

Estudio de la calidad del suelo y presencia de metales potencialmente tóxicos en escenarios de relevancia en salud ambiental, Barrio Botta, Villa María, Córdoba, Argentina

Estudo da qualidade do solo e da presença de metais potencialmente tóxicos em cenários de relevância para a saúde ambiental, Barrio Botta, Villa María, Córdoba, Argentina

Study of soil quality and presence of potentially toxic metals in scenarios of environmental health relevance, Barrio Botta, Villa María, Córdoba, Argentina

Lara R Buthet^{1,2}, Lucía Restovich¹, M^a Victoria Spinetto³, Juan A Gili^{1,4}, Miriam B Virgolini⁵

¹ Universidad Nacional de Villa María (UNVM), Villa María, Provincia de Córdoba.

² Centro de Investigación y Transferencia del I.A.P.C.H. de la UNVM-Conicet.

³ Instituto Superior de Urbanismo - FADU - Universidad de Buenos Aires (ISU/CIAPER-FADU-UBA).

⁴ Dirección de Investigación CEMIC-CONICET.

⁵ IFEC-CONICET. Departamento de Farmacología Otto Orsingher, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba.

Cita: Buthet LR, Restovich L, Spinetto MV, Gili JA, Virgolini MB. Estudio de la calidad del suelo y presencia de metales potencialmente tóxicos en escenarios de relevancia en salud ambiental, Barrio Botta, Villa María, Córdoba, Argentina. Rev. Salud ambient. 2025; 25(1):16-26.

Recibido: 18 de junio de 2024. **Aceptado:** 16 de marzo de 2025. **Publicado:** 15 de junio de 2025.

Autor para correspondencia: Lara Buthet.
Correo e: lbuthet@unvm.edu.ar

Financiación: La presente investigación fue financiada parcialmente con fondos de la Sociedad Iberoamericana de Salud Ambiental (SIBSA).

Declaración de conflicto de intereses: Las autoras y el autor declaran no tener conflicto de intereses para la publicación.

Declaraciones de autoría: Todos los autores contribuyeron al diseño del estudio y a la redacción del artículo. Asimismo, todos aprobaron la versión final.

Resumen

La calidad del agua, aire y suelo impactan directamente en el bienestar de las personas, afectando procesos básicos determinantes de salud. En el presente trabajo se evaluó la calidad del suelo mediante análisis fisicoquímicos y determinación del contenido de metales en tres escenarios de relevancia en salud ambiental en un barrio de características socio-económico-ambientales desiguales en la ciudad de Villa María, Córdoba. El ex Punto Limpio (PL) es una zona en la cual se encontraban residuos sólidos especiales y domiciliarios. En sus inmediaciones, coexisten un jardín de infantes, un jardín maternal (JI) y un monte autóctono (MA).

De acuerdo con lo esperado, los tres suelos difirieron en sus características fisicoquímicas, lo que determina variaciones en la disponibilidad y movilidad de metales y metaloides. No se observaron diferencias significativas en la concentración de estos elementos entre los estratos. Solo el boro se encontró por encima de la norma argentina para suelo agrícola. Se espera que estos datos favorezcan la articulación de información entre instituciones gubernamentales y la población afectada con relación al uso del suelo, contribuyendo a la implementación de políticas públicas de prevención y aportando evidencias que tiendan a revisar la normativa vigente para reducir la exposición de los seres humanos y otros componentes del ecosistema en el contexto de "Un solo Mundo, una sola Salud".

Palabras clave: salud; ambiente; suelo; metales; metaloides; contaminantes; residuos.

Resumo

A qualidade da água, do ar e do solo tem um impacto direto no bem-estar das pessoas, afetando os processos básicos determinantes da saúde. No presente estudo, a qualidade do solo foi avaliada através de análises físico-químicas e da determinação

do teor de metais em três cenários de relevância para a saúde ambiental num bairro de características socioeconômicas e ambientais desiguais na cidade de Villa María, Córdoba. O antigo Punto Limpio (PL) é uma zona onde se encontravam resíduos sólidos especiais e domésticos. Nas imediações coexistem um jardim de infância, uma creche (JI) e uma mata nativa (MA). Como esperado, os três solos diferiram em suas características físico-químicas, o que determina variações na disponibilidade e mobilidade de metais e metalóides. Não foram observadas diferenças significativas na concentração destes elementos nos solos PL, JI ou MA. Apenas o boro foi encontrado acima da norma argentina para solos agrícolas. Espera-se que estes dados favoreçam a articulação de informações entre as instituições governamentais e a população afetada em relação ao uso do solo, contribuindo para a implementação de políticas públicas de prevenção e fornecendo evidências que tendam a rever os regulamentos actuais para reduzir a exposição dos seres humanos e outros componentes do ecossistema no contexto de "Um Mundo, Uma Saúde".

Palabras-chave: saúde; ambiente; solo; metais; metalóides; poluentes; lixo.

Abstract

The quality of water, air, and soil has a direct impact on people's well-being, affecting basic health determinant processes. In the present study, soil quality was evaluated using physicochemical analysis and determination of metal content in three scenarios of environmental health relevance in a neighborhood of unequal socioeconomic and environmental characteristics in the city of Villa María, Córdoba. The former Punto Limpio (PL) is an area where special and household solid wastes were located. In its vicinity, a kindergarten, a nursery school (JI), and a native forest (MA) coexist. As expected, the three soils differed in their physicochemical characteristics, which determines variations in the availability and mobility of metals and metalloids. No significant differences in the concentration of these elements were observed in the PL, JI, or MA soils. Only boron was found above the Argentine standard for agricultural soil. It is expected that these data will favor the articulation of information between governmental institutions and the affected population concerning soil use, contributing to the implementation of public prevention policies and providing evidence that tends to revise the current regulations to reduce the exposure of human beings and other components of the ecosystem in the context of "One World, One Health".

Keywords: health; environment, soil, metals, metalloids; contaminants; waste.

INTRODUCCIÓN

La salud humana no puede percibirse desde un aspecto individual, sino que debe abordarse desde una perspectiva socioeconómica, cultural y ambiental. En este sentido, la calidad del agua, aire y suelo son muy importantes ya que impactan directamente en el bienestar de los seres humanos, afectando procesos básicos determinantes de salud¹, entendiendo a esta última no como la mera ausencia de enfermedad sino como un conjunto dinámico de elementos físicos, psicológicos y personales que interaccionan entre sí. Por lo tanto, la caracterización de posibles contaminantes presentes en el ambiente tiene mucho valor, ya que permite que las poblaciones expuestas puedan conocer los riesgos, determinar su vulnerabilidad y así tomar los recaudos necesarios para disminuir la potencial toxicidad².

De este modo, se hace fundamental la identificación de contaminantes ambientales como los metales pesados, que presentan riesgos por su gran persistencia y capacidad para afectar a los seres humanos y los ecosistemas, así como para acumularse y magnificarse en las cadenas alimentarias y moverse en aguas subterráneas y suelos^{3,4}. Cualquier especie metálica (o metaloide) es considerada un contaminante cuando aparece donde no está presente naturalmente, o cuando está en una

forma química o en una concentración que cause efectos perjudiciales para el ser humano o el ambiente⁵. Si bien podemos encontrar metales y metalóides provenientes de fuentes naturales (geogénicas) en un determinado ambiente, también pueden ingresar a través de fuentes antropogénicas, como ciertas actividades industriales y la disposición de residuos urbanos^{5,6}.

La contaminación del suelo, en particular, es considerada un desafío significativo para la salud pública, abordado a través de la gestión ambiental que implica identificar fuentes y comunicar riesgos a la población².

El presente análisis explora cómo la contaminación afecta las propiedades químicas del suelo, lo que podría alterar la biodisponibilidad y movilidad de los contaminantes, que dependen de factores como el pH y la materia orgánica, entre otros^{7,8}. Esto convierte a los parques y jardines en terrenos potencialmente receptores de contaminantes^{9,10}.

En base a estas evidencias, se podría pensar que las alteraciones en el pH y la materia orgánica, la biodisponibilidad¹ de metales pesados será mayor en los

¹ La biodisponibilidad será analizada en una publicación más adelante.

suelos contaminados, aumentando el riesgo de absorción por plantas y la posible exposición humana. Se propone la hipótesis que las áreas con vegetación autóctona podrían actuar como receptores de contaminantes y que las propiedades del suelo juegan un papel crucial en la determinación del impacto de los mismos.

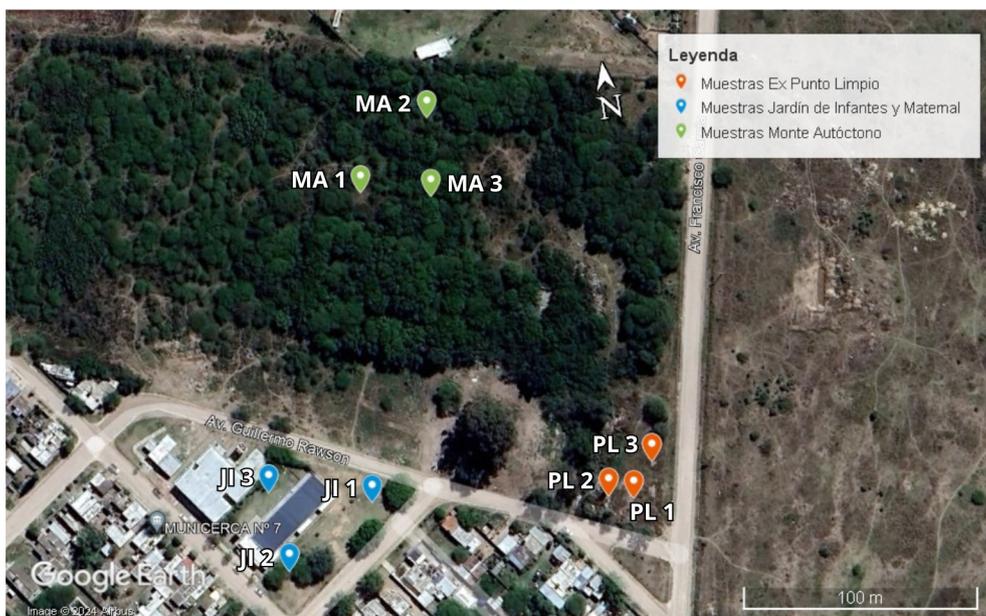
Para responder a esta propuesta, se estudió la calidad del suelo en tres escenarios distintos de relevancia en salud ambiental, mediante análisis fisicoquímicos de suelos y la cuantificación de metales y metaloides, con el objetivo de analizar posibles riesgos de contaminación, teniendo a la población infantil como foco, en un barrio de características socio-económico-ambientales desiguales en la ciudad de Villa María, Córdoba. El primer escenario, denominado ex Punto Limpio (PL), es una zona dentro de la cual se depositaron residuos sólidos especiales y domiciliarios (RSU). Ubicado en el Barrio Felipe Botta, fue destinado a este fin entre los años 2015 y 2020, aunque en la actualidad los residuos continúan siendo arrojados en los alrededores, particularmente en la calle y en los espacios públicos. Debido al descontrol de los microbasurales y su cercanía con un relicto de monte nativo correspondiente al Espinal¹¹, se han producido incendios y quemaduras de residuos, generando humos tóxicos y situaciones de riesgo para la población. Además, se destaca la cercanía de estos escenarios con instituciones educativas infantiles y con asentamientos domiciliarios del barrio.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se ubica en el barrio popular Felipe Botta, de la ciudad de Villa María, Córdoba, donde se pueden apreciar los 3 escenarios con relevancia en salud ambiental: el PL, donde solían depositarse residuos sólidos especiales y domiciliarios, los JI, a los que asisten niños y niñas entre 45 días y 5 años de edad, y un relicto de MA que colinda con el barrio. Todos ellos coexisten a poca distancia entre sí y con hogares y comercios.

Se llevó a cabo un diseño de muestreo de tipo exploratorio, aleatorio, estratificado¹². Dada la heterogeneidad existente en el área de estudio, se delimitaron los 3 sitios mencionados anteriormente y se definió tomar un total de 3 puntos en cada sitio, en base al presupuesto existente. Inicialmente, se ubicaron los 9 puntos de muestreo en un mapa con base en *Google Earth* y *Google maps (my maps)*, realizando previamente una exploración de la zona con el fin de precisar posibles sitios para la toma de muestras. Se consideraron puntos de interés las áreas recreativas con uso y contacto directo de los infantes con el suelo superficial en el jardín de infantes. Quedando planificadas un total de 9 muestras (Punto Limpio: PL1, PL2 y PL3; Jardín: JI1, JI2 y JI3 y Monte Autóctono: MA1, MA2 y MA3) según se evidencian en la figura 1.

Figura 1. Puntos de muestreo en el barrio Felipe Botta, ciudad de Villa María, Córdoba



Fuente: Elaboración propia en Google Earth.

El muestreo se realizó el 8 de abril de 2023, bajo condiciones de temperatura promedio de 21 °C, típicas del otoño en el hemisferio sur. Se utilizó una grilla cuadrículada para enmarcar los puntos de extracción y se extrajeron aproximadamente 500 g de suelo por triplicado más la toma para rellenar "in situ" el cilindro (determinación de la densidad aparente) de los primeros 15-20 cm de profundidad, donde se suelen acumular metales de origen antropogénico⁸. Las muestras se homogeneizaron usando la técnica de

cuarteo y se conservaron en condiciones controladas de temperatura.

Los análisis del suelo en los laboratorios de la Universidad Nacional de Villa María se realizaron utilizando métodos estandarizados. Los parámetros evaluados incluyeron: densidad aparente mediante el método del cilindro^{14,15}, pH y conductividad¹⁶ de acuerdo con la Norma IRAM 29410-1999, humedad, contenido de materia orgánica y carbonatos (figura 2) mediante la pérdida de peso por ignición^{17,18}.

Figura 2. Mufla para determinación de carbonatos en muestras de suelo



Fuente: Elaboración propia.

Las 9 muestras fueron analizadas en el Laboratorio INTEMIN-SegemAR, utilizando espectrometría de emisión atómica por plasma inductivo (ICP-OES) para determinar la concentración (en ug/g peso seco) de los siguientes metales y metaloides en todas las muestras: aluminio, arsénico, antimonio, bario, boro, berilio, cadmio, zinc, cobre, cromo total, cobalto, hierro, manganeso, molibdeno, níquel, plata, plomo, selenio, vanadio y talio se cuantificó el total de los metales mediante la técnica de extracción ácida a temperaturas elevadas según la norma EPA¹⁹. Paralelamente, una muestra por estrato fue enviada a un laboratorio privado de la ciudad de Río Cuarto, provincia de Córdoba, para la determinación de la granulometría mediante la técnica de Bouyocuos¹³. La validación se llevó a cabo usando materiales de referencia certificados.

Respecto a las determinaciones sobre la presencia de contaminantes en suelos, los metales fueron categorizados y presentados en tres grupos distintos,

basados en su relevancia, función biológica y potencial toxicidad para el ser humano y otros organismos vivos:

1. Metales tóxicos principales: incluyen aluminio, cromo, níquel, plomo y vanadio (figura 3).
2. Metales esenciales para los seres humanos con potencial toxicidad: comprenden zinc, cobalto, cobre, hierro y manganeso (figura 4).
3. Metales esenciales para plantas con potencial toxicidad: boro y bario (figura 5).

Solo se analizaron los metales cuya concentración superó el límite de cuantificación de la técnica, dejando sin graficar los siguientes: antimonio, berilio, cadmio, molibdeno, plata, selenio y talio.

Este enfoque minucioso para la recolección y análisis de muestras aseguró una evaluación precisa de la calidad

Figura 3. Mediana e intervalos de confianza al 95 % para metales tóxicos, según el estrato



Figura 4. Mediana e intervalos de confianza al 95 % para metales esenciales, según el estrato

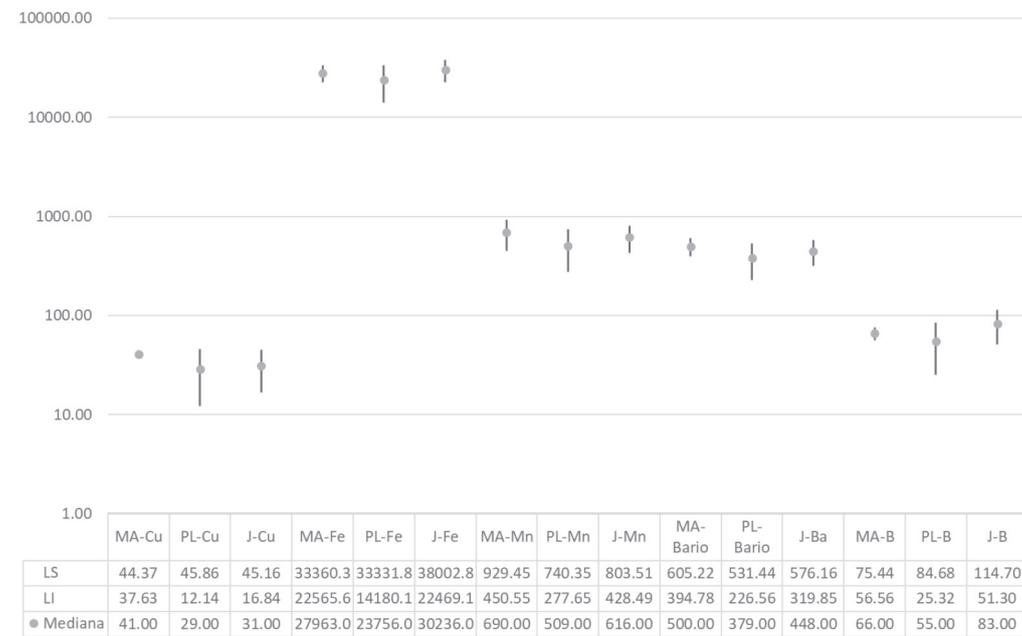
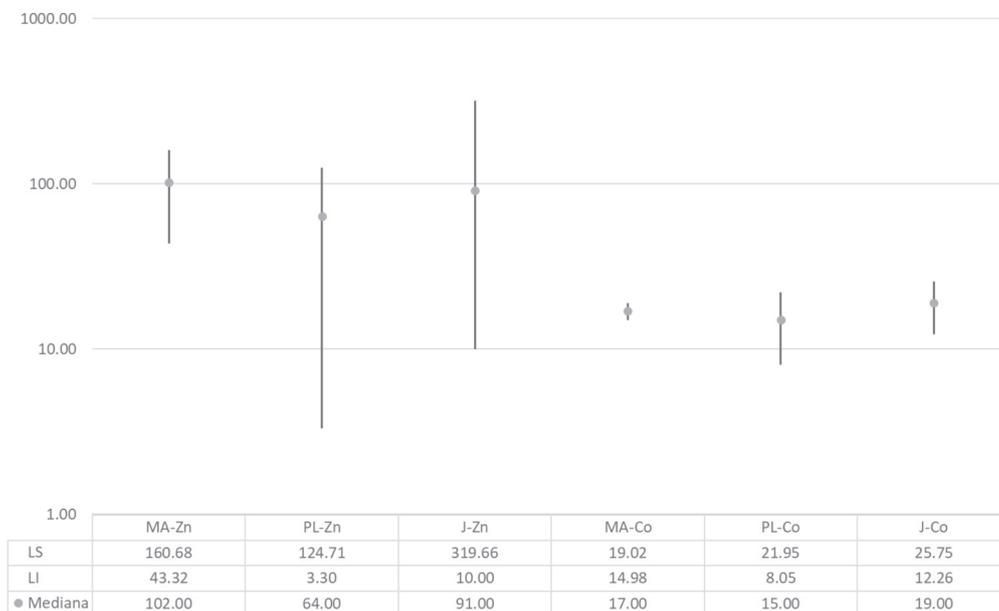


Figura 5. Mediana e intervalos de confianza al 95 % para metales esenciales para las plantas según el estrato



del suelo, centrada especialmente en las condiciones ambientales que afectan a las poblaciones infantiles en áreas recreativas.

Para el análisis descriptivo de los datos, se empleó el software estadístico Infostat, calculando medidas de tendencia central e intervalos de confianza del 95 %. Para investigar la relación entre variables, se utilizó la correlación de Pearson, considerando una asociación relevante con valores superiores a 0,7 y significancia estadística con $p < 0,05$. Los resultados se visualizaron mediante gráficos de barras generados en Excel.

Se aplicó logaritmo a la mediana en las figuras 3, 4 y 5 para visualizar mejor los resultados, y además para obtener los coeficientes de variación.

Los niveles de los elementos metálicos se analizaron comparativamente con los estándares establecidos

por la normativa argentina, específicamente el decreto reglamentario 831/1993 de la Ley n° 24 051 de Residuos Peligrosos, que en la tabla 9, de su Anexo II, establece niveles guía de calidad de suelos basados en normativas canadienses y clasificados según su uso: agrícola, residencial e industrial²⁰. Además, se compararon estos niveles con normativas internacionales^{21-24,26} pertinentes a los elementos analizados, para evaluar la conformidad de los valores obtenidos en el estudio con los estándares existentes. Este abordaje fue crítico para determinar la calidad del suelo en las áreas bajo estudio y la adecuación a sus diferentes usos.

RESULTADOS

En las tablas 1 y 2 pueden observarse los valores medios obtenidos en la caracterización del suelo en cada estrato, los cuales fueron los esperables según los usos y tipos de suelo.

Tabla 1. Caracterización del suelo por estratos

Estrato	Materia Orgánica (%)*	Conductividad (µS/cm)	pH	Carbonatos (%)*	Humedad (%)*
Monte autóctono	11,37	138,35	6,53	1,05	16,36
Limite de confianza	15,69 - 7,05	164,32 - 112,38	7,36 - 5,71	1,25 - 0,85	20,33 - 12,39
Ex Punto Limpio	4,17	161,35	7,9	1,70	7,13
Limite de confianza	6,22 - 7,05	175,04 - 147,66	8,38 - 7,42	2,39 - 1,00	7,38 - 6,87
Jardin de infantes y maternal	2,76	196,00	8,47	1,13	3,08
Limite de confianza	5,22 - 0,30	236,94 - 155,05	8,93 - 8,01	1,27 - 0,99	5,44 - 0,72
Referencias:	*Muestras únicas.				

Tabla 2. Granulometría y densidad aparente de los suelos de cada estrato

Granulometría* y densidad aparente				
Estrato	Contenido de arcillas %	Contenido de arenas %	Contenido de limos %	Densidad aparente (g/cm ³)
MA	10,47	64,86	24,66	0,90±0,01
PL	7,07	60,86	32,06	1,75±0,05
J	12,47	56,86	30,66	1,32±0,01
Referencias:	*Muestras únicas.			

Las figuras 3, 4 y 5 reflejan el logaritmo de la mediana acompañado de los intervalos de confianza de los valores obtenidos de metales en cada una de las muestras por estrato. Como se mencionó previamente, los resultados de la cuantificación de elementos metálicos fueron comparados con niveles guía de calidad de suelo argentinos²⁰ e internacionales^{21-24,26} (tabla 3). Al observar la tabla se evidencia que los valores obtenidos se encuentran por debajo de las normativas analizadas,

excepto el boro en suelo agrícola argentino, aunque el resto de las normativas no lo regula para ningún uso de suelo, y el bario, cuya concentración media en el estrato de MA alcanza el límite argentino de 500 µg/g de peso seco para uso residencial. Por otro lado, se observó que elementos como el aluminio, el hierro y el manganeso no están regulados por la normativa local ni, en muchos casos, internacionales.

Tabla 3. Resultados obtenidos en la cuantificación

Elemento	Resultados obtenidos				Normativas nacionales e internacionales					
	LC	Mediana JI	Mediana PL	Mediana MA	Argentina (Decreto 831/1993)	Comunidad Autónoma del País Vasco, España (Ley 4/2015)	Madrid, España (Orden 2770/2006 y Orden 761/2007)	Principado de Asturias, España (Resolución de 20 de marzo de 2014)	Países Bajos (Soil Remediation Circular 2013)	São Paulo, Brasil (Decisão de Diretoria 045/2014/E/C/I)
Al	1,0	32832,0	26090,0	35833,0	Sin referencia	Sin referencia	Sin referencia	Sin referencia	Sin referencia	Sin referencia
As	1,2	<2,4	<2,4	7,0	30,0	30,0	24**	40,0	76,0	55,0
Ba	0,5	448,0	379,0	500,0	500,0	Sin referencia	15200,0	10000,0	-	1300,0
B	2,0	83,0	55,0	66,0	2*	Sin referencia	Sin referencia	Sin referencia	Sin referencia	Sin referencia
Zn	0,4	91,0	64,0	102,0	500,0	Sin referencia	11700,0	4550,0	720,0	7000,0
Co	1,0	19,0	15,0	17,0	50,0	Sin referencia	150,0	25,0	190,0	65,0
Cu	0,8	31,0	29,0	41,0	100,0	Sin referencia	800,0	400,0	190,0	2100,0
Cr	0,3	27,0	25,0	32,0	250,0	90,0	230,0	Sin referencia	Sin referencia	300,0
Fe	1,0	30236,0	23756,0	27963,0	Sin referencia	Sin referencia	Sin referencia	Sin referencia	Sin referencia	Sin referencia
Mn	0,5	616,0	509,0	690,0	Sin referencia	Sin referencia	3390,0	2135,0	Sin referencia	Sin referencia
Ni	0,2	15,0	15,0	18,0	100,0	110,0	1560,0	650,0	100,0	480,0
Pb	1,5	24,0	35,0	31,0	500,0	120,0	270,0	400,0	530,0	240,0
V	0,5	77,0	72,0	86,0	200,0	Sin referencia	370,0	190,0	Sin referencia	Sin referencia

Referencias: Unidad utilizada: µg/g. LC = Límite de cuantificación * = solo existe límite para uso agrícola. ** = VR90 del elemento

Para evaluar las correlaciones se aplicó el test de Pearson y se estudiaron las relaciones entre diversas propiedades del suelo y la presencia de metales, obteniendo resultados estadísticamente significativos ($p < 0,05$), que pueden observarse en la tabla 4. Se obtuvieron correlaciones que reflejan la interacción y compatibilidad entre componentes del suelo y elementos metálicos, que son relevantes para comprender la dinámica del suelo y su impacto en la toxicidad ambiental. Los resultados más relevantes fueron los siguientes:

A. pH: correlaciones positivas con conductividad y limo ($r = 0,93$ y $0,88$, respectivamente) y correlación negativa con humedad, materia orgánica y arena ($r = -1$, $-0,99$ y $-0,98$ respectivamente), sugiriendo que la matriz más rica en materia orgánica tiende a ser más ácida^{27,28}. Las relaciones fueron las esperadas, ya que los suelos con mayor cantidad de materia orgánica son los más húmedos y poseen valores de pH inferiores a 7, como se visualiza en la tabla 1, más específicamente en el MA. Además, se observaron correlaciones negativas con los siguientes metales: As, Cu, Cr, Mn, Ni y V. El análisis de estas está fuera del alcance de esta publicación y se abordará en una publicación específica más adelante.

B. Carbonatos: correlaciones significativas con plomo, densidad aparente y arcilla ($r = 0,76$, $0,73$, y $-0,73$, respectivamente), indicando una fuerte adhesión del plomo y de mayor densidad aparente e inversamente proporcional en suelos con características arcillosas.

C. Interacción entre metales: asociaciones positivas entre aluminio y metales como bario, boro, cromo, hierro, magnesio, níquel, y vanadio; y correlaciones entre bario con boro, cobre, cromo, hierro, magnesio, níquel y vanadio. Estas interacciones sugieren una mayor tendencia a la formación de complejos como óxidos y quelantes, especialmente relevante en contextos de pH elevado donde la movilidad de ciertos metales como el boro es limitada²⁹; es común encontrar el boro unido al hierro o al aluminio en los suelos, fenómeno que aumenta con el pH, limitando su movilidad y disponibilidad²².

Las correlaciones de la tabla 4 son mucho más complejas, existen correlaciones positivas de todos los metales entre sí, excepto zinc, plomo, cobre y cobalto. Las correlaciones positivas entre metales, sobre todo con aluminio, hierro y manganeso, que son los principales componentes de los silicatos podría

Tabla 4. Matriz de Correlación de Pearson entre distintos parámetros, aplicada a las medianas de los estratos

Parámetros	Materia orgánica	Conductividad	pH	Carbonatos	Humedad	Al	As	Ba	B	Zn	Co	Cu	Cr	Fe	Mn	Ni	Pb	V	Arcillas	Arenas	Limos	Densidad aparente	ESCALA	
Materia orgánica	1,00																							
Conductividad	-0,56	1,00																						1,00
pH	-0,87	0,41	1,00																					0,90 a 0,99
Carbonatos	-0,33	0,24	-0,01	1,00																				0,80 a 0,89
Humedad	0,89	-0,54	-0,97	-0,17	1,00																			0,70 a 0,79
Al	0,30	0,28	-0,31	-0,34	0,32	1,00																		-0,69 a 0,69
As	0,99	-0,77	-0,95	0,59	0,97	0,74	1,00																	-0,70 a -0,79
Ba	0,51	0,10	-0,51	-0,18	0,46	0,87	0,82	1,00																-0,69 a 0,69
B	0,15	0,53	-0,06	-0,15	-0,03	0,78	-0,12	0,83	1,00															-0,70 a -0,79
Zn	0,29	0,38	-0,17	-0,14	0,10	0,21	0,72	0,39	0,56	1,00														-0,69 a 0,69
Co	-0,04	0,10	0,24	-0,38	-0,27	0,13	0,00	0,29	0,41	0,11	1,00													-0,70 a -0,79
Cu	0,67	0,02	-0,78	0,22	0,66	0,51	0,99	0,76	0,54	0,46	-0,09	1,00												-0,70 a -0,79
Cr	0,40	0,29	-0,39	-0,22	0,32	0,89	0,96	0,92	0,84	0,19	0,40	0,61	1,00											-0,80 a -0,89
Fe	0,22	0,41	-0,18	-0,17	0,10	0,86	0,17	0,92	0,96	0,44	0,44	0,57	0,92	1,00										-0,80 a -0,89
Mn	0,15	0,18	-0,10	-0,18	0,05	0,75	0,81	0,87	0,87	0,47	0,48	0,50	0,76	0,92	1,00									-0,90 a -0,99
Ni	0,25	0,32	-0,25	-0,24	0,18	0,84	1,00	0,86	0,82	0,14	0,55	0,50	0,96	0,90	0,77	1,00								-0,90 a -0,99
Pb	-0,04	0,20	-0,17	0,76	-0,02	0,03	0,16	0,34	0,36	0,36	-0,07	0,62	0,16	0,33	0,41	0,14	1,00							-1,00
V	0,34	0,31	-0,35	-0,11	0,26	0,88	0,94	0,94	0,89	0,26	0,39	0,65	0,99	0,96	0,83	0,95	0,30	1,00						-1,00
Arcillas	0,07	0,40	0,17	-0,73	-0,14	0,42	0,15	0,37	0,56	0,44	0,71	-0,02	0,43	0,52	0,50	0,55	-0,31	0,39	1,00					-1,00
Arenas	0,80	-0,75	-0,87	-0,05	0,92	0,22	0,87	0,36	-0,17	-0,18	-0,33	0,55	0,22	-0,02	-0,02	0,09	0,01	0,18	-0,37	1,00				-1,00
Limos	-0,87	0,53	0,76	0,56	-0,84	-0,51	-0,98	-0,62	-0,21	-0,12	-0,16	-0,55	-0,53	-0,33	-0,32	-0,47	0,21	-0,45	-0,32	-0,76	1,00			-1,00
Densidad aparente	-0,74	0,28	0,56	0,73	-0,64	-0,57	-0,86	-0,65	-0,38	-0,26	-0,39	-0,44	-0,59	-0,46	-0,45	-0,59	0,29	-0,51	-0,63	-0,49	0,94	1,00		-1,00

indicar la composición del material original. La falta de correlaciones de los elementos mencionados podría indicar que se han aportado al suelo de forma antrópica, la profundización de este análisis podría discutirse en otra publicación.

D. granulometría y densidad aparente: correlaciones positivas de la densidad aparente con carbonatos y limo ($r = 0,73$ y $0,94$) y negativa con materia orgánica ($r = -0,74$), indicando que los carbonatos y sus posibles uniones con cationes (metales), serían más apropiados en suelos más compactos como aquellos que son limosos, con poca materia orgánica, características observadas en las muestras del JI. Además, se evidenciaron asociaciones de arena con materia orgánica y humedad ($r = 0,80$ y $0,92$), tal cual se observó en el MA, y una correlación negativa con pH ($r = -0,87$). El limo, por otro lado, mostró correlaciones con materia orgánica, pH, humedad y arena ($r = -0,9$; $0,76$; $-0,91$ y $-0,76$ respectivamente).

DISCUSIÓN

A partir del análisis de los resultados obtenidos en la cuantificación de metales y metaloides, debe considerarse la posibilidad de que los niveles observados sean valores característicos y naturales del suelo y que estén delimitados a la zona bajo estudio, por lo que se deberían analizar el material original para observar el fondo geoquímico a fin de confirmar o desechar dicha hipótesis.

Por otra parte, se ha descrito que tanto las interacciones químicas del suelo como la formación de óxidos estables por altas cantidades de hierro y aluminio, pueden influir en la biodisponibilidad de otros metales como el boro, afectando su movilidad y potencial toxicidad²⁹. Al respecto, es de destacar la importancia de considerar variables fisicoquímicas del suelo como el pH, el cual interfiere en la solubilidad y disponibilidad de los metales, y la forma en la que estas variables pueden modificarse con las condiciones ambientales, afectando la retención y movilidad de estos en el suelo^{27,30}.

Cabe mencionar que las diferencias en la textura, el contenido de arcillas y de materia orgánica, juegan un rol crítico en la capacidad de retención de metales, influenciando directamente la calidad del suelo y la salud de los diferentes componentes del ecosistema^{31,32}. A pesar de que la mayoría de los metales y metaloides analizados se encontraron por debajo de los límites establecidos por la normativa argentina vigente, se debe tener en cuenta que este estudio aborda el análisis de contaminantes inorgánicos en suelos, provenientes de fuentes naturales y antropogénicas, y es importante señalar que los valores guía conforman solo una de las diferentes herramientas

utilizadas para catalogar a zonas contaminadas y para la determinación del riesgo que estas representan en la salud humana y de otros componentes del ambiente.

Además de analizar las concentraciones totales de metales y metaloides, se observó el comportamiento fisicoquímico en la matriz en la que están presentes, estas podrían deberse a la composición del material original, aunque no se descarta que sea atribuible a otras causas.

Los valores totales de la normativa argentina se comparan con algunas normativas internacionales, como las españolas, que describen las características de los suelos acompañadas de los valores de referencia de estos elementos. Algunos ejemplos, son las leyes del País Vasco, que no solo cuenta con límites para áreas de juego infantil, sino que dentro de las mismas se tiene en cuenta la humedad y cantidad de arcilla de los suelos²¹, al igual que el Boletín Oficial del Principado de Asturias²⁴: que indica un área diferenciada que tiene como propósito principal el desarrollo de actividades de ocio, recreativas y deportivas, principalmente en instalaciones deportivas al aire libre y en contacto directo con el suelo, incluyendo las pequeñas instalaciones complementarias para funciones auxiliares de este uso principal. Se incluye también aquel que tiene como propósito servir específicamente para el desarrollo de actividades recreativas infantiles. Por otra parte, la normativa de Países Bajos de 2013 es un ejemplo interesante ya que ha eliminado temporalmente su corte crítico de bario en suelo, ya que el valor de intervención previamente establecido para el metal era inferior a la concentración natural en sus suelos propios²⁵.

Estos hallazgos resaltan la importancia de las interacciones fisicoquímicas en el suelo y su influencia en la disponibilidad y toxicidad de metales, lo cual es crucial para las evaluaciones ambientales y estrategias de remediación en suelos contaminados; aunque, las interacciones encontradas con los contenidos totales podrían deberse a otras causas.

Sin embargo, para valorar las mismas con los componentes del suelo, es importante conocer la fracción activa del metal, lo cual se hará en futuras publicaciones, tomando los índices químicos de los metales existentes en bibliografía.

En base a estos resultados y a las normativas estudiadas, es indispensable subrayar la importancia de una gestión integrada y actualizada de la calidad del suelo, teniendo en cuenta no solo el uso de este recurso, sino también sus características particulares, especialmente en contextos donde la normativa nacional existente puede no reflejar adecuadamente los riesgos emergentes para el ecosistema y la salud pública.

Finalmente, en el presente trabajo, la falta de diferencias significativas de los valores de metales entre los diferentes estratos evaluados sugiere que ciertas actividades antropogénicas recientes pueden haber influenciado en ellos. Específicamente, se identificó que el MA fue utilizado como desarmadero de motos y electrodomésticos, lo que podría estar contribuyendo a la presencia de metales en el área, a diferencia del PL, donde la vegetación pudo haber actuado como agente de fitorremediación, ayudando a mitigar la contaminación.

CONCLUSIONES

Sobre estas bases, cabe mencionar que en el análisis de riesgo ambiental deben considerarse no solo las concentraciones de contaminantes detectados sino también las variables fisicoquímicas y toxicidad de los compuestos, los parámetros complementarios, que permiten inferir el tipo y la naturaleza del medio. Los resultados resaltan la necesidad de actualizar la normativa sobre la calidad del suelo en Argentina, tomando en consideración evidencias científicas y estándares internacionales, pero con datos locales como base, con el fin de proteger adecuadamente la salud humana y ambiental en el contexto de *"Un solo Mundo, una sola Salud"*.

Los hallazgos demuestran la importancia del estudio al caracterizar los suelos para evaluar el comportamiento de los contaminantes metálicos, además de que resaltan la necesidad de monitoreo continuo y de tomar posibles medidas de remediación para asegurar que los suelos cumplan con las regulaciones y sean seguros para su uso previsto.

La biodisponibilidad de los metales y su potencial para interactuar entre sí subraya la complejidad de su comportamiento en el suelo y la necesidad de un análisis más detallado.

Por último, este trabajo destaca la necesidad de un enfoque multidisciplinario en la gestión de la salud ambiental y la importancia de prácticas sostenibles en el manejo del suelo para proteger la salud pública, especialmente la de las poblaciones vulnerables, como las infancias.

AGRADECIMIENTOS

A la Sociedad Iberoamericana de Salud Ambiental (SIBSA) por el financiamiento parcial de este proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

1. Baldi López G et al, en Zurita Mézquita EC, López-Mateo C, Ríos-Manríquez M, Sánchez-Fernández, MD (2020). Responsabilidad Social del Gobierno Municipal con el Medio Ambiente y los Servicios Públicos: Percepción Ciudadana. *Holos*, 7, 1–20.
2. García S. La Salud Ambiental en comunidades vulnerables de América Latina. *Revista de Salud Ambiental* 2019; 19(1):104-6.
3. Frimpong SK, Koranteng SS. Levels and human health risk assessment of heavy metals in surface soil of public parks in Southern Ghana. *Environ Monit Assess.* 2019; 23;191(9):588.
4. Astonitas Carrasco LJ, Pariente Mondragón E, Milla Pino ME. (2021). Evaluación del contenido de metales pesados en suelos periurbanos a partir de parámetros fisicoquímicos. *Revista De La Universidad Del Zulia*, 12(33),50-69.
5. Kumar J and Pal A. Phytoremediation of heavy metal: principles and perspectives. *International Journal of Current Research.* Vol. 3, Issue, 11, pp.004-010, October, 2011.
6. Reyes L, Gallegos A, Aguilera A, Aguilar Chan JA. (2023). Diagnóstico domiciliario de la contaminación por metales pesados en el suelo y polvo urbano en Valladolid, Yucatán, México. Hacia un conocimiento global y multidisciplinario del recurso suelo (pp.1-6). Publisher: Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo.
7. Yuanliang J, David O'C, Yong SO, Daniel CW, Tsang AL, Deyi H. Assessment of sources of heavy metals in soil and dust at children's playgrounds in Beijing using GIS and multivariate statistical analysis. *Environment International* 2019; 124:320-8.
8. Reyez Gómez M, Barreto L. Efecto de la materia orgánica del suelo en la retención de contaminantes. *Épsilon* 2011; 16:31-45.
9. Apostoae L, Radu E, Lancu OG. Spatial distribution and assessment of heavy metal pollution in the soils of Copou Park, Iasi, Romania. *Analele Stiintifice ale Universitatii "Al. I. Cuza" din Iasi Seria Geologie.* 2013; 59(1):23–49.
10. Fan S, Wang X. Analysis and assessment of heavy metals pollution in soils around a Pb and Zn smelter in Baoji City, Northwest China, Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal 2017; 23:1099-120.
11. Rodríguez MJ, Becker A, Grumelli M, Guzmán LA, Castro R, Furlan ML et al. Conformación de unidades morfoedológicas como herramienta para el ordenamiento territorial en el departamento General San Martín, 2016.
12. IHOBE, Sociedad Pública de Gestión Ambiental. Gobierno Vasco. Guía Metodológica de estudio Histórico y diseño de Muestreo. 1998.
13. Bouyoucos GJ. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal* 1962; 54:464-5.
14. Agostini MA, Monterubbianesi, Studdert G, Maurette G, S. A simple and practical method for bulk density determination. *Ciencia del Suelo.* 2014; 32:171-6.
15. Blake GR, Hartge KH. Bulk Density. In: A Klute (ed). *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods.* Am. Soc. Agron. and Soil Sci. Soc. Am., Madison, Wisconsin, USA 1986; 363-75.

16. Manasa MRK, Katukuri NR, Nair SSD, Haojie Y, Yang Z, bo Guo R. Role of biochar and organic substrates in enhancing the functional characteristics and microbial community in a saline soil. *Journal of Environmental Management*, 2020; 269:110737.
17. Antczak-Orlewska O, Płóciennik M, Sobczyk R, Okupny D, Stachowicz-Rybka R, Rzodkiewicz M, et al. 2021. Chironomidae Morphological Types and Functional Feeding Groups as a Habitat Complexity Vestige. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10 January 2021. Sec. Paleoecology. Volume 8 - 2020. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/journals/ecology-and-evolution/articles/10.3389/fevo.2020.583831>.
18. Bengtsson L, Enell M. Chemical Analysis. In *Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology*. John Wiley and Sons Ltd; 1986.
19. US EPA. Method 3051 A Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils.
20. Ministerio de Justicia de la Nación (Argentina). Decreto 831 del año 1993. Por medio del cual se reglamenta la Ley N° 24.051. 23 de abril de 1993. Publicado en el Boletín Nacional del 03 de mayo de 1993.
21. Comunidad Autónoma del País Vasco. Ley 4/2015, del 25 de junio. Para la prevención y corrección de la contaminación del suelo. BOE, 176(24), 62274.
22. Consejero de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Orden 2770/2006, del 11 de agosto de 2006. Por medio de la cual se procede al establecimiento de niveles genéricos de referencia de metales pesados y otros elementos traza en suelos contaminados de la Comunidad de Madrid.
23. Consejero de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Orden 761/2007, del 2 de abril de 2007. Por medio de la cual se modifica la Orden 2770/2006, de 11 de agosto, por la que se establecen niveles genéricos de referencia de metales pesados y otros elementos de traza de suelos contaminados de la Comunidad de Madrid.
24. Consejería de Fomento, Ordenación del Territorio y Medio Ambiente. Resolución de 20 de marzo de 2014. Por medio de la cual se establecen los Niveles Genéricos de Referencia para metales pesados en Suelos del Principado de Asturias.
25. Circular, SR. Rijkswaterstaat, Ministry of Infrastructure and Water Management, 2013.
26. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental-Cetesb. Decisão de Diretoria 045/2014/E/C/I, de 20/02/2014. Dispõe sobre a aprovação dos valores orientadores para solos e águas subterrâneas no estado de São Paulo-2014, em substituição aos valores orientadores de 2005 e dá outras providências. Diário Oficial Estado de São Paulo.
27. Rodríguez-Eugenio N, McLaughlin M, Pennock D. 2019. La contaminación del suelo: una realidad oculta. Roma, FAO.
28. Domènech X, Peral J. *Química Ambiental de Sistemas Terrestres*. Reverté. Barcelona, España: Reverté. 2012.
29. Carvajal RR. *Propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos*. Fenalce, Sena, Sac.1997; 5-23.
30. Vargas Rojas R. *Guía para la descripción de suelos*. 2009.
31. Whitaker AH, Duckworth OW. (2018). Cu, Pb, and Zn Sorption to Biogenic Iron (Oxyhydr)Oxides Formed in Circumneutral Environments. *Soil Systems*, 2(2), 18.
32. Cantú Silva I, Yáñez Díaz M I. 2017. Efecto del cambio de uso de suelo en el contenido del carbono orgánico y nitrógeno del suelo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. Vol. 9 (45).