

# Aplicación de la flotación en el tratamiento de residuos líquidos

Oswaldo Pavez<sup>1</sup>  
Bruno Zazzali<sup>1</sup>  
Susana Astorga<sup>1</sup>  
Silvia Campillay<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Metalurgia, Universidad de Atacama, Chile

**RESUMEN:** En el tratamiento de residuos líquidos se considera interesante la utilización de equipos de flotación no convencionales, en los cuales burbujas de gas interactúan con partículas sólidas o con agregados formados por los contaminantes a ser removidos. El éxito del uso de estos equipos puede atribuirse, principalmente, a que emplean burbujas de tamaño mediano (100-600 micrones) y microburbujas (50-100 micrones). Entre los sistemas de flotación no convencionales se pueden destacar los siguientes: flotación por aire disuelto, electroflotación, flotación columnar, flotación centrífuga, flotación jet. En el presente trabajo se presentan resultados obtenidos en el tratamiento de efluentes líquidos, utilizando los diferentes sistemas de flotación no convencionales señalados anteriormente. Los equipos utilizados fueron diseñados y construidos en el Departamento de Metalurgia de la Universidad de Atacama. Se obtuvieron resultados satisfactorios que mostraron una alta efectividad de los equipos de flotación no convencionales en la remoción de los metales pesados presentes en las muestras estudiadas.

**ABSTRACT:** In the treatment of the liquid tailings it is considered interesting the use of non-conventional flotation equipment, in which air bubbles interact with solid particles made of contaminants that should be moved away. The successful use of this equipment is based, mainly, on the use of middling size bubbles (100-600 microns) and microbubbles (50-100 microns). Among the non-conventional flotation systems the most important are: air dissolved flotation, electroflotation, columnar flotation, centrifugal flotation and jet flotation. The results obtained in the treatment of liquid outflows by means of non-conventional flotation systems mentioned above are shown in the present paper. The equipment used to carry out this work was designed and built in the Metallurgical Department of Atacama University. The results obtained were satisfactory and they showed the high effectiveness of non-conventional flotation equipment in moving away heavy metals from the studied test.

**Palabras claves:** flotación, residuos líquidos, remoción de metales.

## INTRODUCCIÓN

Las operaciones unitarias físicas de separación sólido-líquido aplicadas al tratamiento de aguas y residuos industriales líquidos, se pueden resumir, en general, en las siguientes: *tamizado, sedimentación, flotación, filtración y centrifugación.*

La *flotación*, que es la operación que nos ocupa en este trabajo, es un proceso físico-químico de separación de especies de distinto origen que se efectúa a partir de pulpas acuosas mediante burbujas de gas (aire), que aprovecha las propiedades hidrofílicas de estas especies. En dependencia del tamaño de las burbujas utilizadas, en el proceso se pueden distinguir: la flotación con macroburbujas (600-2000 micrones), la flotación con burbujas de tamaño medio (100-600 micrones) y la flotación con microburbujas (50-100 micrones). Los procesos no convencionales de flotación pertenecen a los dos últimos tipos de flotación señalados anteriormente.

Rubio *et al.* (1996), en una revisión bibliográfica reciente, presentan un resumen de los procesos no convencionales de flotación en donde destaca los siguientes sistemas: electroflotación, flotación por aire disuelto, flotación columnar, flotación centrífuga y flotación jet. Los mismos autores muestran la situación actual de las técnicas de flotación aplicadas al tratamiento de efluentes y señalan que tanto la flotación de precipitados y la flotación por adsorción coloidal (*colloid adsorbing flotation*), tienen amplia aplicación industrial.

En la literatura se presentan, en forma detallada, resultados de la aplicación de procesos no convencionales de flotación en el tratamiento de efluentes (Beeby and Nicol, 1993; Lazaridis *et al.*, 1992; Srinivasan y Subbaiyan, 1989).

Dada la importancia que adquiere la flotación como proceso de separación sólido/líquido en el tratamiento de efluentes, presentamos en este trabajo los resultados obtenidos con equipos de sistemas no convencionales de flotación, tales como, electroflotación, flotación por aire disuelto, flotación en columna tipo Microcel, flotación centrífuga en ciclón con manto poroso y flotación en celda Jameson.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Muestras de agua

Se utilizaron tres tipos de muestras: soluciones artificiales de cobre preparadas con el reactivo  $\text{Cu SO}_4 \times 5\text{H}_2\text{O}$ , efluentes líquidos industriales

procedentes de plantas de lixiviación/precipitación de cobre de la III Región Atacama-Chile y agua potable de Copiapó-Chile.

### Reactivos

Se emplearon los siguientes reactivos químicos:

- Oleato de sodio, p.a.
- Dodecil sulfato de sodio, p.a.
- Sulfato de cobre penta hidratado, p.a.
- Hidróxido de sodio, p.a.
- Cloruro de bario, p.a.
- Cloruro férrico, p.a.
- Ácido clorídico, p.a.
- Coagulante comercial M-709
- Coagulante comercial M-704-C
- Metil isobutil carbinol

### Pruebas de flotación

En la ejecución de las pruebas de flotación se utilizó una metodología particular para cada sistema estudiado. En general, se siguieron los procedimientos normales empleados en este tipo de pruebas. Por otra parte, las técnicas de flotación aplicadas fueron las siguientes:

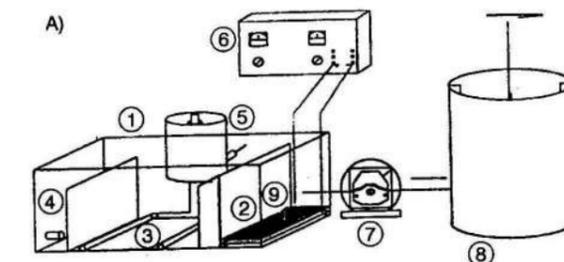
- Flotación de precipitados.
- Flotación por adsorción coloidal, empleando flocúlos de hidróxido de hierro como transportadores de cobre.

### Equipos de flotación

Se utilizaron equipos de flotación de escala piloto con flujos continuos de alimentación, con excepción del sistema de flotación por aire disuelto que era una unidad a escala batch. Los equipos no convencionales de flotación fueron diseñados y construidos en el Departamento de Metalurgia de la Universidad de Atacama, (Figuras 1 y 2). Ellos son:

- Una unidad de flotación por aire disuelto, de escala laboratorio.
- Una columna de flotación tipo Microcel, de escala piloto.
- Un ciclón de fondo plano con manto poroso para flotación centrífuga, de escala piloto.

- Una celda tipo Jameson, de escala piloto.
- Una celda de electroflotación con flujo continuo, de escala piloto.



1. Celda de electroflotación
2. Zona de colección
3. Zona de separación de fases
4. Zona de evacuación de espuma
5. Control de nivel y evacuación de agua clara
6. Fuente de energía
7. Bomba peristáltica
8. Estanque acondicionador
9. Electrodo

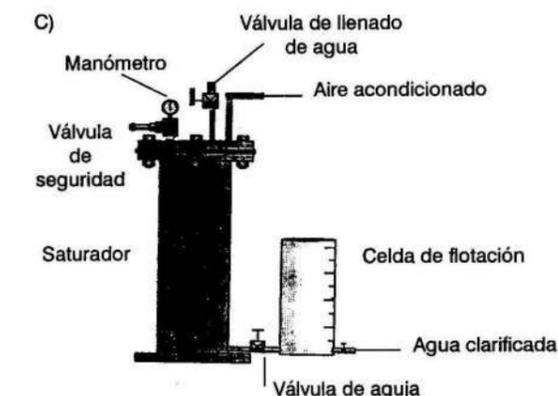
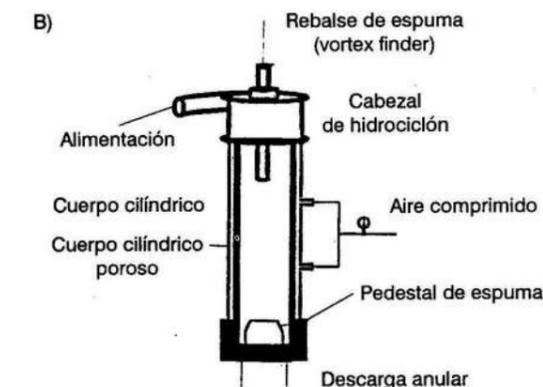


FIGURA 1. Sistemas no convencionales de flotación: (a) celda de electroflotación, (b) ciclón para flotación centrífuga, (c) unidad de flotación por aire disuelto.

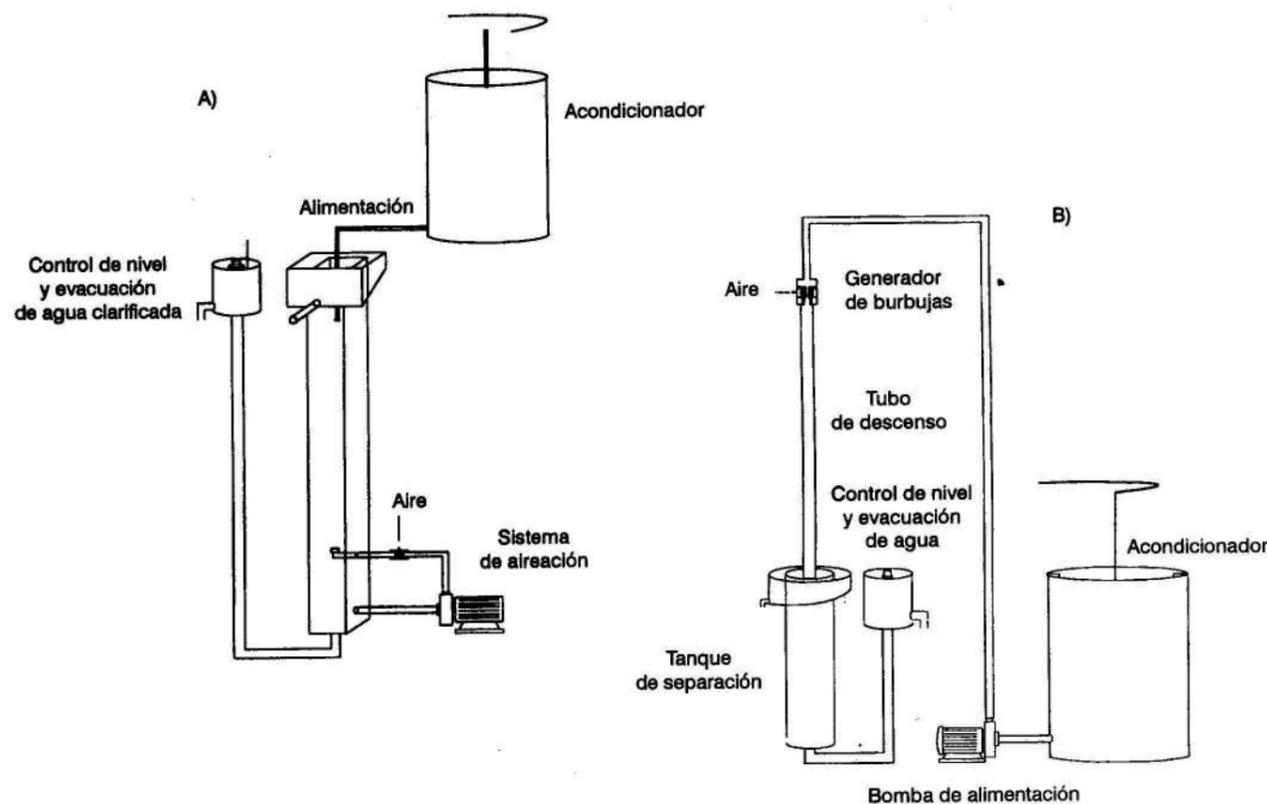


FIGURA 2. Sistemas no convencionales de flotación: (a) columna de flotación tipo Microcel, (b) celda Jameson.

RESULTADOS

Flotación por aire disuelto

En las pruebas preliminares de sedimentación se observó que las muestras precipitaban a partir de pH igual a 4, se hacía más notoria la precipitación con el aumento del pH. En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos en las pruebas de flotación por aire disuelto al utilizar diferentes concentraciones de dodecil sulfato de sodio, a pH de 7,5 y concentración de coagulante MP-205 de 20,0 mg/L. Se observa que los mejores resultados son alcanzados al utilizar 20 mg/L de dodecil sulfato de sodio en una sola etapa, al obtener una concentración final de 1,3 mg/L Cu<sub>T</sub> y de 6,9 mg/L Fe<sub>T</sub> con remociones de 99,1% Cu<sub>T</sub> y 99,4% Fe<sub>T</sub>.

Flotación en columna de flotación tipo Microcel

En la Tabla 2 se presenta la remoción de cobre a partir de una solución artificial mediante flotación de precipitados en la columna de flotación tipo Microcel. Se observa que es posible obtener en 10 minutos de flotación remociones de cobre del orden de 90 % y disminuye la concentración de cobre desde 22,1 mg/L hasta 2,3 mg/L. Aumentos mayores en el tiempo de flotación prácticamente no ayudan en la remoción de cobre.

TABLA 1. Resultados obtenidos en las pruebas de flotación por aire disuelto con muestra de efluentes líquidos procedentes de planta de lixiviación/precipitación de cobre, utilizando diferentes concentraciones de dodecil sulfato de sodio. Coagulante comercial MP-205 = 20,0 mg/L; pH = 7,5; concentración inicial de cobre = 145,6 mg/L; concentración inicial de hierro = 1222, 0 mg/L.

Experiencia	Concentración dodecil sulfato de sodio [mg/L]	Concentración final [mg/L]		Remoción [%]	
		Cobre	Hierro	Cobre	Hierro
1	2,5	11,8	21,1	91,9	98,3
2	5,0	2,1	11,1	98,6	99,1
3	10,0	16,4	22,7	88,7	98,1
4	20,0	1,3	6,9	99,1	99,4
5	40,0	10,5	26,3	92,8	97,9

Por otra parte, en la Tabla 3 se muestran los resultados alcanzados con una solución artificial en la remoción de cobre utilizando cloruro férrico como coagulante y transportador de los precipitados de cobre. Se observa que a pesar de disminuir el flujo de aire a la mitad se obtienen resultados muy similares a los mostrados en

la Tabla 2, y se alcanza a los 30 minutos de flotación un 89,1% de remoción y una concentración final de cobre de 2,4 mg/L.

TABLA 2. Resultados de la remoción de cobre a partir de una solución artificial mediante flotación de precipitados en la columna de flotación tipo Microcel. Concentración oleato de sodio = 20 mg/L; concentración MIBC = 20 mg/L; pH = 8,6; flujo de aire = 4 L/min; flujo de alimentación = 2,3 L/min

Muestra	Tiempo [min]	Concentración de cobre [mg/L]	Remoción de cobre [%]
Alimentación		22,1	
Clarificada	10	2,5	88,5
Clarificada	20	2,5	88,8
Clarificada	30	2,5	89,8

Resultados de la remoción de cobre y hierro utilizando un efluente industrial procedente de una planta de lixiviación/precipitación de la III Región Atacama se muestran en la Tabla 4. Al aplicar una etapa *cleaner* al

TABLA 4. Resultados de remoción de cobre y hierro desde un efluente industrial de planta lixiviación/precipitación de la III Región Atacama empleando una columna tipo Microcel. Concentración dodecil sulfato de sodio = 40 mg/L; concentración MIBC = 20 mg/L; pH = 5,0; coagulante comercial M-704-C = 10 mg/L flujo de aire = 7 L/min; flujo de alimentación = 2,1 L/min

Muestra	Tiempo [min]	Concentración de cobre [mg/L]	Concentración de hierro [mg/L]	Remoción de cobre [%]	Remoción de hierro [%]
Alimentación	0	45,1	1 046,1		
Clarificada	10	27,8	809,2	38,5	22,7
Clarificada	20	26,8	796,8	40,5	23,8
Clarificada	30	23,8	786,5	47,3	24,8
<b>Etapas «Cleaner»</b>					
Clarificada	10	2,0	166,2	95,8	84,1
Clarificada	20	1,6	160,8	96,5	84,6
Clarificada	30	1,2	145,7	97,3	86,1

Flotación centrífuga

En la Tabla 5 se presentan los resultados obtenidos en la flotación centrífuga utilizando una solución artificial de cobre. Se aprecia que en la etapa *rougher* se alcanza una remoción de 65 % y al incluir la etapa *cleaner* se llega a 89,8 % de remoción de cobre. Cabe hacer notar que en esta etapa también se adicionó oleato de sodio 40 mg/L y MIBC 40 mg/L.

Flotación en celda Jameson

En la Tabla 6 se presentan los resultados obtenidos en la celda Jameson con una solución artificial de cobre. En la prueba se tomaron tres muestras, obteniéndose en la tercera muestra una remoción final de cobre de 88,1 %, y disminuye la concentración de cobre desde 19,4 % hasta 2,3 %.

TABLA 3. Resultados de la remoción de cobre a partir de una solución artificial mediante flotación en columna tipo Microcel utilizando cloruro férrico como coagulante y transportador de precipitados de cobre. Concentración oleato de sodio = 20 mg/L; concentración MIBC = 20 mg/L; concentración cloruro férrico = 190 mg/L; pH = 8,6; flujo de aire = 2 L/min; flujo de alimentación = 2,7 L/min

Muestra	Tiempo [min]	Concentración de cobre [mg/L]	Concentración de hierro [mg/L]	Remoción de cobre [%]
Alimentación		22,2		
Clarificada	10	2,4	3,8	89,1
Clarificada	20	2,6	3,5	85,1
Clarificada	30	2,4	3,8	89,1

**TABLA 5. Resultados obtenidos mediante flotación centrífuga utilizando una solución artificial de cobre. Concentración oleato de sodio = 40 mg/L; concentración MIBC = 40 mg/L; concentración coagulante comercial M-709 = 10 mg/L; pH = 9,0; flujo presión = 20 psi**

Muestra	Tiempo [min]	Concentración de cobre [mg/L]	Remoción [%]
<b>Etapa «rougher»</b>			
Alimentación	0	18,60	
Descarga	0 - 10	10,00	46,2
Rebalse	0 - 10	197,10	
Descarga	10 - 20	6,50	65,1
Rebalse	10 - 20	55,20	
<b>Etapa «Cleaner»</b>			
Descarga	0 - 10	1,90	89,8
Rebalse	0 - 10	37,30	

Nota. En la etapa cleaner se adicionó 40 mg/L de oleato de sodio y 40 mg/L de MIBC.

**TABLA 6. Resultados obtenidos en la celda Jameson utilizando una solución artificial de cobre. Concentración oleato de sodio = 40 mg/L; concentración MIBC = 20 mg/L; pH = 9,2; flujo de aire = 90-140 L/min; longitud tubo descenso = 2,0 m; generador de burbujas es un filtro poroso**

Muestra	Concentración de cobre [mg/L]	Remoción de cobre [%]
Alimentación	19,4	
Clarificada	3,9	79,9
Clarificada	4,0	79,4
Clarificada	2,3	88,1

**Flotación en celda de electroflotación**

Los resultados obtenidos en la celda de electroflotación son mostrados en las Tablas 7 y 8. En la primera se presentan los resultados alcanzados con solución artificial de cobre, donde se obtuvo una remoción de 89,1 % y una concentración final de 2,2 % de cobre partiendo de una concentración inicial de 20,2 %. Por otra parte, en la tabla 8 se muestran los resultados obtenidos para la disminución de sulfato presente en agua potable. Al usar cloruro de bario, como precipitador de sulfato, se consiguió reducir la concentración de sulfato desde 600 mg/L hasta 300 mg/L.

**TABLA 7. Resultados en celda de electroflotación tratando agua potable para reducir concentración de sulfato empleando cloruro de bario como precipitador. Concentración oleato de sodio = 20 mg/L; pH = 7,0 (natural); flujo de agua = 800 cm<sup>3</sup>/min, concentración de cloruro de bario = 1,8 g/L; corriente continua con 6 amperes y 4 volts; toma de muestra a los 15 minutos (sistema estabilizado)**

Muestra	Concentración de cobre [mg/L]	Remoción de cobre [%]
Alimentación	20,2	
Clarificada	2,2	89,1

**TABLA 8. Resultados en celda de electroflotación tratando solución artificial de cobre. Concentración oleato de sodio = 20 mg/L; pH = 9,5; flujo de solución = 800 cm<sup>3</sup>/min; corriente continua de 6 amperes y 4 volts; toma de muestra a los 15 minutos (sistema estabilizado)**

Muestra	Concentración de cobre [mg/L]	Remoción de cobre [%]
Alimentación	600	210
Agua clarificada	300	390

**CONCLUSIONES**

- Las remociones de metales pesados obtenidas con los sistemas de flotación estudiados fueron del orden de 90 %. Sin embargo, en algunos casos se alcanzaron resultados muy superiores a los indicados anteriormente.
- Los mejores resultados fueron obtenidos con el equipo de flotación por aire disuelto.
- Los sistemas de flotación no convencionales deben ser considerados como una buena alternativa para el tratamiento de residuos líquidos.

**AGRADECIMIENTO**

Los autores agradecen a la Dirección de Investigaciones de la Universidad de Atacama por el financiamiento del proyecto 08-PI-96, del cual estos resultados forman parte.

**BIBLIOGRAFÍA**

BEEBY, J.P. y S.K NICOL: Concentration of Oil-in-Water Emulsion Using the Air-Sparged Hydrocyclone, *Filt. & Sep.*, 30:141, 1993.

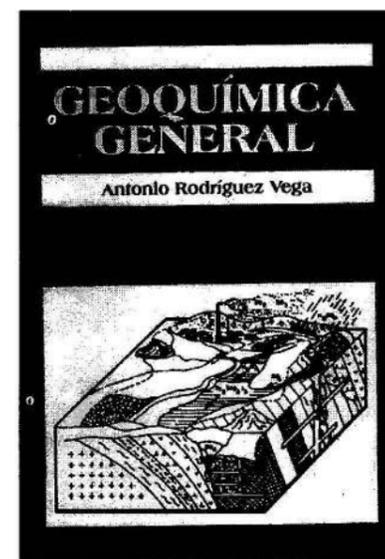
LAZARIDIS, N.K.; K.A MATIS; G.A STALIDIS y P. MAVROS: Dissolved Air Flotation of Metals Ions, *Sep. Sci. Technol.*, 27:1743, 1992.

RUBIO, J.; I.A.H SCHNEIDER y W. ALIAGA: «New Process for Heavy Metals Separation from Waste Water Streams in the Mining Industry», Proceedings of the III International Conference on Clean Technologies for the Mining Industry, Universidad de Concepción, Concepción, Chile, 1996.

SRINIVASAN, V. y M. SUBBAIYAN: «Electroflotation Studies on Cu, Ni, Zn, and Cd with Ammonium Dodecyl Dithiocarbamate», *Sep. Sci. Technol.*, 24:145, 1989.

**GEOQUÍMICA GENERAL**

AUTOR: Antonio Rodríguez Vega  
 Doctor en Ciencias Geológicas. Profesor Titular.  
 Departamento de Geología. Facultad de Geología y Minería.  
 Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba.



El libro está concebido como texto básico de la asignatura Geoquímica General que se imparte a los alumnos de la carrera de Geología en la Facultad de Geología y Minería del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, abordando con la profundidad adecuada los tres aspectos básicos de la Geoquímica como ciencia: la distribución, la migración y las formas de existencia de los elementos químicos en la naturaleza. Estos tres aspectos, que constituyen los conceptos o leyes fundamentales de la Geoquímica, se integran en los nueve siguientes capítulos:

- Distribución de los elementos químicos en las envolturas terrestres.
- Clasificación geoquímica de los elementos.
- Migración mecánica.
- Migración fisicoquímica.
- Migración de los gases.
- Migración acuosa.
- Migración biogénica.
- Migración tecnogénica (antrópica).
- Geoquímica de los procesos geológicos.

En sus 273 páginas, 50 figuras, 11 tablas y 5 anexos el libro encierra la información geoquímica básica correspondiente a todos los elementos químicos naturales. Mediante un uso adecuado de este texto básico los estudiantes podrán comprender los aspectos fundamentales relacionados con la distribución universal, la constante migración (movimiento) y las múltiples formas de existencia de los elementos químicos en la naturaleza, obtener información sobre las particularidades de la distribución y las formas de existencia de los elementos químicos de interés en los más diversos objetos geológicos, conocer como influirían los diferentes factores internos y externos en la migración de los mismos, como se comportarían en las condiciones imperantes en un determinado medio geológico o bajo la acción de un proceso geológico dado. El libro pretende crear en los estudiantes una sólida base geoquímica que le permita comprender con mayor facilidad los procesos que dan origen a los más diversos objetos geológicos (minerales, rocas, menas, depósitos minerales, cortezas de meteorización, suelos, etc.), asimilar los fundamentos teóricos de los métodos de prospección geoquímica, los procedimientos de cuantificación de los recursos minerales y evaluación cualitativa de los recursos hídricos y explicar las causas de muchos fenómenos ambientales, fundamentalmente relacionados con los procesos que conducen a la contaminación química del medio circundante. Aunque está concebido fundamentalmente para estudiantes de las Ciencias Geológicas, puede ser de mucha utilidad para todos los estudiantes que de una forma u otra tienen que ver algo con el medio geológico, particularmente para aquellos interesados en conocer, proteger, restaurar y mejorar el entorno.