Radiación de Sincrotrón: Una herramienta avanzada para el análisis y monitoreo de la contaminación en ecosistemas

Gobinath Chandrakasan ***** Genaro Martín Soto-Zarazúa y Priscila Sarai Flores-Aguilar

Facultad de Ingeniería, Campus Amazcala, Universidad Autónoma de Querétaro, Carr. Chichimequillas S/N Km 1, Amazcala, El Marqués 76265, Querétaro, México.

Artículo recibido el 26 de agosto de 2025 y aceptado el 24 de octubre de 2025

Synchrotron radiation: an advanced tool for analyzing and monitoring pollution in ecosystems

Abstract

Synchrotron radiation is an innovative technology that enables detailed analysis of pollutants in air, water and soil at the molecular level. It's extremely intense and precise light facilitates the identification of harmful substances even at minimal concentrations, providing key information on their impact on ecosystems and human health. This tool is essential for environmental monitoring, early detection of pollutants, and the development of sustainable strategies for environmental protection. This review explores recent applications of synchrotron radiation in environmental studies, highlighting its role in the detection of heavy metals, microplastics and other emerging pollutants.

Key words: Synchrotron radiation; Environmental pollution; Molecular monitoring; Microplastics and heavy metals.

Resumen

La radiación de sincrotrón es una tecnología innovadora que permite el análisis detallado de contaminantes en el aire, agua y suelo a nivel molecular. Su luz extremadamente intensa y precisa facilita la identificación de sustancias nocivas. Incluso, en concentraciones mínimas, proporcionando información clave sobre su impacto en los ecosistemas y la salud humana. Esta herramienta es esencial para el monitoreo ambiental, la detección temprana de contaminantes y el desarrollo de estrategias sostenibles para la protección del medio ambiente. Esta revisión explora las aplicaciones recientes de la radiación de sincrotrón en estudios ambientales, destacando su papel en la detección de metales pesados, microplásticos y otros contaminantes emergentes.

Palabras clave: Radiación de sincrotrón; Contaminación ambiental; Monitoreo molecular; Microplásticos y Metales pesados.

*Autor de correspondencia
Email: gobinath.chandrakasan@uaq.mx
ISSN 2594-0384 (Electrónica)

Introducción

La contaminación ambiental es uno de los desafíos más urgentes de nuestro tiempo, que requiere técnicas analíticas avanzadas para un monitoreo y mitigación efectivos. La radiación de sincrotrón (SR) ha surgido como una poderosa herramienta para investigar contaminantes a nivel molecular, ofreciendo una precisión incomparable en la detección de contaminantes en el aire, el agua y el suelo (de Vives *et al*., 2006). Un sincrotrón es un tipo de acelerador de partículas diseñado para propulsar partículas cargadas, como los electrones, a velocidades cercanas a la de la luz (aproximadamente 300.000 km por segundo). En una fuente de luz sincrotrón, la radiación no se produce por un incremento de la energía del electrón, sino debido a la aceleración centrípeta que experimenta al seguir una trayectoria circular o curva, dirigida hacia el centro de su órbita. Esta aceleración es la responsable de la emisión de radiación electromagnética. La energía de los electrones se mantiene prácticamente constante durante su recorrido, reponiéndose únicamente la fracción perdida por el proceso de radiación. Esta radiación posee propiedades excepcionales que la convierten en una valiosa herramienta en la investigación científica.

La crisis mundial de contaminación requiere soluciones científicas innovadoras y precisas para mitigar su impacto. La tecnología de SR ofrece capacidades incomparables para detectar, analizar y abordar la contaminación ambiental a nivel molecular. Al aprovechar las técnicas de sincrotrón, los investigadores pueden desarrollar estrategias de remediación más efectivas, mejorar el control de la contaminación y contribuir a políticas ambientales sostenibles. Ampliar el acceso a las instalaciones de sincrotrón en todo el mundo e integrar esta tecnología en la gestión ambiental puede mejorar significativamente los esfuerzos globales para reducir la contaminación y restablecer el equilibrio ecológico. El uso de SR permite observar cómo las plantas interactúan con su entorno a nivel molecular. En particular, la participación de México en proyectos internacionales de investigación coordinados ha facilitado el acceso instalaciones y conocimientos avanzados sobre sincrotrón. Estas colaboraciones han fortalecido las capacidades de investigación del país en ciencias ambientales, lo que ha dado lugar a mejores metodologías para analizar contaminantes y desarrollar recursos respetuosos con el medio ambiente. Interesante, un estudio realizado en México utilizó técnicas basados en sincrotrón para investigar la movilidad y especiación del arsénico en relaves mineros, proporcionando información sobre los niveles de contaminación y los riesgos potenciales (Loredo-Portales *et al*., 2017).

El sincrotrón tiene características especiales como alta intensidad, amplia cobertura de espectro, alta colimación y coherencia. Esta radiación es extremadamente brillante y cubre un amplio espectro de longitudes de onda, desde rayos X hasta luz visible, lo que la convierte en una herramienta ideal para la investigación de materiales biológicos y ambientales a nivel microscópico (Méndez-Cruz, 2023). Estas propiedades únicas hacen de la SR una herramienta indispensable para estudiar la estructura y composición de los materiales a nivel atómico y molecular. La naturaleza de alta intensidad y ajustable de la luz de sincrotrón permite a los investigadores analizar oligoelementos y compuestos químicos con una precisión excepcional, lo que la convierte en una técnica esencial en la ciencia ambiental y el monitoreo de ecosistemas.

Al aprovechar la espectroscopia de absorción de rayos X (XAS), la fluorescencia de rayos X (XRF), y la espectrometría infrarroja, las instalaciones de sincrotrón permiten un análisis no destructivo en tiempo real de los contaminantes, lo que ayuda a los científicos a comprender sus fuentes, transformaciones y efectos ambientales a largo plazo (Dinsley *et al*., 2022). Esta capacidad de proporcionar información a escala molecular ha posicionado a la SR como una herramienta fundamental para evaluar los impactos de la contaminación, orientar los esfuerzos de remediación y respaldar políticas ambientales sostenibles (Callefo *et al*., 2019).

El aumento de la contaminación en ecosistemas naturales y urbanos representa una amenaza significativa para la biodiversidad y la salud humana, lo que exige el desarrollo y aplicación de herramientas analíticas avanzadas para su detección y monitoreo. La SR ha emergido como una técnica de vanguardia en la caracterización de contaminantes a nivel atómico y molecular, proporcionando información detallada sobre su composición, distribución y transformación en el medio ambiente (Hu *et al*., 2020). A pesar de su potencial, el acceso a esta tecnología sigue siendo limitado y su aplicación en ciencias ambientales aún es un campo en desarrollo. Contribuciones importantes del equipo del proyecto MILAGRO (Megacity Initiative: Local and Global Research Observations), dirigido por el Dr. Mario Molina en

2006. Utilizando técnicas avanzadas de SR, el equipo realizó un análisis detallado de partículas suspendidas y aerosoles en y alrededor del área metropolitana del Valle de México. Esta investigación pionera sentó las bases para estudios posteriores sobre los efectos atmosféricos de la contaminación urbana y su relación con el cambio climático. En particular, Moffet *et al*. (2010), caracterizaron microscópicamente el envejecimiento de partículas de aerosoles carbonáceos en la columna de salida de la Ciudad de México, proporcionando información clave sobre su transformación química y transporte. Complementariamente, Takahama *et al*. (2007), aplicaron microscopía de rayos X de transmisión de barrido (STXM), para clasificar diferentes tipos de carbono orgánico en partículas atmosféricas, obteniendo información sobre su composición y comportamiento ambiental. En conjunto, estos estudios constituyen una base científica esencial para las estrategias actuales centradas en la calidad del aire urbano y el cambio climático. En este contexto, esta revisión tiene como objetivo compilar y analizar los avances más recientes en el uso de la SR para el estudio de la contaminación ambiental, identificando sus principales ventajas, limitaciones y perspectivas futuras. Una comprensión integral de esta tecnología permitirá optimizar su implementación en estudios ambientales y fomentar su adopción en estrategias de monitoreo y mitigación de la contaminación.

Materiales y métodos

Publicación científica de investigaciones globales sobre la SR aplicada al análisis de la contaminación ambiental

Se creó una base de datos que incluye 314 artículos publicados sobre la SR aplicada al análisis de la contaminación ambiental desde 2015 hasta 2024 a partir de Science Direct, Springerlink, Wiley, MDPI y otros artículos de investigación y revisión internacionales (datos no mostrados). Todas las referencias se organizaron en una hoja de cálculo de Microsoft Excel TM. Los datos se clasificaron inicialmente en función del año de publicación y el país de origen, así como la afiliación del autor correspondiente. La exploración de estudios efectivos de SR aplicada a la contaminación ambiental en revistas científicas de renombre mostró contribuciones importantes durante los años 2020, 2022 y 2023 (Figura 1). A nivel mundial, América, Asia y Europa contribuyen con el 45, 34 y 21%, respectivamente, a la investigación reportada sobre efectivos la contaminación ambiental en las últimas décadas; siendo los principales países

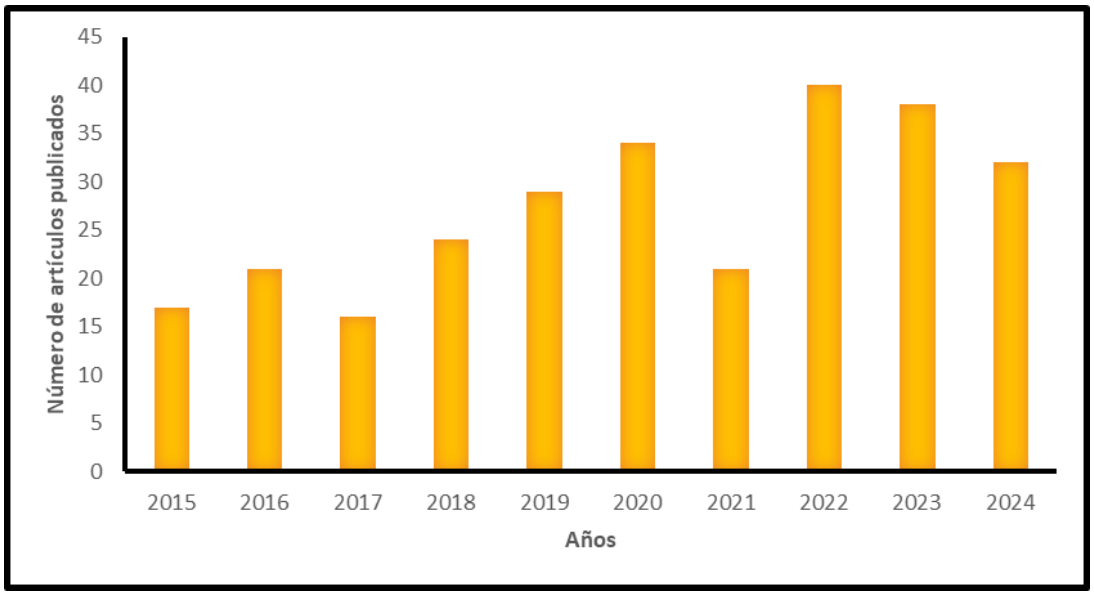


Figura 1. Distribución por año de artículos de investigación globales publicados y revisiones críticas sobre el análisis de SR de la contaminación ambiental (agua, suelo y aire) de 2015 a 2024, provenientes de ScienceDirect, SpringerLink, Ingenta, Wiley, Scopus y SciELO.

contribuyentes (Estados Unidos, China, Australia, Francia y Canadá) (Figura 2). Además, el análisis de SR utilizó la contaminación ambiental se realizó mayoritariamente utilizando agua (33%), suelo (26%), aire (16%), metales pesados (13%) y microplásticos (12%) (Figura 3).

Protocolo de toma de muestras y análisis de contaminación ambiental mediante técnicas de radiación sincrotrón

Muestras y preparación:

Se recopilaron muestras de aire, agua y suelo de diversas regiones con diferentes niveles de impacto ambiental. Las muestras de aire se obtuvieron utilizando filtros de fibra de cuarzo de alta eficiencia. Las muestras de agua se recolectaron en

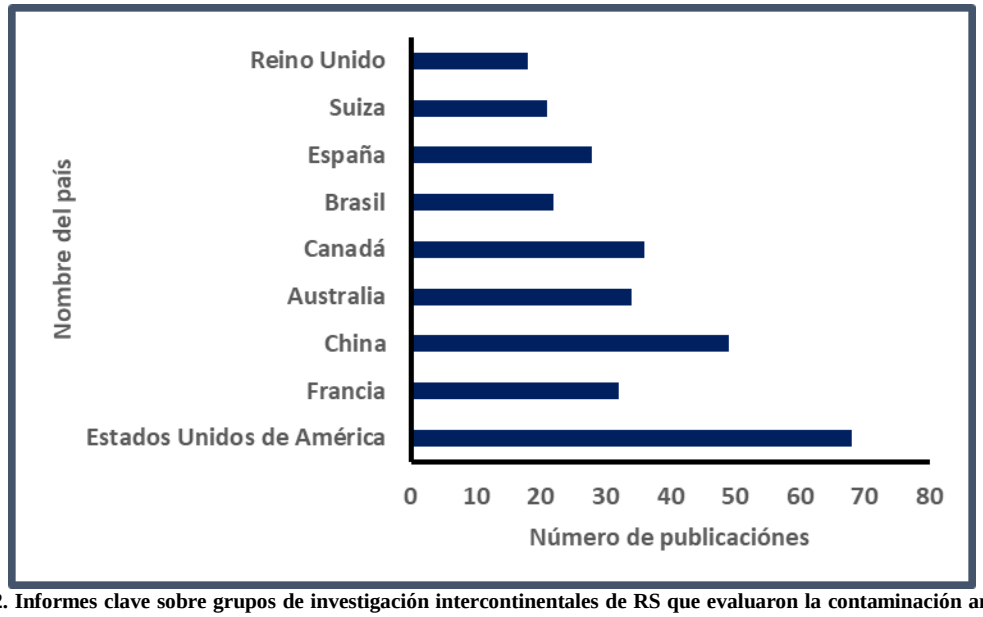


Figura 2. Informes clave sobre grupos de investigación intercontinentales de RS que evaluaron la contaminación ambiental en los ecosistemas durante las últimas décadas. Los principales países contribuyentes (Estados Unidos, China, Australia, Francia y Canadá) se identificaron utilizando las siguientes bases de datos editoriales en línea: ScienceDirect, Scopus, SpringerLink, Ingenta, Wiley y SciELO, entre 2015 y 2024.



Figura 3. Clasificación de las publicaciones basadas en la aplicación de radiación sincrotrón avanzada para el estudio de la contaminación ambiental: agua (33%), suelo (26%), aire (16%), metales pesados (13%) y microplásticos (12%).

recipientes estériles de polietileno de alta densidad (HDPE), mientras que las muestras de suelo fueron extraídas utilizando protocolos estandarizados, secadas a temperatura ambiente, tamizadas y homogeneizadas antes del análisis.

Técnicas basadas en luz de radiación sincrotón: La radiación sincrotrón se utilizó en varios laboratorios (https://lightsources.org), de investigación a nivel mundial, empleando técnicas avanzadas de espectroscopía para caracterizar la contaminación ambiental. La espectroscopía de fluorescencia de rayos X (XRF), permitió la determinación de la composición elemental de las muestras, mientras que la espectroscopía de absorción de rayos X (XAS), se utilizó para la especiación de metales pesados y compuestos tóxicos en matrices ambientales.

Análisis de datos: Los datos espectroscópicos fueron analizados utilizando software especializado, como Atenea y Artemisa para XAS, y PyMca para XRF (Ravel y Newville, 2005). Se realizaron correcciones de fondo, normalización de espectros y ajustes de modelos para determinar las especies químicas presentes. Se aplicaron herramientas de estadística multivariante y análisis geoquímico para evaluar la distribución espacial de los contaminantes y su posible origen.

Control de calidad y validación: Para garantizar la fiabilidad de los resultados, se implementaron rigurosos controles de calidad, incluyendo el uso de materiales de referencia certificados y la calibración periódica de los equipos. Se llevaron a cabo análisis en duplicado y pruebas de recuperación para evaluar la precisión y exactitud de los métodos aplicados.

Consideraciones ambientales y éticas: El estudio se desarrolló siguiendo estrictas normativas ambientales y éticas internacionales. Se obtuvo autorización para la recolección de muestras en cada región estudiada, minimizando el impacto ecológico y asegurando una disposición adecuada de los residuos generados durante la investigación.

Características principales de la SR

La SR se genera cuando partículas cargadas, generalmente electrones, son aceleradas a velocidades cercanas a la de la luz dentro de un acelerador de partículas y luego desviadas por campos magnéticos en una trayectoria curva (Figura 4). Este fenómeno ocurre en anillos de almacenamiento de sincrotrón, donde los electrones son inyectados y mantenidos en una trayectoria circular mediante una combinación de imanes

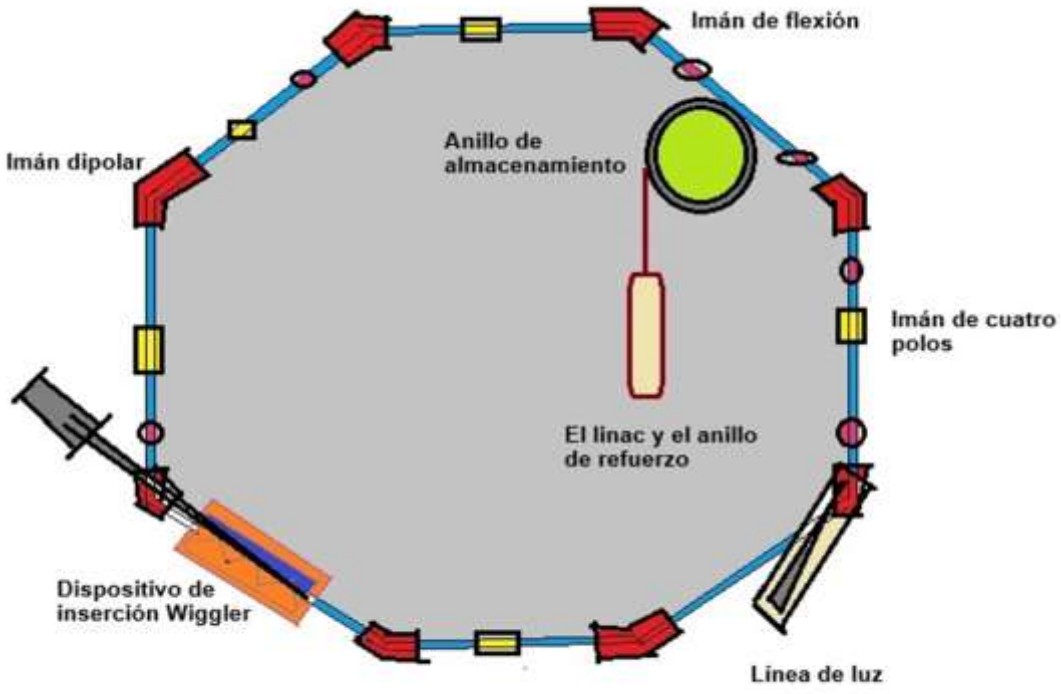


Figura 4. Representación esquemática de la disposición general de una fuente de luz de radiación de sincrotrón típica.

dipolares, cuadrupolares y sextupolares. Cuando los electrones cambian de dirección bajo la influencia del campo magnético, emiten radiación electromagnética altamente colimada y con un espectro continuo que va desde el infrarrojo hasta los rayos X duros (Willmott, 2019). Se caracterizan por un amplio rango espectral: Cubre desde el infrarrojo hasta los rayos X duros, permitiendo el estudio de materiales a diferentes escalas y con diversas técnicas analíticas. Alta intensidad y brillo: Es millones de veces más intensa que las fuentes convencionales de luz, lo que permite analizar muestras con alta sensibilidad y resolución espacial (Grabowski et al., 2021). Polarización ajustable: Puede ser lineal o circularmente polarizada, lo que facilita estudios estructurales y espectroscópicos avanzados. Coherencia temporal y espacial: Permite realizar experimentos de imagen y espectroscopia con alta precisión, incluso a nivel atómico (Lin et al., 2017). Capacidad de análisis no destructivo: Ideal para estudios ambientales, arqueológicos y biológicos, ya que no requiere contacto directo con la muestra.

Aplicaciones en el análisis de contaminantes en ecosistemas

La SR analítica avanzada abarca diversos estudios ambientales, incluida la especiación, distribución y biodisponibilidad de contaminantes como metales pesados, radionúclidos y toxinas orgánicas en suelos, aguas y muestras biológicas (Figura 5). Técnicas como la fluorescencia de rayos X (XRF), la espectroscopia de absorción de rayos X (XAS) y la difracción de rayos X (XRD) permiten a los investigadores determinar la composición elemental, los estados de oxidación y las asociaciones estructurales de los contaminantes con matrices ambientales (Liu et al., 2024). Una de las principales ventajas de los métodos basados en SR es su capacidad para proporcionar análisis in situ, no destructivos y altamente sensibles de contaminantes traza.

Por ejemplo, la XAS se ha utilizado para caracterizar las especies químicas del arsénico en sedimentos contaminados, revelando su asociación con óxidos de hierro, lo que afecta su movilidad y toxicidad (Giudici et al., 2023). De manera similar, se ha empleado el mapeo micro-XRF para visualizar la distribución del plomo en los tejidos vegetales, ofreciendo información sobre la absorción y acumulación de metales en diferentes compartimentos ambientales (Tefera et al., 2020).

Agua

La especiación de metales pesados (Pb, Hg, As, Cr), en ecosistemas acuáticos es un problema ambiental crítico debido a su toxicidad, persistencia y bioacumulación. Para evaluar su impacto y comportamiento en el medio acuático, es esencial conocer su especiación química, es decir, las formas químicas en las que se encuentran. Las técnicas de X-ray Absorption near edge structure (XANES), y Extended X-ray absorption fine structure (EXAFS), ambas basadas en la absorción de rayos X, son herramientas clave en la caracterización de metales pesados en agua. Por ejemplo, XANES proporciona información sobre el estado de oxidación y la coordinación química de los metales en solución (Gräfe et al.,2014; Etschmann et al., 2014; Sundman et al., 2014). EXAFS (Estructura fina de absorción extendida de rayos X), permite identificar la estructura local de los átomos metálicos, determinando su entorno químico y las distancias con los átomos vecinos (Gaur y Shrivastava, 2015; Frenkel et al., 2011). La tabla 1 muestra estudios importantes sobre el análisis de la contaminación del agua en diferentes sitios ambientales detectados por herramientas SR.

Estas técnicas se han aplicado para estudiar la movilidad y toxicidad de arsénico (As), en aguas subterráneas, revelando su asociación con óxidos de hierro y materia orgánica (Wu *et al*., 2018). Asimismo, han permitido identificar la formación de especies de mercurio (Hg), altamente tóxicas, como el metilmercurio, en ecosistemas acuáticos contaminados (Reis *et al*., 2016). Microfluorescencia de rayos X (μXRF), para la identificar la espacial de contaminantes en muestras acuáticas (Zilkey *et al*., 2024). La microfluorescencia de rayos X (μXRF), es una potente técnica analítica que se utiliza para el mapeo elemental no destructivo de contaminantes en muestras acuáticas. Permite el análisis espacial de alta resolución de elementos traza y metales pesados en sedimentos y partículas transportadas por el agua, lo que proporciona información crucial sobre las fuentes de contaminación y los patrones de distribución. La μXRF funciona enfocando un haz de rayos X sobre la muestra, lo que provoca emisiones de fluorescencia características de los elementos dentro del material de destino. Estas emisiones se detectan y analizan para determinar la presencia, tanto cualitativa como cuantitativa, de elementos químicos en el rango que va desde el sodio (Na), hasta el uranio (U). No obstante, algunos autores señalan que esta afirmación puede considerarse “semi-cuantitativa”, debido a que, al



Figura 5. Técnicas basadas en sincrotrón para analizar distribuciones de contaminación en las matrices ambientales y ejemplos de cada herramienta de instrumentación SR con sus ventajas.

aplicar los algoritmos para el ajuste de las curvas espectrales, en ocasiones no se incorporan todos los fenómenos físico-químicos que intervienen en la formación del espectro. Esta omisión puede derivar en la pérdida o atenuación de información relevante, afectando así la precisión del análisis computacional. La principal ventaja de la μXRF radica en su capacidad para generar mapas de distribución elemental bidimensionales (2D), o tridimensionales (3D), lo que permite evaluar la heterogeneidad en los niveles de contaminación en diferentes entornos acuáticos.

Tabla 1. Muestra estudios importantes sobre el análisis de la contaminación del agua en diferentes sitios ambientales detectados por herramientas SR.

Pais	SR	condaminacion	Summary	References
India	TXRF	Diferentes contaminantes en el agua	analizar contaminantes en muestras de agua cuantificando elementos. en comparación con la calidad del agua y la contaminación por metales pesados. muestra que el agua no es apta para beber	Garg *et al*., 2022
Argentina	XRF	agua de cromo	Presenta bajas concentraciones de compuestos de cromo y manganeso. Los resultados demuestran su eficacia en la caracterización de diferentes especies químicas de elementos metálicos en agua.	Robledo *et al*., 2018
Japón	XAFS	sulfuro de mercurio	El análisis de rayos X de sincrotrón mostró que el mercurio en los lisímetros permaneció estable como cinabrio, sin transformaciones, destacando la utilidad de esta técnica para evaluar su comportamiento en vertederos simulados.	Takaoka *et al*.,2023
Argentina	SR-TXRF	Concentración elemental del agua de lluvia.	Permitió obtener una comprensión inicial de la química del agua de lluvia y cuantificar la concentración elemental de metales traza (Mn, Fe, Pb, Zn, Cu, Ni)	López *et al*., 2015
Estado Unidos	XAS y-XRF	Metales del suelo a las plantas	Absorción de metales por parte de los organismos de su entorno, incluidos los contaminantes ambientales	Smieska *et al*.,2023
Italia	XRF, XAS	diferentes matrices ambientales	Comprensión del papel de los oligoelementos en el medio ambiente y en los organismos vivos.	Terzano *et al*., 2019
India	XRF	Residuales industriales	Evaluación de la degradación y la variación de la toxicidad en aguas residuales industriales antes y después del tratamiento por irradiación.	Jadhav *et al*., 2022
Japón	XRF	Radioluminescence en el agua	Se compararon las distribuciones y los espectros entre el agua ultra pura y el agua del grifo. Se midieron las impurezas del agua, el carbono orgánico total	Hirano *et al*., 2015

Suelo

La difracción de rayos X (XRD, por sus siglas en inglés), es una técnica analítica ampliamente utilizada para la identificación de fases minerales y el estudio de su interacción con contaminantes en distintos entornos ambientales. Este método se basa en la difracción de un haz de rayos X al incidir sobre una muestra cristalina, generando un patrón característico en el detector que permite la identificación de las fases presentes mediante la comparación con bases de datos cristalográficas (Ali *et al*, 2022). La XRD permite identificar y caracterizar cambios en las redes o estructuras cristalinas de los minerales, lo que refleja modificaciones en su composición o disposición atómica. Estos cambios pueden producirse por la incorporación de contaminantes en la estructura cristalina, por procesos de adsorción superficial o por transformaciones mineralógicas inducidas por reacciones químicas. Por ejemplo, la sustitución de iones o la formación de nuevas fases cristalinas indican la capacidad del mineral para inmovilizar metales pesados o degradar compuestos orgánicos, tal como se ha documentado en estudios ambientales recientes (Mo *et al*., 2021). Minerales como arcillas, óxidos e hidróxidos de hierro han demostrado ser efectivos en la retención de contaminantes debido a sus estructuras cristalinas y su alta área superficial (Minkina *et al*., 2018, Escobar-Quiroz *et al*., 2019). Además, la técnica facilita el monitoreo de cambios estructurales en minerales expuestos a diferentes condiciones ambientales, lo que ayuda a comprender los mecanismos de interacción y posibles aplicaciones en la remediación de suelos y aguas contaminadas. La tabla 2 muestra diversos estudios sobre análisis de contaminación del suelo en sistemas ambientales analizados técnicas basadas en SR.

El estudio de nanopartículas y microplásticos en el medio ambiente requiere técnicas analíticas avanzadas para caracterizar su composición química y estructura superficial. Por ejemplo, se puede estudiar la absorción de metales pesados o nutrientes desde el suelo, cómo las plantas almacenan compuestos como el carbono, o incluso cómo responden a condiciones de estrés como la sequía o la contaminación (Gobinath *et al*., 2021). Entre estas técnicas, la espectroscopía de fotoelectrones por rayos X (XPS), y XAS se han consolidado como herramientas clave para la identificación de elementos, estados de oxidación y enlaces químicos en estos materiales (Zhang *et al*., 2024). La XPS permite analizar la composición química superficial de nanopartículas y

Tabla 2. Muestra la investigación sobre estudios de análisis de contaminación del suelo en sistemas ambientales analizados utilizando herramientas SR.

Pais	SR	Sistema contaminado	Descripción	Citacion
Australia	EXAFS, STXM, XANES, XAS, XRF	Diferentes componentes del suelo	Avances en biogeoquímica ambiental al proporcionar conocimientos detallados sobre la especiación, transformación y distribución de elementos en sistemas complejos.	Hettiarachchi *et al*., 2017
Australia	XAS y μ-XRF	Metales traza tóxicos (loides) en suelos y plantas	la distribución y especiación de los metales en los sistemas suelo-planta, comprensión del comportamiento y las interacciones de los metales traza en estos entornos.	Kopittke et al., 2017
Rusia	Herramientas SR	Elementos tóxicos en el sistema suelo-planta	Permitir la identificación de los mecanismos clave que impulsan la movilidad de los contaminantes en el suelo y estudiar la especiación de metales impactos ambientales.	Tsitsuashvili *et al*., 2021
Rusia	XRD, XAFS, SRμCT	Sistema suelo-planta	Permiten el análisis no destructivo de la distribución de metaloides y metales pesados, estados de oxidación, composición elemental y especiación en suelos y plantas.	Kirichkov *et al*., 2024
Francia	μXRF/μXANES	Toxicidad de las nanopartículas en los biosólidos	Monitorear y regular el contenido de nanopartículas de TiO2 en biosólidos para uso agrícola, de manera similar a otros elementos potencialmente tóxicos.	Muccifora *et al*., 2021
Australia	XFM	Efectos tóxicos de los metaloides en las plantas	Análisis de la distribución de elementos en el tejido vegetal.	Kopittke *et al*., 2018
China	SR-μCT	Suelo negro	Las características de los poros y la estabilidad de los agregados influyen en la erosión y la calidad del suelo durante los ciclos de congelación y descongelación al afectar el movimiento del agua y la resistencia del suelo.	Ma *et al*., 2021
China	XAFS	Sorción de cadmio (Cd)	Muestra el Cd se adhiere al suelo y se libera de él y proporciona nivel molecular sobre las reacciones de adsorción y precipitación de la superficie del Cd.	Xinxin *et al*., 2021
Estado Unidos	XRF	Elementos minerales en las plantas	Comprensión de la homeostasis de los metales y la función de los oligoelementos en el metabolismo de las plantas.	Chia *et al*., 2023

microplásticos hasta una profundidad de aproximadamente 10 nm, proporcionando información sobre su funcionalización, procesos de degradación y posible adsorción de contaminantes (Gil-Díaz *et al*., 2022). Por otro lado, la XAS, facilita el estudio de la estructura electrónica y la coordinación química de elementos presentes en estos materiales, lo que resulta útil para entender su interacción con metales pesados y compuestos orgánicos en el ambiente (Caporale y Violante, 2016). El uso combinado de XPS y XAS en el análisis de nanopartículas y microplásticos permite no solo identificar su composición química, sino también evaluar su reactividad y potencial impacto ambiental, contribuyendo al desarrollo de estrategias de mitigación y remediación.

Aire

La caracterización de aerosoles y partículas ultrafinas es fundamental para comprender sus propiedades fisicoquímicas y su impacto en áreas como la salud, el medio ambiente y la ciencia de materiales. Entre las técnicas avanzadas utilizadas para su análisis, el *X-ray Scattering* (dispersión de rayos X), y *XANES*. La técnica de *X-ray Scattering*, incluyendo SAXS (dispersión de rayos X a ángulos pequeños), y WAXS (dispersión de rayos X a ángulos grandes), es utilizada para analizar la morfología, el tamaño y la distribución de las partículas en suspensión. SAXS es particularmente útil para la caracterización de nanopartículas y estructuras desordenadas en el rango de 1 a 100 nm (Nirschl y Guo 2018), mientras que WAXS proporciona información sobre la cristalinidad y la organización estructural a escalas menores (Milsom *et al*., 2023). La tabla 3 muestra la investigación sobre los estudios de análisis de la contaminación del aire en matrices ambientales analizadas mediante técnicas basadas en SR.

Por otro lado, *XANES* es una técnica

Tabla 3. Muestra la investigación sobre los estudios de análisis de la contaminación del aire en matrices ambientales analizadas mediante herramientas SR

Pais	SR	Sitio contaminado	Resumen	Referencias
China	XRF, XAS	Metales pesados	Análisis de la exposición a metales pesados, incluida la cuantificación, especiación, obtención de imágenes y caracterización estructural.	Hu *et al*., 2020
Tailandia	ATR-FTIR, EXAFS	Partículas totales suspendidas	Evaluaciones de riesgos para la salud según la edad y el papel de las técnicas basadas en sincrotrón para analizar la composición de los aerosoles con el fin de informar sobre la gestión de la contaminación industrial.	Pongpiachan *et al*., 2024
Italia	XANES & XRF	Partículas atmosféricas asociadas a metales pesados	Análisis de las concentraciones de metales pesados en partículas y la especiación de Pb y Ni en la contaminación atmosférica, proporcionando datos valiosos para orientar las estrategias de control de la contaminación y proteger la salud pública.	Monged *et al*.,2022
Reino Unido	XRF, XAS, XRD	Aerosoles	El polvo en suspensión de los núcleos de hielo ofrece información sobre el clima, pero su complejidad dificulta su análisis.	Cibin *et al*., 2019
Indonesia	XANES & XRF	Partículas transportadas por el aire	Determinar el estado químico de los oligoelementos, centrándose en los puntos con concentraciones más altas. Los estados de oxidación del arsénico y el cromo en partículas suspendidas en el aire.	Lestiani *et al*., 2021
Argentina	XRF	Elementos volcánicos	Analiza elementos tóxicos en ecosistemas volcánicos, para determinar la acumulación de Ti, Fe y Zn en plantas, algas y bacterias.	Lamela *et al*.,2018
Suiza	XAS	Aerosoles en el aire	Estudiar la nucleación de fases en aerosoles multicomponentes in situ e investigar las reacciones (foto)químicas en materia transportada por el aire, con implicaciones para la ciencia atmosférica y aplicaciones químicas más amplias.	Rashid *et al*., 2022

espectroscópica que permite determinar el estado de oxidación y la coordinación química de los elementos presentes en los aerosoles y partículas ultrafinas (Ding *et al*., 2019). Esta técnica es especialmente valiosa para estudiar procesos de transformación química y reactividad de compuestos en sistemas ambientales y materiales funcionales. La combinación de *X-ray Scattering* y *XANES* ofrece una caracterización integral de aerosoles y nanopartículas, permitiendo correlacionar su estructura con su composición química y propiedades funcionales (Rashid *et al*., 2022).

Estas herramientas avanzadas son esenciales para el desarrollo de nuevos materiales y la evaluación del impacto de partículas en la salud y el medio ambiente (Young *et al*., 2022).

Los compuestos orgánicos volátiles (COV), son una amplia clase de sustancias químicas que pueden evaporarse fácilmente a temperatura ambiente y desempeñan un papel crucial en la contaminación ambiental. Su caracterización precisa es esencial para evaluar su impacto en la calidad del aire, la salud humana y diversas aplicaciones tecnológicas. Además, las técnicas basadas SR utilizadas para ello permiten el estudio detallado de la composición química, la estructura electrónica y la dinámica de estos compuestos mediante técnicas como XANES, espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (SR-FTIR), y espectroscopia de fotoionización (Wang *et al*., 2021). La SR permite la identificación y cuantificación precisa de COV en muestras complejas, incluso a bajas concentraciones. También, el análisis de sus interacciones con superficies y su papel en reacciones atmosféricas y catalíticas. Estas técnicas ofrecen una ventaja significativa sobre los métodos convencionales, ya que proporcionan información detallada sobre la dinámica y la reactividad de los COV en tiempo real y en condiciones ambientales relevantes. Como resultado, la aplicación de la SR en el estudio de los COV es una herramienta clave para la investigación de la contaminación ambiental, el desarrollo de nuevos materiales y los procesos industriales sostenibles (Li *et al*., 2024).

Por otro lado, la adsorción de contaminantes

atmosféricos en superficies minerales es un proceso clave en la química atmosférica, ya que influye en la transformación, transporte y reactividad de estos compuestos en el medio ambiente. El estudio de estos mecanismos es esencial para comprender el impacto de los contaminantes en la calidad del aire, el cambio climático y los ciclos geoquímicos (Von Schneidemesser *et al*., 2015). El uso de radiación sincrotrón proporciona herramientas avanzadas para investigar la interacción entre los contaminantes y las superficies minerales con alta sensibilidad y resolución (Kirichkov *et al*., 2024).

Monitoreo ambiental con SR

La radiación sincrotrón permite identificar y cuantificar elementos tóxicos, como metales pesados, en suelos, agua y organismos (Luis *et al*., 2022). Esto es fundamental para evaluar el impacto de la contaminación industrial y diseñar estrategias de remediación. Por ejemplo, la radiación sincrotrón se utiliza para estudiar la composición química de los suelos y sedimentos en los ecosistemas, lo que permite entender cómo se distribuyen los nutrientes y contaminantes en el ambiente (Díaz *et al*., 2015). Esto es crucial para el monitoreo de la calidad del suelo, la gestión de recursos naturales y la evaluación del impacto de actividades humanas o cambios climáticos.

Estas investigaciones pueden proporcionar datos valiosos para entender la salud de los ecosistemas vegetales. En este sentido, Las técnicas basadas en SR ayudan a detectar y analizar contaminantes en niveles muy bajos, como metales pesados o compuestos orgánicos en cuerpos de agua, suelos y aire (Cantellano *et al*., 2015). Esto es útil para monitorear la calidad ambiental y la salud de los ecosistemas acuáticos, forestales o terrestres, ya que los contaminantes pueden afectar la biodiversidad y el equilibrio de los ecosistemas (Aguilera-Samaritano,Wannaz y Bustos, 2018). En ecosistemas complejos, como los bosques o los humedales, la SR se emplea para analizar la estructura de materiales orgánicos e inorgánicos. Esto incluye el estudio de la materia orgánica en descomposición, lo que ayuda a comprender los ciclos biogeoquímicos del carbono, nitrógeno y otros elementos cruciales para la sostenibilidad del ecosistema (Fernández-Luqueño *et al*., 2023).

Efectos del cambio climático

El cambio climático afecta a la composición y estructura de los suelos, así como a la salud de la vegetación (García-Murcia *et al*., 2024). A través de técnicas como la espectroscopía de absorción de rayos X (XAS), se puede analizar cómo los cambios en las condiciones climáticas (como la temperatura, la sequía o el aumento de CO2), alteran la capacidad de los suelos para almacenar carbono o nutrientes. Además, la SR permite estudiar cómo las plantas absorben metales pesados o nutrientes esenciales del suelo, lo que puede ser crucial para comprender cómo las plantas se adaptan o sufren debido al cambio climático (Calleja-Huerta, 2017).

El cambio climático puede influir en los niveles de contaminación en el aire y el agua. Las alteraciones en el clima pueden cambiar los patrones de precipitación y de circulación atmosférica, afectando la dispersión de contaminantes. Los métodos basados en sincrotrón, como los microanálisis de rayos X, permiten estudiar la distribución de contaminantes (por ejemplo, metales pesados, pesticidas o contaminantes orgánicos), en cuerpos de agua o en el aire. Esto es importante para entender cómo los cambios climáticos, como las olas de calor o las lluvias intensas, pueden afectar la calidad del aire y el agua en los ecosistemas. Utilizando tomografía de rayos X (X-ray CT), y espectroscopía de fluorescencia de rayos X (XRF), se puede analizar la interacción de los elementos en las plantas, suelos, sedimentos y organismos (Ruíz-Santoyo *et al*., 2025). Esta información es crucial para comprender cómo las alteraciones en el clima afectan la dinámica de los nutrientes y cómo los ecosistemas pueden adaptarse o colapsar debido a cambios en los ciclos de carbono, nitrógeno, fósforo, entre otros.

Conclusión

Las técnicas basadas en SR se han consolidado como herramientas esenciales para esencial para el estudio avanzado de contaminantes ambientales, permitiendo su detección y caracterización a nivel molecular con una precisión sin precedentes. Su capacidad para analizar muestras en condiciones realistas y a concentraciones extremadamente bajas la convierte en una tecnología clave para evaluar el impacto de diversas sustancias sobre los ecosistemas y la salud humana. A medida que avance la investigación en este campo, el uso de la SR seguirá desempeñando un papel fundamental en la vigilancia ambiental y en el desarrollo de estrategias sostenibles para la mitigación de contaminantes emergentes, contribuyendo así a la protección y conservación del medio ambiente.

Referencias

Aguilera-Samaritano, M.L., Wannaz, E.D., Bustos, D.A. 2018. Biomonitoreo atmosférico en la provincia de San Juan: caracterización y composición de material particulado atmosférico (HAPS y metales pesados). Tesis de CENTRO CIENTIFICO TECNOLOGICO CONICET - SAN JUAN, Argentina. URI:http://hdl.handle.net/11336/93320

Ali, A., Chiang, Y.W., Santos, R.M. 2022. X-ray diffraction techniques for mineral characterization: A review for engineers of the fundamentals, applications, and research directions. *Minerals*, *12*(2), 205.

Antillón-Díaz, A., Jiménez-Mier y Terán, J.I., Valderrama-Blanco, B., Viveros-García, T., de la Rosa-Álvarez, G., Moreno-Yntriago, M., Flores-Valdez, J., Pérez-Pascual, R., Leo-Méndez, R.R. 2015. México hacia el salto tecnológico y científico: sincrotrón. Foro del Senado de la República.

Callefo, F., Maldanis, L., Teixeira, V.C., de Olveira-Abans, R.A., Monfredini, T., Rodrigues, F., Galante, D. 2019. Corrigendum: Evaluating Biogenicity on the Geological Record With Synchrotron-Based TechniquesFront. Microbiol. 10:2358. doi: 10.3389/fmicb.2019.02358

Calleja-Huerta, L. 2017. Estudio del envejecimiento climático en plásticos agrarios mediante difracción de rayos X. E.T.S.I. Industriales (UPM).https://oa.upm.es/47937/

González-Cantellano, M.A., Montaño-Zetina, L.M. 2015. La espectroscopia y su tecnología: Un repaso histórico y su importancia para el siglo XXI. Latin-American Journal of Physics Education, 9(4), 13.

Caporale, A.G., Violante, A. 2016. Chemical processes affecting the mobility of heavy metals and metalloids in soil environments. Current Pollution Reports, *2*, 15-27. DOI:10.1007/s40726-015-0024-y

Chia, J.C., Woll, A.R., Smieska, L., Vatamaniuk, O.K. 2023. Visualizing metal distribution in plants using synchrotron X-ray fluorescence microscopy techniques. Methods Mol Biol. 2665:177-189. DOI:10.1007/978-1-0716-3183-6_14

Cibin, G., Marcelli, A., Maggi, V., Baccolo, G., Hampai, D., Robbins, P.E. Liedl, A., Polese, D'Elia, A., Macis, S., Grilli, A., Raco, A. 2019. Synchrotron radiation research and analysis of the particulate matter in deep ice cores: An overview of the technical challenges. Condensed Matter, 4(3), 61.https://doi.org/10.3390/condmat4030061

De Giudici, G., Medas, D., Meneghini, C. 2023. Bio-mineral interactions and the environment. In *Minerals and Waste* (pp. 67-116). Cham: Springer International Publishing.DOI:10.1007/978-3-031-16135-3_4

de Vives, A., Moreira, S., Brienza, S., Medeiros, J., Filho, M., Zucchi, O., Nascimento, V. 2006. Monitoring of the environmental pollution by trace element analysis in tree-rings using synchrotron radiation total reflection X-ray fluorescence. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 61(10-11), 1170-1174. doi:10.1016/j.sab.2006.08.007

Ding, J., Guan, Y., Cong, Y., Chen, L., Li, Y.F., Zhang, L., Wang, L. 2019. Single-particle analysis for structure and iron chemistry of atmospheric particulate matter. Analytical chemistry, 92(1), 975-982. DOI: 10.1021/acs.analchem.9b03913

Dinsley, J.M., Davies, H.S., Gomez-Gonzalez, M.A., Robinson, C.H., Pittman, J.K. 2022. The value of synchrotron radiation X-ray techniques to explore microscale chemistry for ecology and evolution research. *Ecosphere*, 13(12), e4312. https://doi.org/10.1002/ecs2.4312

Escobar-Quiroz, I.N., Villalobos-Peñalosa, M., Pi-Puig, T., Martin-Romero, F., Aguilar-Carrillo de Albornoz, J. 2019. Identification of jarosite and other major mineral Fe phases in acidic environments affected by mining-metallurgy using X-ray Absorption Spectroscopy: With special emphasis on the August 2014 Cananea acid spill. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, *36*(2), 229-241.https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2019.2.1021

Etschmann, B.E., Donner, E., Brugger, J., Howard, D.L., Jonge, M.D., Paterson, D., Lombi, E. 2014. Speciation mapping of environmental samples using XANES imaging. Environmental Chemistry, *11*(3), 341-350. https://doi.org/10.1071/EN13189

Fernández-Luqueño, F., Vera-Reyes, I., Loera-Serna, S. 2023. Presentación. mundo nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología, 16(30), 1e-7e. https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2023.30.69784

Frenkel, A.I., Yevick, A., Cooper, C., Vasic, R. 2011. Modeling the structure and composition of nanoparticles by extended X-ray absorption fine-structure spectroscopy. Annual Review of Analytical Chemistry, 4(1), 23-39. DOI: 10.1146/annurev-anchem-061010-113906

García-Murcia, Y., Parada-Alzate, L.M., Salgado-Vásquez, J.L., Andramunio-Acero, C.P. 2024. Índice para evaluar la calidad de la vegetación inundable en humedales continentales: una primera aproximación para Colombia utilizando el caso de estudio del complejo cenagoso de Zapatosa. Revista de Ciencias Ambientales, 58(2).

Garg, V.K., Tanta, A., Lal-Srivastav, A., Tiwari, M.K., Sharma A., Kanwar, V.S. 2022. Water quality assessment using synchrotron-based TXRF. Water Environment Research, 94(7), e10759.doi: 10.1002/wer.10759.

Gaur, A., Shrivastava, B.D. 2015. Speciation using X-ray absorption fine structure (XAFS). Review Journal of Chemistry, 5, 361-398. https://doi.org/10.1134/S2079978015040032

Gil-Díaz, M., Pérez, R.A., Alonso, J., Miguel, E., Diez-Pascual, S., Lobo, M.C. 2022. Iron nanoparticles to recover a co-contaminated soil with Cr and PCBs. Scientific Reports, *12*(1), 3541.https://doi.org/10.1038/s41598-022-07558-w

Gobinath, C., Toledano-Ayala, M., García-Trejo, J.F., Marcus, G., Carroll, D.L. 2021. Mapping and distribution of speciation changes of metals from nanoparticles in environmental matrices using synchrotron radiation techniques. Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management, 16, 100491. DOI 10.1016/j.enmm.2021.100491

Grabowski, M., Cooper, D.R., Brzezinski, D., Macnar, J.M., Shabalin, I.G., Cymborowski, M., Otwinowski, Z., Minor, W. 2021. Synchrotron radiation as a tool for macromolecular X-ray crystallography: a XXI century perspective. Nucl Instrum Methods Phys Res B. 15; 489:30-40. doi: 10.1016/j.nimb.2020.12.016.

Gräfe, M., Donner, E., Collins, R.N., Lombi, E. 2014. Speciation of metal (loid) s in environmental samples by X-ray absorption spectroscopy: A critical review. Analytica Chimica Acta, 822, 1-22.https://doi.org/10.1016/j.aca.2014.02.044

Hettiarachchi, G.M., Donner, E., Doelsch, E. 2017. Application of synchrotron radiation-based methods for environmental biogeochemistry: Introduction to the special section. Journal of environmental quality, 46(6), 1139-1145. https://doi.org/10.2134/jeq2017.09.0349

Hirano, Y., Komori, M., Onoda, D., Nagae, T., Yamamoto, S. 2020. Radioluminescence by synchrotron radiation with lower energy than the Cherenkov light threshold in water. Journal of Physics Communications, 4(7), 075002.10.1088/2399-6528/ab9f8d

Hu, H., Zhao, J., Wang, L., Shang, L., Cui, L., Gao, Y., Li, Y.F. 2020. Synchrotron-based techniques for studying the

environmental health effects of heavy metals: current status and future perspectives. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 122, 115721.https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.115721

Jadhav, A.P., Phatangare, A.B., Ganesapandy, T.S., Bholane, G.T., Sonawane, A.M., Khantwal, N., Kamble, P.N., Mondal, P., Dhamgaye, V.P., Dahiwale, S.S., Phase, D.M., Bhoraskar, V.N., Dhole, S.D. 2022. Synchrotron X-ray assisted degradation of industrial wastewater by advanced oxidation process. Radiation Physics and Chemistry, 197, 110161. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110161

Kirichkov, M., Burachevskaya, M., Mandzhieva, S., Minkina, T., Rajput, V.D., Nevidomskaya, D., Shende, S.S., Tsitsuashvili, V., Maksimov, A., Sushkova, S., Gülser, C., Kızılkaya, R. 2024. Synchrotron-based techniques for elemental analysis in soil-plant system under polluted environment. Eurasian Journal of Soil Science, 13(2), 89-100. https://doi.org/10.18393/ejss.1401145

Kopittke, P.M., Punshon, T., Paterson, D.J., Tappero, R.V., Wang, P., Blamey, F.P.C., Van der Ent, A., Lombi, E. 2018. Synchrotron-based X-ray fluorescence microscopy as a technique for imaging of elements in plants. Plant Physiology, 178(2), 507-523. DOI:10.1104/pp.18.00759

Kopittke, P.M., Wang, P., Lombi, E., Donner, E. 2017. Synchrotron-based X-Ray approaches for examining toxic trace metal (loid) s in soil-plant systems. Journal of Environmental Quality, 46(6), 1175-1189.DOI: 10.2134/jeq2016.09.0361

Lamela, P.A., Pérez, R.D., Pérez, C.A., Bongiovanni, G.A. 2018. Use of synchrotron radiation X-ray fluorescence and X-ray absorption spectroscopy to investigate bioaccumulation, molecular target, and biotransformation of volcanic elements. X-Ray Spectrometry, 47(4), 305-319.
https://doi.org/10.1002/xrs.2843

Lestiani, D.D., Santoso, M., Damastuti, E., Kurniawati, S., Migliori, A., Leani, J.J., Czyzykcki, M., Karydas, A.G., Osan, J. 2021. Selected elements characterization of fine particulate matter $PM_{2.5}$ using synchrotron radiation XRF. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2381, No. 1). AIP Publishing. https://doi.org/10.1063/5.0066285

Li, Q., Xing, R., Li, L., Yao, H., Wu, L., Zhao, L. 2024. Synchrotron radiation data-driven artificial intelligence approaches in materials discovery. *Artificial Intelligence Chemistry*, 2(1), 100045.https://doi.org/10.1016/j.aichem.2024.100045

Lin, F., Liu, Y., Yu, X., Cheng, L., Singer, A., Shpyrko, O.G., Xin, H.L., Tamura, N., Tian, C., Weng, T.C., Yang, X.Q., Meng, Y.S., Nordlund, D., Yang, W., Doeff, M.M. 2017. Synchrotron X-ray analytical techniques for studying materials electrochemistry in rechargeable batteries. Chemical reviews, 117(21), 13123-13186. DOI: 10.1021/acs.chemrev.7b00007

Liu, Y., Su, X., Ding, J., Zhou, J., Liu, Z., Wei, X., Yang, H.B., Liu, B. 2024. Progress and challenges in structural, in situ and operando characterization of single-atom catalysts by X-ray based synchrotron radiation techniques. Chemical Society Reviews. DOI: 10.1039/d3cs00967j

López, M.L., Ceppi, S.A., Asar, M.L., Bürgesser, R.E., Ávila, E.E. 2015. Rainwater analysis by synchrotron radiation-total reflection X-ray fluorescence. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 113, 100-105. DOI:10.1016/j.sab.2015.09.003

Loredo-Portales, R., Castillo-Michel, H., Aquilanti, G., Rosa-Álvarez, M.G., Rocha-Amador, D.O., Vogel-Mikus, K., Kump, P., Cruz-Jiménez, G. 2017. Synchrotron based study of As mobility and speciation in tailings from a mining site in Mexico. Journal of environmental chemical engineering, 5(1), 1140-1149.https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.01.019

Loyde De La Cruz**,** L.A., González-Méndez, B., Cruz-Avalos, A.M., Loredo-Portales, R. 2022. Suelos agrícolas y metales pesados, una relación tóxica que se puede remediar. Epistemus (Sonora), 16(33), 93-98.https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i33.228

Ma, R., Jiang, Y., Liu, B., Fan, H. 2021. Effects of pore structure characterized by synchrotron-based micro-computed tomography on aggregate stability of black soil under freeze-thaw cycles. Soil and Tillage Research, 207, 104855. DOI:10.1016/j.still.2020.104855

Méndez-Cruz,. N. 2023. Estudio del modelo de sincrotrón suizo y su aplicación en el diseño del sincrotrón mexicano.URI: http://riaa.uaem.mx/handle/20.500.12055/3344

Milsom, A., Squires, A.M., Ward, A.D., Pfrang, C. 2023. Molecular self-organization in surfactant atmospheric aerosol proxies. Accounts of Chemical Research, 56(19), 2555-2568. doi:10.1021/acs.accounts.3c00194

Minkina, T.M., Nevidomskaya, D.G., Shuvaeva, V.A., Soldatov, A.V., Tsitsuashvili, V.S., Zubavichus, Y.V., Rajput, V.D., Burachevskaya, M.V. 2018. Studying the transformation of Cu2+ ions in soils and mineral phases by the XRD, XANES, and sequential fractionation methods. Journal of Geochemical Exploration, 184, 365-371. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.10.007

Mo, X., Siebecker, M.G., Gou, W., Li, L., Li, W. 2021. A review of cadmium sorption mechanisms on soil mineral surfaces revealed from synchrotron-based X-ray absorption fine structure spectroscopy: Implications for soil remediation. Pedosphere, 31(1), 11-27. https://doi.org/10.1016/S1002-0160(20)60017-0

Moffet, R.C., Henn, T.R., Tivanski, A.V., Hopkins, R.J., Desyaterik, Y., Kilcoyne, A.L.D., Tyliszczak, T., Fast, J., Barnard, J., Shutthanandan, V., Cliff, S.S., Perry, K.D., Laskin, A., Gilles, M.K. 2010. Microscopic characterization of carbonaceous aerosol particle aging in the outflow from Mexico City, Atmos. Chem. Phys., 10, 961–976, https://doi.org/10.5194/acp-10-961-2010.

Monged, M.E.H., Imam, N.G., Aquilanti, G., Pollastri, S., Rashad, A.M., Osán, J. 2022. Heavy metals concentrations and speciation of Pb and Ni in airborne particulate matter over two residential sites in Greater Cairo–reflection from synchrotron radiation. Journal of synchrotron radiation, 29(3), 765-774. DOI: 10.1107/S1600577522003058

Muccifora, S., Castillo-Michel, H., Barbieri, F., Bellani, L., Ruffini-Castiglione, M., Spanò, C., Pradas del Real, A.D., Giorgetti, L., Tassi, E.L. 2021. Synchrotron radiation spectroscopy and transmission electron microscopy techniques to evaluate TiO2 NPs incorporation, speciation, and impact on root cells ultrastructure of *Pisum sativum* L. plants. Nanomaterials, 11(4), 921. https://doi.org/10.3390/nano11040921

Nirschl, H., Guo, X. 2018. Characterisation of structured and functionalised particles by small-angle X-ray scattering (SAXS). Chemical Engineering Research and Design, 136, 431-446. DOI:10.1016/j.cherd.2018.06.012

Pongpiachan, S., Thumanu, K., Tanthanuch, W., Srisamut, D., Pradabsri, J., Hashmi, M.Z., Sun, Y., Poshyachinda, S. 2024. Using synchrotron-based ATR-FTIR, EXAFS, and XRF to characterize the chemical compositions of TSP in industrial estate area. Heliyon, 10(20). DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e39215

Rashid, M.H., Borca, C.N., Xto, J.M., Huthwelker, T. 2022. X-Ray absorption spectroscopy on airborne aerosols. Environmental Science: Atmospheres, 2(6), 1338-1350. https://doi.org/10.1039/d2ea00016d

Ravel, B., Newville, M. 2005. ATHENA, ARTEMIS,

HEPHAESTUS: data analysis for X-ray absorption spectroscopy using IFEFFIT, Journal of Synchrotron Radiation 12, 537–541 doi:10.1107/S0909049505012719

Reis, A.T., Davidson, C.M., Vale, C., Pereira, E. 2016. Overview and challenges of mercury fractionation and speciation in soils. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 82, 109-117. DOI:10.1016/j.trac.2016.05.008

Robledo, J.I., Leani, J.J., Karydas, A.G., Migliori, A., Pérez, C.A., Sánchez, H.J. 2018. Energy-dispersive total-reflection resonant inelastic X-ray scattering as a tool for elemental speciation in contaminated water. Analytical Chemistry, 90(6), 3886-3891. https://doi.org/10.1021/acs.analchem.7b04624

Ruiz-Santoyo, V., Cruz-Mérida, J., García Carvajal, S., Arenas Arrocena, M.C. (2025). Microplásticos y nanoplásticos: una amenaza para la salud humana y el medio ambiente. Mundo Nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología, 18(34). https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2025.34.69832

Schneidemesser, E.V., Monks, P.S., Allan, J.D., Bruhwiler, L., Forster, P., Fowler, D., Lauer, A., Morgan, W.T., Paasonen, P., Righi, M., Sindelarova, K., Sutton, M.A. 2015. Chemistry and the linkages between air quality and climate change. Chemical reviews, 115(10), 3856-3897. DOI: 10.1021/acs.chemrev.5b00089

Smieska, L., Guerinot, M.L., Olson, H.K., Reid, M., Vatamaniuk, O. 2023. Synchrotron science for sustainability: life cycle of metals in the environment. Metallomics, 15(8), mfad041. DOI: 10.1093/mtomcs/mfad041

Sundman, A., Karlsson, T., Laudon, H., Persson, P. 2014. XAS study of iron speciation in soils and waters from a boreal catchment. Chemical Geology, 364, 93-102. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.11.023

Takahama, S., Gilardoni, S., Russell, L.M., Kilcoyne, A.L.D. 2007. Classification of multiple types of organic carbon composition in atmospheric particles by scanning transmission X-ray microscopy analysis. Atmospheric Environment, 41(40), 9435-9451. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.08.051

Takaoka, M., Kusakabe, T., Shiota, K., Hirata, O., Kawase, K., Yanase, R., Nitta, K. 2023. Microscopic synchrotron X-ray analysis of mercury waste in simulated landfill experiments. Journal of Material Cycles and Waste Management, 25(5), 2599-2611. https://doi.org/10.1007/s10163-023-01632-9

Tefera, W., Liu, T., Lu, L., Ge, J., Webb, S.M., Seifu, W., Tian, S. 2020. Micro-XRF mapping and quantitative assessment of Cd in rice (Oryza sativa L.) roots. Ecotoxicology and Environmental Safety, 193, 110245. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2020.110245

Terzano, R., Denecke, M.A., Falkenberg, G., Miller, B., Paterson, D., Janssens, K. 2019. Recent advances in analysis of trace elements in environmental samples by X-ray based techniques (IUPAC Technical Report). Pure and Applied Chemistry, 91(6), 1029-1063. doi: 10.1515/pac-2018-0605

Tsitsuashvili, V.S., Minkina, T.M., Soldatov, A.V., Nevidomskaya, D.G. 2021. On synchrotron radiation for studying the transformation of toxic elements in the soil–plant system: A review. Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 15(4), 814-822. DOI: 10.1134/S1027451021040236

von Schneidemesser, E., Monks, P.S., Allan, J.D., Bruhwiler, L., Forster, P., Fowler, D., Lauer, A., Morgan, W.T., Paasonen, P., Righi, M., Sindelarova, K., Sutton, M.A. 2015. Chemistry and the Linkages between Air Quality and Climate Change. Chem Rev. 27: 115(10):3856-97. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00089

Wang, J., Cao, S., Sun, Y., Meng, X., Wei, J., Ge, Y., Liu, B., Gong, Y.J., Li, Z., Mo, G. 2021. β zeolite nanostructures with a high SiO2/Al2O3 ratio for the adsorption of volatile organic compounds. ACS Applied Nano Materials, 4(12), 13257-13266. DOI:10.1021/acsanm.1c02786

Willmott, P. 2019. An introduction to synchrotron radiation: techniques and applications. John Wiley & Sons. ISBN: 978-1-119-28039-2

Wu, Y., Kukkadapu, R.K., Livi, K.J., Xu, W., Li, W., Sparks, D.L. 2018. Iron and arsenic speciation during as (III) oxidation by manganese oxides in the presence of Fe (II): molecular-level characterization using XAFS, mossbauer, and TEM analysis. ACS Earth and Space Chemistry, 2(3), 256-268.DOI:10.1021/acsearthspacechem.7b00119

Young, L.H., Chen, W.Y., Wang, C.C., Tang, M.T., Tseng, S.C., Lin, B.H., Lai, C.W., Chen, Y.H., Yang, T.T., Lin, Y.T. 2022. Insights to the 3D internal morphology and metal oxidation states of single atmospheric aerosol particles by synchrotron-based methodology. Chemosphere, 307, 135799. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.135799

Zhang, B.B., Lin, J., Song, X.N., Wang, C.K., Hua, W., Ma, Y. 2023. Identification of oxidation states in γ -graphyne by computational XPS and NEXAFS spectra. Applied Surface Science. 609. 155134. DOI:10.1016/j.apsusc.2022.155134

Zilkey, D.R., Baud, A., Francus, P., Antoniades, D., Gregory-Eaves, I. 2024. A pan-Canadian calibration of micro-X-ray fluorescence core scanning data for prediction of sediment elemental concentrations. *Environmental Advances*, 15, 100495.
https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100495