son comparables a las de los ensayos DTR.

Tabla IV. Condiciones de operación de los ensayos de flotación de fluorita.

Caudal másico de sólidos [kg/min.]	% sólidos en peso	Caudal másico de pulpa [kg/min.]	Caudal de agua [l/min.]	Densidad pulpa [g/cc]	Caudal de aire [l/min.]
0,4	15,0	2,7	2,3	1,110	5,5

Los resultados obtenidos en todas las configuraciones se muestran en la tabla V, se ve la similitud entre las configuraciones CII y CIII, especialmente en los dos primeros ciclos. En la misma tabla, se destacan los resultados logrados en el primer ciclo de la configuración CI, superando en ley y recuperación a las restantes.

**Tabla V.** Resultados mineralúrgicos alcanzados durante la flotación de fluorita, en las configuraciones estudiadas

Ciclo	Configuraciones					
	CI		CII		CIII	
	Ley % CaF <sub>2</sub>	Recuperación acumulada %	Ley % CaF <sub>2</sub>	Recuperación acumulada %	Ley % CaF <sub>2</sub>	Recuperación acumulada %
I	79.3	96.4	75.5	88.2	75.2	87.6
II	34.9	98.1	50.3	96.3	47.1	96.4
III	24.0	98.3	34.8	97.9	24.9	97.4

En la tabla VI se resumen los parámetros hidrodinámicos y cinéticos de los ensayos de flotación de fluorita para las configuraciones estudiadas, se puede ver que  $k$  para la configuración C1 es muy inferior a las de las otras.

**Tabla VI.** Parámetros determinados durante los ensayos flotación de fluorita.

Configuración	Jg	Jsl	Tl	Tp	Nd <sub>p</sub>	Rl	k
CI	1.74	0.72	4.89	4.77	0.24225	98.30	0.7204
CII	1.74	0.73	1.79	1.75	0.55455	98.10	1.1902
CIII	1.74	0.74	1.77	1.73	0.54853	97.50	1.3202

#### 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Con la razón del tiempo de residencia de la partícula en la configuración I con respecto a la II (R I/II) y de la I a la III (R I/III), se obtuvo la constante de velocidad de flotación  $k$ , para la configuración I, relativa al tiempo de residencia en las configuraciones II y III, que se muestran en tabla VII. En esta se ve que el valor de  $k$  afectado por la razón de los tiempos de residencia, alcanza el mismo orden que los obtenidos para las configuraciones CII y CIII.

**Tabla VII.** Comparaciones entre las configuraciones I/II y I/III.

Denominación	Ciclo	Razón de tiempos de residencia	Variación respecto de la razón de Hc [%]	K [l/seg]	Razón de recuperación	Variación en recuperación [%]
R I/II	1	2.66	5.9	1.1944	1.09	8.52
R I/II	2	2.68	6.9	1.2138	1.02	1.82
R I/II	3	2.85	12.2	1.3318	1.00	0.37
<b>Promedio I/II</b>		<b>2.73</b>	<b>8.4</b>	<b>1.2467</b>		
R I/III	1	2.74	8.8	1.2549	1.10	9.15
R I/III	2	2.73	8.5	1.2486	1.02	1.75
R I/III	3	2.80	10.8	1.2996	1.01	0.89
<b>Promedio I/III</b>		<b>2.76</b>	<b>9.4</b>	<b>1.2677</b>		

Los resultados obtenidos durante los ensayos de flotación no concuerdan con las afirmaciones de autores como Ityokumbul (1996), Ounpuu y Tremblay (1991), Perez Garibay y otros (2002), Uribe-Salas y otros (2003), quienes determinaron que al aumentar la altura de colección la recuperación no presenta cambios importantes.

En el ascenso de las burbujas a la interfase pulpa-espuma, baja la presión y se incrementa el volumen y superficie de burbuja para la adhesión de partículas hidrófobas, adelgazando el espesor de la película interfacial aire-partículas y el mayor volumen de burbuja disminuye la densidad de la burbuja cargada aumentando la capacidad de carga.

En los ensayos de flotación de fluorita, la recuperación obtenida durante el primer ciclo con la configuración I (H=2.5 m) fue aproximadamente 8 % mayor al primer ciclo de las otras, en el segundo ciclo la recuperación escasa por el agotamiento del mineral flotable, mientras que para las configuraciones II y III esta alcanzó más del 8 %.

Para obtener los índices cinéticos sería necesario un metro de altura de colección, sin embargo, la proyección de los ciclos de flotación indicaría que se puede obtener recuperación adicional prolongando la zona de colección más allá de 2,5 metros, si la mayor parte de la flotación se produce en la zona de alimentación, siempre que se cuente con superficie de burbuja libre para recolectar aquellas partículas que no alcanzaron a adherirse en el primer instante.

La mejor ley obtenida en el primer ciclo en CI se puede atribuir al mayor recorrido de las burbujas cargadas ayudando a depurarla, con los movimientos bruscos y choques entre estas, dejando caer las partículas no-flotables atrapadas mecánicamente. Si la zona de colección es muy corta la burbuja se satura rápidamente y esto no ocurre.

Entonces, si hay superficie de burbujas suficientes para transportar las partículas flotables, el tiempo de residencia debe ser el necesario para un exitoso contacto partícula-burbuja. Aunque, para un óptimo rendimiento, la altura de la zona de colección debe ser tal que el proceso de colección y transporte sea acompañado del crecimiento de la burbuja, con mayor superficie libre que evite su saturación y aumento de la densidad del agregado partícula-burbuja.

## 5. CONCLUSIONES

Del estudio de la zona de sub-aireación se obtiene como conclusión final que:

- a - La reducción de la altura de la zona de colección afecta negativamente a la ley y recuperación
- b - Los resultados de flotación y las determinaciones hidrodinámicas a partir de las curvas DTR, permiten concluir que la zona de sub-aireación no ejerce influencia sobre la zona de colección.
- c - La altura de colección debe ser suficiente para permitir la efectiva adhesión de la partícula y la burbuja, además de proveer un cambio de presión suficiente que permita generar la cantidad de superficie de burbuja, fresca y libre, para la adherencia de las partículas que ingresan a la zona, evitando su saturación.

Finalmente, se advierte que estas conclusiones corresponden a un estudio a escala piloto, en columnas a escala industrial los efectos del mezclado y la zona de sub-aireación pueden ser más significativos.

## 6. REFERENCIAS

- DOBBY, G.S. and FINCH J.A.. *Flotation Column scale-up an modeling*. CIM Bulletin, May 1986. pp 89-96.
- FINCH, J.A AND DOBBY, G.S.. *Column Flotation*. Pergamon Press. 1990.
- ITYOKUMBUL, M.T.; SALAMA, A.I.A.; MIKHAIL, M.W. and TAWHEEL, A.M. *A study of axial backmixing in a 0,76-m flotation column*, Minerals and Metallurgical Processing, 1995.
- ITYOKUMBUL, M.T. *What really determines the height in column flotation?*, Minerals and Metallurgical Processing, 36-40, 1996.
- OUNPUU, M AND TREMBLAY, R. *Investigation into the effect of column height on the 1200 mm diameter column at Matagami*. Proceeding Int. Conf. On column flotation , Sudbury Ontario, Canada. 1991.
- PÉREZ GARIBAY, R.; GALLEGOS P.M, URIBE S A., NAVA F. A. *Effect of Collection Zone Height and Operating Variables on Recovery of Overload Flotation Columns*. Minerals Engineering, 15 (2002) 325 - 331.
- URIBE-SALAS, A; DE LIRA-GOMEZ, P.; PÉREZ- GARIBAY, R.; NAVA-ALONSO, F.; MAGALLANES-HERNÁNDEZ L. and LARA-VALENZUELA C.. *Overloading of gas bubbles in column flotation of coarse particles and effect upon recovery*. Int. J. of Mineral Processing, 71 (2003) 167-178.
- XU M. and FINCH J.A.. *The Axial Dispersion Model in Flotation Column Studies*. Minerals Engineering, Vol. 4 N° 5/6, pp. 553 - 562, 1991.
- YIANATOS, J.B.; BERGH, L.G.; DURÂN, O.U.; DÍAZ, F.J. and HERESI, N.M. *Mesurement of residence time distribution of the gas phase in flotation columns*. Minerals Engineering. Vol. 7 Nos 2/3, pp. 333 - 344, 1994.