

## PROGRAMA DE CURSO VOLÁTILES EN SISTEMAS DE ARCO

### A. Antecedentes generales del curso:

Departamento	Departamento de Geología					
Nombre del curso	Volátiles en Sistemas de Arco	Código	GL5020	Créditos	6	
Nombre del curso en inglés	<i>Volatiles in Volcanic Arc Systems</i>					
Horas semanales	Docencia	1,5	Auxiliares	1,5	Trabajo personal	7
Carácter del curso	Obligatorio		Electivo	X		
Requisitos	GL4503: Fundamentos de Geoquímica; GL4001: Fundamentos de Petrología					

### B. Propósito del curso:

El curso tiene como propósito que los y las estudiantes sean capaces de utilizar e interpretar modelos que caracterizan fluidos de la tierra (inorgánicos, orgánicos) en el ciclo geodinámico-planetario, particularmente el sistema de arco volcánico. Asimismo, serán capaces de identificar y relacionar metodologías de terreno directas (muestreo in situ de fumarolas) e indirectas (sensor remoto, instrumentación de medición en continuo) con problemas de análisis y gestión de datos asociados a geología ambiental, recursos naturales y riesgos naturales.

Por otra parte, los y las estudiantes aplicarán metodologías petrológicas (termobarometría con elementos químicos volátiles, estudio de las inclusiones vítreas/fluidas, entre otras) para la caracterización petrológica de ambientes estudiados en terreno y laboratorio, considerando la interacción fisicoquímica entre los fluidos y la roca.

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

CE1: Caracterizar e interpretar las estructuras geológicas de una zona, a distintas escalas para proyectos de investigación científica y aplicada.

CE3: Caracterizar los minerales formadores de rocas para determinar sus condiciones físico-químicas de formación y sus aplicaciones.

CE4. Analizar e interpretar procesos geoquímicos y petrogenéticos caracterizando las rocas ígneas y metamórficas de una región.

CE8: Interpretar los procesos de formación de los recursos minerales y energéticos para la investigación científica y aplicada.

CG1: Comunicación profesional y académica

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.

**CG4: Trabajo en equipo**

Trabajar en equipo, de forma estratégica y colaborativa, en diversas actividades formativas, a partir de la autogestión de sí mismo y de la relación con el otro, interactuando con los demás en diversos roles: de líder, colaborador u otros, según requerimientos u objetivos del trabajo, sin discriminar por género u otra razón.

**CG6: Innovación**

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

### C. Resultados de aprendizaje:

Competencias específicas	Resultados de aprendizaje
CE1, CE3, CE4	RA1: Utiliza e interpreta modelos que caracterizan fluidos de la tierra en el ciclo geodinámico-planetario, particularmente el sistema de arco volcánico, considerando el rol de estos en la petrogénesis y su origen, producción, transporte, evolución y preservación en el contexto cortical.
CE3, CE4, CE8	RA2: Identifica y relaciona metodologías de terreno directas (muestreo in situ de fumarolas) e indirectas (sensor remoto, instrumentación de medición en continuo) con problemas de análisis y gestión de datos asociados a geología ambiental, recursos naturales y riesgos naturales.
CE3, CE4, CE8,	RA3: Aplica metodologías petrológicas (termobarometría, estudio de las inclusiones vítreas/fluidas, entre otras) a la caracterización petrológica de ambientes estudiados en terreno y laboratorio, considerando la interacción fisicoquímica entre los fluidos y la roca.
Competencias genéricas	Resultado de aprendizaje
CG1	RA4: Elabora reportes sobre los volátiles en sistemas de arco volcánico, sobre el uso de metodologías de muestreo, análisis de datos, etc. para construir modelos geológicos, reflexionando acerca de la importancia de los estudios de volátiles y su aporte a la sociedad.
CG1, CG2	RA5: Lee, en inglés y español, textos y artículos, sintetizando información para reconstruir las ideas centrales sobre teorías y principales supuestos acerca del transporte y comportamiento de volátiles en diferentes contextos geológicos.
CG4, CG6	RA6: Trabaja con sus pares en actividades de cátedra, juegos de roles, entre otros, relacionadas con la caracterización de volátiles en los sistemas geológicos con énfasis en Chile, demostrando organización, distribución de roles, respeto por las ideas del otro al ejecutar tareas y ejercicios.
CG1, CG6	RA7: Compara herramientas básicas y de última generación para el monitoreo volcánico (muestreo petrológico, de ambiente hidrotermal) a fin de determinar cómo funcionan estas tecnologías, considerando su aporte para el avance de los estudios en ciencias de la tierra.

#### D. Unidades Temáticas:

Número	RA al que tributa	Nombre de la unidad	Duración en semanas
1	RA1, RA4, RA5, RA6	Reservorios-Origen de los fluidos terrestres	8 semanas
Contenidos		Indicador de logro	
<p><b>1.1. Volátiles:</b> Definición, génesis, cosmoquímica del concepto de elemento químico volátil.</p> <p><b>1.2. Transporte de los volátiles:</b> Introducción a la física de los elementos volátiles. Diferentes modos de transportes terrestres. Propiedades de la roca que afectan los transportes de volátiles como la conductividad termal, porosidad, permeabilidad. Relación con la geología estructural como factor dinámico.</p> <p><b>1.3. Comportamiento de los volátiles</b> Caracterización de los comportamientos de volátiles en reservorios terrestres como la solubilidad, partición cristal-fundido, la inmiscibilidad de fluidos y volátiles. Observación de fenómenos de adsorción, difusión, cambios óxido-reductores como parámetros físico-químico de los volátiles en tres tipos de ambientes terrestres: Atmósfera (gas)-Líquido-Roca.</p> <p><b>1.4. Rol de los fluidos en la petrogénesis:</b> rol de los fluidos (gas y líquidos) para la comprensión de los procesos que involucran la formación de rocas. Formación de las rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias. Fusión parcial-cristalización, el metamorfismo (ley de equilibrio/rol de los fluidos), procesos de micro mineralización y interacción con fluidos intersticiales, metasomatismo. Se demuestra el modo de preservación gas-líquido en rocas sedimentarias, la formación de rocas sedimentarias y el ciclo de génesis de los hidrocarburos.</p> <p><b>1.5. Arcos volcánicos: rol de los fluidos.</b></p>		<p>El/la estudiante:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Utiliza e interpreta diagramas con datos físicos dados, considerando los mecanismos de transporte de los volátiles o fluidos terrestres en función de las propiedades estructurales de la tierra.</li> <li>Usa diagramas que incluyen datos químicos y revisa conceptos para comprender el rol de los volátiles en el ambiente, en el contexto del Ciclo Geodinámico-Planetario y para ambientes de subducción.</li> <li>Traza fluidos en zonas de subducción (en Chile), considerando el origen, comportamiento químico de los volátiles en estudio, los reservorios, entre otros.</li> <li>Utiliza conceptos teóricos sobre los procesos petrogenéticos para comprender cómo y dónde se producen los ruidos terrestres.</li> <li>Calcula flujos y transportes de masas entre reservorios terrestres, considerando los modelos cuantitativos sobre los volátiles en sistemas geodinámicos.</li> <li>Sintetiza información extraída de artículos científicos sobre el comportamiento y rol de los volátiles en el ciclo geodinámico.</li> <li>Elabora un reporte sobre un trabajo práctico donde sintetiza la aplicación de datos, el análisis crítico de lecturas asociadas y el uso de volátiles en sistemas de arco volcánico para considerando los reservorios y sus orígenes</li> <li>Realiza una reflexión crítica sobre la aplicación de los estudios de volátiles en diferentes áreas de las ciencias de la tierra y cómo estos impactan en posibles soluciones a problemas de la sociedad en diversos ámbitos.</li> <li>Trabaja en la resolución de un problema de carácter geocientífico, en el contexto de una</li> </ol>	

<p>Ciclo completo de transporte de los volátiles en una zona de subducción. Métodos geofísicos-modelamiento, métodos geoquímicos-modelamiento. Estudio de fluidos en terrenos metamórficos con enfoque sobre el concepto de “terrane” tectonoestratigráficas. Transporte y rol de los volátiles en el contexto geodinámico con la subducción de terrenos oceánicos, subducción de placa oceánica-continental. Condiciones de transporte de los fluidos producidos por sedimentos (pelitas/carbonatos), en ambiente de retro-arco (circulación de fluidos corticales), con el magmatismo-volcanismo.</p> <p><b>1.6. Trazadores de geodinámica en arco volcánico:</b> Herramientas para caracterizar las condiciones físico-químicas de los volátiles en los arcos volcánicos. Cuantificación de los tiempos de residencia químicos y reconstrucción geodinámica en ambiente de subducción. Importancia de cada volátil y su impacto en el ambiente natural como social para la civilización humana en ejemplos como los siguientes elementos: agua, carbono, azoto, halógenos, azufre, fraccionamiento biológico (rol de S, C, N), isótopos estables, gases nobles.</p>	<p>simulación o juego de roles incorporando conceptos teóricos sobre el origen y la caracterización de los fluidos terrestres en distintos ambientes geológicos presentes en Chile.</p>
<p>Bibliografía de la unidad</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Fyfe, W. S. (2012). Fluids in the Earth's crust: Their significance in metamorphic, tectonic and chemical transport process (Vol. 1). Elsevier.</li> <li>2) King, P., Fegley, B., &amp; Seward, T. (Eds.). (2018). High Temperature Gas-solid Reactions in Earth and Planetary Processes (Vol. 84). Walter de Gruyter GmbH &amp; Co KG.</li> <li>3) Willson, M. (1989). Igneous petrogenesis. A global tectonic approach, 466 p.</li> </ol>

Número	RA al que tributa	Nombre de la unidad	Duración en semanas
2	RA2, RA3, RA4, RA6, RA7	Aplicaciones en terreno y herramientas petrológicas	7 semanas

Contenidos	Indicador de logro
<p><b>2.1. Métodos muestreo directo-indirecto de gases:</b> Introducción a cómo aplicar los métodos y técnicas de monitoreo volcánico (gas-líquidos) y senso remoto in situ de fumarolas. Demuestra cómo usar los datos por los métodos analíticos en laboratorio, senso remoto indirecto (sensores electroquímicos, sensores UV/IR, geofísica) y análisis de componentes de la atmosfera.</p> <p><b>2.2. Geotermometría de gases y químicos:</b> Uso e interpretación de diagramas de gases para determinar condiciones de temperaturas de fluidos: hidrógeno (<math>^1\text{H}</math>, <math>^2\text{H} = \text{D}</math>, <math>^3\text{H}</math>), oxígeno (<math>^{18}\text{O}</math>, <math>^{16}\text{O}</math>), sulfuro (<math>^{32}\text{S}</math>, <math>^{34}\text{S}</math>), helio (<math>^3\text{He}</math>, <math>^4\text{He}</math>). Uso e interpretación de diagramas de gases para determinar condiciones de temperaturas de fluidos: Sílice, Na-K, Na-K-Ca, Na-K-Mg, Solutos iónicos.</p> <p><b>2.3. Termómetros de vapor (gas)-Inorgánico y Orgánico:</b> Uso e interpretación de diagramas de vapor para gases inorgánicos para determinar temperaturas con los componentes siguientes: <math>\text{CO}_2\text{-CO}</math>, <math>\text{CO}_2\text{-CH}_4</math>, <math>\text{H}_2\text{-H}_2\text{S}</math>, <math>\text{H}_2\text{S-SO}_2\text{-H}_2\text{O}</math> y <math>\text{H}_2\text{-Ar}</math>. Uso e interpretación de diagramas de vapor para gases orgánicos para determinar temperaturas con los componentes siguientes: <math>\text{CH}_4\text{-C}_2\text{H}_6\text{-C}_3\text{H}_8\text{-C}_4\text{H}_{10}</math>, <math>\text{C}_2\text{H}_6\text{-C}_2\text{H}_4</math>, <math>\text{C}_3\text{H}_8\text{-C}_3\text{H}_6</math> y <math>\text{C}_2\text{H}_4\text{-C}_6\text{H}_6</math>.</p> <p><b>2.4. Geobarómetros-Sólidos-Líquidos:</b> Revisa los conceptos de geobarometría con el rol de los volátiles; la teoría sobre la actividad y potencial químico para los</p>	<p>El/la estudiante:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Identifica y analiza métodos y técnicas de muestreo aplicables a ambientes hidrotermales en superficie.</li> <li>2. Distingue y analiza métodos de muestreo aplicados a terreno aplicables a problemas de ciencias de la tierra.</li> <li>3. Usa modelos y analiza datos de muestreo de gases directo-indirecto aplicables a ejemplos de riesgos volcánicos, geotermia, geología económica y ambiental.</li> <li>4. Calcula condiciones termobarométricas de fluidos mediante la construcción de diagramas de componentes de gas, considerando datos químicos.</li> <li>5. Calcula condiciones termobarométricas petrológicas y construye diagramas de componentes de gas considerando tanto medidas petrológicas como petroquímicas.</li> <li>6. Observa y analiza imágenes de muestras de rocas que contienen fluidos, caracterizando los procesos petrológicos que transforman y producen fluidos a diversos estados P/T.</li> <li>7. Interpreta y usa modelos para representar ejemplos asociados a ejemplos de riesgos volcánicos, geotermia, geología económica y ambiental.</li> <li>8. Elabora un reporte donde sintetiza los principales resultados de un trabajo práctico que incorpora conceptos, aplicaciones de gestión de datos sobre los volátiles en sistemas de arco volcánico, así como un análisis crítico de la importancia de estos estudios para las áreas profesionales de las ciencias de la tierra.</li> <li>9. Realiza una reflexión crítica donde contextualiza y argumenta sobre el uso de aplicaciones en terreno y herramientas petrológicas, así como modelamiento y análisis crítico, argumentos cómo estos impactan en la búsqueda de soluciones a problemas de la sociedad.</li> <li>10. Trabaja en la resolución de un problema de</li> </ol>

elementos volátiles. Caracteriza las condiciones tampón ( $f_{O_2}$ ,  $f_S$ ) y demuestra aplicación de los termobarómetros siguientes: Sólido-Sólido-Líquido, reacciones de intercambio (Fe-Mg en olivino), termometría de solvus y sustitución de elementos trazas (KD).

**2.5. Geobarómetros-Volátiles:** Revisión de los conceptos de geobarometría que usan los volátiles en ejemplos como distribución de isótopos en minerales, equilibrio mineral P-T vs.  $CO_2$ - $(H_2O)$ , y termobarómetros Líquidos -Silicatados. Demuestra aplicación de las inclusiones de fundidos para calcular condiciones de presión, temperaturas y composicional de los magmas. Uso de diagramas multi-volátiles y estudio de inclusiones de fluidos con aplicación para usar diagramas de fases y determinar condiciones de presión, temperaturas y composicional de distintos tipos de paleofluidos.

**2.6. Métodos de exploración de gases:** Demostración de las aplicaciones para explorar gases vía herramientas con estrategia de monitoreo de terreno y métodos analíticos en laboratorio. Explica la utilidad de los volátiles en exploración geotermal con demostración de aplicaciones en estudio de reacciones hidrotermales, y fenómenos de ebullición y mezcla. Demuestra ejemplos de análisis de pozos, estudios de determinación de presión de porosidad-fracturación, migración/reservorios de

carácter geocientífico, en el contexto de una simulación o juego de roles incorporando el manejo conceptual de metodologías que entregan datos físico-químicos de los volátiles en distintos ambientes geológicos presentes en Chile y al nivel internacional.

<p>hidrocarburos. Introduce a los métodos innovadores que usan carbono en la roca con reciclaje/secuestro de CO<sub>2</sub>.</p>	
<p>Bibliografía de la unidad</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Putirka, K. D., &amp; Tepley III, F. J. Volume 69: Minerals, Inclusions and Volcanic Processes.</li> <li>2) Fischer, T. P., &amp; Chiodini, G. "Volcanic, magmatic and hydrothermal gases." In The encyclopedia of volcanoes, pp. 779-797. Academic Press, 2015.</li> <li>3) Chandrasekharam, D., &amp; Bundschuh, J. (2002). Geochemistry of thermal waters and thermal gases. Geothermal Energy Resources for Developing Countries, 253-267.</li> </ol>

#### E. Estrategias de enseñanza – aprendizaje:

El curso considera las siguientes estrategias de enseñanza:

- **Clases expositivas.**
- **Ejercicios supervisados semanales:** aplicación de modelamiento y **análisis crítico de lectura.**
- **Resolución de problemas.**
- **Simulaciones** (juego de roles) de caso en grupo con presentaciones orales en clases auxiliares.

*El cuerpo académico dispondrá de tiempos de consulta y revisión para aclarar, corregir, retroalimentar el trabajo de los y las estudiantes.*

#### F. Estrategias de evaluación:

El curso podría considerar las siguientes estrategias de evaluación:

- **Ejercicios:** 4 actividades supervisadas (taller).
- **Simulaciones de caso (juego de roles):** 4 actividades prácticas donde se analizan casos relacionados con el territorio nacional. Para esta actividad, los y las estudiantes por equipos asumen roles específicos: (1) geólogos de terreno, (2) científicos de laboratorio, (3) gobierno, (4) empresarios con el objetivo de dar una solución a problemas que se le presentan y cuyos resultados exponen al resto de sus compañeros y cuerpo académico.
- **Reporte 1:** 1 trabajo práctico que sintetiza la aplicación de gestión de datos, el análisis crítico de lectura y su importancia para ejemplos (casos) de problemas que la sociedad enfrenta y que pueden ser resueltos con estudios de volátiles en sistemas de arco volcánico (entrega semana 8).
- **Reporte 2:** 1 trabajo práctico que integra el uso de metodologías, modelamiento,

análisis crítico de lectura supervisado con temas relacionados a ejemplos donde son relevantes los estudios de volátiles en sistemas de arco (entrega semana 14).

### **G. Recursos bibliográficos:**

#### **Bibliografía obligatoria:**

- (1) Fyfe, W. S. (2012). Fluids in the Earth's crust: Their significance in metamorphic, tectonic and chemical transport process (Vol. 1). Elsevier.
- (2) King, P., Fegley, B., & Seward, T. (Eds.). (2018). High Temperature Gas-solid Reactions in Earth and Planetary Processes (Vol. 84). Walter de Gruyter GmbH & Co KG.
- (3) Willson, M. (1989). Igneous petrogenesis. A global tectonic approach, 466 p.
- (4) Chandrasekharam, D., & Bundschuh, J. (2002). Geochemistry of thermal waters and thermal gases. Geothermal Energy Resources for Developing Countries, 253-267.
- (5) Fischer, T. P., & Chiodini, G. "Volcanic, magmatic and hydrothermal gases." In The encyclopedia of volcanoes, pp. 779-797. Academic Press, 2015.
- (6) Putirka, K. D., & Tepley III, F. J. Volume 69: Minerals, Inclusions And Volcanic Processes.

#### **Bibliografía complementaria:**

- (7) Aiuppa, A. (2015). Volcanic-gas monitoring. In Volcanism and Global Environmental Change (pp. 81-96). Cambridge University Press.
- (8) Allègre, C. J. (2008). Isotope geology. Cambridge University Press. 512 p.
- (9) Bancroft, G. M., & Hyland, M. M. (1990). Mineral-water interface geochemistry. Mineralogical Society of America, Washington, 512-557.
- (10) Bodnar, R. J., & Samson, I. (2003). Introduction to fluid inclusions. Fluid inclusions: Analysis and interpretation, 32, 1-8.
- (11) Cannatelli, C., Doherty, A. L., Esposito, R., Lima, A., & De Vivo, B. (2016). Understanding a volcano through a droplet: a melt inclusion approach. Journal of Geochemical Exploration, 171, 4-19.
- (12) Frezzotti, M. L. (2001). Silicate-melt inclusions in magmatic rocks: applications to petrology. Lithos, 55(1-4), 273-299.
- (13) Giggenbach, W. F. (1988). Geothermal solute equilibria. derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers. Geochimica et cosmochimica acta, 52(12), 2749-2765.
- (14) Giggenbach, W. F. (1996). Chemical composition of volcanic gases. In Monitoring and mitigation of volcano hazards (pp. 221-256). Springer, Berlin, Heidelberg.
- (15) Hurai, V., Huraiová, M., Slobodník, M., & Thomas, R. (2015). Geofluids: developments in microthermometry, spectroscopy, thermodynamics, and stable isotopes. Elsevier.
- (16) Jambon, A. (1994). Earth degassing and large-scale geochemical cycling of volatile elements. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 30(1), 479-517.
- (17) Mitra, S. (2004). High pressure geochemistry & mineral physics: basics for planetology and geo-material science. Elsevier, 1233 p.
- (18) Naldrett, A. J., & Naldrett, A. L. (2004). Magmatic sulfide deposits: Geology,

- geochemistry and exploration. Springer Science & Business Media. 727 p.
- (19) Pasquale, V., Verdoya, M., & Chiozzi, P. (2014). Geothermics: Heat flow in the lithosphere (pp. 15-49). Heidelberg: Springer.
- (20) Perchuk, L. L. (Ed.). (2004). Progress in Metamorphic and Magmatic Petrology: A Memorial Volume in Honour of DS Korzhinskiy. Cambridge University Press.
- (21) Porcelli, D., Ballentine, C. J., & Wieler, R. (2002). An overview of noble gas geochemistry and cosmochemistry. Reviews in mineralogy and geochemistry, 47(1), 1-19.
- (22) Roedder, E. (1984). Volume 12: Fluid inclusions. Mineralogical Society of America.
- (23) Saccorotti, G., Iguchi, M., & Aiuppa, A. (2015). In situ Volcano monitoring: present and future. In Volcanic Hazards, Risks and Disasters (pp. 169-202). Elsevier.
- (24) Yardley, B. W., Manning, C., & Garven, G. (Eds.). (2011). Frontiers in geofluids. John Wiley & Sons.

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

Vigencia desde:	Otoño, 2021
Elaborado por:	Philippe Robidoux
Validado por:	Validación académico par: Valentina Flores, Jefa Docente Validación CTD de Geología
Revisado por:	Área de Gestión Curricular