



1. Datos Generales de la asignatura

Nombre de la asignatura: Clave de la asignatura: SATCA¹: Carrera:	Hidrometalurgia MEF-2403 3-2-5 Ingeniería Química
---	--

2. Presentación

Caracterización de la asignatura
<p>Esta asignatura aporta al perfil del Ingeniero Químico:</p> <ul style="list-style-type: none">-Distinguir los principios fundamentales de los procesos hidrometalúrgicos y reconocer los parámetros que rigen a este tipo de procesos.-Aplicar el proceso hidrometalúrgico que mejor se adapte de acuerdo al mineral o concentrado, de manera tal que permita extraer en forma eficiente un elemento en forma iónica, evitando al mismo tiempo disolver elementos no deseados.-Calcular las condiciones de operación de los diferentes circuitos hidrometalúrgicos con base en la evaluación de los diferentes equilibrios químicos y los aspectos termodinámicos y cinéticos que ocurren en ellos, haciendo énfasis en aquellos procesos que operan actualmente en nuestro país.-Conocer la selección de métodos de lixiviación y su aplicación a procesos de separación de minerales.-Conocer los fundamentos de utilizar soluciones acuosas para la extracción de valores metálicos y las bases fisicoquímicas para el análisis de los procesos de extracción.-Diferenciar los procesos de extracción de acuerdo a sus características particulares y a las bases fundamentales que los rigen.-Analizar el estado actual de las innovaciones y la posibilidad de desarrollo de nuevos procesos hidrometalúrgicos.-Conocer los procesos electroquímicos y su operación en la industria metalúrgica tales como: electrobeneficio y electrefinación a partir de soluciones acuosas.
Intención didáctica

Este curso tiene como objetivo el lograr que el alumno comprenda los fundamentos fisicoquímicos y cinéticos, así como los aspectos operativos de los procesos hidrometalúrgicos con el fin de analizar su aplicabilidad a casos particulares. Con este fin se desarrolla la materia en cinco unidades principales. El docente de la asignatura deberá tener habilidad para vincular el saber, con el hacer y con el saber ser, para que el proceso formativo sea integral. La evaluación de la asignatura debe comprender la valoración diagnóstica, formativa, sumativa y contemplar saberes de competencias holísticas.

3. Participantes en el diseño y seguimiento curricular del programa

Lugar y fecha de elaboración o revisión	Participantes	Observaciones
Instituto Tecnológico de La Laguna, marzo 2024	Integrantes de la Academia de Ingeniería Química del ITL.	Diseño del módulo de especialidad de la carrera de Ingeniería Química.

4. Competencia(s) a desarrollar

Competencia(s) específica(s) de la asignatura
Conoce los fundamentos de utilizar soluciones acuosas para la extracción de valores metálicos, selecciona métodos de lixiviación para su aplicación y analiza los diferentes métodos de recuperación de metales.

5. Competencias previas

Conoce el origen y los procesos de purificación y preparación de los minerales utilizados industrialmente.

Conoce los fundamentos y técnicas físicas, así como las aplicaciones fisicoquímicas para la concentración de los minerales utilizando diferentes procesos según su objetivo final.

Identificar y representar esquemáticamente cada una de las operaciones y procesos unitarios comunes en el campo de la ingeniería realizando los balances macroscópicos de materia y energía con y sin reacción asociados a procesos metalúrgicos.

Aplica los conocimientos en termodinámica y fisicoquímica según el estado,

¹ Sistema de Asignación y Transferencia de Créditos Académicos

composición y temperatura de los minerales.

6. Temario

No.	Temas	Subtemas
1	FUNDAMENTOS DE HIDROMETALURGIA	1.1 Principios químicos de la hidrometalurgia 1.2 Especie más abundante en un sistema acuoso 1.3 Diagramas de especiación (o distribución de iones) 1.4 Diagramas de especiación metal-ligando 1.5 Elaboración y aplicación de Diagramas de Fase Electroquímicos (Pourbaix)
2	TRANSFERENCIA DE MASA Y REACCIONES CINÉTICAS	2.1 Introducción 2.2 Cinética Homogénea 2.3 Cinética Heterogénea 2.4 Tasa de fenómenos en procesos hidrometalúrgicos 2.5 Transporte de masa en procesos hidrometalúrgicos 2.6 Combinación de Transporte de Masa y Cinética de la Reacción en los procesos hidrometalúrgicos 2.7 Transporte de Masa Combinado y Cinética Electroquímica 2.8 Cinética de Cristalización
3	TÉCNICAS DE LIXIVIACIÓN	3.1 Principios Generales y Terminología 3.1.1 Permeabilidad y Flujo de Fluidos a través de Lechos de Partículas 3.1.2 Lixiviación In Situ 3.1.3 Lixiviación en Vertederos 3.1.4 Lixiviación en Pilas 3.1.5 Modelado del Rendimiento de Lixiviación en Pilas y Vertederos 3.1.6 Aplicación de Soluciones Técnicas 3.1.7 Aplicaciones Comerciales de Lixiviación en Pilas Biolixiviación/Biooxidación 3.1.8 Aplicaciones Comerciales de la Biolixiviación 3.2 Aplicaciones de Lixiviación de Metales Preciosos 3.2.1 Lixiviación con Cianuro 3.2.2 Otros Extractantes de Metales Preciosos 3.3 Extracción desde Concentrados

¹ Sistema de Asignación y Transferencia de Créditos Académicos

		<p>3.3.1 Lixiviación de Concentrados</p> <p>3.3.2 Lixiviación de Concentrados a Presión Ambiental</p> <p>3.3.3 Lixiviación con Agitación de Minerales de Oro y Concentrados</p> <p>3.3.4 Diversos Métodos de Lixiviación a Presión Atmosférica</p> <p>3.3.5 Lixiviación a Presión de Minerales y Concentrados de Alta Ley</p> <p>3.3.6 Lixiviación de Mineral de Aluminio a Presión Elevada</p> <p>3.3.7 Oxidación a Presión del Concentrado de Mineral de Sulfuro</p> <p>3.3.8 Lixiviación de Concentrado de Níquel a Escala Comercial</p> <p>3.3.9 Lixiviación a Presión de Mineral de Uranio</p>
4	SEPARACIÓN DE METALES DISUELTOS	<p>4.1 Introducción</p> <p>4.2 Extracción por Solventes o Extracción Líquido-Líquido</p> <p>4.2.1 Tipos de Extractantes Líquido-Líquido o Solvente</p> <p>4.2.1.1 Extractantes de Intercambio Iónico</p> <p>4.2.1.2 Extractantes Solvatantes</p> <p>4.2.1.3 Extractantes de Coordinación</p> <p>4.2.2 Principios Generales de la Extracción por Solventes</p> <p>4.2.3 Extracción con Solventes Comerciales</p> <p>4.2.3.1 Cobre</p> <p>4.2.3.2 Oro</p> <p>4.2.3.3 Otros Metales Preciosos</p> <p>4.2.3.4 Níquel y Cobalto</p> <p>4.2.3.5 Metales de Tierras Raras</p> <p>4.2.3.6 Uranio</p> <p>4.3 Intercambio Iónico</p> <p>4.3.1 Información General sobre Intercambio Iónico</p> <p>4.3.2 Modelos de Adsorción por Intercambio Iónico en Equilibrio</p> <p>4.3.2.1 Modelo Freundlich</p> <p>4.3.2.2 Modelo Langmuir</p> <p>4.3.2.3 Modelo Tempkin</p> <p>4.3.3 Modelos de Cinética de Adsorción por Intercambio Iónico</p> <p>4.4 Adsorción de Carbón Activado</p> <p>4.5 Ultrafiltración u Ósmosis Inversa</p>

		<p>4.6 Precipitación</p> <p>4.6.1 Proceso y Tratamiento de Aguas Residuales</p> <p>4.7 Cementación o Reducción de Contacto</p> <p>4.8 Recuperación utilizando Reactivos Reductores Disueltos</p>
5	<p>PROCESOS DE RECUPERACIÓN DE METALES EN SOLUCIÓN ACUOSA POR VÍA ELECTROLÍTICA</p>	<p>5.1 Electrobeneficio a partir de soluciones acuosas</p> <p>5.1.1 Procesos de electrodos</p> <p>5.1.2 Curvas de Polarización</p> <p>5.1.3 Potencial Mixto y Corriente de Lixiviación</p> <p>5.1.4 Solución de Conductancia Específica</p> <p>5.1.5 Procesos electrometalúrgicos para obtener metales no ferrosos (Cu, Zn, Cd, Co, Ni, Ag, Au, Pb)</p> <p>5.2 Electrorefinación a partir de soluciones acuosas</p> <p>5.3 Disolución anódica de sulfuros</p>

7. Actividades de aprendizaje de los temas

1. Fundamentos de Hidrometalurgia	
Competencias	Actividades de aprendizaje
<p>Específicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Conoce la historia y aspectos generales de la Hidrometalurgia, aprender a utilizar el método ion - electrón, aplicar el concepto de solubilidad, iones complejos y constante de equilibrio, calcular actividades iónicas, determinar la especie más abundante en un sistema acuoso y generar diagramas de especiación y de fase electroquímicos. <p>Genéricas:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Capacidad de análisis y síntesis. ● Habilidades en el uso 	<ul style="list-style-type: none"> ● Realiza problemas como repaso de principios termodinámicos. ● Define el estado estándar, actividades, principales actividades iónicas y coeficientes de actividad, así como actividades iónicas individuales. ● Calcula las actividades iónicas principales. ● Estima los coeficientes de actividades iónicas individuales. ● Enlista las características básicas de iones complejos. ● Establece y resuelve una serie de ecuaciones simultáneas para determinar la distribución de las especies acuosas. ● Construye diagramas de especiación y de fase electroquímicos. ● Utiliza programas

¹ Sistema de Asignación y Transferencia de Créditos Académicos

<p>de tecnologías de la información.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de comunicación oral y escrita. • Solución de problemas. • Trabajo en equipo. • Capacidad de aplicar el conocimiento en práctica. • Capacidad de aprender. • Habilidad de trabajo autónomo 	<p>computacionales para determinar la distribución y concentración de especies en soluciones acuosas.</p>
<p align="center">2. Transferencia de Masa y Reacciones Cinéticas</p>	
<p>Competencias</p>	<p>Actividades de aprendizaje</p>
<p>Específicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Define una reacción homogénea y heterogénea y sus correspondientes expresiones de velocidad de uno de los componentes por medio de la estequiometría. • Obtiene la etapa controlante y la energía de activación de un proceso hidrometalúrgico de acuerdo con el modelo cinético seleccionado. <p>Genéricas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de análisis y síntesis. • Habilidades en el uso de tecnologías de la información. • Capacidad de comunicación oral y escrita. • Solución de problemas. • Trabajo en equipo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Define una reacción homogénea y heterogénea y sus correspondientes expresiones de velocidad. • Relaciona la tasa de un componente a otro por medio de estequiometría. • Describe la función de una catálisis y determina el orden de reacción de los datos del reactor. • Describe la secuencia de reacciones en una reacción heterogénea para describir el concepto de control de la velocidad. • Interpreta algunos datos cinéticos simples y determina la velocidad límite a la que ocurren algunos procesos hidrometalúrgicos. • Selecciona y discute las ecuaciones de velocidad para reacciones de superficie química y para reacciones de transporte de masa. • Interpreta los datos cinéticos calculados en Excel para determinar la etapa controlante en una geometría esférica de la superficie y su energía de

<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de aplicar el conocimiento en práctica. • Capacidad de aprender. • Habilidad de trabajo autónomo 	activación.
3. Técnicas de Lixiviación	
Competencias	Actividades de aprendizaje
<p>Específicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Conoce y comprende los diferentes procesos de extracción de iones metálicos a partir de sus minerales y materiales secundarios. • Describe los métodos de lixiviación, los tipos de equipo y tipos de reactivos utilizados en los procesos de lixiviación. <p>Genéricas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de análisis y síntesis. • Habilidades en el uso de tecnologías de la información. • Capacidad de comunicación oral y escrita. • Solución de problemas. • Trabajo en equipo. • Capacidad de aplicar el conocimiento en práctica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Describe brevemente los métodos de lixiviación, tipos de equipos, reacciones y reactivos de lixiviación. • Describe la teoría y práctica de la cianuración del oro y la lixiviación amoniaca de cobre metálico. • Describe en términos generales los procesos de lixiviación de níquel y minerales de sulfuro de cobalto. • Enumera los tipos de especies microbianas utilizadas en los sistemas de lixiviación en los cuales la acción microbiana es de importancia. • Describe los tipos básicos de procesos utilizados en operaciones comerciales. • Calcula el flujo máximo en una lixiviación en pilas. • Genera un mapa conceptual de la lixiviación in situ, vertederos y pilas e indica qué iones metálicos se pueden extraer con cada uno de ellos. • Investiga y genera un mapa conceptual de la biolixiviación/biooxidación. • Realiza un mapa conceptual del proceso de la lixiviación con cianuro.

<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de aprender. • Habilidad de trabajo autónomo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Investiga y genera un mapa conceptual de la extracción desde concentrados.
4. Separación de Metales Disueltos	
Competencias	Actividades de aprendizaje
<p>Específicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Comprende los fundamentos de los principales métodos de reducción para poder seleccionar los procesos de reducción de iones en soluciones. <p>Genéricas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de análisis y síntesis. • Habilidades en el uso de tecnologías de la información. • Capacidad de comunicación oral y escrita. • Solución de problemas. • Trabajo en equipo. • Capacidad de aplicar el conocimiento en práctica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Describe los tipos de extracción por solventes y caracteriza las principales variables de un proceso de extracción. • Describe los aspectos químicos fundamentales acerca de los solventes extractantes más utilizados. • Discute la importancia de la extracción por solventes; los parámetros de control importantes; y el tipo de equilibrio utilizado en la práctica industrial. • Describe ejemplos de aplicación de extracción por solventes en procesos comerciales. • Enumera los tipos y describe la química de los procesos de intercambio iónico. • Ilustra y describe las aplicaciones del intercambio iónico en la industria. • Da ejemplos de aplicación en procesos hidrometalúrgicos. • Comprende los mecanismos de adsorción de carbón activado, precipitación de iones metálicos y cementación. • Describe los fundamentos de la ultrafiltración u ósmosis inversa.

	<ul style="list-style-type: none"> ● Analiza la recuperación empleando reactivos reductores disueltos.
5. Procesos de Recuperación de Metales en Solución Acuosa por Vía Electrolítica	
Competencias	Actividades de aprendizaje
<p>Específicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Enlista y describe los procesos de electro-beneficio y electro refinación a partir de soluciones acuosas. ● Comprende la disolución anódica de sulfuros. <p>Genéricas:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Capacidad de análisis y síntesis. ● Habilidades en el uso de tecnologías de la información. ● Capacidad de comunicación oral y escrita. ● Solución de problemas. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Expone por equipos las variables de operación de los procesos de EW en solución acuosa (Cu, Zn, Cd, Co, Ni, Ag, Au y Pb). ● Realiza una tabla de las variables de operación de los procesos de EW en solución acuosa. ● Consulta las variables de operación y características de los principales procesos de ER en solución acuosa (Cu, Ag, Au y Pb). ● Genera un mapa conceptual del proceso de disolución anódica de sulfuros.

8. Práctica(s)

Se realizarán en la asignatura de Laboratorio de Metalurgia Extractiva.

9. Proyecto de asignatura

¹ Sistema de Asignación y Transferencia de Créditos Académicos

Elaboración de un proceso que comprenda desde la concentración de minerales, hasta la refinación de un metal, desarrollando cada etapa requerida para aplicarla en su procesamiento hidrometalúrgico.

Atender en forma generalizada las particularidades ambientales que pueden generarse en el proceso.

10. Evaluación por competencias

Realizar la evaluación diagnóstica, formativa y sumativa.

- Participación en el desarrollo del curso y en la resolución de problemas.
- Informes de visitas industriales.
- Tareas.
- Exámenes escritos.
- Exposiciones.
- Caso integrador.
- Portafolio de evidencias (formato electrónico).

11. Fuentes de información

1. Kenneth N. Han (2002) Fundamentals of Aqueous Metallurgy. SME.
2. Michael L. Free (2013) Hydrometallurgy. Fundamentals and Applications.
3. Esteban M. Domínguez M. (2001) HIDROMETALURGIA, fundamentos, procesos y aplicaciones. Instituto de Ingenieros de Minas de Chile.
4. Curso de Hidrometalurgia. Arthur Lakes Library, Colorado School of Mines.
5. Gaviria C. Ana Cecilia, Restrepo B. Óscar Jaime, Bustamante R. M. Oswaldo. (2007). Notas de Clase. Hidrometalurgia Aplicada. Línea de Metales Preciosos. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Medellín.
6. Zaki Mubarak. (2010) Lecture Notes. Hydro-Electrometallurgy. Department of Metallurgical Engineering. ITB.
7. Curso de Hidrometalurgia. Universidad de Atacama.
8. Capítulo 4. Principios en la Hidrometalurgia del Oro. InterMet. Consultores Metalúrgicos.
9. Ugarte Álvarez, G. (1984) Curso de Lixiviación. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Instituto de Geología y Metalurgia.
10. Hong Yong Sohn & Milton E. Wadsworth. Editorial Trillas. Cinética de los procesos de la METALURGIA EXTRACTIVA.
11. Van A. G. "Hidrometalurgia de metales comunes" ed. UTHEMA, 1965.



- 12.** Ghosh A.& Shanker Ray H. "Principles of Extractive Metallurgy" Wiley Eastern Ltd, 1991.
- 13.** Dominic, Esteban (2001) Hidrometalurgia: fundamentos, procesos y aplicaciones.