



Distribución geoquímica y disponibilidad de elementos esenciales y tóxicos en suelos agrícolas de Colquencha en el altiplano boliviano

Romel Emil Aruquipa Buitre^{1,*}, Leonardo Guzmán Alegria¹, Eleonore Resongles², Israel Quino Lima¹ and Oswaldo Eduardo Ramos Ramos¹

¹Instituto de Investigaciones Químicas IIQ-Ambiental, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz;

²Institut de Recherche pour le Développement (IRD), La Paz - Bolivia

Keys: *Agricultural Soils, Essential Elements, Potentially Toxic Elements, Sequential Extraction, Geochemical Distribution, HR-CS-AAS*; **Claves:** *Suelos Agrícolas, Elementos Esenciales, Elementos Potencialmente Tóxicos, Extracción Secuencial, Distribución Geoquímica, HR-CS-AAS*.

ABSTRACT

Geochemical distribution and availability of essential and toxic elements in agricultural soils of colquencha in the Bolivian highlands. The geochemical distribution and availability of essential elements such as iron (Fe), manganese (Mn), copper (Cu), zinc (Zn), and potentially toxic elements including arsenic (As), cadmium (Cd), and lead (Pb) were evaluated in agricultural soils from Colquencha, La Paz. A sequential extraction procedure following the Community Bureau of Reference (BCR) method was applied to soil samples collected to a depth of 174 cm. The method's efficiency was validated by comparing the sum of the exchangeable (F1), reducible (F2), oxidizable (F3), and residual (FR) fractions with a Pseudo-Total Analysis (PTA) performed using acid digestion with nitric acid (HNO₃) and hydrochloric acid (HCl), yielding a recovery rate of 91–103%. The distribution and mobility of the elements were influenced by geochemical and geospatial factors, as well as by the physicochemical properties of the soil. The predominant fractions for each element were as follows: Mn: FR > F2 > F1 > F3; Fe: FR > F2 > F3 > F1; Cu: FR > F2 > F3 ≈ F1; Zn: FR > F2 > F1 > F3; As: FR > F2 > F3 > F1; Cd: FR > F2 > F1 > F3; Pb: FR > F2 > F3 > F1. The main mobilization factors were identified as Mn in surface layers, Cu at intermediate depths, and Cd at greater depths

RESUMEN

Se evaluó la distribución geoquímica y la disponibilidad de elementos esenciales como el hierro (Fe), manganeso (Mn), cobre (Cu), zinc (Zn) y potencialmente tóxicos como (As), cadmio (Cd), plomo (Pb) en suelos agrícolas de Colquencha, La Paz. Se aplicó un procedimiento de extracción secuencial BCR (Community Bureau of Reference) a muestras de suelo recolectadas hasta una profundidad de 174 cm. La eficiencia del método se validó comparando la suma de las fracciones intercambiable (F1), reducible (F2), oxidizable (F3) y residual (FR) con un Análisis de Pseudo Total (APT) realizado mediante digestión ácida de ácido nítrico (HNO₃) y ácido clorhídrico (HCl), obteniéndose una tasa de recuperación del 91-103%. La distribución y movilidad de los elementos estuvieron influenciadas por factores geoquímicos y geoespaciales, así como por las propiedades fisicoquímicas del suelo. Las fracciones predominantes para cada elemento fueron las siguientes. Se identificó como principales factores de movilidad al Mn en las capas superficiales, al Cu en profundidades intermedias y al Cd en las profundidades mayores.

Revista Boliviana de Química, 2026, 43, 128-141
ISSN 0250-5460, Rev. Bol. Quim. Paper edition
ISSN 2078-3949, Rev. boliv. quim. e-edition, Jan-Jun
30 junio 2026, <https://doi.org/10.53287/pyii9560fa84g>
© 2026 Universidad Mayor de San Andrés,
Facultad de Ciencias Puras y Naturales,
Carrera Ciencias Químicas, Instituto de Investigaciones Químicas
<https://bolivianchemistryjournaliiq.umsa.bo>

¹Received May 15, 2026, accepted June 10, 2026, published June 30, 2026. *Mail to: raruquipab@fcpn.edu.bo

INTRODUCCIÓN

La contaminación de suelos agrícolas por elementos potencialmente tóxicos (EPT) como arsénico (As), cadmio (Cd) y plomo (Pb), representa una amenaza a la sostenibilidad agrícola y a la salud humana¹. Paralelamente, elementos esenciales (EE) como hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn) y cobre (Cu), son fundamentales para el desarrollo de cultivos, aunque su deficiencia o exceso puede afectar negativamente la fertilidad del suelo y la calidad nutricional de los productos agrícolas^{2 3 4}. A nivel global, las concentraciones promedio de estos elementos en suelos varían ampliamente⁵, lo que puede dar lugar a una contaminación natural, por otro lado, la contaminación de suelos agrícolas se relaciona principalmente con el uso de fertilizantes, pesticidas, actividades mineras, industriales y urbanas^{5 6}. Por ello, es importante el estudio de la disponibilidad geoquímica del suelo, incluyendo la distribución y movilidad de EE y EPT. Esta distribución depende de factores como la meteorización de la roca madre y las condiciones físico-químicas del suelo^{7 8}.

En este contexto, el presente estudio se centra en suelos agrícolas del municipio de Colquenchá (Altiplano boliviano), donde se aplica un sistema de gestión ancestral llamado aynokas. Se empleará el método de extracción secuencial BCR (Community Bureau of Reference) para evaluar la disponibilidad y movilidad de EE y EPT en muestras de suelos superficiales, considerando además las propiedades edáficas y las unidades de paisaje. Estudios anteriores han identificado concentraciones elevadas de Fe y Cu en zonas específicas de Colquenchá^{9 10}, así como la presencia de materiales arcillosos con valor económico¹¹.

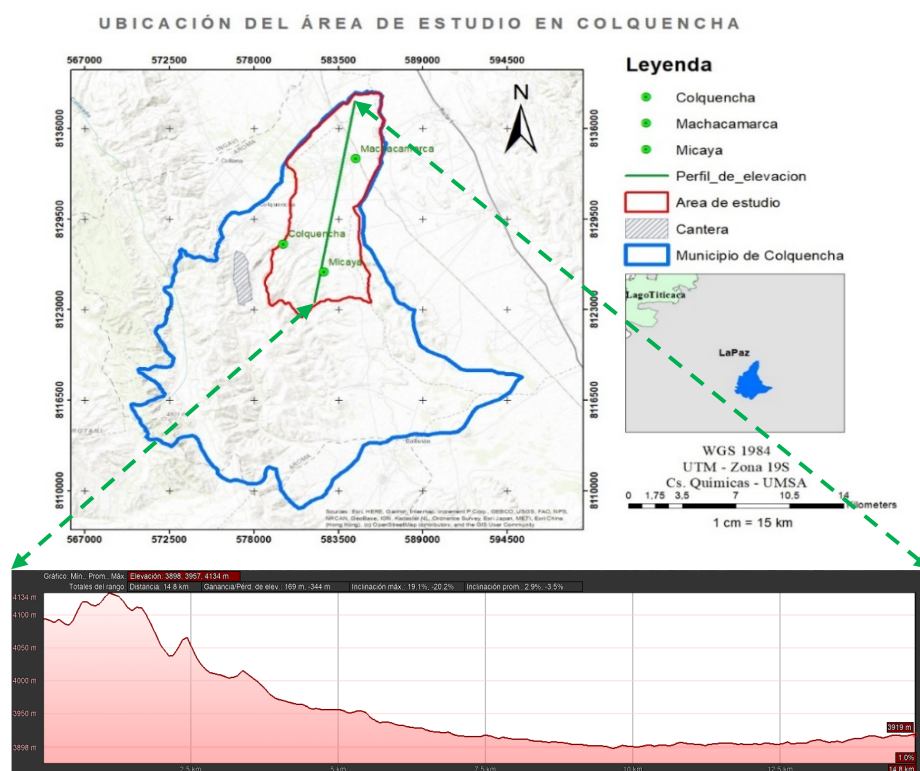


Figura No 1. Ubicación de la zona de estudio (polígono rojo), dentro del municipio de Colquenchá (polígono azul), en relación al perfil de elevación (línea verde).

La sobreexplotación de suelos agrícolas, erosión, lixiviación y actividades antrópicas, han disminuido la fertilidad y genera contaminación. Esto afecta tanto la disponibilidad de EE como el aumento de EPT^{12 13 14 15}. Además, el material particulado generado por la minería puede degradar aún más la calidad de los suelos y del agua¹⁶. El objetivo de este trabajo es determinar la distribución geoquímica, la disponibilidad y la distribución de EE (Fe, Mn, Cu, Zn) y EPT (As,

Cd, Pb) en suelos agrícolas del municipio de Colquencha mediante el método de extracción secuencial BCR. El trabajo de investigación se realizó en los laboratorios del IIQ, en el área de Hidroquímica y Química Ambiental.

EXPERIMENTAL

Área de estudio

El área de estudio se encuentra dentro del municipio de Colquencha que está ubicado al sur del departamento de La Paz, en la provincia Aroma (Figura 1), en la zona 19, con una altitud promedio de 3.890 m s.n.m., con una superficie de 311 km² ¹⁷. Históricamente, el asentamiento poblacional ha estado vinculado a la explotación de piedra caliza, lo que dio origen a los centros urbanos de Colquencha y Marquirivi¹⁸

Toma de muestras

Las muestras de ocho perfiles de suelos agrícolas se recolectaron en el marco del Proyecto “Caracterización del recurso suelo agrícola y agua para consumo humano/riego del municipio de Colquencha” con financiamiento IDH (Impuesto Directo a los Hidrocarburos), a partir de perfiles de 1x2x1,7 m excavadas hasta encontrar la capa de roca madre. Los perfiles permitieron diferenciar niveles del suelo por textura y color, la ubicación de los perfiles y la cantidad de muestra por perfil se detallan en la Tabla 1. Se tomaron muestras de alrededor de 1 kg por nivel, codificadas según su ubicación y transportadas evitando contaminación. Se consideró una muestra de suelo según la morfología y profundidad observada en el campo (Figura 3b).

Tabla No 1. Ubicación de los puntos de muestreo de los perfiles en coordenadas UTM y sección de municipio

Nº	Código de calicata	Altura [m s.n.m.]	Coordenadas UTM (Zona 19K)		Sección	Muestras por perfil
			X (m)	Y (m)		
1	CC1	4138	583667	8128523	Colquencha	1
2	CC2	4082	582156	8129902		4
3	CC3	4045	583558	8131854	Machacamarca	4
4	CC4	4004	583742	8135489		2
5	CM1	3943	581808	8123662	Micaya	4
6	CM2	3941	582617	8123998		4
7	CM3	3907	581849	8126018		4
8	CM4	3900	584487	8125943		3

Parámetros fisicoquímicos del suelo

El pH y la conductividad eléctrica (CE) se midieron a partir de una extracción sólido-líquido en una proporción 1:5 de suelo seco con agua desionizada¹⁹ utilizando electrodos específicos y material de referencia interno para garantizar precisión. La materia orgánica (MO) se determinó mediante el método de Walkley y Black²⁰. La textura del suelo se analizó con el método del hidrómetro de Bouyoucos²¹, que permite estimar el tamaño de partículas (arena, limo y arcilla) según el tiempo de sedimentación en una suspensión.

Extracción secuencial de los suelos

La metodología utilizada para analizar la especiación y estabilidad geoquímica de los EE y EPT en los suelos agrícolas se basó en el método BCR de extracción secuencial desarrollado y estandarizado por la Community Bureau of Reference (BCR)^{22, 23}. Este método clasifica los metales en fracciones solubles en ácido/intercambiables (Fracción 1, F1), reducibles (Fracción 2, F2), oxidables (Fracción 3, F3), una fracción residual (FR). Este protocolo fue adaptado en cuanto a concentraciones, pH y volúmenes de reactivos, y se complementó con un análisis pseudo total tras una digestión con agua regia formada con ácido nítrico (HNO₃)/ácido clorhídrico (HCl) para comparar resultados (Figura 2), con el fin de evaluar tanto el contenido total como la movilidad potencial de EE y EPT, considerando su disponibilidad bajo posibles cambios en condiciones ambientales como la acidez y el potencial redox.

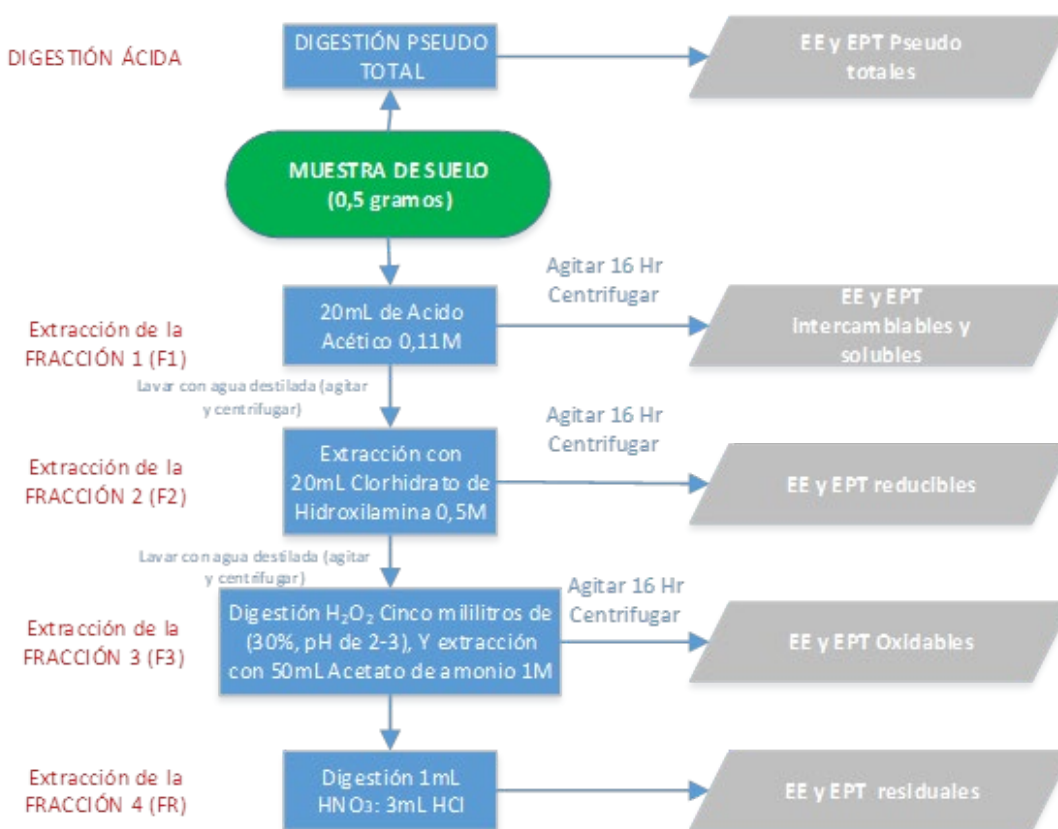


Figura No 2. Descripción de la extracción secuencial BCR de cuatro pasos y digestión directa de la muestra

Análisis de los EE y EPT

La concentración EE en las soluciones de extracción secuencial y digestión pseudo total se analizaron mediante Espectrometría de Absorción Atómica de Alta Resolución con Flama (F-HR-CS-AAS), utilizando el equipo Analytik Jena modelo ContrAA800. Se prepararon curvas de calibración individuales para Fe, Mn, Zn y Cu con soluciones estándar diluidas en HNO_3 , bidestilado, al 0,2%, y se verificó el método con un material de referencia certificado TMDA-64.4. Para el análisis de Cu en bajas concentraciones se empleó la técnica de Horno de Grafito (GF-HR-CS-AAS). Se incluyeron blancos del método BCR y digestiones para asegurar la ausencia de contaminación durante todo el protocolo. Cada analito se midió por triplicado, reportando el promedio, con resultados válidos si la Desviación Estándar Relativa (RSD) fue menor al 10%.

Para el análisis de As y Cd se utilizó una solución modificadora de 0,1% de nitrato de paladio ($\text{Pd}(\text{NO}_3)_2$) y 0,05% de nitrato de magnesio ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$), junto con una solución patrón de 50 $\mu\text{g/L}$ de los mismos analitos²⁴, para las diluciones y la elaboración de la curva de calibración. Para el análisis de Pb se empleó fosfato diácido de amonio ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) al 1% como modificador y una solución de 20 $\mu\text{g/L}$ para las diluciones y calibración.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Debido a las características fisiográficas del área de estudio y la ubicación de los puntos de muestreo distribuidos entre colinas y llanuras, las muestras de suelo tienen una tendencia a mayor porcentaje de arena y menor de arcilla (Figura 3a), la distribución de puntos de perfiles y sus profundidades se puede apreciar en la Figura 3b.

A pesar de la distribución de las muestras entre colinas y llanuras, el análisis ANOVA de propiedades del suelo como ser pH, CE, acidez, MO y fósforo (P) mostró una variabilidad no significativa ($p > 0,05$) entre perfiles y los intervalos de profundidad de cada perfil, lo que indica uniformidad en dichas propiedades. Dada la homogeneidad, las características de los suelos se agrupan en suelos superficiales, medio y profundos (Tabla 2) y de esta forma podemos integrar los parámetros fisicoquímicos, los EE y los EPT (Tabla 3, 4 y 5) en la misma clasificación.

Tabla No 2. Muestras de suelos agrupadas en tres niveles de profundidad de los perfiles de suelos

Nº	Nivel de calicata	Cantidad de muestras	Muestras
1	Superficial	n=8	CC1-1, CC2-1, CC3-1, CC4-1, CM1-1, CM2-1, CM3-1, CM4-1
2	Medio	n=11	CC2-2, CC2-3, CC3-2, CC3-3, CM1-2, CM1-3, CM2-2, CM2-3, CM3-2, CM3-3, CM4-2
3	Profundo	n=7	CC2-4, CC3-4, CC4-2, CM1-4, CM2-4, CM3-4 y CM4-3

Tabla No 3. Parámetros fisicoquímicos de las muestras de suelos en sus respectivos niveles de profundidad

Nivel	Parámetro	Promedio	Max	Min	Desviación Estándar
Superficial	pH	6,41	6,95	5,70	0,45
	CE [μS/cm]	61,73	110,70	30,00	24,07
	Acidez [mEq/l]	0,35	0,95	0,15	0,26
	MO %	1,30	3,55	0,19	1,35
	P [mg/L]	8,67	14,08	7,26	2,69
	Arcilla %	51,38	10,00	82,00	24,38
Medio	pH	6,66	7,72	5,81	0,47
	CE [μS/cm]	43,09	105,10	17,93	25,42
	Acidez [mEq/l]	0,24	0,62	0,14	0,14
	MO %	0,52	2,15	0,04	0,65
	P [mg/L]	17,41	73,73	7,26	19,67
	Arcilla %	63,27	38,00	83,00	12,00
Profundo	pH	7,37	8,49	6,65	0,74
	CE [μS/cm]	65,55	154,70	19,92	53,75
	Acidez [mEq/l]	0,20	0,34	0,14	0,07
	MO %	0,28	0,59	0,19	0,14
	P [mg/L]	8,09	12,24	7,26	1,94
	Arcilla %	50,71	37,00	65,00	10,53

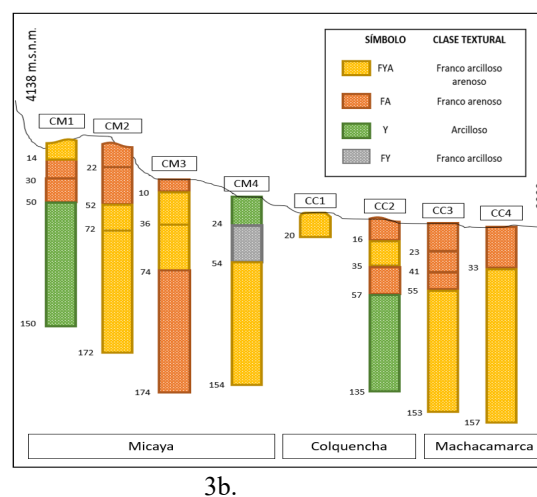
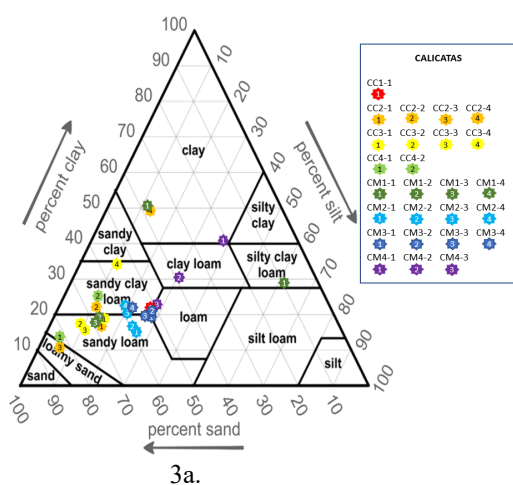


Figura No 3. Diagramas esquemáticos de las características de los suelos, 3a) Muestra la clase textural distribuida en el diagrama Atterberg; 3b) Representa el perfil idealizado de la distribución de los puntos de muestreo y su clasificación textural no a proporciones reales

Los suelos superficiales de Colquencha no mostraron diferencias significativas en las propiedades fisicoquímicas (pH, CE, acidez, MO y P; Tabla 3), con valores promedio que indican suelos ligeramente ácidos (pH 6,4), baja salinidad (CE 61,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$), acidez baja (0,35 mEq/L), moderado fósforo (8,7 mg/L). La variación altitudinal que se observa en el perfil de elevación de las Figuras 1 y, 3b, como la representación de la distribución de la clase textural de puntos en la variación altitudinal y las profundidades de cada calicata en colinas y llanuras. La textura es variable, predominando clases como franco arcilloso arenoso y franco arenoso, y arcilla entre 4% y 62%, lo que sugiere una heterogeneidad edáfica, variación altitudinal y potenciales diferencias en la interacción con elementos traza.

Análisis por Extracción secuencial BCR de EE y EPT

En la Tabla 4, se puede observar la distribución general de los EE en el área de estudio, en los suelos superficiales, La distribución de Mn esta principalmente en las fracciones reducible (Mn-F2) y residual (Mn-FR), con promedios de 490,9 mg/kg (37,6 %) y 466,4 mg/kg (38,8 %), respectivamente. La fracción intercambiable (Mn-F1), que representa la forma más disponible, es menor pero más alta en suelos superficiales (214,0 mg/kg, 17,0 %) que en otras profundidades. Esto indica que, en la superficie, hay mayor presencia de Mn potencialmente disponible, aunque la mayoría sigue siendo no móvil y estable, adsorbida en óxidos. Las concentraciones de Fe en los perfiles muestran cantidades diferentes (Figura 4c); sin embargo, las proporciones en % son similares (Figura 4d). Las cantidades de Fe en suelos superficiales, se encuentra principalmente en las fracciones residual (Fe-FR) y reducible (Fe-F2), con concentraciones superiores a 20 g/kg (Tabla 4). La fracción intercambiable (Fe-F1), que representa la forma más disponible, es muy baja con un promedio aproximado de 51,2 mg/kg, que representa menos del 0,06% del Fe total. Esto indica que el Fe superficial está mayormente en formas no disponibles, estables y asociadas a óxidos. Las concentraciones de Mn-F2 y Fe-F2, y relacionado con las bajas concentraciones en relación a la MO reportado por Muñoz en 2015²⁵, y al ser un ambiente semiárido, podría indicar que no existe una reducción natural de Mn y Fe²⁶, por lo tanto, una baja disponibilidad de Mn-F2 y Fe-F2.

Tabla No 4. Resumen estadístico de las concentraciones y proporciones de la distribución de los EE y su disponibilidad según el método BCR

Fracción		Promedio		Máximo		Mínimo		DE
		[mg/kg]	%	[mg/kg]	%	[mg/kg]	%	
(Mn-F1)	F. Intercambiable	214,0	17,0	456,9	30,6	34,95	3,17	156,42
(Mn-F2)	F. Reducible	490,9	37,6	1135,5	70,8	123,60	11,37	341,62
(Mn-F3)	F. Oxidable	80,4	6,6	159,3	10,1	41,02	3,61	37,37
(Mn-FR)	F. Residual	466,4	38,8	928,5	81,6	109,10	11,32	306,65
(Fe-F1)	F. Intercambiable	51,2	0,06	73,3	0,09	42,03	0,05	9,63
(Fe-F2)	F. Reducible	22493,3	27,6	31763,6	39,0	18046,2	22,18	4113,85
(Fe-F3)	F. Oxidable	11212,4	13,8	15821,3	19,4	9039,20	11,11	2067,08
(Fe-FR)	F. Residual	54299,9	66,7	76903,8	94,5	43794,9	53,82	10085,2
(Cu-F1)	F. Intercambiable	1,5	12,0	3,7	26,4	0,79	7,09	1,05
(Cu-F2)	F. Reducible	4,2	32,0	8,3	51,8	1,96	16,66	2,15
(Cu-F3)	F. Oxidable	1,8	14,2	3,2	22,7	1,16	9,50	0,65
(Cu-FR)	F. Residual	5,2	41,8	7,3	62,0	2,97	21,31	1,51
(Zn-F1)	F. Intercambiable	4,4	2,5	7,8	4,5	2,33	1,11	1,97
(Zn-F2)	F. Reducible	7,0	4,0	11,3	5,9	4,40	2,53	2,08
(Zn-F3)	F. Oxidable	2,9	1,6	4,7	2,7	1,01	0,74	1,25
(Zn-FR)	F. Residual	165,4	91,9	201,3	95,4	134,25	89,23	23,43

En el área de estudio, las concentraciones totales de Cu presentan un rango de 7,2 a 31,9 mg/kg, de la distribución por fracciones, se evidencia que el Cu intercambiable (Cu-F1) alcanza un promedio de 1,5 mg/kg en el nivel superficial, con su máxima concentración en la calicata CM4. Las fracciones reducible (Cu-F1) y oxidable (Cu-F3) mantienen concentraciones del mismo orden (1,5 y 1,8 mg/kg respectivamente); las proporciones de Cu-F3 son similares en todas las muestras; además, que presentan una menor DE (Tabla 4 y Figura 4f), esto podría presentar una estabilidad o poca disponibilidad de Cu-F3. La fracción residual (Cu-FR) es dominante, representando $\geq 50\%$ del total, con un promedio de 5,6 mg/kg en superficie y valores máximos de 20,8 mg/kg en muestras arcillosas como CC2-4. La movilidad del Cu-F1 está limitada por su adsorción en arcillas e intercambio con calcio, esto debido a que ambos son cationes divalentes²⁷. La distribución de Zn presenta concentraciones totales entre 36,6 y 263,9 mg/kg; su fracción intercambiable (Zn-F1) aumenta con la profundidad (Tabla 4) (4,4 mg/kg en superficie), la reducible (Zn-F2) muestra valores similares en niveles superficial y medio (11,2 mg/kg en CC4-1), y la oxidable (Zn-F3) presenta bajas concentraciones (2,9 mg/kg en superficie).

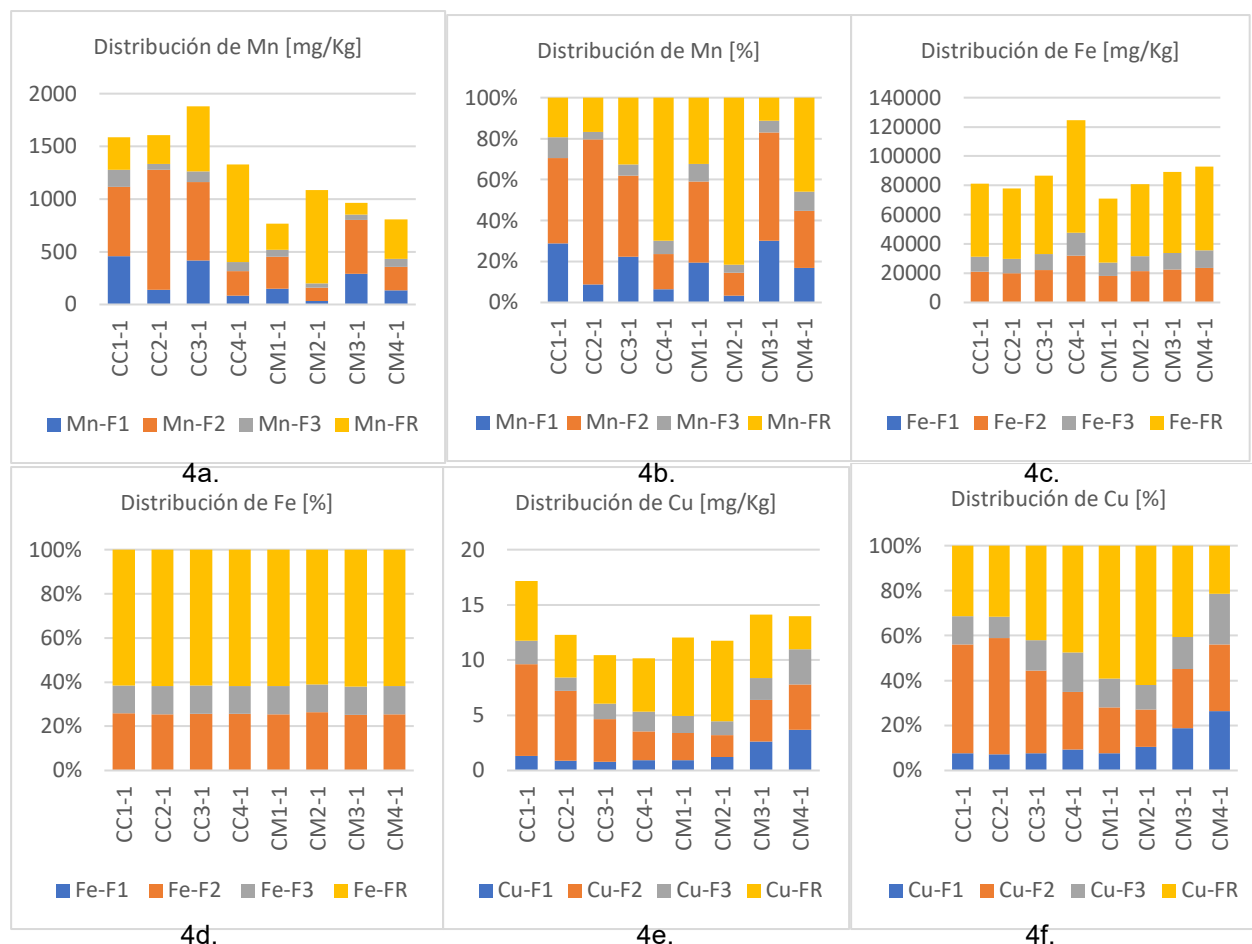


Figura No 4. Distribución de las fracciones BCR de los EE de los perfiles. 4a y 4b) muestran la distribución en concentraciones y las proporciones en porcentaje de Mn. 4c y 4d) muestran de Fe. 4e y 4f) de Cu, y 4g y 4h) de Zn

EXPERIMENTAL

La fracción residual (Zn-FR) es claramente dominante ($>71\%$), alcanzando 165,4 mg/kg en el nivel superficial. Se observa que mientras el Zn-FR predomina especialmente en superficie y en la mayoría de las muestras (Figura 4g y 4h), las fracciones Zn-F1 y Zn-F2 incrementan su movilidad con la profundidad. Los principales factores que influyen en esta distribución son la textura arcillosa, la presencia de óxidos/hidróxidos de Fe/Mn/Al y la MO²⁸. La importancia de que los EE sean considerados micronutrientes radica en su disponibilidad para el desarrollo y crecimiento de las plantas de cultivo, así como en los problemas de deficiencia o contaminación asociados a su concentración en los suelos agrícolas⁴.

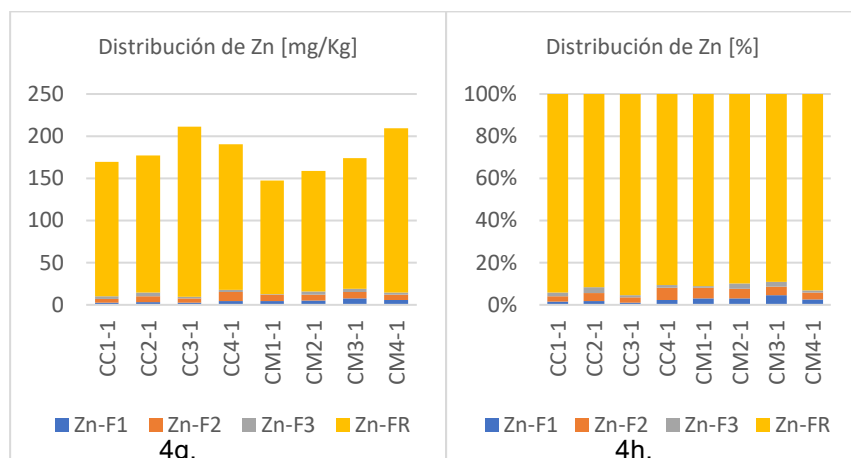


Figura No 5 (Cont.). Distribución de las fracciones BCR de los EE de los perfiles. 4a y 4b) muestran la distribución en concentraciones y las proporciones en porcentaje de Mn. 4c y 4d) muestran de Fe. 4e y 4f) de Cu, y 4g y 4h) de Zn

Desde este punto de vista, se puede clasificar que el Zn, en su mayor proporción, no se encuentra disponible, ya que presenta una elevada presencia en la FR en comparación con las demás fracciones obtenidas en la extracción secuencial (Figura 4h). De manera similar, aunque en menor medida, se observan altas concentraciones de Fe en la fracción residual y bajas concentraciones en la fracción intercambiable (Figura 4d). En el caso del Cu y Mn, las fracciones potencialmente disponibles dependen principalmente de condiciones oxidantes y reductoras, y en menor medida de la fracción intercambiable (Figuras 4b y 4f). En conjunto, estos resultados sugieren que, para estos suelos agrícolas, podría existir una probable deficiencia de EE⁴.

Las concentraciones de EPT en las muestras de suelos se puede apreciar en la Tabla 5, el As presenta concentraciones totales entre 1,7 y 17,5 mg/kg, predominando la fracción residual (As-FR) con un promedio de 5,5 mg/kg, mientras que las fracciones intercambiable (As-F1) y reducible (As-F2) muestran valores bajos (As-F2 en CC2-1: 0,32 mg/kg). El Cd registra concentraciones totales bajas (0,2–0,5 mg/kg), con predominio de la fracción residual (Cd-FR). Los promedios y DE similares sugieren la existencia de un equilibrio entre Cd-F1 y Cd-F2. Las concentraciones de Pb oscilan entre 12,9 y 44,0 mg/kg, siendo casi inmóvil (95% Pb-FR), aunque con concentraciones moderadas de Pb-F2 (oxidables) en superficie (CC1-1: 5,88 mg/kg). La movilidad de estos metales está controlada por su adsorción por óxidos de Fe/Al/Mn, MO y probable formación de complejos de esfera interno^{29 30}.

Tabla No 5. Resumen estadístico de las concentraciones y proporciones de la distribución de los EPT y su disponibilidad según el método BCR

Fracción	Promedio		Máximo		Mínimo		DE
	[mg/kg]	%	[mg/kg]	%	[mg/kg]	%	
(As-F1) F. Intercambiable	0,15	3,24	0,33	6,65	0,05	0,60	0,09
(As-F2) F. Reducible	0,40	8,29	0,57	16,54	0,26	2,81	0,09
(As-F3) F. Oxidable	0,28	6,76	0,52	19,88	0,12	1,28	0,09
(As-FR) F. Residual	5,53	81,79	8,67	93,02	1,15	59,15	2,88
(Cd-F1) F. Intercambiable	0,04	13,77	0,07	26,71	0,01	2,44	7,22
(Cd -F2) F. Reducible	0,03	11,81	0,07	27,83	0,001	1,23	7,53
(Cd -F3) F. Oxidable	0,02	8,12	0,03	10,24	0,01	4,74	2,31
(Cd -FR) F. Residual	0,22	85,14	0,25	98,42	0,16	63,55	7,02
(Pb-F1) F. Intercambiable	0,39	2,18	1,34	8,31	0,02	0,09	0,50
(Pb -F2) F. Reducible	1,87	9,22	5,88	21,66	0,02	0,09	2,14
(Pb -F3) F. Oxidable	0,39	1,84	0,90	3,01	0,13	0,67	0,26
(Pb -FR) F. Residual	19,03	86,83	39,02	99,12	12,35	73,64	8,80

Distribución espacial de los EE y EPT

La heterogeneidad edáfica y fisiográfica del área de estudio, junto con la distribución compleja EE y EPT, introduce incertidumbre en la capacidad agrícola del suelo y en la toma de decisiones³¹. Los perfiles de suelos se ubican en dos tipos de relieve: colinas (perfiles CM1-CM4) y zonas llanas (perfiles CC1-CC4), lo que permite analizar diferencias en meteorización y movilidad de metales. Las concentraciones de las fracciones residuales de los EE y EPT predominan sobre las fracciones solubles e intercambiables, lo que indica una baja disponibilidad. Algunas áreas (CC1, CC4, CM1 y CM3) corresponden a Aynokas, que pertenece a un sistema rotativo de uso de suelos para evitar la sobre explotación, lo que podría influir en la dinámica de los metales. La ausencia de muestras en pies de monte y serranías limita el análisis en esos relieves. La distribución espacial de los EPT y EE en superficie está más asociada a procesos naturales de meteorización que, a fracciones móviles, destacándose patrones diferenciales entre colinas y llanuras para los EE (Figuras 6 y 7) y para EPT (Figura 8).

Los suelos superficiales presentan concentraciones pseudo-totales de Mn elevadas (promedio: 1224 mg/kg), superando el promedio mundial (488 mg/kg), con mayores contenidos en llanuras (1465-2086 mg/kg) que en colinas (757-1211 mg/kg)⁵. La distribución de Mn se concentra principalmente en las fracciones reducible (Mn-F2: 37,6%) y residual (Mn-FR: 38,8%), vinculadas a minerales oxidados y meteorización acelerada³². La movilidad (Mn-F1: 17%) puede ser atribuido a la formación de $MnCO_3$ en superficie³³. Para el Fe, las concentraciones superficiales (promedio: 89 g/kg) también exceden el valor global (35g/kg), dominando las fracciones reducible (Fe-F2: 27,6%) y residual (Fe-FR: 66,7%), asociadas a minerales primarios y baja solubilidad. Las llanuras muestran los niveles más altos de Fe (CC4: 127,10 mg/kg) (Figura 6a), influenciados por texturas arenosas (4% arcilla) y manejo agrícola por aynokas. La heterogeneidad espacial refleja diferencias en relieve (colinas vs llanuras) y procesos geoquímicos (Figura 6a y 6b) con menor retención de Mn en suelos poco arcillosos.

Los suelos superficiales presentan concentraciones promedio de Cu (12,69 mg/kg) y Zn (203,06 mg/kg), inferiores y superiores, respectivamente, a los promedios mundiales (38,9 mg/kg para Cu; 70 mg/kg para Zn)⁵. El Cu se distribuye principalmente en las fracciones reducible (Cu-F2: 32%) y residual (Cu-FR: 42%), asociadas a minerales primarios³², con mayor acumulación en suelos arcillosos (CM4: 15,3 mg/kg, 38% arcilla). En llanuras, la muestra CC1 (15,8 mg/kg; 27% arcilla) destaca en superficie, mientras que en profundidad, CC2 registra el máximo (31,9 mg/kg) (Figura 7a).

La baja movilidad del Cu se atribuye a su afinidad por azufre (calcófilo) y condiciones neutro-reductoras. Para el Zn, predomina la fracción residual (Zn-FR: 91,9%), vinculada a ciertos silicatos y baja liberación por escasa MO, indicando una deficiencia de Cu y Zn como micronutriente⁴. Las colinas muestran los mayores valores superficiales (CM4: 223,0 mg/kg, 38% arcilla), mientras que en llanuras, CC3 (224,7 mg/kg, 15% arcilla) presenta la concentración más alta (Figura 7b). A pesar de los niveles elevados de Zn, su baja concentración con Zn-F1 sugiere limitada disponibilidad, posible deficiencia como micronutriente^{34 35}, y retención en formas no intercambiables. La heterogeneidad espacial refleja diferencias en textura (arcilla vs arenosos) y uso del suelo.

En los suelos superficiales, la concentración de As tiene un promedio de 6,3 mg/kg, similar al promedio mundial (6,8 mg/kg)⁵, dominando su fracción residual (As-FR: 81,8%) debido a condiciones redox limitadas por baja MO y sobre todo en materiales refractarios. Las mayores concentraciones se observan en colinas (CM1: 9,0 mg/kg, 62% arcilla) y llanuras (CC1: 9,20 mg/kg, 27% arcilla), la distribución de As en suelos superficiales es heterogénea, con mayor acumulación en sectores de colinas y menor concentración en llanuras (Figura 8a), esta última asociada a suelos en descanso. El Cd muestra un promedio de 0,3 mg/kg, ligeramente inferior al global (0,4 mg/kg)⁵ con predominio de la fracción residual (Cd-FR: 85,1%) por su incorporación en estructuras de aluminosilicatos³⁰. La disponibilidad (Cd-F1: 11,8%) sugiere interacción con carbonatos, especialmente en llanuras (CC4: 0,3 mg/kg, 4% arcilla). La distribución heterogénea de Cd, con mayores concentraciones en sectores de colinas y menores en la llanura, con posibles aportes por actividades antropogénicas que podrían intensificar las concentraciones en las zonas de CC3 y CC4 (Figura 8b). Por último, las concentraciones pseudo totales de Pb están por debajo del promedio superficial de Pb es 23,3 mg/kg, con fracción residual (Pb-FR: 85,1%) vinculada a minerales calcófilos y retención en arcillas (CM4: 39,8 mg/kg, 38% arcilla). Las llanuras destacan por acumulación en suelos en descanso (CC1: 26,9 mg/kg). El Pb en suelos superficiales presenta una distribución heterogénea, con valores significativamente más altos en zonas de colinas y más bajos en la llanura (Figura 8c). Este comportamiento muestra una distribución de EPT, con la presencia de un foco de acumulación destacado que podría requerir atención específica, para una mejor gestión de uso de suelos agrícolas. Sin embargo, las concentraciones pseudo totales se presentan por debajo del nivel reportado como estándar de la calidad de ambiental de suelos agrícolas normalizado por el Perú³⁶.

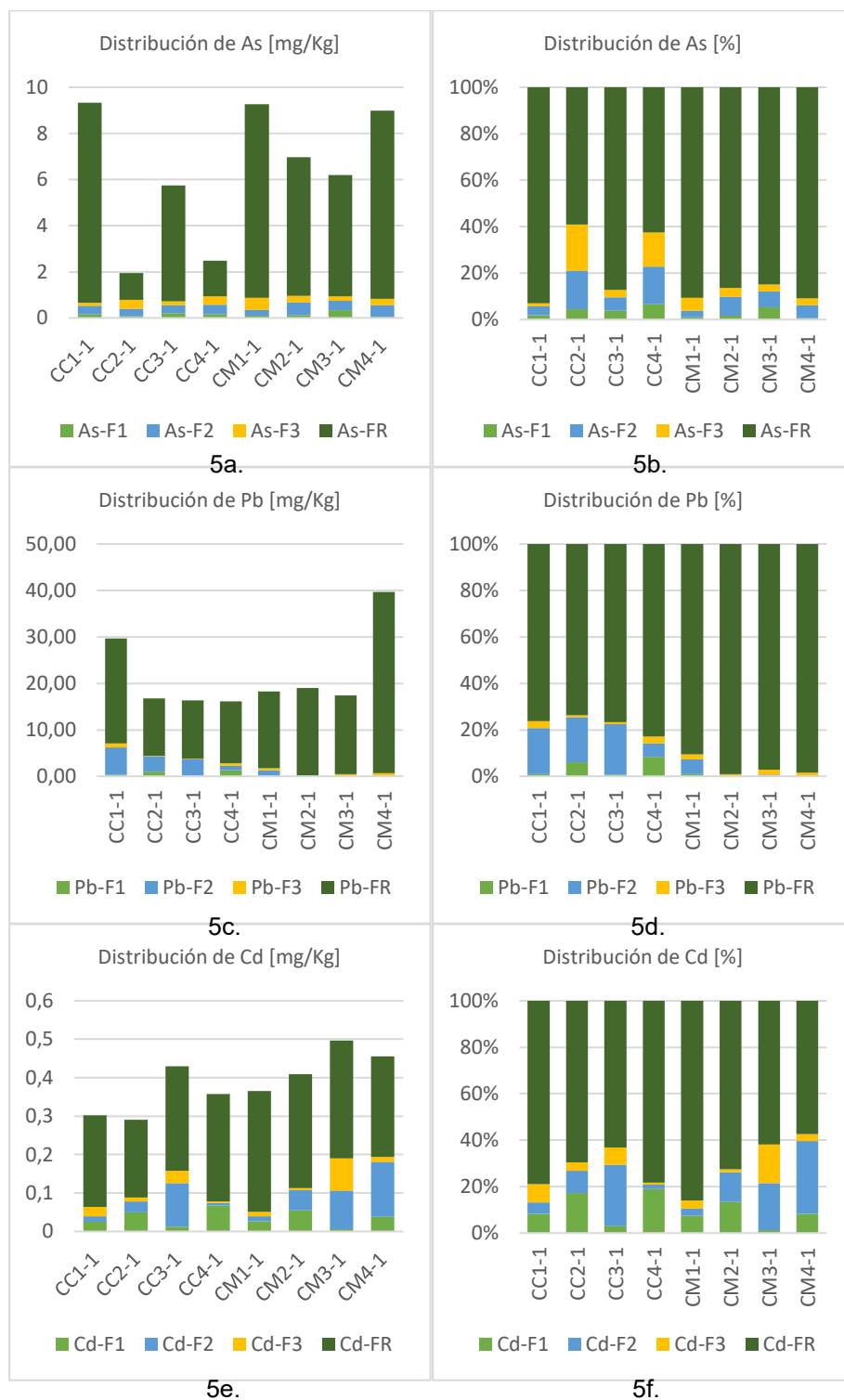


Figura No 6 Distribución de las concentraciones de los EPT de los perfiles. 5a y 5b) indica la distribución en concentraciones y proporción de As. 5c y 5d) de Pb. 5e y 5f) de Cd.

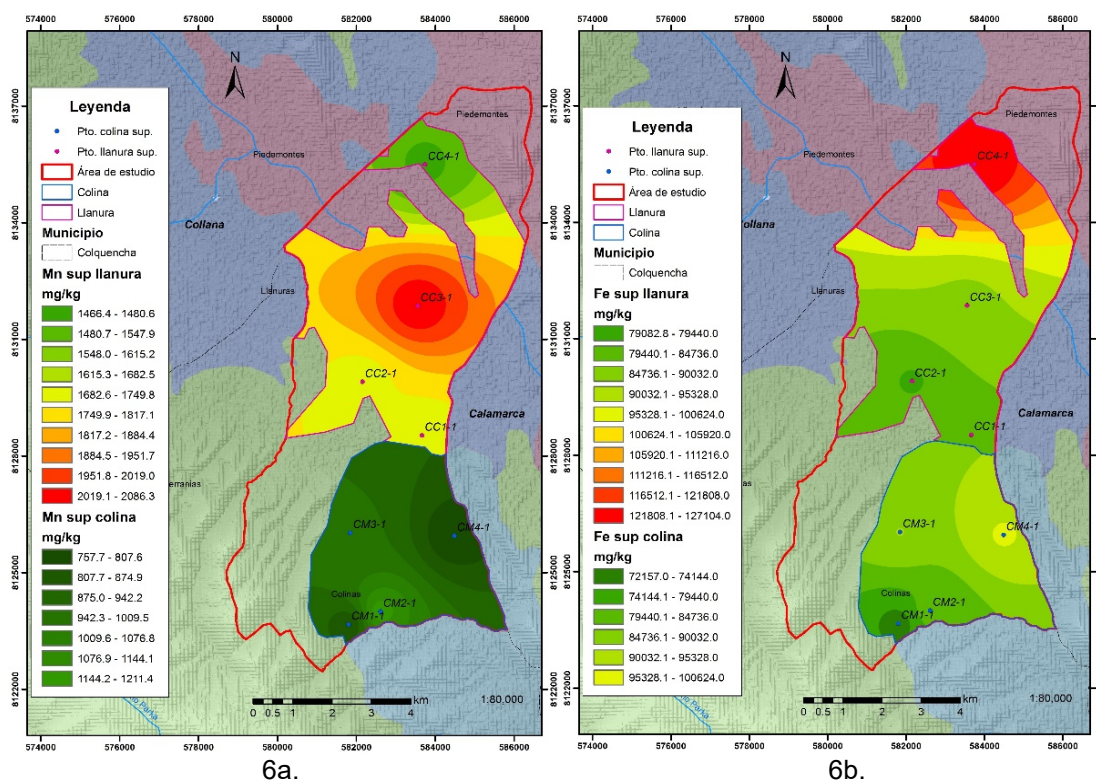


Figura No 7. Mapa de distribución de Mn (6a) y Fe (6b) en los suelos superficiales del área de estudio

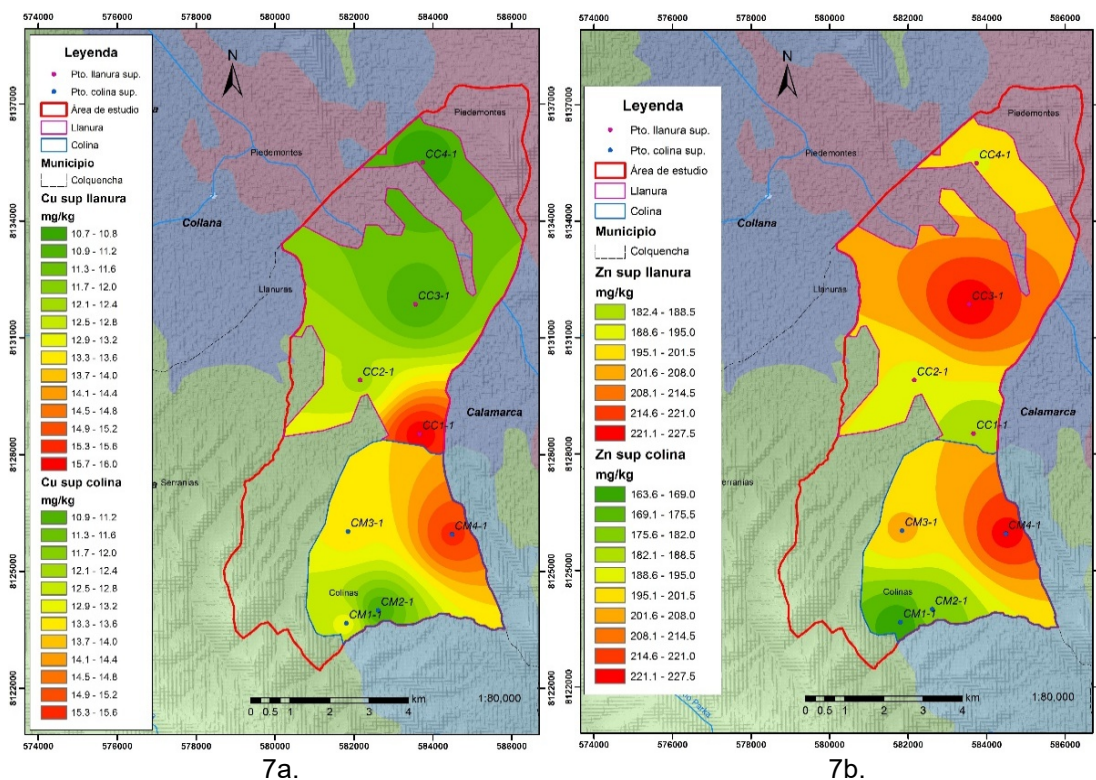
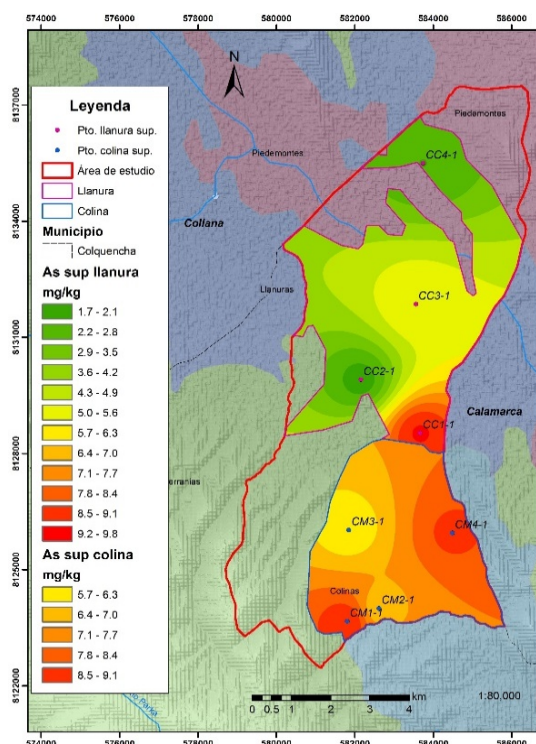
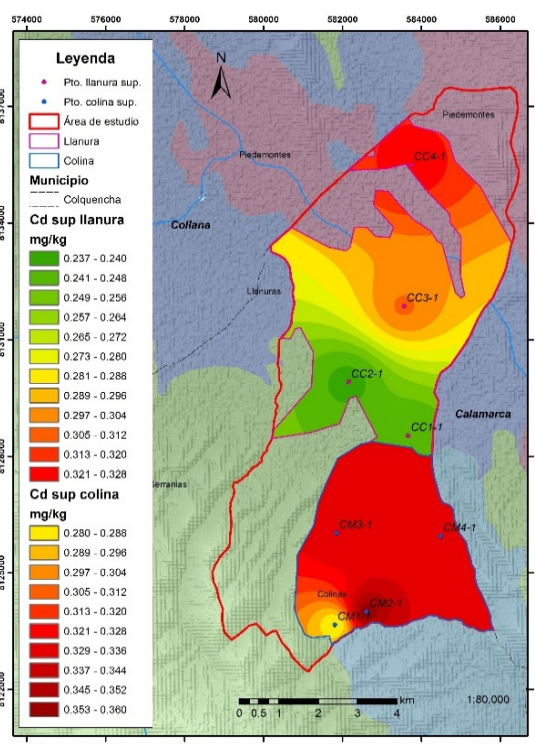


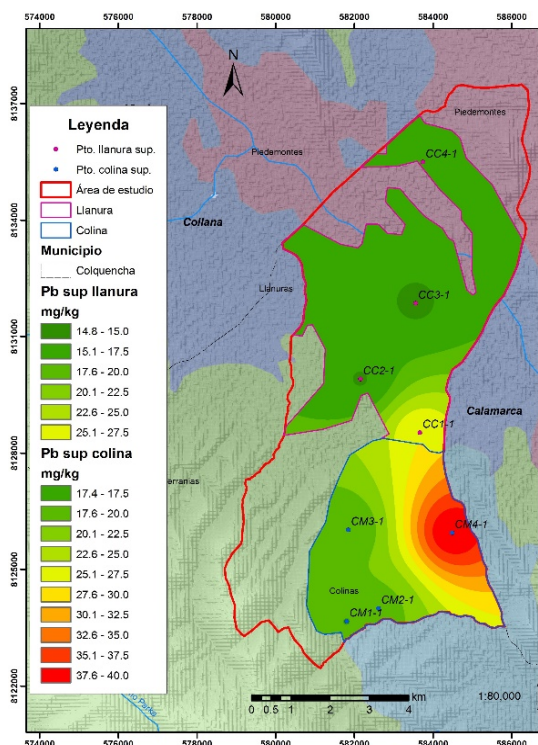
Figura No 8. Mapa de distribución de Cu (7a) y Zn (7b) en los suelos superficiales del área de estudio



8a.



8b.



8c.

Figura No 9. Mapa de distribución, 8a) de As, 8b) Pb y 9c) Cd en los suelos superficiales del área de estudio



CONCLUSIONES

La distribución de EE y EPT en los suelos varía según factores fisiográficos, geomorfológicos y edafológicos, siendo menor en suelos arenosos por su baja capacidad de retención. El sistema de rotación de cultivos (aynokas) influye principalmente en propiedades fisicoquímicas como la materia orgánica y la conductividad eléctrica, sin afectar significativamente a los micronutrientes.

Los EE más abundantes son Fe y Mn; mientras, entre los EPT destacaron el Pb y As, aunque en niveles normales según estándares de calidad ambiental del Perú. Las muestras se distribuyen en colinas y llanuras con gran heterogeneidad edafológica y geomorfológica para los EE y EPT. Por el contrario, no hay variabilidad significativa entre las muestras de colinas y llanuras, de acuerdo al pH, CE, acidez, MO y P, demostrando homogeneidad por estratos en los suelos de esta región. La fertilidad de los suelos agrícolas en estudio, depende más de sus características fisicoquímicas que de la disponibilidad de EE, sobre todo con fracciones disponibles de Cu y Mn. Por otro lado, la mayor cantidad de EPT se encuentran en las fracciones residuales, dentro de un contexto influido por la topografía y la rotación de cultivos. A pesar de la intensa actividad antrópica en la zona de estudio, como la explotación de piedra caliza y arcilla en Micaya.

RECONOCIMIENTOS

Los autores expresan su profundo agradecimiento a Sulema Nieves Valdez Castro y María Isabel Chambi Tapia por su valioso apoyo. Asimismo, se agradece al programa ASDI- Suecia, subprograma Hidrogeología & Biogeoquímica Agua/Suelo (UMSA/ASDI TB-BRC 54100087), por el soporte financiero. Así como el soporte tecnológico brindado por los proyectos con financiamiento internacional OIEA “Developing Integral Management of Water Resources in the South Lipez Province Using Isotope Hydrology, BOL 7005” y “Evaluating the impact of heavy metals and other pollutants on soils contaminated by anthropogenic activities and natural origin, ARCAL RLA 5089” y proyectos con financiamiento nacional “Caracterización del recurso suelo agrícola y agua para consumo humano/riego del municipio de Colquencha” y Diagnostico de la Calidad de Agua potable de la Ciudad de La Paz.

REFERENCIAS

- ¹ D. Hou, D. O'Connor, A. D. Igalavithana, D. S. Alessi, J. Luo, D. C. W. Tsang, D. L. Sparks, Y. Yamauchi, J. Rinklebe, and Y. S. Ok, *Nat. Rev. Earth Environ.*, 2020, **1**, 366.
- ² E. Moreno-Jiménez, C. Plaza, H. Saiz, R. Manzano, M. Flagmeier, and F. T. Maestre, *Nat. Sustain.*, 2019, **2**, 371.
- ³ T. S. Rötting, M. Mercado, M. E. García, and J. Quintanilla, *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 2014, **11**, 935.
- ⁴ D. K. Tripathi, S. Singh, S. Singh, S. Mishra, D. K. Chauhan, and N. K. Dubey, *Acta Physiol. Plant.*, 2015, **37**, 139.
- ⁵ A. Kabata-Pendias, *Trace Elements in Soils and Plants*, CRC Press, Boca Raton, 2000
- ⁶ M. Uchimiya, D. Bannon, H. Nakanishi, M. B. McBride, M. A. Williams, and T. Yoshihara, *J. Agric. Food Chem.*, 2020, **68**, 12856.
- ⁷ D. Langmuir, *Aqueous Environmental Geochemistry*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1997.
- ⁸ G. Sposito, *The Chemistry of Soils*, Oxford University Press, Oxford, 2008.
- ⁹ M. I. Chambi, Validación del método analítico para la determinación de metales en suelos por la técnica de FRX-ED, (BSc tesis), Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), La Paz, Bolivia, 2017.
- ¹⁰ M. R. Cori, Evaluar la presencia natural de metales pesados totales en suelos agrícolas del municipio de Colquencha por FRX, (BSc tesis), Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), La Paz, Bolivia, 2016.
- ¹¹ A. Mendoza, Estandarización de materiales en etapa bizcocho en la producción de cerámicos en el centro integral de formación y desarrollo Micaya, (BSc tesis), Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), La Paz, Bolivia, 2020.
- ¹² O. E. Ramos Ramos, Geoquímica de elementos traza en el Altiplano boliviano: efectos de procesos naturales y actividades antropogénicas, (PhD tesis), KTH Royal Institute of Technology, Estocolmo, Suecia, 2014.
- ¹³ O. E. R. Ramos, M. I. C. Tapia, I. Q. Lima, T. S. Rötting, V. Orsag, L. Chambi, and P. Bhattacharya, *J. Environ. Sci. Health Sustain.*, 2025, **1**, 8.
- ¹⁴ D. Roberts, M. Nachtegaal, and D. L. Sparks, en *Chemical Processes in Soils*, eds. M. A. Tabatabai y D. L. Sparks, *Soil Science Society of America*, Madison, WI, 2005, **8**, 619.
- ¹⁵ E. Huertos G. and A. Romero B., *MACLA, Rev. Soc. Esp. Mineral.*, 2008, **10**, 48.
- ¹⁶ D. G. Groenendyk, T. P. A. Ferré, K. R. Thorp, and A. K. Rice, *PLoS ONE*, 2015, **10**, e0131299.



-
- ¹⁷ Gobierno Autónomo Municipal de Colquencha, Plan Municipal de Emergencias en Nutrición, Colquencha, Bolivia, 2022. Disponible en: <http://serresiliente.org/wp-content/uploads/2022/05/Plan-Nutricional-de-Emergencias-en-Nutricion-Colquencha.pdf>
- ¹⁸ Gobierno Autónomo Municipal de Colquencha, *Plan de Desarrollo Municipal de Colquencha 2000-2004*, Colquencha, Bolivia, 2000. Disponible en: <https://www.studocu.com/bo/document/universidad-mayor-de-san-andres/economia-general/colquencha-2000-2004/23442089>
- ¹⁹ FAO, Standard operating procedure for soil pH determination, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, 2021.
- ²⁰ FAO, Carbono orgánico del suelo por el método de Walkley-Black, GLOSOLAN, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, 2019.
- ²¹ A. N. Beretta, A. V. Silbermann, L. Paladino, D. Torres, D. Bassahun, R. Musselli, and A. García-Lamohte, *Cienc. Investig. Agrar.*, 2014, **41**, 25.
- ²² A. M. Ure, P. H. Quevauviller, H. Muntau, and B. Griepink, *Int. J. Environ. Anal. Chem.*, 1993, **51**, 135.
- ²³ G. Rauret, J. F. López-Sánchez, A. Sahuquillo, R. Rubio, C. Davidson, A. Ure, and P. Quevauviller, *J. Environ. Monit.*, 1999, **1**, 57.
- ²⁴ R. E. Aruquipa Buitre, L. Guzmán Alegría, and O. E. Ramos Ramos, *Rev. Bol. Quím.*, 2024, **41**, 6
- ²⁵ M. A. Muñoz, A. Faz, and A. R. Mermut, en *Climate Change Impacts on High-Altitude Ecosystems*, eds. M. Öztürk, K. R. Hakeem, I. Faridah-Hanum, y R. Efe, Springer International Publishing, Cham, 2015, pp. 135–153.
- ²⁶ M. Li, X. Zhang, Y. Zhang, X. Xu, Y. Liu, Y. Zhang, and Y. Liang, *Sci. Total Environ.*, 2024, **918**, 170351
- ²⁷ L. Ammann, F. Bergaya, and G. Lagaly, *Clay Miner.*, 2005, **40**, 441.
- ²⁸ N. Roca, M. S. Pazos, and J. Bech, *Cienc. Suelo*, 2007, **25**, 31.
- ²⁹ K. M. Campbell and D. K. Nordstrom, *Rev. Mineral. Geochem.*, 2014, **79**, 185.
- ³⁰ A. G. Caporale and A. Violante, *Curr. Pollut. Rep.*, 2016, **2**, 15
- ³¹ S. J. Fonte, S. J. Vanek, P. Oyarzun, S. Parsa, D. C. Quintero, I. M. Rao, and P. Lavelle, *Adv. Agron.*, 2012, **116**, 125.
- ³² W. M. White (ed.), *Encyclopedia of Geochemistry: A Comprehensive Reference Source on the Chemistry of the Earth*, Springer International Publishing, Cham, 2018. (doi: 10.1007/978-3-319-39312-4)
- ³³ A. V. Filgueiras, I. Lavilla, and C. Bendicho, *J. Environ. Monit.*, 2002, **4**, 823.
- ³⁴ H. Baggio and H. Heinrich, *Comun. Geol.*, 2012, **99**, 71
- ³⁵ B. J. Alloway (ed.), *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability*, 3rd edn., Springer Netherlands, Dordrecht, 2012, Vol. 22. (doi: 10.1007/978-94-007-4470-7)
- ³⁶ Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM