

Inventario de cesio-137 y plomo-210 en suelos de referencia del centro-oeste de Uruguay: base para estudios de erosión y vigilancia radiológica

Inventory of cesium-137 and lead-210 in reference soils from the center-west of Uruguay: baseline for erosion studies and radiological monitoring

Inventário de césio-137 e chumbo-210 em solos de referência do centro-oeste do Uruguai: base para estudos de erosão e monitoramento radiológico

 **MARCOS TASSANO** (1)

 **PABLO CABRAL** (1)

 **MIREL CABRERA** (1)

(1) Laboratorio de Radioquímica, Centro de Investigaciones Nucleares, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

RECIBIDO: 19/5/2025 → APROBADO: 16/6/2025 ✉ marcos.tassano@fcien.edu.uy

RESUMEN

Este trabajo caracteriza los niveles de inventario, concentración y distribución vertical de ^{137}Cs y $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ en suelos de referencia en Uruguay para establecer una línea base que soporte futuras investigaciones sobre erosión y vigilancia radiológica. Se estudiaron siete sitios distribuidos desde el sur (Colonia) hasta el norte (Rivera), cubriendo un gradiente climático representativo. Los inventarios de ^{137}Cs resultaron homogéneos espacialmente (357,8 a 365,4 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$), mostrando una alta concordancia con registros históricos de deposición atmosférica en Buenos Aires, lo que valida estos datos como referencia regional. Por el contrario, los inventarios de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (3973 a 8428 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ en los primeros 15 cm) presentaron una fuerte correlación positiva con la precipitación media anual ($R^2 = 0,92$, $p = 0,01$). Se concluye que los inventarios de ^{137}Cs pueden considerarse estables y adecuados como referencia general para estudios de erosión, mientras que para $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, debido a su sensibilidad ambiental, es necesario determinar referencias locales específicas. Estos resultados aportan una línea base fundamental para evaluar cambios futuros en la contaminación radiológica regional derivada de eventos nucleares potenciales.

Palabras clave: vigilancia radiológica, fallout, referencia ambiental, datación sedimentaria, radionucleidos atmosféricos.

ABSTRACT

This study characterizes inventory levels, concentration, and vertical distribution of ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ in reference soils across Uruguay, establishing a baseline for future erosion and radiological monitoring studies. Seven sites were analyzed along a climatic gradient from south (Colonia) to north (Rivera). The ^{137}Cs inventories were spatially homogeneous ($357.8 - 365.4 \text{ Bq.m}^{-2}$) and closely matched historical atmospheric deposition records from Buenos Aires, validating these as regional references. Conversely, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ inventories ($3973 - 8428 \text{ Bq.m}^{-2}$ in the upper 15 cm) strongly correlated with mean annual precipitation ($R^2 = 0.92$, $p = 0.01$). Results indicate ^{137}Cs inventories are stable and suitable as a general reference for erosion studies, whereas local-specific references are necessary for $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ due to its environmental sensitivity. These findings provide a crucial baseline for assessing future radiological contamination from potential nuclear events in the region.

Keywords: radiological monitoring, fallout, atmospheric radionuclides, environmental baseline, sediment dating.

RESUMO

Este estudo caracteriza níveis de inventário, concentração e distribuição vertical de ^{137}Cs e $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ em solos de referência no Uruguai, estabelecendo uma linha de base para estudos futuros sobre erosão e monitoramento radiológico. Foram analisados sete locais distribuídos ao longo de um gradiente climático desde o sul (Colônia) até o norte (Rivera). Os inventários de ^{137}Cs mostraram-se homogêneos espacialmente ($357,8 - 365,4 \text{ Bq. m}^{-2}$), com alta concordância com registros históricos de deposição atmosférica em Buenos Aires, validando-os como referência regional. Por outro lado, os inventários de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ($3973 - 8428 \text{ Bq.m}^{-2}$ nos primeiros 15 cm) apresentaram forte correlação positiva com a precipitação média anual ($R^2 = 0,92$, $p = 0,01$). Conclui-se que os inventários de ^{137}Cs são estáveis e adequados como referência geral em estudos de erosão, enquanto para o $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ são necessárias referências locais específicas devido à sua sensibilidade ambiental. Estes resultados fornecem uma linha de base essencial para avaliar futuras contaminações radiológicas decorrentes de eventos nucleares potenciais.

Palavras-chave: monitoramento radiológico, fallout, radionuclídeos atmosféricos, linha de base ambiental, datação de sedimentos.

INTRODUCCIÓN

Los radionucleidos de deposición atmosférica incorporados al suelo principalmente mediante procesos de precipitación, como el cesio-137 (^{137}Cs , $T_{1/2} = 30$ años) y el plomo-210 (^{210}Pb , $T_{1/2} = 22.3$ años), han sido ampliamente utilizados en estudios de procesos geomorfológicos y ambientales, como la erosión del suelo y la datación de sedimentos (Cabrera et al., 2023; Chaboche et al., 2022). Su presencia en suelos y sedimentos responde a diferentes fuentes y mecanismos de transporte. Mientras que el ^{210}Pb es un radionucleido natural que ingresa de forma continua al suelo desde la atmósfera, el ^{137}Cs es un producto

de fisión liberado principalmente durante los ensayos nucleares atmosféricos realizados entre 1945 y 1980 a nivel global (Chaboche et al., 2022), así como en accidentes nucleares como los de Chernóbil (1986) y Fukushima (2011) (Imanaka et al., 2015).

Más del 90% de la energía liberada por las pruebas nucleares atmosféricas (440 megatones) se concentró en el hemisferio norte, debido principalmente a los ensayos realizados por Estados Unidos en las Islas Marshall hasta 1958, y por la ex Unión Soviética entre 1961 y 1962 en Novaya Zemlya y Semipalatinsk (UNSCEAR, 2008). La firma del Tratado de Prohibición Parcial de Ensayos Nucleares, en 1963, redujo significativamente las emisiones globales de radionucleidos artificiales al poner fin a las pruebas atmosféricas de Estados Unidos, la URSS y el Reino Unido. Francia, por su parte, inició sus pruebas en el desierto del Sahara (1960–1966), trasladándolas posteriormente al Centro de Experimentación del Pacífico (C.E.P.) en la Polinesia Francesa, donde realizó 41 detonaciones atmosféricas entre 1966 y 1974. China también llevó a cabo pruebas en Lop Nor hasta 1980 (Chaboche et al., 2022).

La dispersión de los residuos radiactivos depende del tipo de prueba, su potencia, y de la altitud y latitud de la detonación. Las partículas depositadas en la troposfera suelen tener tiempos de residencia de días y se transportan a lo largo de las trayectorias del viento dentro de su banda latitudinal (Bennett, 2002), mientras que la deposición estratosférica, principal responsable de la lluvia radioactiva global (fallout) de radionucleidos de vida larga, puede tardar entre 3 y 24 meses en alcanzar la superficie terrestre (UNSCEAR, 2000a, 2000b).

Además del ^{137}Cs , se han empleado los isótopos de plutonio, como ^{239}Pu ($T_{1/2} = 24110$ años) y ^{240}Pu ($T_{1/2} = 6561$ años), para discriminar el origen de los residuos radiactivos. Las proporciones isotópicas de $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ varían según la fuente: por ejemplo, valores entre 0.19 y 0.34 se asociaron a pruebas estadounidenses en el Pacífico, mientras que proporciones de 0.16 a 0.19 reflejan la influencia de pruebas soviéticas (Koide et al., 1985). Accidentes nucleares, como los de Chernóbil y Fukushima, suelen presentar relaciones mayores a 0.33 (Igarashi et al., 2019). En contraste, las pruebas francesas en Moruroa y Fangataufa muestran relaciones mucho más bajas, entre 0.03 y 0.07, características de dispositivos de bajo rendimiento (Hrnecek et al., 2005).

Dado que muchas de las pruebas en la Polinesia Francesa se realizaron durante el invierno austral, cuando los vientos predominantes en latitudes medias circulan de oeste a este (Cai et al., 2020), una proporción significativa del fallout troposférico se depositó sobre Sudamérica en días o semanas posteriores a las explosiones. Esta hipótesis se ve respaldada por documentos y mapas desclasificados del Ministerio de Defensa francés (Disclose et al., 2021), así como por datos de la CNEA y la Autoridad Reguladora Nuclear de Argentina sobre mediciones de fallout en aire y suelo en Buenos Aires entre 1959 y 1993 (Figura 1) (Argentina. Presidencia de la Nación. Secretaría General. Autoridad Regulatoria Nuclear, 1994; Beninson et al., 1972; Beninson et al., 1974).

En Uruguay, esta influencia quedó registrada en los sedimentos del embalse de Rincón del Bonete, donde la relación promedio $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ fue de 0.09, indicando que aproximadamente un 60% del fallout radiactivo proviene de pruebas francesas en la Polinesia (Chaboche et al., 2022).

El ^{210}Pb , por otro lado, se origina a partir de la desintegración del ^{222}Rn en la atmósfera, gas radiactivo que forma parte de la cadena de decaimiento del ^{238}U presente en suelos y

rocas. Su deposición sobre la superficie terrestre está condicionada por factores como la geología local, el régimen de precipitaciones y la ubicación geográfica (Zhang et al., 2021). En suelos y sedimentos, el ^{210}Pb se presenta en dos fracciones: una fracción soportada, en equilibrio con sus radionúclidos predecesores *in situ*, y una fracción no soportada o en exceso ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$), que proviene exclusivamente de la deposición atmosférica. Este último disminuye exponencialmente con la profundidad, lo que permite su uso como herramienta de datación de sedimentos recientes y como trazador del suelo superficial.

En Uruguay, diversos estudios han documentado la datación y dinámica de sedimentación en cuerpos de agua mediante $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ y ^{137}Cs (Marrero et al., 2014; Hordedaña, 2016; Azcune et al., 2020). Recientemente, Cardoso-Silva et al. (2024) reconstruyeron 90 años de impactos antrópicos en el embalse Ingeniero Maggiolo, mientras que Foucher et al. (2023) y Chaboche et al. (2022) resaltaron el valor de los isótopos de plutonio como nuevos marcadores temporales en Uruguay y la región.

En suelos, la presencia de ^{137}Cs en Uruguay ha sido documentada por el Plan de Vigilancia Radiológica Ambiental del MIEM, por el Centro de Investigaciones Nucleares de la Universidad de la República y por el Laboratorio GDMEA, CURE, Universidad de la República (Odino et al., 2017; Cabrera et al., 2023; Noguera et al., 2022). Los niveles reportados en suelos superficiales oscilaron entre 1 y 4 Bq.kg^{-1} calibrados al 2010. Se ha observado que su distribución está influenciada por el uso del suelo y las tasas de erosión: los suelos degradados presentan menores concentraciones debido a la pérdida de partículas finas, mientras que los sitios de acumulación muestran mayores contenidos (Cabrera et al., 2023). En áreas con bajo disturbio antrópico y pendientes nulas, las concentraciones de ^{137}Cs en los primeros centímetros del suelo pueden utilizarse como referencia para evaluar procesos erosivos, manteniéndose estables en el tiempo salvo por la desintegración radioactiva o nuevos ingresos atmosféricos.

Este estudio tiene como finalidad caracterizar los niveles de inventario, concentración y distribución vertical de ^{137}Cs y $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ en suelos de referencia de Uruguay, con el objetivo de establecer una línea base que sirva de soporte para futuras investigaciones sobre procesos de erosión del suelo y vigilancia radiológica.

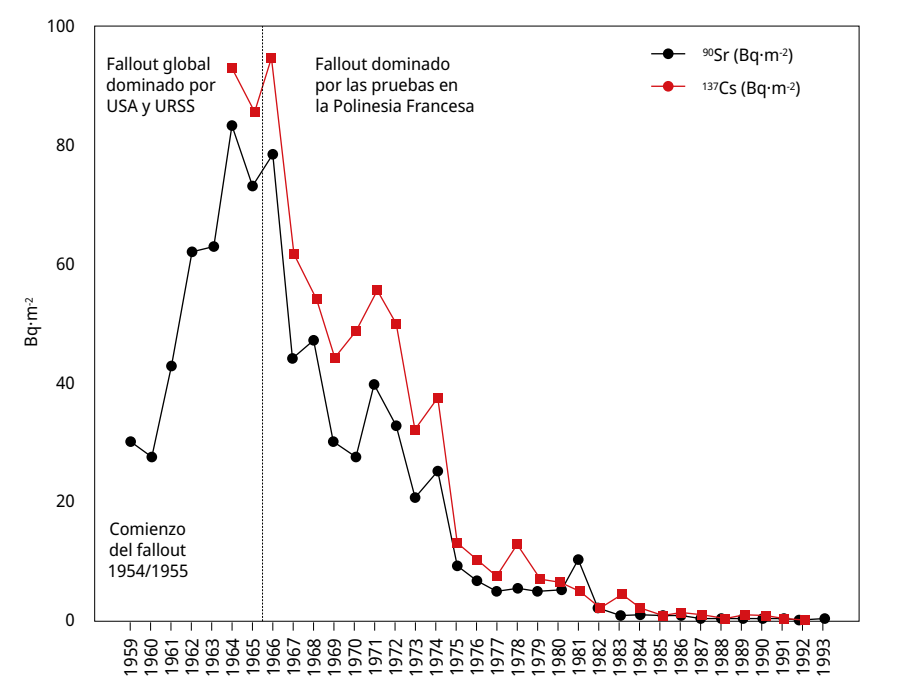


FIGURA 1. Deposición anual en base a documentos en Buenos Aires medidos a partir de 1959 para ^{90}Sr , y a partir de 1964 para ^{137}Cs , sin corrección por decaimiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios referencia y muestreo

Se relevaron siete sitios considerados como referencia a lo largo de un transecto que se extiende desde el sur del país (Colonia) hasta el norte (Rivera), con una distancia promedio de 85 km entre sitios, abarcando un total de 425 km en línea recta. El muestreo fue planificado estratégicamente para seguir el gradiente de precipitaciones medias anuales (Tabla 1). Adicionalmente, se generaron curvas de nivel de precipitación media anual mediante interpolación por kriging, utilizando datos del período 1980–2009 provenientes de 50 estaciones meteorológicas distribuidas en todo el territorio nacional (Castaño et al., 2011) (Figura 4).

TABLA 1. Identificación, coordenadas, características del suelo según Soil Taxonomy (USA), fecha de muestreo y precipitaciones medias anuales en cada sitio.

Identificación	Latitud	Longitud	Unidad	Tipo de suelo	Fecha de muestreo	Precipitación media (mm.año ⁻¹)	Estación meteorológica (distancia kms)
Rivera	-31.01	-55.59	Rivera	Hapludalfs, Hapludults	2018-11-25	1605	Rivera (12)
Tacuarembó 2	-31.6	-55.85	Tres Cerros	Hapludalf, Hapludults	2018-11-25	1427	Tacuarembó (17)
Tacuarembó 1	-32.28	-56.24	Curtina	Hapludolls, Argiudolls, Haper	2018-11-25	1355	Achar (15)
Baygorria	-32.883	-56.758	Itapebi - Tres Árboles	Argiudolls y Hapluderts	2019-06-10	1322	Paso de los Toros (23)
El Perdido	-33.66	-57.19	San Gabriel - Guaycurú	Hapludolls, Argiudolls, Eutrudepts	2024-05-23	1232	Palmitas (40)
La Estanzuela	-34.34	-57.69	Ecilda Paullier - Las Brujas	Argiudolls y Hapluderts	2020-03-03	1119	La Estanzuela (1)
Nueva Helvecia	-34.33	-57.21	Ecilda Paullier - Las Brujas	Argiudolls y Hapluderts	2019-06-03	1100	

Las precipitaciones anuales fueron obtenidas en base a la estación meteorológica más cercana.

Los sitios de referencia fueron seleccionados siguiendo los siguientes criterios para asegurar condiciones representativas de mínima perturbación: (1) ausencia de pendiente; (2) localización fuera de zonas potenciales de acumulación de sedimentos; (3) ausencia de árboles o construcciones en un radio mínimo de 20 metros; (4) ausencia de laboreo reciente u otras alteraciones visibles del suelo; y (5) verificación de estabilidad histórica mediante fotografías aéreas de baja altitud tomadas en 1966, correspondientes al vuelo fotogramétrico nacional realizado entre 1966 y 1967, a una escala de 1:40.000 y altitud de vuelo de 6000 metros (Uruguay. Presidencia de la República. Infraestructura de Datos Espaciales, 2025).

Las muestras identificadas como “La Estanzuela” y “Baygorria” fueron recolectadas en el marco de los proyectos ANII FMV_1_2019_1_156244 y Fondo Conjunto Uruguay-México (AMEXCID/AUCI), respectivamente, cuyas publicaciones previas se encuentran disponibles (Quincke et al., 2024; Cabrera et al., 2023). Las muestras restantes fueron recolectadas específicamente para este estudio. En cada sitio de referencia, se extrajeron seis núcleos de suelo de hasta 40 cm de profundidad utilizando un muestreador Eijkelkamp de 5 cm de diámetro, dentro de un área de 10 × 10 m. Cada núcleo fue seccionado en intervalos de 5 cm, y las fracciones correspondientes a cada profundidad fueron posteriormente homogeneizadas. En el caso del sitio ‘Nueva Helvecia’, la muestra consistió en una única muestra compuesta que abarcó todo el perfil de 0 a 40 cm.

Procesamiento y medición

Las muestras, combinadas por incrementos de 5 cm o en el perfil completo según correspondiera a cada sitio de referencia, fueron secadas a 40 °C durante 48 horas, tamizadas con una malla de 2 mm y posteriormente homogenizadas. Para la medición de radionucleidos, las muestras secas y tamizadas fueron envasadas en contenedores tipo Marinelli de plástico (250 mL), selladas herméticamente y almacenadas durante al menos 28 días para permitir el establecimiento del equilibrio secular entre el ^{226}Ra y sus productos de decaimiento (^{222}Rn , ^{214}Pb , ^{214}Bi).

Transcurrido este período, se procedió a la medición espectrométrica de los siguientes radionucleidos mediante sus energías características de emisión gamma:

- ^{226}Ra a través de ^{214}Pb (295.2 y 351.9 keV) y ^{214}Bi (609.3 keV);
- ^{137}Cs a través de $^{137\text{m}}\text{Ba}$ (661.7 keV);
- ^{210}Pb a través de 46.5 keV.

Todas las mediciones fueron realizadas en el Laboratorio de Radioquímica del Centro de Investigaciones Nucleares, Facultad de Ciencias, Universidad de la República (Montevideo, Uruguay), utilizando detector HPGe (High Purity Germanium) Canberra, con una eficiencia de 20% a 1332 keV. El detector está instalado en el subsuelo y cuenta con blindaje compuesto por 10 cm de plomo antiguo, con revestimientos internos de cadmio (5 mm) y cobre (1 mm). El estándar utilizado fue IAEA 447. La autoabsorción de fotópico de ^{210}Pb fue corregida por el método Appleby et al. (1992).

La concentración mínima detectable (MDC) (International Atomic Energy Agency - IAEA, 1989) fue de 0.04 Bq.kg⁻¹ para ^{137}Cs y de 5 Bq.kg⁻¹ para ^{210}Pb . Con tiempos de conteo de 48 horas por muestra, se alcanzó una precisión analítica entre 5 % y 10 % para ^{137}Cs , y entre 7 % y 18 % para ^{210}Pb , con un nivel de confianza del 95 %. Todas las actividades fueron corregidas por decaimiento hasta el 1 de enero de 2020. Para calcular el $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ se resta la actividad del ^{226}Ra a la actividad total del ^{210}Pb .

Documentos históricos

Para la recopilación de datos históricos de fallout radioactivo, se utilizó como referencia la Ciudad de Buenos Aires, al ser el punto más cercano con registros sistemáticos de deposición de radionucleidos atmosféricos durante los años de interés. Para ello, se recurrió a informes de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) y la Autoridad Reguladora Nuclear (ARN) de Argentina (Beninson et al., 1965; Argentina. Presidencia de la Nación. Secretaría General. Autoridad Reguladora Nuclear, 1994). Adicionalmente, se consultaron documentos recientemente desclasificados por el gobierno francés sobre las pruebas nucleares realizadas en la Polinesia Francesa.

Para estimar la cantidad de ^{137}Cs acumulada por fallout anterior a 1964, se utilizaron los valores acumulados de ^{90}Sr reportados para 1963 en Buenos Aires, y se aplicó la relación $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$, derivada tanto de fuentes bibliográficas como de reportes técnicos de la época, también se calcula en base a los datos de 1964 y 1965 tomados de ARN (Argentina. Presidencia de la Nación. Secretaría General. Autoridad Reguladora Nuclear, 1994). Esta

metodología permite una aproximación indirecta de la deposición histórica de ^{137}Cs en ausencia de datos específicos medidos *in situ* previos a 1964.

Tratamiento de datos y estadística

A partir de las concentraciones de actividad calibradas para cada radionucleido en $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, se calculó el inventario ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$) considerando la densidad aparente (de las muestras secas y fraccionadas a $<2\text{ mm}$) y el espesor de cada incremento de profundidad. Los inventarios por incremento fueron posteriormente sumados para obtener el inventario total correspondiente a cada sitio de muestreo.

Para los análisis estadísticos y la visualización de los datos, se emplearon distintos paquetes del entorno Spyder v. 4.1.5 (Raybaut, 2009), un IDE orientado al análisis científico en Python v. 3.8.5 (Python Software Foundation, 2022; Hunter, 2007; McKinney, 2010; Harris et al., 2020; Virtanen et al., 2020). Asimismo, se utilizó un software de código abierto QGIS (QGIS Association, 2022) para el tratamiento de datos espaciales y la generación de mapas temáticos.

Los inventarios obtenidos fueron georreferenciados sobre un mapa base de Uruguay, junto con las curvas de nivel de precipitaciones medias anuales generadas mediante interpolación por kriging. Esta interpolación se realizó a partir de registros del período 1980–2009 correspondientes a 50 estaciones meteorológicas distribuidas a lo largo del territorio nacional (Castaño et al., 2011).

RESULTADOS

Concentración en profundidad

La Figura 2 muestra los perfiles de concentración ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$) en función de la profundidad para los radionucleidos ^{137}Cs y $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$. En el caso del ^{137}Cs , se observa una mayor concentración en los primeros 10 cm del perfil del suelo, con valores máximos generalmente localizados entre los 5 y 10 cm de profundidad (rango: 1.0 a $4.5\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$). A partir de esa profundidad, las concentraciones disminuyen progresivamente hasta los 25–30 cm en la mayoría de los sitios, con excepción de 'Tacuarembó 2' y 'Rivera', donde se detecta actividad hasta los 35–40 cm.

Para el $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, se identifica un patrón típico de disminución exponencial con la profundidad, con máximos concentrados en la capa superficial de 0–5 cm, donde los valores oscilan entre 50 y $160\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$. En todos los casos analizados, la concentración disminuye notablemente hasta los 15 cm de profundidad.

La densidad aparente del suelo (fracción $<2\text{ mm}$) presenta valores más bajos en la superficie, con un aumento progresivo hasta los 10 – 15 cm de profundidad, donde tiende a estabilizarse. Este comportamiento se ve alterado en los sitios 'Baygorria' y 'Tacuarembó 1', donde la presencia de elementos gruesos ($>2\text{ mm}$), no considerados como suelo según los criterios pedológicos estándar, disminuye la masa efectiva del suelo muestreado y, en consecuencia, afecta los valores reportados de densidad aparente.

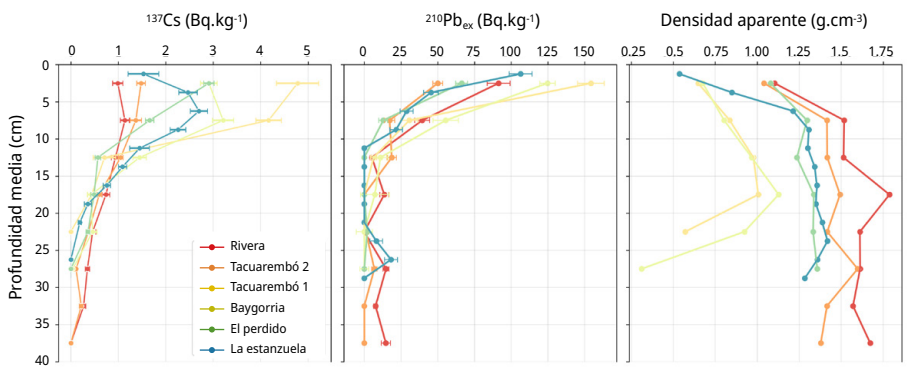


FIGURA 2. Concentraciones de radioactividad en profundidad de ^{137}Cs y $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ en conjunto con la densidad aparente del suelo (fracción <2 mm) en los sitios de estudio.

La Tabla 2 presenta los resultados de inventario (Bq.m^{-2}) para cada sitio de muestreo. Para el cálculo del promedio, el desvío estándar y el coeficiente de variación, se excluyó la muestra correspondiente a “Nueva Helvecia”, con el fin de evitar un sesgo geográfico hacia el sur del país. En un segundo análisis, también se excluyó el sitio “Tacuarembó 2”, debido a evidencia de procesos de erosión del suelo, reflejados en un inventario de ^{137}Cs significativamente inferior al promedio. Esta anomalía fue corroborada mediante la prueba de Dixon ($p > 0.05$, *).

En el caso de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, se consideró únicamente el inventario correspondiente a los primeros 15 cm de profundidad, ya que este espesor representa, en promedio, el límite inferior de la distribución exponencial de este radionucleido en todos los perfiles analizados (ver Figura 2) (International Atomic Energy Agency - IAEA, 2014).

TABLA 2. Inventarios totales en cada punto de muestreo en conjunto con las precipitaciones medias anuales y estadística básica.

Identificación	Precipitación media (mm.año ⁻¹)	¹³⁷ Cs Bq.m ⁻² (2020)	²¹⁰ Pb _{ex} Bq.m ⁻² (15 cm)	Comentarios
Rivera	1605	365.0	8427.8	
Tacuarembó 2	1427	319.3*	5149.7	Erosión
Tacuarembó 1	1355	386.5	6586.6	
Baygorria	1322	352.0	6671.5	
El Perdido	1232	356.6	4413.0	
La Estanzuela	1119	367.1	3973.3	
Nueva Helvecia	1100	364.6	ND	
	Promedio	357.8	5870	Excluyendo
	desvío estándar	22.3	1670	Nueva Helvecia
	Coef. de variación (%)	6.2	28	
	Promedio	365.4	6014	Excluyendo
	desvío estándar	13.3	1824	Nueva Helvecia
	Coef. de variación (%)	3.6	30	y Tacuarembó 2

* test de Dixon p > 0.05.

Documentos históricos

Según el Informe N.º 149 de la CNEA (Beninson et al., 1965), la actividad acumulada de ⁹⁰Sr por fallout en Buenos Aires en 1963 fue de 11.5 mCi.km⁻², equivalente a aproximadamente 425.5 Bq.m⁻². Para estimar la deposición asociada de ¹³⁷Cs, se utilizaron las relaciones ¹³⁷Cs/⁹⁰Sr correspondientes a los años inmediatamente posteriores, 1964 y 1965, que no presentan influencia de las pruebas nucleares francesas en la Polinesia (iniciadas en 1966, ver Figura 1). Estas relaciones resultaron en 1.1 y 1.2 respectivamente, obteniéndose un valor promedio de 1.15. Aplicando este factor, y corrigiendo por decaimiento al año 2020, se estimó una deposición de ¹³⁷Cs de 132.3 Bq.m⁻² para 1963 (Tabla 3).

Complementariamente, se utilizó un segundo valor de referencia reportado por UNSCEAR (UNSCEAR, 1964), el cual indica una acumulación de ⁹⁰Sr de 8.9 mCi.km⁻² (equivalente a 329.3 Bq.m⁻²) en Buenos Aires en 1963. Considerando una relación ¹³⁷Cs/⁹⁰Sr de 1.5, también proporcionada por UNSCEAR (2000a), se estimó una deposición de ¹³⁷Cs de 133.2 Bq.m⁻², corregida al año 2020 (Tabla 3).

Asimismo, se tomó en cuenta el valor reportado por Beninson et al. (1964) para Buenos Aires en el periodo 1959–1963, que indica una relación de 1.8 ± 0.4 (Beninson et al., 1964), también incluido en los cálculos presentados en la Tabla 3.

TABLA 3. Valores acumulados de ⁹⁰Sr en el año 1963 según distintas fuentes documentales. Se incluye la relación ¹³⁷Cs/⁹⁰Sr empleada para convertir dichos valores a inventarios de ¹³⁷Cs, así como el inventario total estimado de ¹³⁷Cs (Bq.m⁻²), corregido por decaimiento al año 2020. En negrita, se destacan los valores más próximos al promedio obtenido con los sitios de muestreo del presente estudio.

Acumulado de ⁹⁰ Sr en 1963 (Bq.m ⁻²)	¹³⁷ Cs/ ⁹⁰ Sr Antes de 1966	Acumulado de ¹³⁷ Cs en 1963 (Bq.m ⁻² corr. 2020)	Inventario ¹³⁷ Cs (Bq.m ⁻² corr. 2020)
425.5 (Beninson et al., 1965)	1.15 (promedio 1964, 1965)	132.3	361.4
	1.5 (UNSCEAR 1964)	172.4	401.5
	1.8 (Beninson 1964)	207.0	436.1
329.3 (UNSCEAR 1964)	1.15 (promedio 1964, 1965)	102.3	331.4
	1.5 (UNSCEAR 1964)	133.5	362.6
	1.8 (Beninson 1964)	160.2	389.3

De los seis valores de inventario de ¹³⁷Cs estimados a partir de documentación histórica, los más cercanos al valor promedio obtenido en el presente estudio para Uruguay (365.4 Bq.m⁻²; ver Tabla 2) fueron: 361.4 Bq.m⁻², calculado a partir del informe ARN (Argentina. Presidencia de la Nación. Secretaría General. Autoridad Regulatoria Nuclear, 1994) y el Informe N.º 149 de la CNEA (Beninson et al., 1965) (ver Figura 3), y 363.6 Bq.m⁻², derivado del informe ARN (Argentina. Presidencia de la Nación. Secretaría General. Autoridad Regulatoria Nuclear, 1994) y los datos de UNSCEAR (1964). Ambos valores muestran una alta concordancia con el promedio observado en campo. Cabe señalar que los años posteriores a 1993 no se consideran relevantes en términos de aporte significativo de fallout radioactivo en esta región del mundo, al momento de la publicación del presente trabajo.

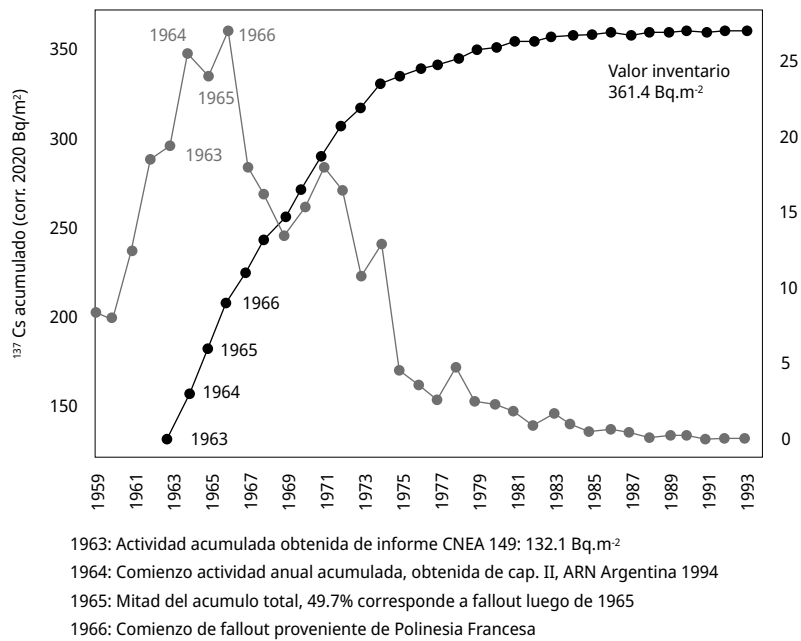


FIGURA 3. Acumulación y fallout anual de ¹³⁷Cs en base a documentos históricos en Buenos Aires, corregido por decaimiento al 2020.

Distribución espacial y relación con precipitaciones

Los inventarios de ¹³⁷Cs muestran una notable homogeneidad a nivel territorial, incluso considerando el valor estimado para el sitio “CNEA Ezeiza” en Argentina (95 km en línea recta al punto “La estanzuela”), calculado a partir de mediciones anuales y del inventario acumulado de ⁹⁰Sr en 1963 (ver Tabla 3 y Figura 3). No se observa una relación clara entre las precipitaciones medias anuales y los inventarios de ¹³⁷Cs.

En contraste, los inventarios de ²¹⁰Pb_{ex} presentan una tendencia creciente hacia el norte del país, en concordancia con el gradiente espacial de precipitaciones. Esta tendencia se refleja en una fuerte correlación lineal positiva entre precipitación media anual e inventario de ²¹⁰Pb_{ex}, con un coeficiente de determinación R²= 0.92, lo que sugiere una fuerte relación entre inventario de ²¹⁰Pb_{ex} y las condiciones climáticas locales (p = 0.01) (ver Figuras 4 y 5).

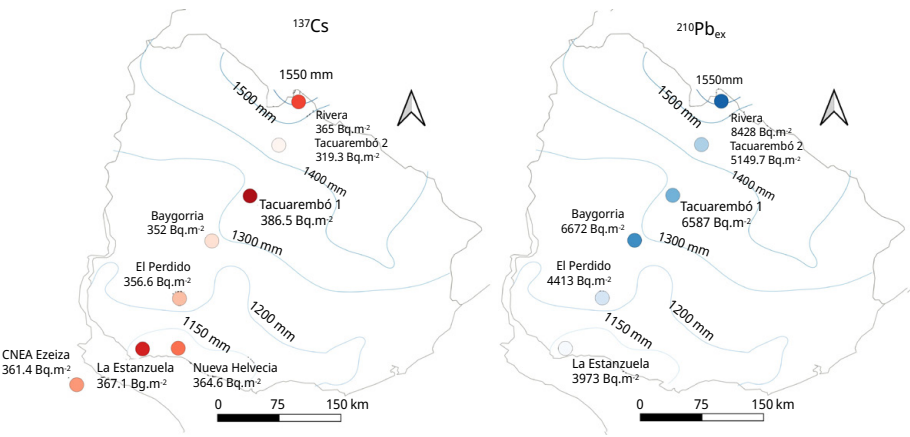


FIGURA 4. Inventarios de ^{137}Cs y $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (Bq.m⁻²) corregido al año 2020, en conjunto con el gradiente de precipitaciones promedio en Uruguay. El inventario “CNEA Ezeiza” para ^{137}Cs , corresponde al inventario calculado en base a documentos (Tabla 3).

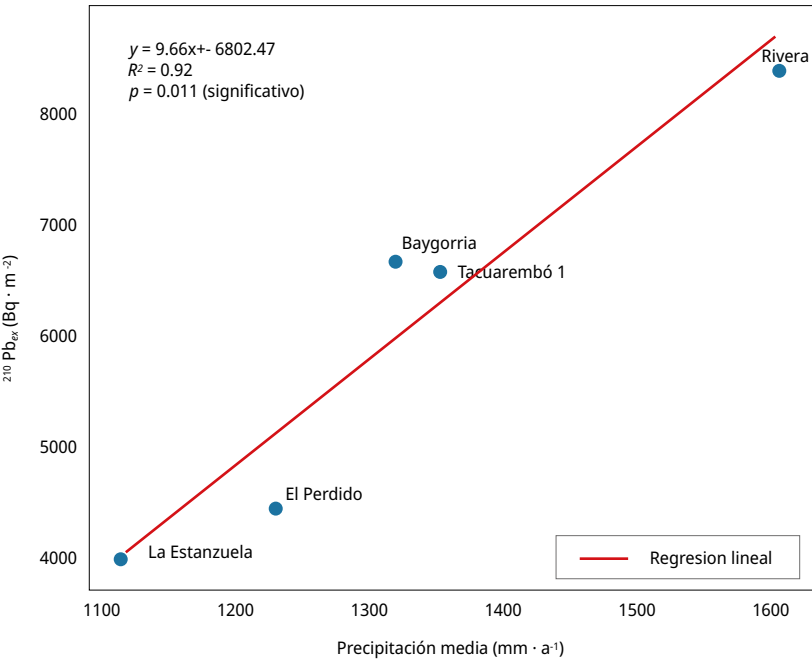


FIGURA 5. Gráfico de dispersión entre $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (Bq.m⁻²) y precipitaciones medias anuales, en conjunto con regresión lineal, ecuación de la recta y R². Se excluye el sitio “Tacuarembó 2” por presentar signos de erosión según ^{137}Cs .

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los inventarios de ^{137}Cs determinados en suelos de referencia de Uruguay muestran una estrecha concordancia con los valores históricos reconstruidos para Buenos Aires a

partir de registros de fallout atmosférico (Argentina. Presidencia de la Nación. Secretaría General. Autoridad Regulatoria Nuclear, 1994; Beninson et al., 1965; UNSCEAR, 1964). El valor promedio observado en este estudio (365.4 Bq.m^{-2} , corregido a 2020) coincide en gran medida con los estimados documentales obtenidos mediante la relación $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$, lo cual refuerza la validez de utilizar datos de Buenos Aires como proxy para en Uruguay. Si bien la relación $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ reportada puede ser tan variable como 1.8 para el periodo 1959-1963 según Beninson et al. (1964), 1.5 según UNSCEAR, (1964), y 1.15 según este trabajo y datos de ARN (Argentina. Presidencia de la Nación. Secretaría General. Autoridad Regulatoria Nuclear, 1994); los valores 1.15 y 1.5 parecen ser los más adecuados al compararlos con el inventario medido en los sitios de muestreo, según se tomen los datos de acumulo de ^{90}Sr en 1963 de CNEA Informe N.º 149 (Beninson et al., 1965) o (UNSCEAR, 1964) respectivamente.

Si bien el enfoque de utilizar datos históricos medidos en Buenos Aires no es novedoso (Ribeiro Guevara y Arribére, 2002), en dicho trabajo estos datos fueron empleados de manera relativa para datar perfiles sedimentarios en lagos de la Patagonia argentina, pero no se utilizaron con el objetivo de estimar el valor del inventario de ^{137}Cs en suelos.

La ausencia de incrementos entre 1986-1993 en los registros históricos de Buenos Aires, sumado a la inexistencia de aumentos de inventario detectables en muestras de suelo en este trabajo, permite descartar una contribución significativa de los eventos de Chernóbil, Fukushima o de otra clase. Este resultado es consistente con la bibliografía que documenta una mínima influencia del fallout de ambos accidentes en el hemisferio sur (UNSCEAR, 2000a, 2000b; Muramatsu et al., 2000, Ribeiro Guevara y Arribére, 2002; Dicen et al. 2025), así como con las proporciones isotópicas características de plutonio observadas en sedimentos de la región (Chaboche et al., 2022).

Además del pico principal de ^{137}Cs que abarca los años 1964 a 1966 (centrado en 1965), siendo 1964 asociado al fallout estratosférico global posterior a los ensayos de alta altitud de EE.UU. y la URSS, y 1966 asociado al fallout troposférico provenientes de los ensayos atómicos a nivel de suelo en la polinesia francesa (Disclose et al., 2021), se propone un segundo pico de menor intensidad y más "ancho" centrado en 1971, el cual está vinculado a las pruebas termonucleares de alta altitud francesas en el Pacífico en el periodo 1970-1974 (Beninson et al., 1974; Disclose et al., 2021). Este segundo pulso ha sido identificado en perfiles sedimentarios de lagos del sur de Argentina (Ribeiro Guevara y Arribére, 2002), por lo que futuras investigaciones de datación de sedimentos en Uruguay podrían confirmar su existencia y, por ende, utilizarlo como segundo pico de datación. La posibilidad de detectar este evento dependerá de la tasa de acumulación y de la resolución de muestreo del núcleo de sedimentos.

También, a partir de la acumulación de ^{137}Cs de la Figura 3 se pudo calcular el porcentaje correspondiente al fallout a partir de 1966, el cual resultó en 49.7%. Este porcentaje, corresponde predominantemente al fallout de las pruebas en la Polinesia Francesa. Esta proporción se ve respaldada por el análisis de isótopos de plutonio, que arrojó un valor de $51.3 \pm 5.1\%$ en muestras de suelo de referencia recolectadas en 1970-1971 en Buenos Aires (Chaboche et al., 2022), y de $62.2 \pm 12.2\%$ en sedimentos recolectados en 2020 en el embalse de Rincón del Bonete, Uruguay (Chaboche et al., 2022).

El valor de inventario observado en “suelos de referencia” y su baja heterogeneidad espacial en Uruguay pueden ser considerados como una línea base confiable para la vigilancia radiológica ante potenciales escenarios futuros que impliquen liberación de radionucleidos, tales como la reanudación de ensayos nucleares atmosféricos, conflictos bélicos o accidentes nucleares de escala nacional o regional. Aunque la probabilidad de estos eventos es baja, su posibilidad no puede descartarse completamente.

Un caso particular que merece atención es el de las centrales nucleares Atucha I y II, ubicadas sobre la margen del río Paraná en territorio argentino. En la región del Río de la Plata, los vientos predominantes provienen desde el noreste y el este; sin embargo, eventos meteorológicos como la “sudestada” o el “pampero” pueden generar vientos persistentes del sudeste. Bajo dichas condiciones, sería posible el transporte de contaminantes atmosféricos hacia territorio uruguayo en caso de un accidente severo en dichas instalaciones. De forma similar, la central nuclear de Angra dos Reis, ubicada en el litoral atlántico de Brasil, también representa una fuente potencial de emisión cuya influencia regional no puede descartarse bajo condiciones meteorológicas particulares.

A escala continental sudamericana, Chaboche et al. (2021) encontraron una alta relación entre latitud y precipitaciones, con los valores inventario de ^{137}Cs . En cuanto a la distribución espacial de ^{137}Cs en los sitios analizados en Uruguay, no se observó correlación con las precipitaciones medias anuales o con zonas específicas, lo cual es coherente con la escala geográfica analizada en el contexto de Sudamérica (Chaboche et al., 2021). El valor promedio de inventario determinado en este estudio puede emplearse como referencia en estudios de erosión donde no sea posible identificar sitios imperturbados, dado el bajo coeficiente de variación observado (3.6 %).

Por el contrario, los inventarios de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ mostraron una correlación positiva y significativa ($p = 0.01$) con el gradiente de precipitaciones medias anuales ($R^2 = 0.92$), en concordancia con su mecanismo de deposición predominantemente asociado a eventos de precipitación local (Zhang et al., 2021). La alta sensibilidad del inventario de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ frente a variables ambientales como la precipitación impide establecer un valor único y representativo para todo el país. En consecuencia, se recomienda determinar el inventario de referencia a partir de muestras colectadas específicamente en la zona de estudio, a fin de asegurar la validez y precisión de las estimaciones en aplicaciones como la cuantificación de tasas de erosión.

A futuro, con un mayor número de sitios de referencia evaluados en Uruguay, sería posible desarrollar modelos predictivos basados en precipitaciones u otras covariables ambientales que permitan estimar inventarios de referencia de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ en cualquier punto del país. Esto resultaría particularmente valioso considerando la creciente dificultad para identificar sitios imperturbados, condición esencial para la aplicación precisa de trazadores radiactivos en estudios de erosión de suelos.

En conjunto, los resultados presentados consolidan una línea base representativa de la deposición histórica de radionucleidos de fallout en suelos no perturbados del Uruguay, con implicancias relevantes para estudios de erosión, dinámica de partículas finas, datación de sedimentos y vigilancia radiológica ambiental.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado en parte por el Fondo María Viñas (proyecto FMV_1_2023_1_176577, ANII, Uruguay), y se enmarca también dentro del proyecto CELESTE Lab-ClimatAmSud, financiado por la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII, Uruguay). Asimismo, se reconoce la colaboración científica del consorcio AVATAR en la determinación de radionucleidos de fallout en el hemisferio sur.

REFERENCIAS

- Appleby, P. G.; Richardson, N. y Nolan, P. J., 1992. Self-absorption corrections for well-type germanium detectors. En: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 71(2), pp. 228-233.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(92\)95328-O](https://doi.org/10.1016/0168-583X(92)95328-O)
- Argentina. Presidencia de la Nación. Secretaría General. Autoridad Regulatoria Nuclear, 1994. *Informe anual 1994*. Cap. 2. Buenos Aires: Autoridad Regulatoria Nuclear. [Consulta: 21 de marzo de 2025]. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/arn/informe-anual-1994>
- Azcune, G.; Pérez Parada, A. y Fornaro, L., 2020. Implementación de la datación mediante ²¹⁰Pb - ¹³⁷Cs en Uruguay para el reconocimiento de la variabilidad climático-ambiental del Holoceno superior: Caso de estudio: Laguna de las Nutrias - Rocha - Uruguay. En: *INNOTEC*, (20), pp. 89-105. DOI: <https://doi.org/10.26461/20.04>
- Beninson, D.; Van der Elst, E. y Ramos, E., 1964. *Informe CNEA N.º 133*. Buenos Aires: Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) Argentina.
- Beninson, D. ; Ramos, E. y Touzet, R., 1965. *Radioestroncio y estroncio estable en los huesos y dietas de los niños*. *CNEA Informe N.º 149* [En línea]. Buenos Aires: Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA). [Consulta: 29 de abril de 2025].
Disponible en: <https://nuclea.cnea.gob.ar/server/api/core/bitstreams/4d1c90cf-b148-4d89-a22e-b7c5786cbd3d/content>
- Beninson, D.; Menossi, C. A.; Migliori de Beninson, Ambreta., 1972. *"Fallout" radiactivo debido a las explosiones en el Pacífico Sur en el período 1966-1970*. *Informe CNEA-321*. Buenos Aires: Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Argentina. Disponible en: <https://nuclea.cnea.gob.ar/server/api/core/bitstreams/4869dd37-2c06-4472-afb3-1fab7629dfc6/content>
- Beninson, D.; Menossi, C. A.; Migliori de Beninson, Ambreta., 1974. *"Fallout" radiactivo debido a las explosiones en el Pacífico Sur en el período 1971-1972*. *Informe CNEA-376*. Buenos Aires: Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Argentina. Disponible en: <https://nuclea.cnea.gob.ar/server/api/core/bitstreams/92a80838-cf04-4ce5-b47c-cfc3efec0bb4/content>
- Bennett, B. G., 2002. Worldwide dispersion and deposition of radionuclides produced in atmospheric tests: fallout from atmospheric nuclear tests: impact on science and society. En: *Health Phys.*, 82, pp. 644-655. DOI: <https://doi.org/10.1097/00004032-200205000-00011>
- Cabrera, M.; Sanabria, R.; González, J.; Cabral, P.; Tejeda, S.; Zarazua, G.; Melgar-Paniagua, E. y Tassano, M., 2023. Using ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pbex to assess soil redistribution at

- different temporal scales along with lithogenic radionuclides to evaluate contrasted watersheds in the Uruguayan Pampa grassland. En: *Geoderma*, 435, 116502.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116502>.
- Cai, W.; McPhaden, M. J.; Grimm, A. M.; Rodrigues, R. R.; Taschetto, A. S.; Garreaud, R. D.; Dewitte, B.; Poveda, G.; Ham, Y.-G.; Santoso, A.; Ng, B.; Anderson, W.; Wang, G.; Geng, T.; Jo, H.-S.; Marengo, J. A.; Alves, L. M.; Osman, M.; Li, S.; Wu, L.; Karamperidou, C.; Takahashi, K. y Vera, C., 2020. Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. En: *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(4), pp. 215–231.
DOI: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0040-3>
- Cardoso-Silva, S.; Mi Kim, B. S.; Ferreira, P. A. L.; Benedetti, B.; Goyenola, G.; Iglesias, C.; Figueira, R. C. L.; López-Rodríguez, A.; Moschini-Carlos, V.; Mello, F. T.; Meerhoff, M. y Pompêo, M., 2024. Reconstructing 90 years of anthropogenic activities in a subtropical reservoir: a chemometric and paleolimnological perspective. En: *Environmental Science and Pollution Research*, 31, pp. 55756–55773. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34718-4>
- Castañó, J. P.; Giménez, A.; Ceroni, M.; Furest, J.; Aunchayna, R. y Bidegain, M., 2011. *Caracterización agroclimática del Uruguay 1980–2009* [En línea]. Montevideo: INIA. (Serie Técnica N° 193). [Consulta: 29 de abril de 2025]. Disponible en: <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2538/1/18429021211104157.pdf>
- Chaboche, P. A.; Saby, N. P. A.; Laceby, J. P.; Minella, J. P. G.; Tiecher, T.; Ramon, R.; Tassano, M.; Cabral, P.; Cabrera, M.; Bezerra da Silva, Y. J. A.; Lefevre, I. y Evrard, O., 2021. Mapping the spatial distribution of global ¹³⁷Cs fallout in soils of South America as a baseline for Earth Science studies. En: *Earth-Science Reviews*, 214, 103542.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103542>
- Chaboche, P. A.; Pointurier, F.; Sabatier, P.; Foucher, A.; Tiecher, T.; Minella, J. P. G. Tassano, M.; Hubert, A.; Morera, S.; Guédron, S.; Ardois, C.; Boulet, B.; Cossonnet, C.; Cabral, P.; Cabrera, M.; Chalar, G. y Evrard, O., 2022. ²⁴⁰Pu/²³⁹Pu signatures allow refining the chronology of radionuclide fallout in South America. En: *Science of The Total Environment*, 843, 156943. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156943>
- Dicen, G.; Guillevic, F.; Gupta, S.; Chaboche, P.-A.; Meusburger, K.; Sabatier, P.; Evrard, O. y Alewell, C., 2025. Distribution and sources of fallout ¹³⁷Cs and ²³⁹⁺²⁴⁰Pu in equatorial and Southern Hemisphere reference soils. En: *Earth System Science Data*, 17, pp. 1529–1549. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-17-1529-2025>
- Disclose; Science and Global Security y Interpret, 2021. *Moruroa Files, 2021* [En línea]. s.n.: s.l. [Consulta: 2 de mayo de 2025]. Disponible en: <https://moruroa-files.org/en/about>
- Foucher, A.; Tassano, M.; Chaboche, P. A.; Chalar, G.; Cabrera, M.; Gonzalez, J.; Cabral, P.; Simon, A. C.; Agelou, M.; Ramon, R.; Tiecher, T. y Evrard, O., 2023. Inexorable land degradation due to agriculture expansion in South American Pampa. En: *Nature Sustainability*, 6, pp. 662–670. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01074-z>
- Harris, C. R.; Millman, K. J.; van der Walt, S. J.; Gommers, R.; Virtanen, P.; Cournapeau, D.; Wieser, E.; Taylor, J.; Berg, S.; Smith, N. J.; Kern, R.; Picus, M.; Hoyer, S.; van Kerkwijk, M. H.; Brett, M.; Haldane, A.; del Río, J. F.; Wiebe, M.; Peterson, P.; Gérard-Marchant, P.; Sheppard, K.; Reddy, T.; Weckesser, W.; Abbasi, H.; Gohlke, C. y Oliphant, T. E., 2020. Array programming with NumPy. En: *Nature*, 585(7825), pp. 357–362.
DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>

- Hordedaña, J., 2016. Estudio paleolimnológico de un lago recientemente urbanizado: lago del Parque Rivera, Montevideo, Uruguay. Montevideo: Universidad de la República, Facultad de Ciencias. (Tesis de grado)
- Hrnecek, E.; Steier, P. y Wallner, A., 2005. Determination of plutonium in environmental samples by AMS and alpha spectrometry. En: *Appl. Radiat. Isot.*, 63, pp. 633–638. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2005.05.012> Get rights and content
- Hunter, J.D., 2007. Matplotlib: A 2D graphics environment. En: *Computing in Science & Engineering*, 9(3), pp. 90–95. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>
- International Atomic Energy Agency - IAEA, 1989. *Measurement of radionuclides in food and the environment: a guidebook*. Viena: IAEA. (Technical Reports Series, No. 295)
- International Atomic Energy Agency - IAEA, 2014. *Guidelines for using fallout radionuclides to assess soil erosion and effectiveness of soil conservation strategies*. Vienna: IAEA. (IAEA-TECDOC-1741). [Consulta: 16 mayo 2025]. Disponible en: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1741_web.pdf
- Igarashi, J.; Zheng, J.; Zhang, Z.; Ninomiya, K.; Satou, Y.; Fukuda, M.; Ni, Y.; Aono, T. y Shinohara, A., 2019. First determination of Pu isotopes (^{239}Pu , ^{240}Pu and ^{241}Pu) in radioactive particles derived from Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. En: *Sci Rep*, 9, 11807. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48210-4>
- Imanaka, T.; Hayashi, G. y Endo S., 2015. Comparison of the accident process, radioactivity release and ground contamination between Chernobyl and Fukushima-1. En: *J Radiat Res.*, 56 Suppl 1(Suppl 1), pp. 56-61. DOI: <https://doi.org/10.1093/jrr/rrv074>
- Koide, M.; Bertine, K. K.; Chow, T. J. y Goldberg, E. D., 1985. The $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ ratio, a potential geochronometer. En: *Earth Planet. Sci. Lett.*, 72, pp. 1–8.
- Marrero, A.; Tudurí, A.; Pérez, L.; Cuña, C.; Muniz, P.; Lopes Figueira, R.C.; de Mahiques, M.M.; Ferreira, P. A. L.; Pittauerová, D.; Hanebuth, T. y García-Rodríguez, F., 2014. Cambios históricos en el aporte terrígeno de la cuenca del Río de la Plata sobre la plataforma interna Uruguay. En: *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*, 21(2), pp. 95–110.
- McKinney, W., 2010. Data structures for statistical computing in Python. En: van der Walt, S. y Millman, J., eds. *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*. Austin: SciPy. pp. 51–56.
- Muramatsu, Y.; Uchida, S.; Ohmomo, Y.; Watanabe, K. y Tagami, K. 2000. Concentrations of ^{239}Pu and ^{240}Pu and their isotopic ratios in soils from the Chernobyl zone. En: *Environmental Science & Technology*, 34(14), pp. 2913–2917.
- Noguera, A.; Azcune, G.; Bentos Pereira, H. et al., 2022. Radionuclide distribution in the Barra de Valizas—Agua Dulces Region, Uruguay. En: *Environ Earth Sci*, 81(195). DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10318-8>
- Odino Moure, M. del R.; Reina, E.; Piuma, L. y Gabrielli, A., 2017. *Environmental radioactivity monitoring plan in Uruguay* [En línea]. Vienna: International Atomic Energy Agency (IAEA). [Consulta 5 de junio de 2025]. Disponible en: <https://inis.iaea.org/records/k53gh-93y12>
- Python Software Foundation, 2022. *Python Language Reference*. [En línea]. Vers. 2.7. Wilmington: Python Software Foundation. [Consulta: 30 de marzo de 2025]. Disponible en: <http://www.python.org>.
- QGIS Association, 2022. *QGIS Geographic Information System* [En línea]. Vers. 3.28.9. s.l.: QGIS Association. [Consulta: 30 de marzo de 2025]. Disponible en: <http://www.qgis.org>

- Quincke, A.; Tassano, M.; González, J. M.; Grahmann, K.; Pérez-Bidegain, M.; Ciganda, V.; Evrard, O.; Barolin, E. y Cabrera, M., 2024. Erosión del suelo: nuevos métodos de estudio en el “viejo” experimento de rotaciones de La Estanzuela [En línea]. En: *Revista INIA Uruguay*, (77), pp. 47–50. [Consulta: 29 de abril de 2025]. Disponible en: <https://www.inia.uy/erosion-del-suelonuevos-metodos-de-estudio-en-el-viejo-experimento-de-rotaciones-de-la-estanzuela>
- Raybaut, P., 2009. *Spyder-documentation*. s.n.: s.l. [Consulta: 30 de marzo de 2025]. Disponible en: <https://docs.spyder-ide.org/current/index.html>
- Ribeiro Guevara, S. y Arribére, M., 2002. 137Cs dating of lake cores from the Nahuel Huapi National Park, Patagonia, Argentina: Historical records and profile measurements. En: *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 252, pp. 37–45. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1015275418412>
- UNSCEAR, 1964. *Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: Report to the General Assembly, with Scientific Annexes*. New York: United Nations. Disponible en: <https://www.unscear.org/unscear/en/publications/1964.html>
- UNSCEAR, 2000a. *Sources and effects of ionizing radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2000 report to the General Assembly, with scientific annexes* [En línea]. Vol. I: Sources. New York: United Nations. [Consulta: 29 de abril de 2025]. Disponible en: https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2000_1.html
- UNSCEAR, 2000b. *Sources and effects of ionizing radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2000 report to the General Assembly, with scientific annexes* [En línea]. Vol. II: Effects. New York: United Nations. [Consulta: 29 de abril de 2025]. Disponible en: https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2000_2.html
- UNSCEAR, 2008. *Sources and effects of ionizing radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2008 report to the General Assembly with scientific annexes* [En línea]. Vol. I. New York: United Nations. [Consulta: 29 de abril de 2025]. Disponible en: https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2008_1.html
- Uruguay. Presidencia de la República. Infraestructura de Datos Espaciales, 2025. *Infraestructura de datos espaciales del Uruguay*. Montevideo: IDE. [Consulta: 29 de abril de 2025]. Disponible en: <https://www.ide.uy>
- Virtanen, P.; Gommers, R.; Oliphant, T. E.; Haberland, M.; Reddy, T.; Cournapeau, D.; Burovski, E.; Peterson, P.; Weckesser, W.; Bright, J.; van der Walt, S. J.; Brett, M.; Wilson, J.; Millman, J. K.; Mayorov, N.; Nelson, A. R. J.; Jones, E.; Kern, R.; Larson, E.; Carey, C. J.; Polat, I.; Feng, Y.; Moore, E. W.; VanderPlas, J.; Laxalde, D.; Perktold, J.; Cimrman, R.; Henriksen, I.; Quintero, E. A.; Harris, C. R.; Archibald, A. M.; Ribeiro, A. H.; Pedregosa, F. y van Mulbregt, P., 2020. SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python. En: *Nature Methods*, 17(3), pp. 261–272.
- Zhang, F.; Wang, J.; Baskaran, M.; Zhong, Q.; Wang, Y.; Paatero, J. y Du, J., 2021. A global dataset of atmospheric ⁷Be and ²¹⁰Pb measurements: annual air concentration and depositional flux. En: *Earth System Science Data Discussions*, 13(6), pp. 2963–2994. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-2021-35>