

Direttore

Maurizio PALMISANO

Istituto per i Sistemi Agricoli e Forestali del Mediterraneo

Comitato scientifico

Manuel CURZI

Sapienza – Università di Roma

Benedetto DE VIVO

Università degli Studi di Napoli “Federico II” e l’Università Telematica Pegaso

Diana DI LUCCIO

Università degli Studi di Napoli “Parthenope”

Sabino MAGGI

Istituto sull’Inquinamento Atmosferico del Consiglio Nazionale delle Ricerche

Néstor Hernando CAMPOS

Universidad Nacional de Colombia

Aimè Lay EKUAKILLE

Università del Salento

LA SACRA ALCHIMIA

Processi chimici, contaminanti naturali e antropici
e implicazioni per gli ecosistemi e la salute umana



Tra roccia, acqua e aria, l'alchimia degli elementi decide il confine sottile tra risorsa e rischio.

La collana «La sacra alchimia» ospita volumi dedicati alle trasformazioni dei componenti inorganici e organici nell'ambiente e alle loro ricadute sulla salute umana. L'obiettivo è integrare geochimica ambientale, idrogeochimica, scienze del suolo, tossicologia, epidemiologia ambientale e scienze dei materiali, con particolare attenzione a contaminanti naturali e antropici, scenari di esposizione e valutazione del rischio. La collana accoglie manuali avanzati, monografie tematiche e casi studio che combinano monitoraggio, modellistica, tecniche analitiche d'avanguardia e approcci interdisciplinari per supportare la gestione sostenibile delle risorse, la mitigazione degli impatti e le politiche di tutela degli ecosistemi e delle comunità esposte.

Classificazione Decimale Dewey

— 577.14 (23.) CHIMICA AMBIENTALE

Thema

— Soggetto: RBGK. Geochimica

— Qualificatori: 3MR. XXI secolo, 2000-2100

MAURIZIO PALMISANO

**GEOQUÍMICA
AMBIENTAL
Y SALUD**
TEORÍA, MÉTODOS Y APLICACIONES





ISBN
979-12-218-2566-4

PRIMERA EDICIÓN
ROMA 10 JULIO 2026

A mis Padres

RESUMEN

11	<i>Prefacio</i>
13	<i>Introducción</i>
19	Fundamentos de la geoquímica ambiental
39	Principios y reacciones geoquímicas
55	Física nuclear
67	Cinética química
75	Cinética química y geoquímica
103	Ciclos geoquímicos
181	Elementos potencialmente tóxicos
207	Geoquímica ambiental
273	Geoquímica del agua
289	Química del agua
347	Parámetros físicos y químicos
355	Técnicas analíticas

387	Ciclos geoquímicos de los gases de efecto invernadero
463	Muestreo y protocolos analíticos
479	Técnicas analíticas en geoquímica ambiental
545	Análisis elemental en geoquímica
593	Principios analíticos
627	Estudios de caso
667	Indices de contaminación
683	Técnicas avanzadas y complementarias
693	Análisis de metales traza
713	Regulaciones internacionales
729	Geoquímica isotópica
769	Ejemplos y técnicas de remediación
819	Caracterización de sitios y técnicas de remediación
837	Normas y directrices internacionales
875	La geoquímica del mañana
923	<i>Bibliografía y referencias para lectura complementaria</i>
927	<i>Índice analítico</i>

PREFACIO

El presente volumen, *Geochímica Ambiental y Salud*, se concibió en respuesta a la urgente necesidad de comprender con mayor profundidad las complejas relaciones entre los procesos geoquímicos y sus implicaciones para los ecosistemas y el bienestar humano. En las últimas décadas, la intensificación de las presiones antrópicas, incluidas las actividades mineras, las emisiones industriales y el uso generalizado de agroquímicos, ha provocado la movilización y redistribución de elementos potencialmente tóxicos (EPT) en el ambiente, a menudo con consecuencias para la salud aún insuficientemente comprendidas.

La geochímica ambiental, disciplina situada en la intersección de las ciencias de la Tierra, la química, la toxicología y la salud ambiental, aporta herramientas esenciales para investigar las fuentes, la movilidad y el destino de contaminantes naturales y de origen antrópico. Sin embargo, pese a su relevancia crítica, ha faltado un texto integral e integrador que vincule la teoría geoquímica con los efectos reales sobre la salud, especialmente en contextos educativos. Este libro aspira a cubrir ese vacío.

Basado en avances científicos recientes y en estudios de caso de diversos entornos ambientales, el libro adopta un enfoque multidisciplinar para caracterizar sitios contaminados, rastrear contaminantes mediante firmas isotópicas y elementales, y comprender los ciclos biogeoquímicos alterados por las actividades humanas. Se presta especial atención a las metodologías de evaluación del riesgo, las estrategias de remediación y las herramientas de apoyo a la toma de decisiones, fundamentales para una gestión ambiental y una formulación de políticas sustentadas en evidencia.

La estructura del libro está diseñada para favorecer tanto la progresión didáctica como la profundidad temática. Resulta adecuado para estudiantes avanzados de grado y posgrado, científicos ambientales, geoquímicos, ingenieros, profesionales de la salud pública y responsables de la toma de decisiones en la interfaz ciencia-política. Los capítulos se enriquecen con figuras conceptuales, tablas comparativas y conjuntos de datos reales para facilitar el aprendizaje y su aplicación.

En última instancia, esta obra refleja una visión de la geochímica no solo como una ciencia descriptiva, sino como una disciplina proactiva, capaz de contribuir al desarrollo sostenible, la justicia ambiental y la salud planetaria.

INTRODUCCIÓN

La geochímica ambiental se sitúa en la convergencia de las geociencias, la química y la salud pública, y constituye una disciplina poderosa capaz de descifrar la dinámica química de la superficie terrestre y sus repercusiones sobre los organismos vivos. Aborda las fuentes, transformaciones, mecanismos de transporte y el destino final de las especies químicas, tanto de origen natural como introducidas por actividades antrópicas, a través de compartimentos ambientales interconectados: rocas, suelos, aguas, sedimentos y la biosfera. A medida que las sociedades afrontan de forma creciente la degradación ambiental, la contaminación y las crisis sanitarias asociadas, la geochímica ambiental emerge no solo como una ciencia diagnóstica, sino también como una herramienta crítica de carácter predictivo y preventivo.

Las raíces de la geochímica se remontan a comienzos del siglo XX, inicialmente orientada a comprender la distribución de los elementos en la corteza terrestre y su papel en la petrogénesis. Con la llegada de técnicas analíticas modernas y el incremento de la conciencia ambiental en la era posindustrial, la geochímica experimentó un cambio de paradigma. El auge de la geochímica ambiental en las décadas de 1970 y 1980 reflejó la creciente preocupación por los impactos ecológicos y sanitarios de la contaminación por elementos traza, el drenaje ácido de minas, la disposición de residuos radiactivos y las emisiones industriales.

En la actualidad, la geochímica ambiental es una ciencia plenamente interdisciplinaria. Se nutre de la química analítica, la mineralogía, la hidrogeología, la edafología, la ecología y la toxicología para dilucidar

cómo se desplazan los elementos químicos a través del ambiente y cómo pueden afectar negativamente a la salud humana, especialmente en poblaciones y ecosistemas vulnerables. A diferencia de la geochímica clásica, que a menudo se centra en procesos geológicos inertes o de muy largo plazo, la geochímica ambiental pone el énfasis en dinámicas contemporáneas, interacciones biogeoquímicas y perturbaciones antrópicas de los ciclos naturales.

Toda forma de vida se sustenta en la disponibilidad y el ciclado de los elementos químicos. Elementos como el carbono (C), el nitrógeno (N), el fósforo (P), el hierro (Fe) y el zinc (Zn) son esenciales para las funciones metabólicas. Sin embargo, el límite entre esencialidad y toxicidad es estrecho, depende de la concentración y está influido por factores como la especiación química, la biodisponibilidad y el contexto ambiental.

Algunos elementos, como el arsénico (As), el cadmio (Cd), el mercurio (Hg) y el plomo (Pb), no tienen una función biológica conocida y son tóxicos incluso a niveles traza. Otros, como el cromo (Cr), el manganeso (Mn) y el selenio (Se), pueden ser a la vez esenciales y perjudiciales según la dosis y el estado de oxidación. El comportamiento geoquímico de estos elementos, cómo se movilizan, transportan, adsorben y transforman, es fundamental para comprender el riesgo de exposición y los desenlaces toxicológicos.

Un desafío clave en geochímica ambiental consiste en distinguir entre fuentes de contaminación geogénicas y antrópicas. Los procesos geogénicos, como la meteorización de rocas metalíferas, la actividad hidrotermal y las emisiones volcánicas, pueden liberar cantidades significativas de elementos tóxicos al ambiente. Concentraciones naturalmente elevadas de arsénico en acuíferos de aguas subterráneas del sur de Asia, fluoruro en regiones volcánicas, o el uranio en cuencas sedimentarias son ejemplos de contextos geoquímicos puramente naturales, pero peligrosos.

Por el contrario, las actividades humanas han amplificado de manera drástica los flujos elementales en el ambiente. Los vertidos industriales, las operaciones mineras, la combustión de combustibles fósiles, las prácticas agrícolas y la gestión inadecuada de residuos han conducido a la acumulación de sustancias tóxicas en suelos, sedimentos y sistemas

acuáticos. En muchos casos, la movilización antrópica supera en órdenes de magnitud los niveles geoquímicos de fondo natural. Además, el cambio climático y las modificaciones en el uso del suelo complican aún más el transporte de contaminantes al alterar las condiciones redox, los regímenes hidrológicos y la dinámica sedimentaria.

La geochímica ambiental desempeña un papel fundamental en el esclarecimiento de las vías por las cuales las sustancias tóxicas alcanzan a las poblaciones humanas.

Estas vías incluyen:

- ingesta directa de agua contaminada (p. ej., aguas subterráneas con arsénico);
- consumo de alimentos contaminados (p. ej., cadmio en el arroz, mercurio en el pescado);
- inhalación de partículas en suspensión (p. ej., plomo en el polvo urbano);
- contacto dérmico con suelos contaminados o residuos industriales.

Cada ruta de exposición está gobernada por la compleja interacción entre la especiación geoquímica, las propiedades del medio (p. ej., pH, potencial redox, materia orgánica) y el comportamiento humano. De forma crucial, no todas las especies químicas de un mismo elemento son igualmente tóxicas. Por ejemplo, Cr(VI) es mucho más peligroso que Cr(III), y la forma metilada del mercurio (MeHg) es mucho más biodisponible que su contraparte inorgánica.

Los métodos geoquímicos son indispensables en la evaluación del riesgo ambiental. Permiten determinar valores de fondo, cartografiar penachos de contaminación, identificar fuentes de contaminantes (p. ej., mediante huellas isotópicas o estadísticas) y estimar la movilidad y la bioaccesibilidad de los contaminantes.

Herramientas avanzadas como la extracción secuencial, la modelización geoquímica (p. ej., PHREEQC, Visual MINTEQ) y el análisis de especiación aportan información sobre el reparto de los elementos entre fases sólida, líquida y gaseosa. Acoplada con datos epidemiológicos y toxicológicos, esta información permite evaluaciones más precisas del riesgo para la salud humana y el diseño de estrategias de mitigación adecuadas.

Es importante destacar que la integración del conocimiento geoquímico y biomédico facilita el tránsito desde estudios meramente descriptivos de contaminación hacia una ciencia proactiva de salud ambiental, identificando no solo la presencia de un contaminante, sino su potencial para causar enfermedad bajo escenarios realistas de exposición.

Este libro se apoya en una amplia gama de estudios de caso internacionales para ilustrar la aplicación de la geochímica ambiental a problemas reales. Desde la acidificación de regiones mineras en los Andes hasta la contaminación por arsénico en Bangladesh e India, desde la exposición al plomo en entornos urbanos hasta la acumulación de mercurio en redes tróficas acuáticas amazónicas, cada caso pone de relieve combinaciones singulares de condiciones geoquímicas, presiones socioeconómicas y resultados en salud.

Estos estudios de caso también sirven para subrayar las disparidades en las capacidades de monitoreo, las tecnologías de remediación y las infraestructuras de salud pública a escala global. La carga de la exposición recae de manera desproporcionada sobre poblaciones de regiones de bajos ingresos, a menudo sin acceso a agua segura, regulación efectiva o pericia técnica.

La geochímica ambiental no puede operar de forma aislada. Para abordar eficazmente desafíos complejos de salud ambiental, debe articularse con disciplinas como la geología médica, la toxicología, la epidemiología, la política ambiental y la comunicación del riesgo. Un geocientífico especializado en geochímica ambiental debe sentirse tan cómodo discutiendo isotermas de sorción y amortiguamiento redox como comprendiendo marcos regulatorios y estrategias de participación pública.

La aparición de los paradigmas de “One Health” y los marcos de salud planetaria refuerza aún más la relevancia de la geochímica en los diálogos transdisciplinarios. Estos enfoques reconocen la interconexión entre la salud humana, animal y ambiental, y sitúan a la geochímica como una ciencia fundacional para comprender vulnerabilidades compartidas.

Este volumen está diseñado para guiar a los lectores, desde estudiantes hasta investigadores, consultores y responsables de políticas, a través de los principios teóricos y las aplicaciones prácticas de la geochímica ambiental en el contexto de la salud.

La salud de nuestro planeta y de sus habitantes está cada vez más condicionada por interacciones químicas en la superficie terrestre. La geochímica ambiental ofrece no solo una lente para diagnosticar problemas, sino también herramientas para anticiparlos y mitigarlos. A medida que avanzamos en el Antropoceno, donde los sistemas naturales se reconfiguran por la actividad humana, la integración entre geochímica y ciencias de la salud deja de ser simplemente importante para convertirse en un imperativo.

Al tender puentes sobre la brecha de conocimiento entre las ciencias de la Tierra y las ciencias de la vida, este libro aspira a contribuir a esa misión, fomentando un enfoque científicamente fundamentado y orientado a la salud para gestionar los desafíos geoquímicos de nuestro tiempo.

FUNDAMENTOS DE LA GEOQUÍMICA AMBIENTAL

Definición y relevancia de la geoquímica ambiental

La geoquímica ambiental es la disciplina científica que investiga la abundancia, distribución, movilidad y transformaciones químicas de elementos y compuestos en los ambientes superficiales de la Tierra, a saber: suelos, sedimentos, aguas superficiales y subterráneas, biota y atmósfera. Abarca tanto procesos naturales (geogénicos) como antrópicos (inducidos por el ser humano) que modelan la composición química de estos compartimentos y las complejas interacciones que ocurren en sus interfaces. Al rastrear dichos procesos, la geoquímica ambiental constituye un marco interpretativo poderoso para comprender el comportamiento ambiental de las especies químicas y sus implicaciones para el funcionamiento de los ecosistemas y la salud humana.

En su esencia, la geoquímica ambiental deriva de la geoquímica clásica, pero trasciende los límites disciplinarios al integrar conceptos y metodologías de las ciencias ambientales, la química analítica, la geología, la hidrología, la edafología, la mineralogía, la microbiología, la toxicología y la salud pública. Esta interdisciplinariedad es esencial para evaluar de forma integral las fuentes, las vías de transporte, los mecanismos de transformación y los sumideros de los elementos químicos, en particular los elementos potencialmente tóxicos (EPT) y los contaminantes emergentes, dentro de sistemas ambientales dinámicos.

La relevancia de la geoquímica ambiental ha crecido de manera marcada en las últimas décadas en respuesta a la intensificación de presiones antrópicas como la minería, la industrialización, la expansión urbana,

la gestión inadecuada de residuos, la combustión de combustibles fósiles y la intensificación agrícola. Estas actividades han alterado el equilibrio geoquímico natural, provocando la removilización y bioacumulación de elementos traza y compuestos que pueden resultar nocivos incluso a bajas concentraciones. La contaminación por arsénico en aguas subterráneas, la acumulación de mercurio en redes tróficas acuáticas, el enriquecimiento de cadmio en suelos agrícolas y la proliferación del drenaje ácido de minas en paisajes postmineros son solo algunos ejemplos emblemáticos de problemáticas geoquímicas con graves consecuencias ambientales y de salud pública.

Más allá de describir patrones espaciales y temporales de distribución elemental, la geoquímica ambiental se centra en aspectos mecanísticos clave como la especiación (es decir, las formas químicas de los elementos), la reactividad (incluidos los procesos redox y de sorción), la biodisponibilidad (el grado en que los contaminantes son accesibles a los organismos) y los umbrales de toxicidad. Estos factores determinan el destino ambiental y los riesgos ecológicos de los contaminantes mucho más que las concentraciones totales por sí solas.

Desde un punto de vista práctico, la geoquímica ambiental sustenta numerosos ámbitos aplicados, entre ellos:

- Evaluación del riesgo y delimitación de sitios contaminados;
- Planificación de la remediación, mediante modelización geoquímica y monitoreo de la atenuación natural;
- Protección de la salud pública, al identificar vías de exposición (p. ej., agua de consumo, cultivos, inhalación de polvo);
- Geoquímica forense ambiental, orientada a la identificación de fuentes y a la huella (“fingerprinting”) de contaminantes;
- Desarrollo de políticas, aportando datos científicamente sólidos para fundamentar regulaciones ambientales y un uso sostenible del territorio.

La disciplina también desempeña un papel central en el avance de conceptos como las líneas base geoquímicas, los estándares ambientales y las cargas críticas, esenciales para distinguir entre niveles de fondo naturales y anomalías inducidas por la contaminación.