



## II CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA AMBIENTAL EN SISTEMAS ACUÁTICOS, CChIASA

### RESISTENCIA DE FLÓCULOS DE HIERRO Y ALUMINIO FORMADOS EN DRENAJE ÁCIDO

JAVIER RIVERA<sup>1</sup>  
GUILLERMO ARCE<sup>2</sup>  
PABLO PASTÉN<sup>2,3</sup>  
PAULA GUERRA<sup>1</sup>

#### RESUMEN EXTENDIDO

El drenaje ácido ( $\text{pH} < 6$ ), formado por la exposición de minerales sulfurados a oxígeno y agua, contamina aguas superficiales y subterráneas con aportes de metales (Fe y Al, entre otros), elementos trazas (As, B), y aniones ( $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ). Dentro de un rango  $3 < \text{pH} < 6$  ocurre la formación de fases de oxi/hidróxidos de Fe y Al, compuestos amorfos de alta superficie específica que retienen elementos como arsénico, presente en ríos del norte de Chile (Guerra et al., 2016). Estas partículas de Fe y Al están expuestas a las condiciones hidrodinámicas del sistema fluvial, potencialmente causando su ruptura y liberando partículas finas con altas concentraciones de elementos tóxicos al seno del fluido en lugar de sedimentar en el lecho (Contreras et al., 2015). De esta manera, el destino y transporte de elementos tóxicos depende tanto de las condiciones químicas como físicas del medio. Por esto, es importante evaluar bajo qué condiciones se forman partículas reactivas capaces de resistir esfuerzos de corte, a fin de profundizar sobre las interacciones químicas y físicas que regulan el transporte de partículas contaminadas en medios acuáticos.

El objetivo de este trabajo es evaluar la resistencia de flóculos de hierro y aluminio formados en aguas ácidas, a distintos pH y concentración de metales ante un esfuerzo de corte constante (proporcional a 250 rpm). Para ello: (i) se prepararon aguas ácidas sintéticas utilizando ácido sulfúrico para aportar  $1500 \text{ mg L}^{-1}$  de sulfato, cloruro férrico para aportar 25 ó  $50 \text{ mg L}^{-1}$  de ión férrico, sulfato de aluminio para aportar 25 ó  $50 \text{ mg L}^{-1}$  de aluminio, e hidróxido de sodio para modificar pH a 4,5 ó 5,5 (Tabla 1), (ii) se midió la distribución de tamaño de partícula (DTP) inicial utilizando transmisometría in-situ de dispersión láser (LISST 100X, Sequoia Inc.), (iii) se agitaron las soluciones en un equipo de Jar Test para ruptura de flóculos bajo

---

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Universidad Técnica Federico Santa María  
[paula.guerra@usm.cl](mailto:paula.guerra@usm.cl)

<sup>2</sup>Centro de Desarrollo Urbano Sustentable CEDEUS

<sup>3</sup>Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile  
[Chile/ppasten@ing.puc.cl](mailto:ppasten@ing.puc.cl)



condiciones controladas (velocidad de agitación de 250 rpm), y (iv) se volvió a medir la DTP. Para calcular la fuerza de flóculo, se utilizó el factor de fuerza (Jarvis et al., 2005):

$$\text{Factor de fuerza} = \frac{d(2)}{d(1)} \times 100 \quad (1)$$

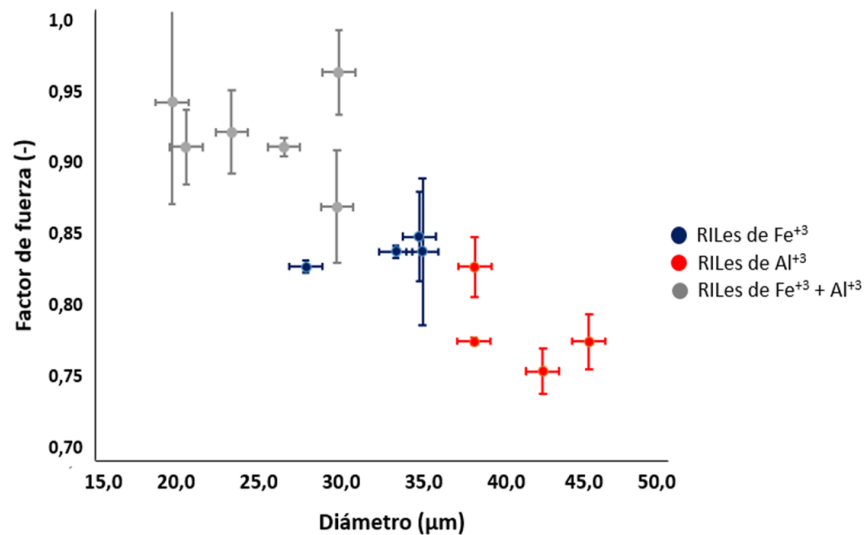
Donde d(1) corresponde al diámetro medio inicial, y d(2) corresponde al diámetro medio después de la ruptura.

**Tabla 1:** Aguas ácidas preparadas a distintos pH y concentraciones de Fe<sup>+3</sup> y/o Al<sup>+3</sup>.

RIL	Concentración mg/L		pH
	Fe <sup>+3</sup>	Al <sup>+3</sup>	
Al <sup>+3</sup>	0	25	4,5
			5,5
	0	50	4,5
			5,5
Fe <sup>+3</sup>	25	0	4,5
			5,5
	50	0	4,5
			5,5
Al <sup>+3</sup> + Fe <sup>+3</sup>	25	25	4,5
			5,5
	50	50	4,5
			5,5
	25	50	4,5
			5,5
	50	25	4,5
			5,5

Los flóculos de hierro presentaron mayores factores de fuerza que los de aluminio, con valores promedios de 0,84 y 0,79, respectivamente (ver Figura 1). Este factor aumentó aún más cuando se combinaron ambos metales, llegando a valores de hasta 0,96, con un promedio de 0,92. Estos valores son altos en comparación a la resistencia de flóculos de hierro y aluminio encontrada en otros sistemas a pH neutro (agua residual y agua potable), que no supera 0,51 (Jarvis et al., 2005). Esto sugiere que el aporte de cargas positivas del medio ácido (H<sup>+</sup>) mejoran la resistencia de flóculos; esto también explicaría por qué las soluciones con presencia de Fe<sup>+3</sup> y Al<sup>+3</sup> también presentaron flóculos más resistentes comparado con soluciones que contienen sólo Fe<sup>+3</sup> o Al<sup>+3</sup>. Adicionalmente, se observó que a mayor diámetro medio, menor tiende a ser la fuerza de flóculo, como es el caso de Al.

Esta investigación aporta diversas claves sobre como la dinámica de partículas de hierro y aluminio en aguas ácidas: el transporte de partículas no dependería solamente de factores hidrodinámicos, sino según las condiciones químicas del medio, es decir, pH y concentración, serían más resistentes a esfuerzos de corte, lo que implica que tendrían mayor potencial para sedimentar que partículas susceptible a ruptura, evitando que actúen como vectores de contaminantes.



**Figura 1:** Comparación de distintas aguas ácidas sintéticas en función de su diámetro medio inicial de las partículas,  $d(1)$ , y los respectivos factores de fuerza.

### Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen el financiamiento del Proyecto Interno USM 116.27.2, al Programa de Apoyo Complementario a la Investigación 2018 (USM), y los proyectos Fondecyt 1161337 y Fondap 15110020.

### Referencias

- Contreras, M. T., Müllendorff, D., Pastén, P., Pizarro, G. E., Paola, C., & Escauriaza, C. (2015). Potential accumulation of contaminated sediments in a reservoir of a high-Andean watershed: Morphodynamic connections with geochemical processes. *Water Resources Research*, 51(5), 3181–3192.
- Guerra, P., Gonzalez, C., Escauriaza, C., Pizarro, G., & Pasten, P. (2016). Incomplete Mixing in the Fate and Transport of Arsenic at a River Affected by Acid Drainage. *Water, Air, & Soil Pollution*, 227(3), 1–20.
- Jarvis, P., Jefferson, B., Gregory, J., & Parsons, S. A. (2005). A review of floc strength and breakage. *Water Research*, 39(14), 3121–3137.