DOI: 10.24850/j-tyca-18-01-10

Artículos

Tratamiento de desechos líquidos radiográficos mediante el uso de carbonato de calcio

Treatment of radiographic liquid waste using calcium carbonate

Jimy Cristian Parizaca-Condori[1], ORCID: https://orcid.org/0009-0006-1011-8127

Jhonatan Mario Uribe-Tupac Amaru[2], ORCID: https://orcid.org/0009-0008-7783-2004

Juan Eduardo Vigo-Rivera[3], ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6597-7336

[1]Universidad Peruana Unión, Juliaca, Perú, jimy.parizaca@upeu.edu.pe

[2]Universidad Peruana Unión, Juliaca, Perú, jhonatanuribe@upeu.edu.pe

[3]Universidad Peruana Unión, Juliaca, Perú, eduardo.vigo@upeu.edu.pe

Autor para correspondencia: Juan Eduardo Vigo-Rivera, eduardo.vigo@upeu.edu.pe

Resumen

La gestión inadecuada de residuos líquidos radiográficos odontológicos representa un riesgo de contaminación ambiental. Se evaluó la eficacia

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y Ciencias del Agua
OPEN ACCESS
Check for updates

de la cal tipo I (85.8 % de $Ca(OH)_2$) y la cal tipo II (98.5 % de $CaCO_3$) como alternativas de pretratamiento. Se recolectaron residuos de seis clínicas odontológicas de Juliaca, Perú, y se realizaron pruebas de jarras con dosis de 0.000, 0.500, 0.667, 0.833, 1.000 y 1.167 g/L, referidas al volumen final de la mezcla. La dosis de mejor desempeño se seleccionó según la reducción de turbidez. Posteriormente, se cuantificaron 35 elementos mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) y se compararon sus concentraciones con los valores máximos admisibles (VMA) peruanos y los criterios de la FAO para agua de riego. La dosis de 1.000 g/L produjo reducciones de turbidez de 56.7 y 56.9 % con cal tipo I y II, respectivamente. La cal tipo II presentó las mayores reducciones de concentración de mercurio (92.7 %), plata (90.8 %), titanio (79.2 %), cobre (71.0 %), bario (65.5 %) y hierro (60.7 %). Las reducciones de plomo, arsénico y boro fueron inferiores al 25 %. El boro residual (5.25–5.68 mg/L) superó el VMA de 4 mg/L, mientras que el pH inicial (11.8) excedió el intervalo permitido. Se concluye que la cal tipo II presenta potencial como pretratamiento, pero requiere medidas complementarias para remover boro antes del vertimiento.

Palabras clave: contaminación del agua, agua residual, tratamiento del agua, tratamiento de desechos, metal, odontología, muestreo de aguas, ingeniería ambiental, desecho, líquidos radiográficos, carbonato de calcio, calcio.

Abstract

Improper management of liquid waste from dental radiographic processing poses a risk of environmental contamination. This study evaluated the effectiveness of type I lime (85.8% $Ca(OH)_2$) and type II

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

lime (98.5% $CaCO_3$) as alternative pretreatment agents. Liquid waste was collected from six dental clinics in Juliaca, Peru, and jar tests were conducted using doses of 0.000, 0.500, 0.667, 0.833, 1.000, and 1.167 g/L, calculated based on the final mixture volume. The best-performing dose was selected based on turbidity reduction. Subsequently, 35 elements were quantified using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), and their concentrations were compared with Peruvian maximum admissible values (MAVs) and FAO irrigation water quality criteria. The 1.000 g/L dose achieved turbidity reductions of 56.7% and 56.9% with type I and type II lime, respectively. Type II lime achieved the highest concentration reductions for mercury (92.7%), silver (90.8%), titanium (79.2%), copper (71.0%), barium (65.5%), and iron (60.7%). Reductions in lead, arsenic, and boron concentrations were below 25%. Residual boron concentrations (5.25–5.68 mg/L) exceeded the MAV of 4 mg/L, while the initial pH (11.8) was above the permissible range. It is concluded that type II lime shows potential as a pretreatment agent; however, additional measures are required to remove boron before discharge.

Keywords: water pollution, wastewater, water treatment, waste treatment, metal, dentistry, water sampling, environmental engineering, wastes, radiographic liquid, calcium carbonate, calcium.

Recibido: 01/08/2025

Aceptado: 25/09/2026

Publicado ahead of print: 20/11/2026

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y Ciencias del Agua
OPEN ACCESS
Check for updates

1. Introducción

La investigación sobre el vertimiento de líquidos reveladores y fijadores sin tratamiento previo en los sistemas de alcantarillado ha evidenciado la presencia de metales pesados entre sus componentes. Esta práctica provoca la contaminación de suelos, ríos, lagos y aguas subterráneas, afectando tanto a los ecosistemas como a las fuentes de agua potable (Akpor et al., 2014). Según Putra et al. (2019), estos residuos pueden generar compuestos peligrosos que requieren un manejo adecuado para evitar riesgos ambientales y sanitarios. Tanto el paquete radiográfico como los líquidos de procesamiento contienen elementos que, debido a sus características, pueden ser clasificados como "peligrosos" para la salud humana y el medio ambiente (Romero & Veloso, 2016).

La generación de desechos peligrosos ha experimentado un incremento sostenido, y su adecuada gestión constituye una responsabilidad ineludible para las instituciones generadoras, tanto públicas como privadas, dado su compromiso ambiental y social (Decreto Supremo N.º 014-2017-MINAM). Según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2018), los desechos médicos dentales se definen como todos aquellos residuos generados por la atención médica, en caso específico de los hospitales odontológicos, los residuos producidos son de naturaleza diversa, presentando variaciones en cuanto a materiales, tamaños, colores y formas, lo que les confiere un carácter heterogéneo. Gurumurthy et al. (2020) mencionan que entre estos se encuentran los desechos líquidos dentales, como los residuos provenientes de radiografías, específicamente los líquidos reveladores y fijadores.

El Ministerio de Salud (Resolución Ministerial N.º 1295-2018/MINSA. Aprueban La NTS N.º 144-MINSA/2018/DIGESA, 2018) indica que los

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

líquidos reveladores y fijadores se consideran dentro de las categorías de sustancias tóxicas, corrosivas y ecotóxicas, debido a la alta contaminación que generan, no solo en el medio ambiente, sino también por el riesgo que representa al contacto directo con la piel. Grigoletto et al. (2011) afirman que la contaminación es constante, además, no se encuentra adecuadamente controlada por las autoridades competentes. Estos efluentes líquidos radiográficos constituyen residuos altamente contaminantes por su contenido tóxico.

Romero & Veloso (2016) indican que, para la obtención de imágenes intraorales, se utilizan paquetes radiográficos que contienen una película en su interior, la cual, al ser expuesta a los rayos X, requiere posteriormente un proceso de revelado. Este proceso implica el uso de líquidos reveladores y fijadores, los cuales están compuestos por sustancias químicas como sulfito de sodio, dietilenglicol, hidroquinona, carbonato de sodio, EDTA y bromuro de potasio. Chiegwu et al. (2016) resaltan en su estudio que los productos químicos empleados en el procesamiento de películas radiográficas, específicamente las soluciones reveladoras y fijadoras, contienen sustancias tóxicas capaces de generar efectos adversos en la salud cuando existe exposición por inhalación o ingestión. En su investigación experimental con ratas Wistar, evidenciaron alteraciones en las enzimas hepáticas alanina aminotransferasa y aspartato aminotransferasa, así como cambios histológicos en los tejidos del hígado, lo que demuestra el potencial dañino de estos compuestos. Asimismo, los autores señalan que la solución reveladora contiene agentes como metol o fenidona combinados con hidroquinona, además de otros componentes como hidróxidos, sulfitos, ácido acético, compuestos con bromo o cloro y glutaraldehído; mientras que la solución fijadora contiene principalmente tiosulfato de sodio o tiosulfato de

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

amonio, sustancias consideradas tóxicas, corrosivas y potencialmente peligrosas. El procedimiento implica una serie de reacciones químicas que permiten el revelado de la película radiográfica. Poltava & Likhouzova (2024) indican que, aunque actualmente el proceso se realiza de forma automatizada, en algunos casos continúa siendo necesario el procedimiento manual, especialmente en radiografías intraorales.

El proceso consta de cuatro fases: revelado, fijación, lavado y secado. Según Manja & Kumar (2021), las soluciones utilizadas en el revelado y fijador contienen diversos componentes, cada uno con funciones específicas para el desarrollo de las imágenes. de Santana et al. (2024) indican que los componentes de la solución fijadora incluyen un agente aclarador, un acidificante, un conservante y un endurecedor. Por su parte, la solución reveladora está compuesta por un agente revelador, un acelerador, un restrictor y un conservante (Manja & Kumar, 2021).

Benaïssa et al. (2020) realizaron una investigación sobre la contaminación por metales pesados en efluentes líquidos, con el objetivo de cuantificar el contenido de mercurio y otros metales en clínicas dentales. Entre los elementos analizados se encuentran Hg, Cu, Zn, Fe, Ni, Mn, Cr, Cd y Pb. El estudio se llevó a cabo en tres ciudades vecinas, donde se analizaron las aguas residuales y se compararon los resultados con los valores estándar aceptables.

La OMS (2018) señala que el carbonato de calcio, formado por la reacción entre hidróxido de calcio y bicarbonato, es un compuesto indispensable en los procesos de tratamiento de agua. Radovenchyk et al. (2022) indican que la aplicación de la cal permite ablandar y purificar el agua, eliminar su turbiedad, neutralizar la acidez, eliminar impurezas, reducir la presencia de virus y bacterias, así como remover la mayoría de

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

los metales pesados disueltos. Benalia et al. (2022) indicaron que la cal es un agente precipitante preferido por su viabilidad y alta eficiencia en la eliminación de metales pesados. Asimismo, Groznov (2023) destaca que la lechada de cal se emplea en estaciones automatizadas para la neutralización de aguas residuales industriales que contienen iones metálicos. De igual forma, Anagnostopoulos & Heuss-Aßbichler (2025) utilizaron lechada de cal en procesos de precipitación química y alcanzaron tasas de eliminación de metales pesados de hasta 99.9 %.

En este contexto, considerando la relevancia ambiental de los residuos odontológicos, el objetivo de la presente investigación fue evaluar la eficiencia de la cal tipo I ($Ca(OH)_2$) y de la cal tipo II ($CaCO_3$), reactivos de fácil acceso en el Perú, en la reducción de la turbidez y la remoción de metales de los residuos líquidos reveladores y fijadores provenientes de clínicas odontológicas, como tratamiento previo a su vertimiento al sistema de alcantarillado, así como comparar las concentraciones residuales con los valores máximos admisibles (VMA) nacionales y con los criterios de la FAO para agua de riego.

2. Metodología

2.1. Área de estudio y condiciones experimentales

La investigación se llevó a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Saneamiento Ambiental de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Universidad Peruana Unión – Campus Juliaca, ubicado en el kilómetro 6 de Chullunquiani, Juliaca, Puno, a una altitud de 3 830 m s. n. m. y con coordenadas UTM WGS 84, zona 19S: Este 373386 m y Norte 8 284 426 m.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

2.1.1. Protocolo de muestreo de residuos odontológicos

En la presente investigación, para la obtención de muestras se distribuyeron seis recipientes a seis clínicas odontológicas ubicadas en la ciudad de Juliaca, Puno, Perú. Los frascos utilizados permiten un adecuado rendimiento de filtración, así como la reducción de materia orgánica mediante procesos indirectos de sedimentación (Schott, 2020).

El volumen total de residuos odontológicos recolectados fue de 21 litros. Los volúmenes de todas las clínicas se mezclaron y homogeneizaron en una sola muestra compuesta, que se usó en todos los ensayos. Estas muestras fueron inicialmente analizadas en el Laboratorio de Saneamiento Ambiental de la Universidad Peruana Unión y, posteriormente, enviadas de forma inmediata a un Laboratorio acreditado por el INACAL (Instituto Nacional de Calidad) para su análisis complementario.

2.1.2. Obtención de la cal tipo I y cal tipo II

La cal tipo I, también conocida como cal apagada, se obtuvo de la empresa La Calera, con 85.8 % de $Ca(OH)_2$. Los datos correspondientes al porcentaje de pureza fueron obtenidos de las respectivas fichas técnicas, las cuales se detallan en la Tabla 1. La cal tipo II fue adquirida en la empresa Grupo Sur Química, con 98.5 % de $CaCO_3$ (Tabla 1).

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

2.1.3. Determinación de la dosis óptima

Los ensayos para determinar la dosis óptima se realizaron mediante la prueba de jarras, utilizando un equipo JLT6 Velp Scientifica, en el Laboratorio de Saneamiento Ambiental de la Universidad Peruana Unión. Para evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes se emplearon dos reactivos: cal tipo I y cal tipo II, de acuerdo con el procedimiento descrito por Bouyer et al. (2005) y Benalia et al. (2022). Para el desarrollo experimental se utilizaron seis vasos de precipitados de 1 000 mL, seis probetas, tres pipetas, cinco matraces Erlenmeyer de 100 mL, seis lunas de reloj, ocho jeringas de 10 mL y dos espátulas. Asimismo, se emplearon un equipo de prueba de jarras de seis posiciones, un GPS, un turbidímetro Hach 2100Q, un multiparámetro, una balanza analítica Sartorius con capacidad de 1 000 g y un cronómetro. Como insumos se utilizaron agua destilada, cal tipo I y cal tipo II.

Para cada ensayo, se rotularon seis vasos de precipitados de 1 000 mL y se colocaron 500 mL de muestra de residuo líquido odontológico en cada uno. Antes del tratamiento, se determinaron los parámetros iniciales de la muestra: pH de 11.8, turbidez de 70 UNT y temperatura de 16.7 °C. La lechada de cal se preparó en matraces Erlenmeyer de 100 mL, dispersando 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 y 0.7 g de cal en 100 mL de agua destilada, respectivamente (Tejada Mayta, 2017). Cada suspensión se añadió completa (100 mL) a un vaso con 500 mL de muestra, y al vaso blanco se le añadieron 100 mL de agua destilada sin cal; por ello, las dosis se expresaron sobre el volumen final de 600 mL: 0.000, 0.500, 0.667, 0.833, 1.000 y 1.167 g/L de lechada de cal. Antes de su adición, cada suspensión fue agitada vigorosamente para favorecer la dispersión homogénea del reactivo.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Luego de adicionar la dosis correspondiente, las muestras fueron sometidas a una agitación rápida de 300 rpm durante 1 min. Posteriormente, la velocidad se redujo a 40 rpm durante 20 min para favorecer la floculación. Finalizada esta etapa, las muestras permanecieron en reposo durante 20 min para permitir la sedimentación de los sólidos formados. Finalmente, se extrajo una alícuota de 40 mL del sobrenadante de cada tratamiento para determinar la turbidez final mediante el turbidímetro Hach 2100Q. Los resultados obtenidos fueron registrados sistemáticamente y utilizados para seleccionar la dosis con mejor desempeño en la reducción de turbidez y remoción de contaminantes.

Los datos obtenidos en cada etapa del proceso fueron registrados de manera sistemática. El diseño experimental se estructuró como un arreglo factorial 2A × 6B, con tres repeticiones. Este diseño se empleó para evaluar la turbidez final y seleccionar la dosis óptima del tratamiento. Con base en los resultados de la prueba de jarras, la dosis óptima fue de 1.0 g/L. Por ello, el análisis de metales no se realizó en las 36 unidades experimentales, sino únicamente en las muestras tratadas con dicha dosis óptima. Se seleccionaron las tres repeticiones correspondientes a cal tipo I a 1.0 g/L, las tres repeticiones correspondientes a cal tipo II a 1.0 g/L y una muestra control sin tratamiento. Estas siete muestras fueron enviadas a un laboratorios acreditado por el INACAL para la determinación de metales totales mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS).

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y Ciencias del Agua
OPEN ACCESS
Check for updates

2.2. Esquema experimental

La Figura 1 presenta el esquema experimental seguido. La turbidez se midió al inicio y al final de los ensayos en el Laboratorio de Saneamiento Ambiental de la universidad, y las muestras seleccionadas se enviaron posteriormente al laboratorio externo para la determinación de metales.

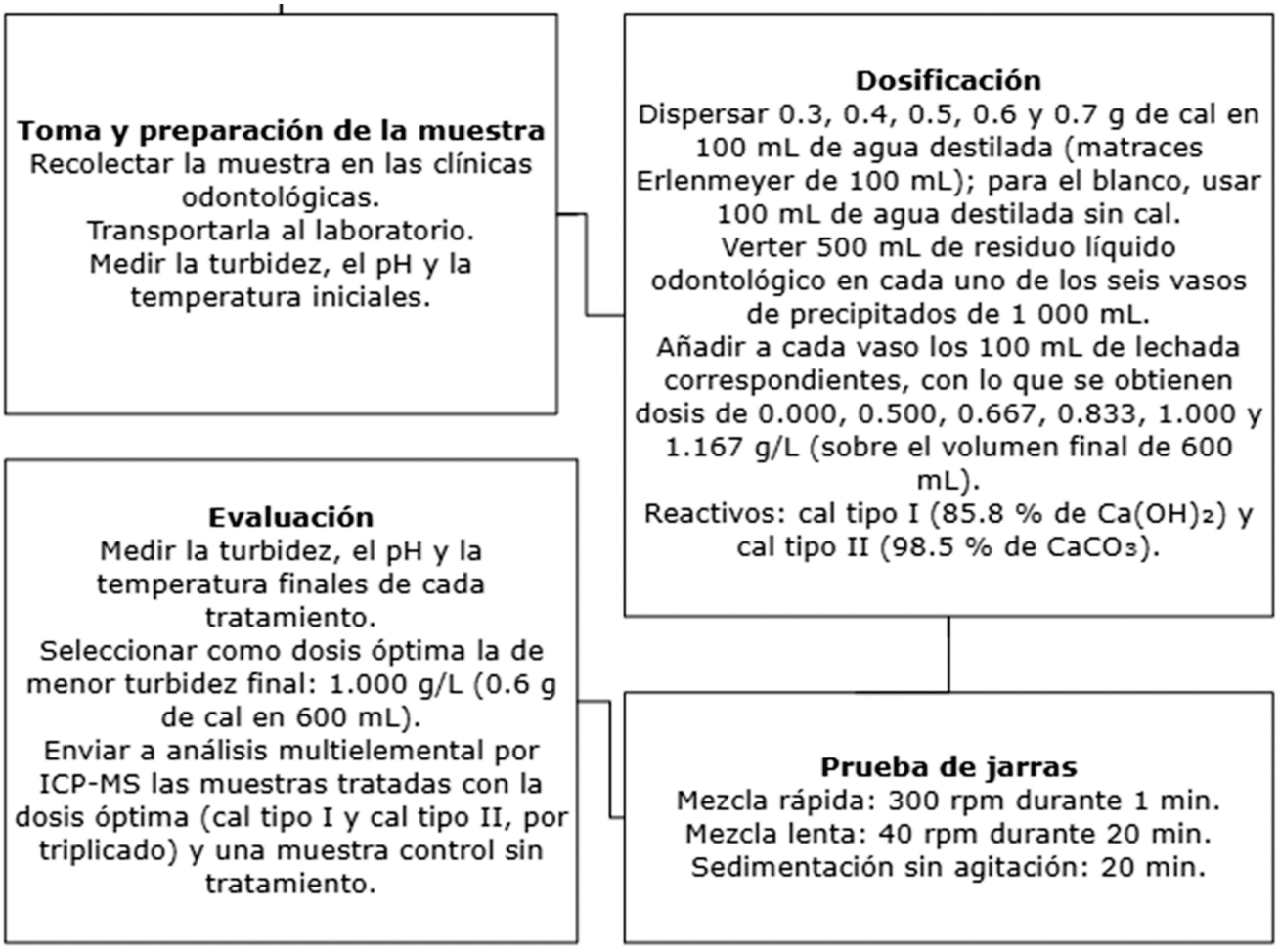


Figura 1. Procedimiento experimental para el tratamiento de residuos líquidos odontológicos con cal tipo I y cal tipo II mediante prueba de jarras

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

2.2.1. Diseño estadístico experimental

La matriz de diseño o arreglo factorial corresponde al conjunto de tratamientos experimentales obtenidos a partir de la combinación de los niveles de cada factor evaluado (Montgomery, 2019). En esta investigación, además de los tratamientos experimentales, se consideró una muestra control inicial, sin adición de reactivo, con el propósito de comparar las condiciones del residuo líquido antes y después del tratamiento. El diseño experimental correspondió a un arreglo factorial 2 × 6, con tres repeticiones, obteniéndose un total de 36 unidades experimentales. El factor A estuvo constituido por el tipo de reactivo químico empleado: a1 = cal tipo I (85.8 % de $Ca(OH)_2$) y a2 = cal tipo II (98.5 % de $CaCO_3$). El factor B correspondió a las dosis aplicadas de lechada de cal: b1 = 0 g/L, b2 = 0.500 g/L, b3 = 0.667 g/L, b4 = 0.833 g/L, b5 = 1.000 g/L y b6 = 1.167 g/L. Los ensayos se realizaron bajo las siguientes condiciones de operación en la prueba de jarras: agitación rápida a 300 rpm durante 1 min, seguida de agitación lenta a 40 rpm durante 20 min y una etapa final de sedimentación, sin agitación, durante 20 min. Este diseño se empleó para evaluar la variación de la turbidez y determinar la dosis óptima del tratamiento.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y Ciencias del Agua
OPEN ACCESS
Check for updates

3. Resultados

3.1. Caracterización de cal y de los residuos líquidos odontológicos

3.1.1. Caracterización de las cales tipos I y II

De acuerdo con las especificaciones comerciales, la cal tipo I presenta 85.8 % de $Ca(OH)_2$, mientras que la cal tipo II contiene 98.5 % de $CaCO_3$. En la Tabla 1 se resume la composición declarada para ambos productos.

Tabla 1. Composición declarada por los proveedores para los materiales tipos I y II.

Cal	$Ca(OH)_2$	$CaCO_3$	Fe_2O_3	SiO_2	MgO	Mg	Humedad	CaO	Al	Hg	Pb	Cd	As	Cr
Tipo I*	85.8%	-	0.13%	1.86.0%	0.95%	-	2.0%	65.0%	-	-	-	-	-	-
Tipo II**	-	98.5%	<232 ppm	<0.5 ppm	-	<1252 ppm	<0.50	-	<0.20 ppm	<0.5 ppm	<32 ppm	<9.1 ppm	<0.1 ppm	<17.7 ppm

Fuente: Elaboración propia a partir de las fichas técnicas de *La Calera (2022) y **Sur Química (2024)

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

3.1.2. Caracterización de la muestra de residuos líquidos odontológicos

La Tabla 2 presenta las concentraciones iniciales de 35 elementos determinados en la muestra de residuo líquido odontológico sin tratamiento mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS). Estos resultados constituyen la línea base para evaluar posteriormente el comportamiento de los tratamientos con cal tipo I y cal tipo II.

Tabla 2. Concentración inicial de elementos determinados en el residuo líquido odontológico sin tratamiento

Elemento	Valor mg/L
Aluminio	2.11
Antimonio	0.0028
Arsénico	0.00271
Bario	0.0987
Berilio	0.00007
Bismuto	0.0033
Boro	6.435
Cadmio	0.00035
Calcio	15.84
Cerio	0.00501
Cesio	0.00356
Cobalto	0.00020
Cobre	0.023

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Elemento	Valor mg/L
Cromo	0.00391
Estaño	0.0008
Estroncio	0.2240
Fósforo	0.19
Hierro	0.200
Litio	0.05371
Magnesio	3.21
Manganeso	0.0463
Mercurio	0.0100
Molibdeno	0.0019
Níquel	0.0129
Plata	0.03480
Plomo	0.0200
Potasio	358.39
Selenio	0.0005
Silicio	6.69
Sodio	4968
Talio	0.00008
Titanio	0.0040
Uranio	0.00041
Vanadio	0.0010
Zinc	0.086

Nota. Adaptado de *Informe de ensayos N.º 4962-2024* (p. 2), por Bhios Laboratorios, 2024.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

3.2. Pruebas de jarras

La Figura 2 muestra la variación de la turbidez (UNT) del agua residual tratada al aplicar distintas dosis de cal tipo I y cal tipo II (0.500 a 1.167 g/L).

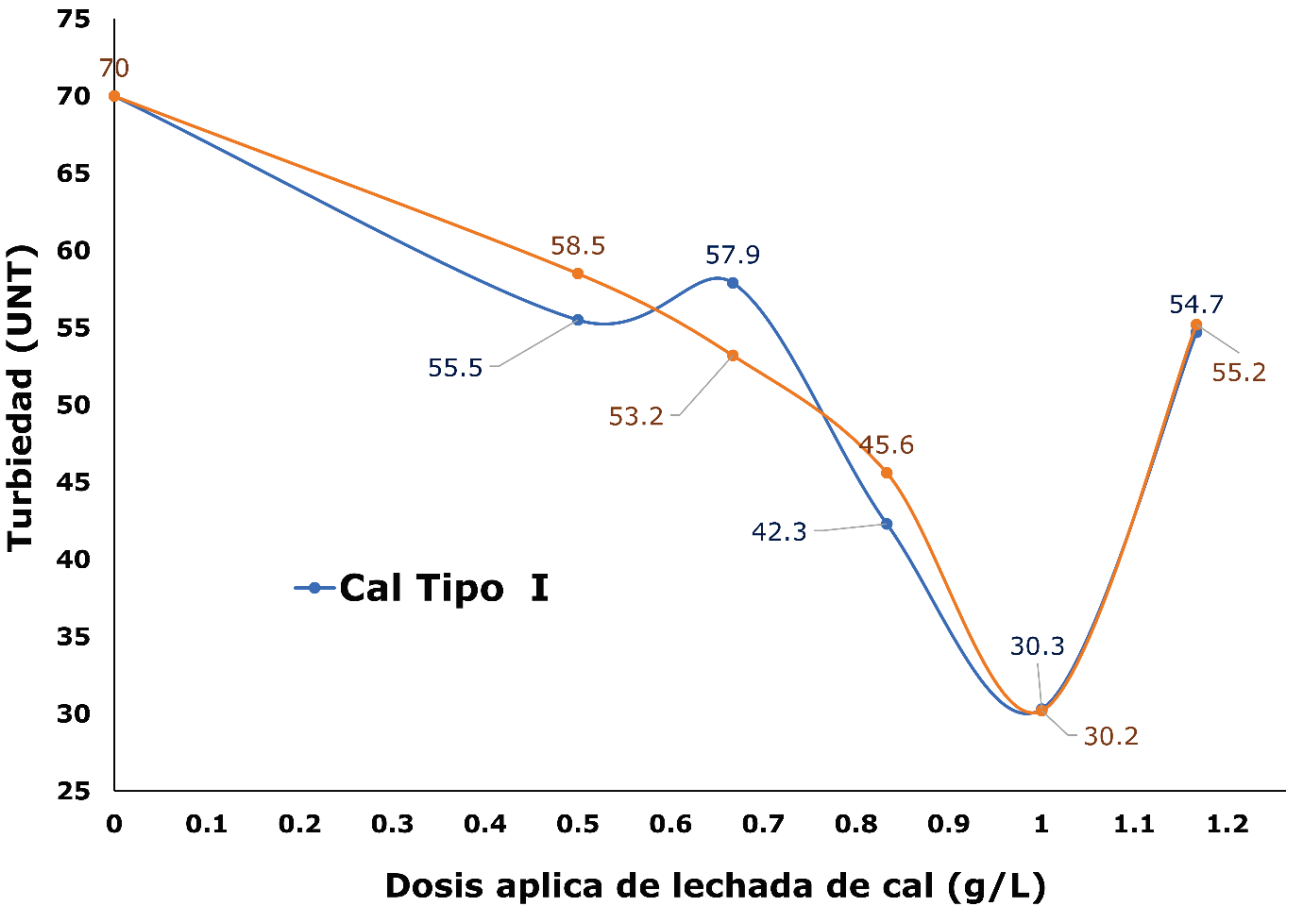


Figura 2. Efecto de la dosis de cal tipo I y tipo II sobre la turbidez del agua residual odontológica durante la prueba de jarras.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

3.3. Remoción de metales pesados

La Tabla 3 presenta las concentraciones de elementos obtenidas en las muestras tratadas con la dosis óptima de 1.0 g/L. El análisis se realizó por triplicado para cada reactivo: cal tipo I y cal tipo II. Las diferencias observadas entre los tratamientos podrían responder al comportamiento químico de cada metal frente a los reactivos empleados durante el proceso de remoción.

Tabla 3. Concentraciones de elementos (mg/L) después del tratamiento con la dosis óptima de 1.0 g/L.

Metales pesados	Cal tipo I R1	Cal tipo I R2	Cal tipo I R3	Cal tipo II R1	Cal tipo II R2	Cal tipo II R3
Aluminio	1.37	1.29	1.46	1.27	1.22	1.16
Arsénico	0.00243	0.00246	0.00256	0.00211	0.00237	0.00211
Antimonio	0.0022	0.0023	0.0023	0.0020	0.0021	0.0022
Bario	0.0847	0.0912	0.0819	0.0302	0.0366	0.0354
Berilio	<0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002	<0.00002
Bismuto	0.0024	0.0023	0.0022	0.0021	0.0021	0.0021
Boro	5.610	5.637	5.777	5.165	5.301	5.287
Cadmio	0.00033	0.00028	0.00031	0.00020	0.00025	0.00020
Calcio	51.77	37.59	43.70	21.47	17.28	17.66
Cerio	0.00303	0.00354	0.00402	0.00315	0.00245	0.00245
Cesio	0.00274	0.00276	0.00290	0.00264	0.00267	0.00263
Cobalto	0.00014	0.00014	0.00015	0.00009	0.00012	0.00008
Cobre	0.010	0.018	0.010	0.006	0.008	0.006

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Metales pesados	Cal tipo I R1	Cal tipo I R2	Cal tipo I R3	Cal tipo II R1	Cal tipo II R2	Cal tipo II R3
Cromo	0.00212	0.00265	0.00265	0.00182	0.00173	0.00181
Estaño	0.0006	0.0007	0.0007	0.0005	0.0005	0.0004
Estroncio	0.1913	0.1873	0.2001	0.1785	0.1801	0.1741
Fósforo	0.12	0.12	0.13	0.11	0.10	0.09
Hierro	0.179	0.143	0.180	0.086	0.078	0.072
Litio	0.04758	0.05038	0.05040	0.04489	0.04598	0.04660
Magnesio	2.89	3.02	2.97	2.66	2.71	2.80
Manganeso	0.0360	0.0360	0.0400	0.0212	0.0213	0.0190
Mercurio	0.0012	0.0018	0.00150	0.0008	0.0007	0.0007
Molibdeno	0.0015	0.0014	0.0015	0.0012	0.0012	0.0013
Níquel	0.0094	0.0094	0.0098	0.0085	0.0089	0.0089
Plata	0.00546	0.00664	0.00385	0.00324	0.00312	0.00325
Plomo	0.0161	0.0159	0.0160	0.0156	0.0157	0.0157
Potasio	281.72	282.76	285.11	280.13	278.56	279.45
Selenio	0.0005	0.0004	0.0003	0.0002	0.0002	0.0003
Silicio	5.14	5.16	5.25	4.55	4.36	4.61
Sodio	4041	3956	4132	3859	3924	3992
Talio	0.00006	0.00005	0.00007	0.00003	0.00004	0.00004
Titanio	0.0037	0.0029	0.0033	0.0013	0.0005	0.0007
Uranio	0.00038	0.00040	0.00038	0.00032	0.00032	0.00032
Vanadio	0.0008	0.0006	0.0008	0.0005	0.0004	0.0005
Zinc	0.070	0.091	0.072	0.061	0.066	0.057

Nota: R1: Repetición 1; R2: Repetición 2; R3: Repetición 3; "<" indica menor al límite de cuantificación del método. Elaboración propia a partir de los resultados de los informes de ensayos n.º 4963-2024, 4964-2024, 4965-2024, 4966-2024, 4967-2024 y 4968-2024 (BHIOS Laboratorios, 2024a, 2024b, 2024c, 2024d, 2024e, 2024f).

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y Ciencias del Agua
OPEN ACCESS
Check for updates

3.4. Cumplimiento normativo

La Tabla 4 muestra los valores iniciales del agua residual proveniente de las clínicas odontológicas y los valores promedio obtenidos tras aplicar la dosis óptima de 1.0 g/L de cal tipo I y tipo II, comparados con los valores máximos admisibles (VMA) para descargas al sistema de alcantarillado (Ministerio de Vivienda, 2019) y con los límites de la FAO para agua de riego (Ayers & Westcot, 1985).

Tabla 4. Comparación de las concentraciones iniciales y después del tratamiento con el marco normativo

Parámetro	Valor inicial (mg/L)	Cal Tipo I (mg/L)	Cal Tipo II (mg/L)	Norma	mg/L	Inicial ¿Cumple?	Tipo I ¿Cumple?	Tipo II ¿Cumple?
Aluminio	2.11	1.37	1.22	VMA	10	SÍ	SÍ	SÍ
				Límite FAO	5	SÍ	SÍ	SÍ
Antimonio	0.0028	0.0023	0.0021	No establecido		No aplica	No aplica	No aplica
Arsénico	0.00271	0.00248	0.00220	VMA	0.5	SÍ	SÍ	SÍ
				Límite FAO	0.1	SÍ	SÍ	SÍ
Bario	0.0987	0.0859	0.0341	No establecido		No aplica	No aplica	No aplica
Berilio	0.00007	<0.00002	<0.00002	VMA	No establecido	No aplica	No aplica	No aplica
				Límite FAO	0.1	SÍ	SÍ	SÍ
Bismuto	0.0033	0.0023	0.0021	No establecido		No aplica	No aplica	No aplica
Boro	6.435	5.675	5.251	VMA	4	NO	NO	NO
				Límite FAO	> 3.0 = restricción severa	NO	NO	NO
Cadmio	0.00035	0.00031	0.00022	VMA	0.2	SÍ	SÍ	SÍ
				Límite FAO	0.01	SÍ	SÍ	SÍ

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y Ciencias del Agua
OPEN ACCESS
Check for updates

Parámetro	Valor inicial (mg/L)	Cal Tipo I (mg/L)	Cal Tipo II (mg/L)	Norma	mg/L	Inicial ¿Cumple?	Tipo I ¿Cumple?	Tipo II ¿Cumple?
Calcio	15.84	44.35	18.80	No establecido		No aplica	No aplica	No aplica
Cerio	0.00501	0.00353	0.00268	No establecido		No aplica	No aplica	No aplica
Cesio	0.00356	0.00280	0.00265	No establecido		No aplica	No aplica	No aplica
Cobalto	0.0002	0.00014	0.00010	No establecido		No aplica	No aplica	No aplica
				Límite FAO	0.05	SÍ	SÍ	SÍ
Cobre	0.023	0.0127	0.0067	VMA	3	SÍ	SÍ	SÍ
				Límite FAO	0.2	SÍ	SÍ	SÍ
Cromo	0.00391	0.00247	0.00179	VMA	10	SÍ	SÍ	SÍ
				Límite FAO	0.1	SÍ	SÍ	SÍ
Estaño	0.0008	0.0007	0.0005	No establecido		No aplica	No aplica	No aplica
Estroncio	0.224	0.193	0.178	No establecido		No aplica	No aplica	No aplica
Fósforo	0.19	0.12	0.10	No establecido		No aplica	No aplica	No aplica
Hierro	0.2	0.17	0.08	No establecido		No aplica	No aplica	No aplica
				Límite FAO	5	SÍ	SÍ	SÍ
Litio	0.05371	0.04945	0.04582	No establecido		No aplica	No aplica	No aplica
				Límite FAO	2.5	SÍ	SÍ	SÍ
Magnesio	3.21	2.96	2.72	No establecido		No aplica	No aplica	No aplica
Manganeso	0.0463	0.0373	0.0205	VMA	4	SÍ	SÍ	SÍ
				Límite FAO	0.2	SÍ	SÍ	SÍ
Mercurio	0.01	0.0015	0.00073	VMA	0.02	SÍ	SÍ	SÍ
Molibdeno	0.0019	0.0015	0.0012	No establecido		No aplica	No aplica	No aplica
				Límite FAO	0.01	SÍ	SÍ	SÍ
Níquel	0.0129	0.0095	0.0088	VMA	4	SÍ	SÍ	SÍ
				Límite FAO	0.2	SÍ	SÍ	SÍ
Plata	0.0348	0.00532	0.00320	No establecido		No aplica	No aplica	No aplica

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y Ciencias del Agua
OPEN ACCESS
Check for updates

Parámetro	Valor inicial (mg/L)	Cal Tipo I (mg/L)	Cal Tipo II (mg/L)	Norma	mg/L	Inicial ¿Cumple?	Tipo I ¿Cumple?	Tipo II ¿Cumple?
Plomo	0.02	0.0160	0.0157	VMA	0.5	SÍ	SÍ	SÍ
				Límite FAO	5	SÍ	SÍ	SÍ
Potasio	358.39	283.20	279.38	No establecido		No aplica	No aplica	No aplica
Selenio	0.0005	0.0004	0.0002	No establecido		No aplica	No aplica	No aplica
				Límite FAO	0.02	SÍ	SÍ	SÍ
Silicio	6.69	5.18	4.51	No establecido		No aplica	No aplica	No aplica
Sodio	4968	4043	3925	No establecido		No aplica	No aplica	No aplica
				Límite FAO	RAS > 9 = restricción severa	NO	NO	NO
Talio	0.00008	0.00006	0.00004	No establecido		No aplica	No aplica	No aplica
Titanio	0.004	0.0033	0.0008	No establecido		No aplica	No aplica	No aplica
Uranio	0.00041	0.00039	0.00032	No establecido		No aplica	No aplica	No aplica
Vanadio	0.001	0.0007	0.0005	No establecido		No aplica	No aplica	No aplica
				Límite FAO	0.1	SÍ	SÍ	SÍ
Zinc	0.086	0.0777	0.0613	VMA	10	SÍ	SÍ	SÍ
				Límite FAO	2	SÍ	SÍ	SÍ

Fuente: VMA según Ministerio de Vivienda (2019); límites FAO según Ayers y Westcot (1985), cuadros 1 y 21.

3.5. Eficiencia de remoción

La Figura 3 muestra el porcentaje de remoción de 34 elementos con cal tipo I (cal hidratada, 85.8 % de $Ca(OH)_2$; barras azules) y cal tipo II (98.5 % de $CaCO_3$; barras rojas), a la dosis óptima de 1.0 g/L. Este análisis busca comparar el comportamiento de ambos reactivos en la eliminación de contaminantes presentes en los residuos líquidos radiográficos odontológicos.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y Ciencias del Agua

OPEN ACCESS

Check for updates

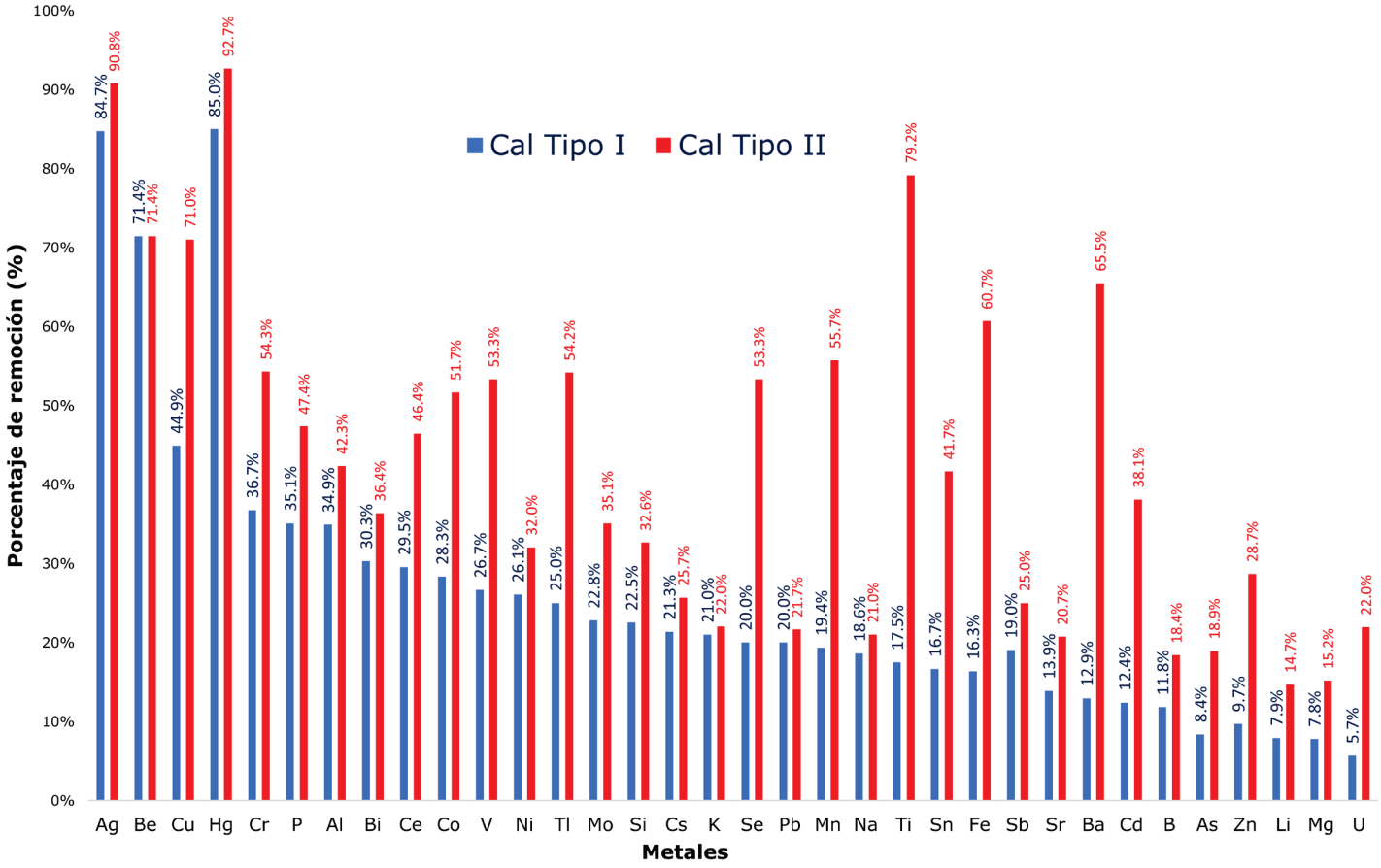


Figura 3. Eficiencia de remoción de los elementos mediante cal tipo I y cal tipo II a la dosis óptima de 1.0 g/L.

La Figura 3 evidencia que la cal tipo II alcanzó una eficiencia igual o superior a la de la cal tipo I en todos los elementos evaluados, con diferencias de hasta 61.7 puntos porcentuales en el titanio; solo en el berilio no fue posible diferenciarlas, porque sus concentraciones finales quedaron por debajo del límite de cuantificación (remoción ≥ 71.4 %).

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tecnología y Ciencias del Agua
OPEN ACCESS
Check for updates

4. Discusión

4.1. Caracterización de los tipos de cal y de los residuos líquidos odontológicos

La caracterización de los agentes de tratamiento (Tabla 1) evidenció diferencias en su composición química: la cal tipo I presentó 85.8 % de hidróxido de calcio, mientras que la cal tipo II contenía 98.5 % de carbonato de calcio. Estas diferencias pueden condicionar los mecanismos de remoción de metales. El $Ca(OH)_2$ favorece la precipitación de hidróxidos metálicos mediante el incremento del pH, mientras que el $CaCO_3$ puede intervenir en procesos de adsorción, precipitación y coprecipitación, dependiendo de las condiciones del medio (Qasem et al., 2021;Niu et al., 2022).

Asimismo, la cal tipo II presentó contenidos reportados de Pb (<32 ppm), Cd (<9.1 ppm), Hg (<0.5 ppm), As (<0.1 ppm) y Cr (<17.7 ppm). Sin embargo, la ausencia de datos equivalentes para la cal tipo I impide comparar sus niveles de impurezas metálicas. Por otra parte, el 65.0 % de CaO declarado para la cal tipo I corresponde al contenido de $Ca(OH)_2$ expresado como óxido de calcio equivalente (85.8 % × 56.08/74.09 = 64.9 %). En consecuencia, la composición comercial permite identificar diferencias químicas entre ambos materiales, pero no establecer su eficacia relativa, la cual debe evaluarse mediante los porcentajes de remoción y las condiciones experimentales de tratamiento (Qasem et al., 2021).

La caracterización inicial mediante ICP-MS permitió identificar 35 elementos en los residuos líquidos odontológicos sin tratamiento (Tabla 2), incluidos contaminantes de interés ambiental como Hg (0.0100 mg/L),

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Ag (0.03480 mg/L), Pb (0.0200 mg/L), As (0.00271 mg/L), Cd (0.00035 mg/L) y Cr (0.00391 mg/L). La presencia de plata es compatible con residuos procedentes del procesamiento radiográfico convencional, debido a su utilización en películas y soluciones fijadoras (Goshima et al., 1994). Asimismo, las concentraciones de sodio (4968 mg/L) y potasio (358.39 mg/L) evidencian una matriz de composición heterogénea que debe considerarse durante el tratamiento químico.

Estos resultados constituyen una referencia para evaluar la eficiencia de remoción de las cales tipos I y II. Sin embargo, la cuantificación elemental total mediante ICP-MS no permite establecer directamente la especiación química ni la biodisponibilidad de los contaminantes (U.S. Environmental Protection Agency [EPA], 1994). La remoción mediante precipitación química depende principalmente del pH, la concentración y las interacciones entre los componentes del efluente (Qasem et al., 2021). Por tanto, la eficacia de ambos tratamientos debe determinarse mediante las concentraciones residuales, los porcentajes de remoción y la evaluación de las condiciones finales del efluente, sin atribuir incumplimientos normativos únicamente a la detección inicial de los elementos.

4.2. Pruebas de jarras

La turbidez inicial (70 UNT) disminuyó con ambos tipos de cal hasta 1.0 g/L, aunque de forma no lineal, pues la cal tipo I presentó un incremento transitorio a 0.667 g/L (57.9 UNT). A 1.0 g/L se obtuvo la menor turbidez (30.3 UNT con la cal tipo I y 30.2 UNT con la tipo II), equivalente a reducciones de 56.7 y 56.9 %, respectivamente. Este comportamiento puede asociarse con la precipitación, agregación y sedimentación

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

favorecidas por los reactivos cálcicos, cuya eficacia depende del control del pH (Soto-Cruz et al., 2024). Mohamad et al. (2021) alcanzaron una remoción mayor (77.6 %) al combinar caparrosa con $Ca(OH)_2$, gracias a la formación de flóculos más pesados de hidróxido férrico, lo que podría explicar la menor remoción obtenida al emplear la cal como único reactivo. Asimismo, aunque Li et al. (2020) evidenciaron que el $CaCO_3$ actúa a un pH cercano a 7.5, frente a alrededor de 11 con $Ca(OH)_2$, ambas cales mostraron un desempeño prácticamente igual a 1.0 g/L (diferencia de 0.1 UNT), lo que sugiere que la dosis influyó más que el tipo de cal en la reducción de la turbidez.

Sin embargo, a 1.167 g/L la turbidez aumentó a 54.7 UNT (cal tipo I) y 55.2 UNT (cal tipo II), posiblemente por el aporte de partículas finas de reactivo sin reaccionar y de precipitados en suspensión. Haghiri et al. (2018) señalan que una dosis excesiva de coagulante puede favorecer la permanencia de sólidos en el agua tratada. Por tanto, 1.0 g/L fue la dosis de mejor desempeño con ambos tipos de cal; no obstante, la turbidez residual cercana a 30 UNT indica una clarificación parcial, por lo que futuras investigaciones podrían evaluar la combinación de la cal con coagulantes primarios.

4.3. Remoción de metales pesados

Según las Tablas 2 y 3, la aplicación de cal tipo I y tipo II redujo las concentraciones de la mayoría de los metales pesados presentes en los residuos líquidos odontológicos. La cal tipo II presentó un mejor desempeño general en la reducción de elementos como hierro, cobre, titanio, cobalto y cadmio. Por ejemplo, el hierro disminuyó de 0.200 mg/L a 0.072–0.086 mg/L con cal tipo II (remoción media de 60.7 %), frente

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

a 0.143–0.180 mg/L con cal tipo I (16.3 %). El cobre, elemento crítico por su toxicidad, se redujo de 0.023 mg/L a 0.006–0.008 mg/L con cal tipo II (71.0 %), frente a 0.010–0.018 mg/L con cal tipo I (44.9 %). Este comportamiento concuerda con Li et al. (2020), quienes demostraron que la coprecipitación con $CaCO_3$ remueve Fe, Cu, Zn, Cd y Ni, aunque con eficiencias mayores (93.8 % a más de 99 %), posiblemente por el uso de procesamiento mecanoquímico. La ventaja de la cal tipo II también podría relacionarse con su mayor pureza (98.5 % de $CaCO_3$; Tabla 1).

Asimismo, con la cal tipo II el titanio y la plata disminuyeron en 79.2 % y 90.8 %, respectivamente, lo que es coherente con Donovan et al. (2016), quienes reportaron una remoción de 97 ± 3 % de nanopartículas de TiO_2 , Ag y Au mediante ablandamiento con cal y coagulación con alumbre/adsorción con carbón activado en el tratamiento de agua potable. En cambio, el plomo se redujo solo entre 20.0 % y 21.7 % con ambos reactivos (de 0.0200 a 0.0156–0.0161 mg/L), mientras que el calcio aumentó, sobre todo con la cal tipo I (de 15.84 a 37.59–51.77 mg/L), por la disolución del propio reactivo, más soluble en el caso del $Ca(OH)_2$. En conjunto, la cal tipo II resulta la alternativa más adecuada para el pretratamiento de los residuos de las clínicas odontológicas antes de su vertimiento al sistema de alcantarillado, aunque se requiere verificar el cumplimiento de la normativa vigente.

4.4. Remoción de metales pesados y cumplimiento normativo

Ambos tratamientos redujeron la concentración de metales, aunque la cal tipo II mostró una mayor reducción promedio; por ejemplo, el hierro descendió de 0.200 mg/L a 0.08 mg/L con cal tipo II y a 0.17 mg/L con

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

cal tipo I, y el mercurio, de 0.0100 mg/L a 0.00073 mg/L con cal tipo II (Tabla 4). Respecto a los VMA para descargas al sistema de alcantarillado (Decreto Supremo N° 010-2019-VIVIENDA, 2019). En cuanto a los criterios de la FAO para agua de riego (Ayers & Westcot, 1985), el boro superó en todos los casos el umbral de restricción severa (> 3.0 mg/L), y la elevada concentración de sodio (3925–4968 mg/L) generó una relación de adsorción de sodio (RAS) estimada de 159 a 298, muy superior al valor de 9 que indica restricción severa. En consecuencia, el efluente tratado no reúne las condiciones para su vertimiento al sistema de alcantarillado ni para su reúso en riego sin un tratamiento complementario que reduzca el boro y, en el caso del riego, también el sodio.

4.5. Eficiencia de remoción

La Figura 3 presenta la eficiencia de remoción de 34 elementos presentes en los residuos líquidos radiográficos odontológicos, luego del tratamiento con la dosis óptima de 1.0 g/L. Se comparó el desempeño de dos reactivos: cal tipo I, correspondiente a cal hidratada, y cal tipo II, compuesta principalmente por carbonato de calcio. Este análisis permitió evaluar la capacidad de ambos materiales para reducir la concentración de metales en la muestra tratada. Los resultados evidencian que la eficiencia de remoción varió según el tipo de metal y el reactivo empleado. En general, ambos tratamientos mostraron capacidad para disminuir la concentración de varios metales; sin embargo, la cal tipo II presentó una eficiencia igual o superior en todos los elementos, con las mayores diferencias en titanio, bario, hierro y manganeso (entre 36 y 62 puntos porcentuales). Este comportamiento podría atribuirse a su mayor pureza

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

y a su composición rica en carbonato de calcio, que favorece procesos de precipitación, adsorción y coprecipitación de especies metálicas (Li et al., 2020).

Según la Figura 3, las mayores eficiencias de remoción con cal tipo II se observaron en mercurio (92.7 %), plata (90.8 %), titanio (79.2 %), cobre (71.0 %) y bario (65.5 %), mientras que con cal tipo I solo superaron el 50 % el mercurio (85.0 %) y la plata (84.7 %). En el berilio, las concentraciones finales quedaron por debajo del límite de cuantificación con ambos reactivos, por lo que su remoción solo puede expresarse como ≥ 71.4 %. El cobre y el cromo superaron el 50 % solo con cal tipo II (71.0 y 54.3 %), frente a 44.9 y 36.7 % con cal tipo I. Estos resultados son relevantes debido a la toxicidad ambiental de dichos metales y a la necesidad de reducir su concentración antes del vertimiento de residuos líquidos al sistema de alcantarillado. No obstante, la remoción fue baja (menor de 25 % con ambos reactivos) en arsénico, plomo, boro, litio, magnesio, estroncio, sodio, potasio y uranio. Esto sugiere que la respuesta de cada metal depende de su forma química, solubilidad, interacción con el pH del medio y afinidad por los precipitados generados durante el tratamiento. Cabe señalar que la adición de 100 mL de lechada a 500 mL de muestra diluye la turbidez y las concentraciones de los analitos en un factor de 500/600, lo que por sí solo produce una reducción aparente de 16.7 %. Ello explicaría la disminución de 19 a 22 % observada en elementos que no precipitan con la cal, como el sodio y el potasio, e indica que la remoción efectiva de plomo, arsénico y boro fue marginal.

En conjunto, los resultados indican que el tratamiento con cal constituye una alternativa con potencial para la reducción de metales pesados en residuos líquidos radiográficos odontológicos. Sin embargo, la

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

eficiencia no fue uniforme para todos los elementos evaluados y fue baja para metales tóxicos como el plomo y el arsénico. Por ello, la selección del reactivo debe considerar no solo la disminución global de contaminantes, sino también el comportamiento específico de los metales de mayor riesgo ambiental. Bajo estas condiciones, la cal tipo II a 1.0 g/L mostró el mejor desempeño general, aunque la cal tipo I también presentó resultados aceptables para determinados metales, como el mercurio y la plata.

5. Conclusiones

Ambos reactivos redujeron la turbidez y las concentraciones de diversos elementos presentes en los residuos líquidos radiográficos odontológicos, siendo 1.000 g/L la dosis de mejor desempeño para la reducción de turbidez (56.7–56.9 %). La cal tipo II (98.5 % de $CaCO_3$) presentó mayores reducciones de concentración que la cal tipo I (85.8 % de $Ca(OH)_2$), especialmente para mercurio (92.7 %), plata (90.8 %), titanio (79.2 %), cobre (71.0 %), bario (65.5 %) y hierro (60.7 %). En contraste, las reducciones de plomo, arsénico y boro fueron inferiores al 25 %. El boro residual (5.251–5.675 mg/L) superó el VMA de 4 mg/L, mientras que el pH inicial (11.8) excedió el intervalo permitido. Asimismo, el boro y la relación de adsorción de sodio superaron los umbrales de restricción severa de la FAO para agua de riego. En consecuencia, el $CaCO_3$ presenta potencial como alternativa de pretratamiento, aunque requiere procesos complementarios de remoción de boro.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

6. Agradecimientos

Se agradece a la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Universidad Peruana Unión, Campus Juliaca, por las facilidades brindadas y el apoyo institucional proporcionado para el desarrollo y la ejecución de la presente investigación.

7. Financiamiento

La investigación no contó con financiamiento económico institucional ni externo. Los costos asociados al desarrollo del estudio fueron asumidos por los autores. No obstante, se recibió apoyo logístico mediante el acceso a equipos, reactivos y materiales proporcionados por el Laboratorio de Saneamiento Ambiental de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Universidad Peruana Unión, Campus Juliaca.

8. Declaración de conflicto de interés

Los autores declaran no presentar ningún conflicto de interés.

9. Declaración de uso de IA

Los autores declaran que se utilizaron ChatGPT Plus (OpenAI) y Claude (Anthropic) como herramientas de apoyo para mejorar la claridad, la redacción científica y la corrección gramatical del manuscrito, así como para verificar la consistencia de los datos reportados. El contenido científico, la interpretación de los resultados y las conclusiones fueron revisados y validados íntegramente por los autores. Juan Eduardo Vigo Rivera fue responsable de supervisar y verificar el uso de estas herramientas durante la preparación del manuscrito.

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

10. Referencias

Akpor, O. B., Ohiobor, G. O., & Olaolu, T. D. (2014). Heavy metal pollutants in wastewater effluents: Sources, effects and remediation. *Advances in Bioscience and Bioengineering*, *2*(4), 37–43. https://doi.org/10.11648/j.abb.20140204.11

Anagnostopoulos, I. F., & Heuss-Aßbichler, S. (2025). Recovery of Different Cu-Phases from Industrial Wastewater. *Minerals*, *15*(1), 23. https://doi.org/10.3390/min15010023

Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). *Water quality for agriculture (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29)*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/3/t0234e/t0234e00.htm

Benaïssa, A., Madjram, M. S., Taouk, B., & Abdelouahed, L. (2020). Heavy metal pollution from dental clinics-Part 1: Annual emissions assessment. *Pollution*, *6*(3), 611–626. https://doi.org/10.22059/POLL.2020.298433.758

Benalia, M., Youcef, L., Bouaziz, M., Achour, S., & Menasra, H. (2022). Removal of Heavy Metals from Industrial Wastewater by Chemical Precipitation: Mechanisms and Sludge Characterization. *Arabian Journal for Science and Engineering*, *47*, 5587–5599. https://doi.org/10.1007/s13369-021-05525-7

BHIOS Laboratorios. (2024). Informe de ensayos n.º 4962-2024 [Informe de laboratorio inédito].

BHIOS Laboratorios. (2024a). Informe de ensayos n.º 4963-2024 [Informe de laboratorio inédito].

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

BHIOS Laboratorios. (2024b). Informe de ensayos n.º 4964-2024 [Informe de laboratorio inédito].

BHIOS Laboratorios. (2024c). Informe de ensayos n.º 4965-2024 [Informe de laboratorio inédito].

BHIOS Laboratorios. (2024d). Informe de ensayos n.º 4966-2024 [Informe de laboratorio inédito].

BHIOS Laboratorios. (2024e). Informe de ensayos n.º 4967-2024 [Informe de laboratorio inédito].

BHIOS Laboratorios. (2024f). Informe de ensayos n.º 4968-2024 [Informe de laboratorio inédito].

Bouyer, D., Escudié, R., & Liné, A. (2005). Experimental analysis of hydrodynamics in a jar-test. *Process Safety and Environmental Protection*, *83*(1), 22–30. https://doi.org/10.1205/PSEP.03109

Chiegwu, H. U., Ugwuanyi, D. C., Ogenyi, S. i., Chuks, H. C., & Mbakwe, K. L. (2016). Hepatic cells and enzymes reactions in wistar rats exposed to x-ray film processing chemicals. *Scholars Journal of Applied Medical Sciences*, *4*(1B), 112–123. https://www.saspublishers.com/article/9302/

de Santana, I. H. G., de Souza, M. M., Viana, M. R. M., Felix, K. D., da Silva Filho, S. L. G., Cirilo, I. B. A., Madeiro, M. D. S., Pinto, M. R. C. L., de Melo Pereira, J. H., Alves, Y. B., Smith, M. I. E., da Silva, F. R. M., Paodjuenas, A. V. M., Santos, D. T. B., da Cunha, D. B., & de Sales, M. A. O. (2024). Characterization by x-ray fluorescence (FRX) of precipitate from dental radiographic processing. *Contribuciones a Las Ciencias Sociales*, *17*(9). https://doi.org/10.55905/revconv.17n.9-366

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Decreto Supremo N.º 014-2017-MINAM. Aprueban Reglamento del Decreto Legislativo N.º 1278, Decreto Legislativo que aprueba la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, El Peruano 32 (2017).

Decreto Supremo N° 010-2019-VIVIENDA, Decreto Supremo que aprueba el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario, Diario Oficial El Peruano (2019). https://www.gob.pe/institucion/vivienda/normas-legales/272120-010-2019-vivienda

Donovan, A., Adams, C., Ma, Y., Stephan, C., Eichholz, T., & Shi, H. (2016). Single particle ICP-MS characterization of titanium dioxide, silver, and gold nanoparticles during drinking water treatment. *Chemosphere*, *144*, 148–153. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.07.081

Goshima, T., Hori, K., & Yamamoto, A. (1994). Recovery of silver from radiographic fixer. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology*, *77*(6), 684–688. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0030-4220(94)90335-2

Grigoletto, J. C., Santos, C. B., Albertini, L. B., & Takayanagui, A. M. M. (2011). Situação do gerenciamento de efluentes de processamento radiográfico em serviços de saúde. Radiologia Brasileira, 44(5), 301–307. https://doi.org/10.1590/S0100-39842011000500008

Groznov, I. N. (2023). Автоматизированная станция нейтрализации шахтных и подотвальных сбросов от ионов тяжелых металлов [Automated station for neutralization of mine and underspoil effluents from heavy metal ions]. *Russian Mining Industry*, (6), 33–36. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-6-33-36

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Gurumurthy, K., Ganapathy, D., & Sasanka, K. (2020). Awareness on disposal of liquid waste in dentistry among dental students. *International Journal of Research in Pharmaceutical Sciences, 11*(SPL3), 907–910. https://doi.org/10.26452/ijrps.v11ispl3.3047

Haghiri, S., Daghighi, A., & Moharramzadeh, S. (2018). Optimum coagulant forecasting by modeling jar test experiments using ANNs. *Drinking Water Engineering and Science*, *11*(1), 1–8. https://doi.org/10.5194/dwes-11-1-2018

La Calera. (2022). *Ficha técnica: Cal hidratada (Versión 00, código DO.03.A02)*. https://lacalera.com.bo/wp-content/uploads/2023/10/Ficha-Tecnica-Cal-Hidratada-Act.-21-03-22.pdf

Li, X., Zhang, Q., & Yang, B. (2020). Co-precipitation with CaCO3 to remove heavy metals and significantly reduce the moisture content of filter residue. *Chemosphere*, *239*. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124660

Manja, C. D., & Vasudeva, H. (2021). Electrolysis method to determine the amount of silver in occlusal and periapical films. *International Journal of Dentistry Research, 6*(1), 7–8. https://www.dentistryscience.com/IJDR_202161_03.pdf

Mohamad, N. A., Hamzah, S., Che Harun, M. H., Ali, A., Rasit, N., Awang, M., Rahman, W. R. W. A., Azmi, A. A. A. R., Abu Habib, A. A., Amri Zahid, M. S., Fahmi Mustofa, A. A., Latfi, S. A., Aripin, S. M., & Saad, R. (2021). Integration of copperas and calcium hydroxide as a chemical coagulant and coagulant aid for efficient treatment of palm oil mill effluent. *Chemosphere*, *281*, 130873. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130873

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Montgomery, D. C. (2019). Design and analysis of experiments. In *Design and Analysis of Experiments* (10th ed., Vol. 3). Wiley.

Niu, Y. Q., Liu, J. H., Aymonier, C., Fermani, S., Kralj, D., Falini, G., & Zhou, C. H. (2022). Calcium carbonate: controlled synthesis, surface functionalization, and nanostructured materials. *Chemical Society Reviews*, *51*(18), 7883–7943. https://doi.org/10.1039/d1cs00519g

OMS, Organización Mundial de la Salud. (2018). *Guías para la calidad del agua de consumo humano: cuarta edición que incorpora la primera adenda*. Organización Mundial de la Salud. https://iris.who.int/handle/10665/272403

Poltava, V., & Likhouzova, T. (2024). Аналіз шляхів автоматизації робочого процесу стоматологічної клініки [Analysis of ways to automate the dental clinic's workflow]. *System Technologies*, *5*(154), 56–63. https://doi.org/10.34185/1562-9945-5-154-2024-07

Putra, A. E. E., Sulfiana, E., Amaliyah, N., Hayat, A., & Arsyad, H. (2019). Hazardous content removal and silver nanoparticle recovery from liquid radiography waste using microwave plasma. *Revue des Composites et des Matériaux Avancés*, *29*(6), 369–373. https://doi.org/10.18280/rcma.290605

Qasem, N. A. A., Mohammed, R. H., & Lawal, D. U. (2021). Removal of heavy metal ions from wastewater: A comprehensive and critical review. *npj Clean Water*, *4*, 36. https://doi.org/10.1038/s41545-021-00127-0

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Radovenchyk, Ya. V., Hordiienko, K. Yu., Radovenchyk, V. M., & Krysenko, T. V. (2022). Особливості хімічного висадження іонів кальцію з розведених водних розчинів [The specifics of chemical sedimentation of calcium ions from diluted aqueous solutions]. *Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Серія: «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження»*, (2), 72–78. https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2022.260353

Resolución Ministerial N.o 1295-2018/MINSA. Aprueban la NTS N.o 144-MINSA/2018/DIGESA, Norma Técnica de Salud: Gestión integral y manejo de residuos sólidos en establecimientos de salud, servicios médicos de apoyo y centros de investigación, Diario Oficial El Peruano (2018). https://busquedas.elperuano.pe/dispositivo/NL/1722912-1?

Romero, M. E., & Veloso, C. M. (2016). Peligrosidad de los componentes del paquete radiográfico intraoral y líquidos de procesado. *Revista del Ateneo Argentino de Odontología*, *55*(1), 57–63. https://repositorio.unne.edu.ar/items/11253dd0-dec3-42f3-a797-41afab5f538c

Schott, G. (2020). Jar testing made easy. *Opflow*, *46*(8), 22–27. https://doi.org/10.1002/opfl.1411

Soto-Cruz, F. J., Pérez-Moreno, S. M., Ceccotti, E., Barba-Lobo, A., Bolívar, J. P., Casas-Ruiz, M., & Gázquez, M. J. (2024). Valorisation diagnosis of waste from the decontamination of phosphogypsum leachates through a combined calcium carbonate/hydroxide process. *Heliyon*, *10*(9). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30610

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Sur Química. (2024). *Información técnica: Carbonato de calcio industrial 325 (Versión 7.0, código 557-53325-000)*. https://www.gruposur.com/download/hojas_tecnicas/ht-557-53325-000.pdf

Tejada Mayta, R. (2017). *Tratamiento y sedimentación de la turbidez con cal en las aguas residuales de los relaves mineros de la Unidad Operativa Minera Santiago - B* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional del Altiplano. https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/4695

EPA, U.S. Environmental Protection Agency. (1994). *Method 200.8, revision 5.4: Determination of trace elements in waters and wastes by inductively coupled plasma–mass spectrometry*. https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-08/documents/method_200-8_rev_5-4_1994.pdf

2026, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)