

## PROGRAMA DE CURSO FISICOQUÍMICA METALÚRGICA

### A. Antecedentes generales del curso:

Departamento	Minas (DIMIN)					
Nombre del curso	Físicoquímica metalúrgica	Código	MI3230	Créditos	6	
Nombre del curso en inglés	<i>Metallurgical Physical Chemistry</i>					
Horas semanales	Docencia	3	Auxiliares	2	Trabajo personal	5
Carácter del curso	Obligatorio	X		Electivo		
Requisitos	FI2004: Termodinámica/IQ2212: Termodinámica química					

### B. Propósito del curso:

El curso tiene como propósito que los y las estudiantes apliquen herramientas de la fisicoquímica, cinética y termodinámica tales como funciones de estado y constantes de equilibrio, entre otros, mediante el uso de modelos matemáticos para evaluar la eficiencia en estado estacionario de los procesos metalúrgicos y transformaciones, considerando diferentes tipos de reacciones y/o separaciones. Asimismo, determinan las concentraciones reales de especies químicas y su impacto en procesos metalúrgicos, en equilibrio químico homo y heterogéneo, considerando soluciones diluidas y concentradas.

Por otra parte, busca resolver un problema técnico de metalurgia asociado a tratamientos de agua y drenaje de ácido de rocas, considerando restricciones, ventajas y desventajas, análisis económico preliminar y puesta en valor de la propuesta.

El curso tributa a las siguientes competencias específicas (CE) y genéricas (CG):

CE1: Analizar datos y elaborar modelos para la caracterización geo-minero-metalúrgica de materiales, recursos minerales y procesos.

CE2: Concebir, diseñar, optimizar e implementar soluciones científico-tecnológicas en explotación de yacimientos, procesamiento de minerales o metalurgia extractiva.

CG1: Comunicación académica y profesional

Comunicar en español de forma estratégica, clara y eficaz, tanto en modalidad oral como escrita, puntos de vista, propuestas de proyectos y resultados de investigación fundamentados, en situaciones de comunicación compleja, en ambientes sociales, académicos y profesionales.

**CG2: Comunicación en inglés**

Leer y escuchar de manera comprensiva en inglés variados tipos de textos e informaciones sobre temas concretos o abstractos, comunicando experiencias y opiniones, adecuándose a diferentes contextos de acuerdo a las características de la audiencia.

**CG5: Sustentabilidad**

Concebir y aplicar nuevas estrategias de solución a problemas de ingeniería y ciencias en el marco del desarrollo sostenible, considerando la finitud de recursos, la interacción entre diferentes actores sociales, ambientales y económicos, además de las regulaciones correspondientes.

**CG6: Innovación:**

Concebir ideas viables y novedosas que generen valor para resolver necesidades latentes, materializadas en productos, servicios o en mejoras a procesos dentro de un sistema u organización, considerando el contexto sociocultural y económico y los beneficios para el usuario.

**C. Resultados de aprendizaje:**

Competencias específicas	Resultados de aprendizaje
CE1	RA1: Resuelve problemas de procesos metalúrgicos mediante funciones de estado y constantes de equilibrio para evaluar la eficiencia en estado estacionario de los procesos, considerando diferentes tipos de reacciones y/o separaciones.
	RA2: Utiliza y elabora modelos termodinámicos y cinéticos para calcular la velocidad de reacciones en sistemas homo y heterogéneos, considerando mecanismos de reacción y etapa controlante en procesos metalúrgicos, con o sin transferencia de electrones.
	RA3: Resuelve problemas de equilibrio químico homo y heterogéneo en soluciones diluidas y concentradas estimando las concentraciones reales de especies químicas y su impacto en procesos metalúrgicos.
	RA4: Utiliza ecuaciones de la fisicoquímica de superficies e interfases en procesos metalúrgicos, aplicando fundamentos de termoquímica a sistemas homo y heterogéneos, con y sin transferencia de carga.

CE2	RA5: Propone una solución innovadora para un problema en metalurgia sobre tratamientos de agua y drenaje de ácido de rocas, considerando restricciones, ventajas y desventajas, análisis económico preliminar y puesta en valor de la propuesta.
<b>Competencias genéricas</b>	<b>Resultados de aprendizaje</b>
CG1	RA6: Produce, en forma oral y escrita, informes sobre procesos metalúrgicos, metalurgia y solución a un problema de tratamiento de agua y drenaje de ácido de rocas, a fin de explicar con fundamentos y en base a evidencia, dichos procesos y su utilidad para la industria.
CG1, CG2	RA7: Lee en español e inglés diversos textos (capítulos y extractos de memorias de ingeniería y artículos científicos breves), para relacionar e interpretar información aplicable a tópicos de fisicoquímica metalúrgica.
CG4	RA8: Ejecuta con su equipo tareas y ejercicios, mediante una coordinación y planificación de las actividades, considerando colaboración y acuerdo entre los pares.
CG5, CG6	RA9: Analiza estrategias y tecnologías nuevas y eficientes en metalurgia, para integrar a la solución de un problema de tratamiento de aguas y drenaje de ácido, considerando su puesta en valor e impacto ambiental sobre las comunidades, agricultura, mar y napas.

**D. Unidades temáticas:**

Número	RA al que tributa	Nombre de la unidad	Duración en semanas
1	RA1, RA7	Fundamentos de termodinámica química aplicados a sistemas metalúrgicos	2 semanas
<b>Contenidos</b>		<b>Indicador de logro</b>	
1.1. Rutas de proceso de minerales – reactividad. Sulfuros, óxidos, carbonatos e hidróxidos. 1.2. Fundamentos termodinámicos aplicados en el contexto de los sistemas metalúrgicos. 1.3. Termoquímica y sus aplicaciones en sistemas metalúrgicos.		El/la estudiante: 1. Calcula si procesos relacionados con metalurgia extractiva ocurrirán espontáneamente o no, utilizando funciones de estado como energía libre de Gibbs, entalpía, entropía. 2. Utiliza fundamentos termoquímicos como balance de materia y energía a procesos metalúrgicos, considerando la eficiencia de las transformaciones fisicoquímicas y energéticas.	



<p>1.4. Aplicaciones de conceptos de entalpía, entropía, energía libre, capacidad calorífica.</p> <p>1.5. Balances de materia y energía.</p> <p>1.6. Equilibrio termodinámico en sistemas de un componente.</p> <p>1.7. Diagramas de Pourbaix.</p> <p>1.8. Extensión de estudios de soluciones. Actividad química: Coeficiente de actividad. Modelo Debye Huckel y Modelo Davis. Caso de Estudio.</p>	<p>3. Resuelve problemas de balance de masa y energía, obteniendo las eficiencias teóricas de procesos homo- y heterogéneos.</p> <p>4. Utiliza modelos de corrección de concentraciones ideales a concentraciones reales de iones en distintas aplicaciones,</p> <p>5. Lee de manera analítica sobre conceptos asociados a procesos de termodinámica química, relacionando dichos aprendizajes con sistemas metalúrgicos.</p>
<p>Bibliografía de la unidad</p>	<p>1.-Vol. 1 y 2. 2.- 3,4, 6, 14-17. 3.- Cap. 2 y 4.</p> <p><i>Bibliografía complementaria:</i></p> <p>13.</p>

Número	RA al que tributa	Nombre de la unidad	Duración en semanas
2	RA1, RA2, RA7, RA8	Cinética química	3 semanas
Contenidos		Indicador de logro	

<p>2.1. Teoría cinética, mecanismos y velocidad de reacción: Reacciones homogéneas, ley de acción de masas.</p> <p>2.2. Cinética de orden n.</p> <p>2.3. Efectos de la temperatura en la velocidad de reacciones.</p> <p>2.4. Velocidad de reacciones químicas en sistemas de 0, 1 y 2 dimensiones espaciales.</p> <p>2.5. Diseños simples de reactores de proceso.</p> <p>2.6. Cinética de sistemas heterogéneos: etapas fundamentales, concepto de etapa controlante. Cinética. Mecanismo de núcleo sin reaccionar.</p> <p>2.7. Reacciones de una partícula individual no porosa.</p> <p>2.8. Reacciones en que no se forma capa de producto sólido.</p> <p>2.9. Reacciones en que sí se forma capa de producto sólido.</p> <p>2.10. Reacciones de una partícula individual porosa.</p>	<p>El/la estudiante:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Calcula la cinética de reacciones en sistemas homo y heterogéneos, usando ecuaciones cinéticas matemáticas.</li> <li>2. Utiliza las propiedades termodinámicas para definir si un proceso ocurre espontáneamente o requiere de energía para su realización.</li> <li>3. Trabaja con su equipo de manera coordinada en problemas asociados a la cinética química de reacciones homogéneas y heterogéneas.</li> <li>4. Lee de manera analítica, relacionando e interpretando información sobre conceptos y principios de cinética heterogénea.</li> </ol>
<p>Bibliografía de la unidad</p>	<p>4.- Cap. 2 y 4. 5.- Cap. 2,3.</p> <p><i>Bibliografía complementaria:</i></p> <p>12. 15.</p>

Número	RA al que tributa	Nombre de la unidad	Duración en semanas
3	RA3, RA7	Cinética electrometalúrgica	3 semanas
Contenidos		Indicador de logro	
3.1. Cinética electroquímica. 3.2. Controles cinéticos. 3.3. Ley de Faraday. 3.4. Control por transferencia de carga (ley de Tafel, ley de Butler-Volmer). 3.5. Control por transferencia de masa (ley de Fick). 3.6. Representaciones gráficas.		El/la estudiante: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Estima la transferencia de carga por unidad de tiempo (corriente eléctrica) y el proceso químico involucrado, aplicando la ley de Faraday y la ecuación de Butler-Volmer.</li> <li>2. Define gráfica y cuantitativamente el mecanismo de reacción en sistemas electroquímicos, mediante diagramas de <math>i</math> vs <math>E</math> y Evans.</li> <li>3. Analiza y evalúa la posibilidad de realizar mejoras a la eficiencia de procesos electrolíticos, considerando parámetros de control por transferencia de carga y de masa.</li> <li>4. Lee de manera analítica sobre balance de carga y masa en celdas electrolíticas, estableciendo las ideas principales aplicables a cinemática electrometalúrgica.</li> </ol>	
Bibliografía de la unidad		7.- Cap. 3. 8.- Vol. 2.	

Número	RA al que tributa	Nombre de la unidad	Duración en semanas
4	RA2, RA3, RA4, RA8, RA7	Aplicaciones industriales de la fisicoquímica metalúrgica	3 semanas
Contenidos		Indicador de logro	
4.1. Aspectos termodinámicos y cinéticos. 4.2. Cementación y efectos galvánicos. 4.3. Electro refinación. 4.4. Electro obtención. 4.5. Aplicaciones.		El/la estudiante: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Elabora diagramas de Evans para identificar y representar posibles mejoras a la eficiencia de los procesos en el contexto de la electrometalurgia.</li> <li>2. Compara las operaciones convencionales de electrometalurgia con nuevas tendencias, determinando ventajas y desventajas de cada una.</li> <li>3. Trabaja con su equipo de manera colaborativa y coordinada en problemas sobre electrometalurgia clásica.</li> <li>4. Elabora, de manera clara y coherente, un reporte escrito sobre la eficiencia de los procesos de electrorrefinación y electro obtención de metales, tales como cementación y efectos galvánicos.</li> </ol>	
Bibliografía de la unidad		10. <i>Bibliografía complementaria:</i>	



12.  
16.

Número	RA al que tributa	Nombre de la unidad	Duración en semanas
5	RA4, RA5, RA6, RA7, RA8, RA9	Fisicoquímica de superficies e interfases	4 semanas
Contenidos		Indicador de logro	
4.1. Adsorción: química y física. 4.2. Aplicación a tratamiento de aguas 4.3. Modelos termodinámicos y cinéticos. 4.4. Aspectos coloidales en procesamiento de minerales y metalurgia extractiva. 4.5. Teoría de burbujas. 5.6.1. Teoría de Laplace. 5.6.2. Presión de separación y fuerzas superficiales. 5.6.3. Fuerzas de Van der Waals. 5.6.4. Teoría de doble capa eléctrica y fuerzas asociadas – fuerzas DLVO y potencial Z. 5.6.5. Fuerzas no-DLVO: hidratación e hidrofobización. 5.6.6. Descripción cuantitativa de estructuras de espumas. 5.6.7. Reología de espumas. 5.6.8. Drenaje y colapso de espumas. 5.6.9. Otras aplicaciones – emulsiones.		El/la estudiante: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Resuelve problemas de estabilidad de adsorción en procesos industriales, usando ecuaciones derivadas de la química de superficie e interfases.</li> <li>2. Utiliza modelos matemáticos para definir una solución a problemas sobre sobre tratamientos de agua y drenaje de ácido de rocas.</li> <li>3. Determina restricciones, ventajas y desventajas de la propuesta de solución a un problema de metalurgia sobre tratamientos de agua y drenaje de ácido de rocas.</li> <li>4. Realiza un análisis económico preliminar del estudio de caso, considerando costos operacionales.</li> <li>5. Realiza cálculos para determinar la eficiencia de estrategias de distintos tratamientos innovadores de aguas y de drenaje de ácido de rocas.</li> <li>6. Analiza y evalúa, a nivel básico, la puesta en valor, eficiencia e impacto ambiental de la solución sobre las comunidades, actividades agrícolas, mar, napas y subterráneas.</li> <li>7. Expone, con su equipo, los resultados de la propuesta de solución, reportando los aspectos técnicos involucrados, las fases, eficiencia e impacto.</li> </ol>	
Bibliografía de la unidad		9.- Basmadjian, 2018, Cap. 1-3.  <i>Bibliografía complementaria:</i>  11.- Farooq, 2017, Cap. 10. 14.- Weaire, 1999, Cap. 7, 1,2, 3, 11, 12.	

### E. Estrategias de enseñanza - aprendizaje:

El curso considera las siguientes estrategias de enseñanza:

- Clases expositivas
- Estudio de caso.
- Resolución de problemas.

### F. Estrategias de evaluación:

El curso considera las siguientes instancias de evaluación:

Tipo de evaluación	Resultado de aprendizaje asociado a la evaluación
• Tareas/ejercicios	Tarea 1 evalúa RA3 (unidad 1: actividad en la concentración real). Tarea 2: evalúa RA2 y RA9 (reporte asociado a la unidad 5)
• Controles escritos	Control 1 evalúa RA1, RA2 y RA3 (unidad 1 a la 3) Control 2 evalúa RA2, RA4, RA5 (unidad 4 a la 6)
• Proyecto acotado sobre tratamiento de aguas y drenaje de ácido de rocas.	Evalúa RA5, RA6, RA7, RA8, RA9
• Examen	Evalúa RA1, RA2, RA3, RA4

*Al inicio de cada semestre, el cuerpo académico informará el tipo y cantidad de evaluaciones, así como las ponderaciones asociadas.*



## G. Recursos bibliográficos:

### Bibliografía obligatoria

- (1) Santamaría:  
Santamaría, F. (2006). **Curso de Química General**. Vol. 1 y 2. Editorial Universitaria.
- (2) Atkins:  
Atkins, P.W (2008). **Química Física**. Médica Panamericana.
- (3) Duque:  
Duque R. (2014). **Lixiviación de Minerales Sulfurados de Cobre de baja ley en Columnas Unitarias, Utilizando la Tecnología CuproChlor**. Memoria de Ingeniero Civil de Minas, Universidad de Chile.
- (4) Fredes:  
Fredes, S. (2015). **Diseño de Mejores Prácticas Operacionales en el Procesamiento de concentrados de Molibdeno para Minera Los Pelambres**. Memoria de Ingeniero Civil Químico, Universidad de Chile.
- (5) Han:  
Han, K.N. (2002) *Fundamentals of Aqueous Metallurgy*, SME.
- (6) Bard:  
Bard, A. (2002) *Electrochemical Methods*, Wiley, 2nd Ed.
- (7) Bockris & Reddy:  
Bockris, J.O.M., Reddy, A.K.N. and Gamboa - Aldeco, M. (2000). *Modern Electrochemistry*. Kluwer-Plenum.
- (8) Burkin:  
Burkin, A.R. (2001) *Chemical Hydrometallurgy*, ICP Pubs.
- (9) Basmadjian:  
Basmadjian (2018). *The Little Adsorption Book: A Practical Guide for Engineers and Scientists*. 1st Edition, CRC Press.
- (10) Pugh:  
Pugh, R.J. (2016) *Bubble and Foam Chemistry*, Cambridge University Press; 1 edition.
- (11) Farooq  
Farooq R., Ahmad Z. (2017) *Physico-chemical wastewater treatment and resource recovery*, INTECH Pub.

### Bibliografía complementaria:

- (12) Houston:  
Houston, P.L. (2006). *Chemical kinetics and reaction dynamics*. Dover Publications.
- (13) Burgot:  
Burgot, J.L. (2010). *Predicting Redox Reactions by Graphical Means* [recurso electrónico]. Springer.
- (14) Weaire:  
Weaire D., Hutzler S. (1999) *The physics of foams*, Oxford.
- (15) Levenspiel  
Levenspiel, O (1999). *Chemical Reactor Omnibook*. 729 p., Ch. 51-55.

(16) Jergensen:

Jergensen, G.V. (1999) *Copper Leaching, Solvent Extraction, and Electrowinning Technology*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration Pubs.

#### H. Datos generales sobre elaboración y vigencia del programa de curso

Vigencia desde:	Primavera, 2021
Elaborado por:	Gonzalo Montes
Validado por:	Validación CTD de Minas
Revisado por:	Área de Gestión Curricular