

UNIVERSIDAD PRIVADA SAN CARLOS

FACULTAD DE INGENIERÍAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



TESIS

**ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DEL AGUA SUBTERRÁNEA AFECTADA POR
LIXIVIADOS DEL BOTADERO MUNICIPAL APACHETA EN ILAVE, 2025**

PRESENTADA POR:

FRANK RONALD MENDOZA GALLEGOS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AMBIENTAL

PUNO – PERÚ

2026



Repositorio Institucional ALCIRA by [Universidad Privada San Carlos](http://www.upsc.edu.pe) is licensed under a [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



7.18%

SIMILARITY OVERALL

SCANNED ON: 3 FEB 2026, 11:28 PM

Originality & Authorship Report

Your text is highlighted according to the matched content in the results above.

● IDENTICAL
0.93%

● CHANGED TEXT
6.24%

Report #31278751

FRANK RONALD MENDOZA GALLEGOS // ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DEL AGUA SUBTERRÁNEA AFECTADA POR LIXIVIADOS DEL BOTADERO MUNICIPAL APACHETA EN ILAVE, 2025

RESUMEN El presente estudio evaluó la calidad físico-química del agua subterránea afectada por los lixiviados del botadero municipal Apacheta, ubicado en el distrito de Ilave, región Puno, 2025. Para ello, se analizaron muestras de agua subterránea provenientes de tres pozos cercanos al botadero (M1, M2 y M3), así como una muestra de lixiviado (M4), considerando parámetros físicos y químicos como pH, turbidez, sólidos totales disueltos, conductividad eléctrica, nitratos, nitritos, amonio, sulfatos, demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO) y metales pesados (arsénico, plomo, cadmio y mercurio). Los resultados obtenidos fueron comparados con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua establecidos en el D.S. N.º 004-2017-MINAM. Los resultados del análisis del agua subterránea mostraron valores de pH cercanos a la neutralidad (7.4 – 7.6); sin embargo, se registraron concentraciones elevadas de turbidez (22 – 46 NTU), sólidos totales disueltos (2,450 – 3,180 mg/L), conductividad eléctrica (1,980 – 2,860 µS/cm), nitratos (82 – 118 mg/L) y nitritos (6.4 – 13.2 mg/L), los cuales superan los límites permisibles establecidos por la normativa ambiental. Asimismo, se detectó la presencia de metales pesados, especialmente arsénico y cadmio, en concentraciones que representan un riesgo potencial para la salud humana.

UNIVERSIDAD PRIVADA SAN CARLOS
FACULTAD DE INGENIERÍAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL
TESIS

**ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DEL AGUA SUBTERRÁNEA AFECTADA POR
LIXIVIADOS DEL BOTADERO MUNICIPAL APACHETA EN ILAVE, 2025**

PRESENTADA POR:

FRANK RONALD MENDOZA GALLEGOS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AMBIENTAL

APROBADA POR EL SIGUIENTE JURADO:


PRESIDENTE

:


Dra. MARLENE CUSI MONTESINOS

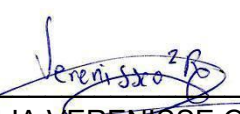
PRIMER MIEMBRO

:


M.Sc. KORINA ASQUI GOMEZ

SEGUNDO MIEMBRO

:


Dra. CELIA VERENISSEE ORTIZ DE ORUE ROJAS

ASESOR DE TESIS

:


Mg. JULIO WILFREDO CANO OJEDA

Área: Ingeniería Ambiental

Sub área: Ingeniería ambiental

Línea de investigación: Ciencias Ambientales

Puno, 06 de febrero del 2026.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, por darme la vida, la fortaleza y la sabiduría necesarias para continuar cada día y culminar esta etapa importante de mi formación. A mis padres, cuyo amor incondicional, sacrificio y apoyo constante han sido la base fundamental de mi crecimiento personal y académico. A mi familia y seres queridos, quienes con sus palabras de ánimo, compañía y comprensión me acompañaron en los momentos más difíciles y celebraron conmigo cada logro alcanzado. También dedico este esfuerzo a aquellas personas especiales que, de una u otra manera, aportaron motivación, guía o inspiración para que hoy este trabajo sea una realidad. A todos ustedes, con profundo cariño y gratitud, les ofrezco este logro.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a Dios por brindarme la vida, la salud y la fortaleza necesarias para culminar este trabajo de investigación. Mi gratitud especial a mis padres y a toda mi familia, cuyo amor, apoyo y confianza han sido pilares esenciales durante todo este proceso académico. Extiendo mi sincero agradecimiento a la Universidad Privada San Carlos, a la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y a la plana docente, quienes con su formación, orientación y compromiso contribuyeron significativamente a mi desarrollo profesional. Asimismo, expreso mi reconocimiento a las autoridades, instituciones y personas que brindaron su apoyo directo e indirecto para la realización de esta investigación en el distrito de Santa Rosa – Mazocruz, facilitando el acceso a la información, los espacios de trabajo y la coordinación necesaria para ejecutar cada etapa del estudio. A todos ellos, mi más profundo agradecimiento por hacer posible la culminación de este proyecto académico.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	1
AGRADECIMIENTOS	2
ÍNDICE GENERAL	3
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE ANEXOS	10
RESUMEN	11
ABSTRACT	12
INTRODUCCIÓN	13

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
1.1.1. PROBLEMA GENERAL	16
1.1.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS	16
1.2. ANTECEDENTES	16
1.2.1. INTERNACIONALES	16
1.2.2. NACIONALES	19
1.2.3. LOCALES	20
1.3. OBJETIVOS	21
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	21
1.3.2. OBJETIVO ESPECÍFICOS	21

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO, CONCEPTUAL E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	22
2.1.1. CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA	22
2.1.2. AFLORAMIENTO DE LIXIVIADOS.	24

2.1.3. LIXIVIACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS.	26
2.1.4. CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA.	27
2.2. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	29
2.2.1. CONCEPTOS GENERALES	29
2.2.2. PARÁMETROS FÍSICOS	30
2.2.3. PARÁMETROS QUÍMICOS	30
2.3. MARCO TEÓRICO NORMATIVO	31
2.4. HIPÓTESIS	31
2.4.1. HIPÓTESIS GENERAL	31
2.4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	31
CAPÍTULO III	
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	
3.1. ZONA DE ESTUDIO	32
3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA	33
3.2.1. POBLACIÓN	33
3.2.2. MUESTRA	33
3.3. MÉTODOS Y MATERIALES	34
3.3.1. ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN	34
3.3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN	34
3.3.3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	35
3.3.4. DISEÑO ESTADÍSTICO	35
3.4. DISEÑO METODOLÓGICO POR OBJETIVO ESPECÍFICO	35
3.4.1. OBJETIVO ESPECÍFICO 01	35
3.4.2. OBJETIVO ESPECÍFICO 02	37
3.4.3. OBJETIVO ESPECÍFICO 03	38
3.5. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	39

CAPÍTULO IV

EXPOSICION Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS

4.1. OBJETIVO GENERAL: ANÁLISIS DE LA CALIDAD FÍSICO-QUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA AFECTADA POR LIXIVIADOS DEL BOTADERO MUNICIPAL APACHETA – ILAVE, 2025	40
4.1.1. COMPORTAMIENTO DEL PH DEL AGUA SUBTERRÁNEA Y DEL LIXIVIADO	40
4.1.2. TURBIDEZ Y PRESENCIA DE SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	40
4.1.3. COMPUESTOS NITROGENADOS COMO INDICADORES DE CONTAMINACIÓN	41
4.1.4. SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	41
4.1.5. PRESENCIA DE SULFATOS	41
4.1.6. METALES PESADOS EN EL AGUA SUBTERRÁNEA Y LIXIVIADO	42
4.1.7. MATERIA ORGÁNICA: DBO ₅ Y DQO	42
4.2. OBJETIVO ESPECÍFICO 1: ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN POZOS CERCANOS AL BOTADERO MUNICIPAL APACHETA	42
4.2.1. PH DEL AGUA SUBTERRÁNEA	42
4.2.2. TURBIDEZ	43
4.2.3. COMPUESTOS NITROGENADOS: NITRATOS, NITRITOS Y AMONIO	44
4.2.4. SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	47
4.2.5. SULFATOS	49
4.2.6. METALES PESADOS EN EL AGUA SUBTERRÁNEA	50
4.2.7. MATERIA ORGÁNICA: DBO ₅ Y DQO	53
4.3. OBJETIVO ESPECÍFICO 2: ANÁLISIS DE LA COMPOSICIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LOS LIXIVIADOS DEL BOTADERO MUNICIPAL APACHETA	55
4.3.1. PH DEL LIXIVIADO	55

4.3.2 .TURBIDEZ	56
4.3.3. COMPUESTOS NITROGENADOS: NITRATOS, NITRITOS Y AMONIO	57
4.3.4. SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	59
4.3.5. SULFATOS	61
4.3.6. METALES PESADOS EN EL LIXIVIADO	62
4.3.7. MATERIA ORGÁNICA: DBO ₅ Y DQO	65
4.4. OBJETIVO ESPECÍFICO 3: COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LOS ESTÁNDARES DE CALIDAD AMBIENTAL (ECA) PARA AGUA	66
4.4.1. COMPARACIÓN DEL PH CON LOS ECA PARA AGUA	67
4.4.2. COMPARACIÓN DE LA TURBIDEZ CON LOS ECA PARA AGUA	67
4.4.3. COMPARACIÓN DE COMPUESTOS NITROGENADOS CON LOS ECA PARA AGUA	68
4.4.4. COMPARACIÓN DE SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA CON LOS ECA	71
4.4.5. COMPARACIÓN DE SULFATOS CON LOS ECA PARA AGUA	72
4.4.6. COMPARACIÓN DE METALES PESADOS CON LOS ECA PARA AGUA	73
4.4.7. COMPARACIÓN DE DBO ₅ Y DQO CON LOS ECA PARA AGUA	76
4.5. DISCUSIÓN	77
CONCLUSIONES	82
RECOMENDACIONES	84
BIBLIOGRAFÍA	86
ANEXOS	88

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 01: Ubicación de los puntos de muestreo.	34
Tabla 02: Operacionalización de variables.	39

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 01: Mapa de georeferencia de puntos de muestreo.	33
Figura 02: pH en las muestras de agua subterránea (M1, M2 y M3)	43
Figura 03: Turbidez en las muestras de agua subterránea (M1, M2 y M3).	44
Figura 04: Nitratos (NO_3^-) en las muestras de agua subterránea (M1, M2 y M3).	45
Figura 05: Nitritos (NO_2^-) en las muestras de agua subterránea (M1, M2 y M3).	46
Figura 06: Amonio (NH_4^+) en las muestras de agua subterránea (M1, M2 y M3).	47
Figura 07: Sólidos Totales Disueltos en las muestras (M1, M2 y M3).	48
Figura 08: Conductividad eléctrica en las muestras de agua subterránea (M1, M2 y M3).	49
Figura 09: Sulfatos (SO_4^{2-}) en las muestras de agua subterránea (M1, M2 y M3).	50
Figura 10: Arsénico (As) en las muestras de agua subterránea (M1, M2 y M3).	51
Figura 11: Plomo (Pb) en las muestras de agua subterránea (M1, M2 y M3).	51
Figura 12: Cadmio (Cd) en las muestras de agua subterránea (M1, M2 y M3).	52
Figura 13: Mercurio (Hg) en las muestras de agua subterránea (M1, M2 y M3)	53
Figura 14: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) en las muestras de agua subterránea (M1, M2 y M3)	54
Figura 15: Demanda Química de Oxígeno (DQO) en las muestras de agua subterránea (M1, M2 y M3).	54
Figura 16: pH del lixiviado (M4).	56
Figura 17: Turbidez del lixiviado (M4).	57
Figura 18: Concentración de nitratos (NO_3^-) en el lixiviado (M4).	58
Figura 19: Concentración de nitritos (NO_2^-) en el lixiviado (M4).	58
Figura 20: Concentración de amonio (NH_4^+) en el lixiviado (M4).	59
Figura 21: Sólidos Totales Disueltos del lixiviado (M4).	60
Figura 22: Conductividad eléctrica del lixiviado (M4).	61
Figura 23: Concentración de sulfatos (SO_4^{2-}) en el lixiviado (M4).	62

Figura 24: Concentración de arsénico (As) en el lixiviado (M4).	63
Figura 25: Concentración de plomo (Pb) en el lixiviado (M4).	63
Figura 26: Concentración de cadmio (Cd) en el lixiviado (M4).	64
Figura 27: Concentración de mercurio (Hg) en el lixiviado (M4).	64
Figura 28: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅) del lixiviado (M4).	65
Figura 29: Demanda Química de Oxígeno (DQO) del lixiviado (M4).	66
Figura 30: Comparación del pH del agua subterránea con el ECA.	67
Figura 31: Comparación de la turbidez del agua subterránea con el ECA.	68
Figura 32: Comparación de la concentración de nitratos (NO ₃ ⁻) con el ECA.	69
Figura 33: Comparación de la concentración de nitritos (NO ₂ ⁻) con el ECA.	70
Figura 34: Comparación de la concentración de amonio (NH ₄ ⁺) con el ECA.	70
Figura 35: Comparación de los sólidos totales disueltos con el ECA.	71
Figura 36: Comparación de la conductividad eléctrica con el ECA.	72
Figura 37: Comparación de la concentración de sulfatos con el ECA.	73
Figura 38: Comparación de la concentración de arsénico con el ECA.	74
Figura 39: Comparación de la concentración de plomo con el ECA.	74
Figura 40: Comparación de la concentración de cadmio con el ECA.	75
Figura 41: Comparación de la concentración de mercurio con el ECA.	75
Figura 42: Comparación de la DBO ₅ del agua subterránea con el ECA.	76
Figura 43: Comparación de la DQO del agua subterránea con el ECA.	77
Figura 44: Vista general del área de estudio.	90
Figura 45: Toma de muestra de agua subterránea en M1.	90
Figura 46: Toma de muestra de agua subterránea de M2.	91
Figura 47: Toma de muestra de agua subterránea en M3.	91
Figura 48: Toma de muestra de lixiviado M4.	92
Figura 49: Acondicionamiento de las muestras para su traslado a laboratorio.	93
Figura 50: Resultados de laboratorio de muestras de agua subterránea.	94
Figura 51: Resultados de laboratorio de muestra de lixiviado.	95

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 01: MATRIZ DE CONSISTENCIA: Análisis físico-químico del agua subterránea afectada por lixiviados del botadero municipal Apacheta en llave, 2025.	89
Anexo 02: Registro fotográfico.	90

RESUMEN

El presente estudio evaluó la calidad físico-química del agua subterránea afectada por los lixiviados del botadero municipal Apacheta, ubicado en el distrito de llave, región Puno, 2025. Para ello, se analizaron muestras de agua subterránea provenientes de tres pozos cercanos al botadero (M1, M2 y M3), así como una muestra de lixiviado (M4), considerando parámetros físicos y químicos como pH, turbidez, sólidos totales disueltos, conductividad eléctrica, nitratos, nitritos, amonio, sulfatos, demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO) y metales pesados (arsénico, plomo, cadmio y mercurio). Los resultados obtenidos fueron comparados con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua establecidos en el D.S. N.º 004-2017-MINAM. Los resultados del análisis del agua subterránea mostraron valores de pH cercanos a la neutralidad (7.4 – 7.6); sin embargo, se registraron concentraciones elevadas de turbidez (22 – 46 NTU), sólidos totales disueltos (2,450 – 3,180 mg/L), conductividad eléctrica (1,980 – 2,860 µS/cm), nitratos (82 – 118 mg/L) y nitritos (6.4 – 13.2 mg/L), los cuales superan los límites permisibles establecidos por la normativa ambiental. Asimismo, se detectó la presencia de metales pesados, especialmente arsénico y cadmio, en concentraciones que representan un riesgo potencial para la salud humana. En cuanto al lixiviado, los resultados evidenciaron una alta carga contaminante, con valores elevados de nutrientes, sólidos disueltos, DBO₅ (28 mg/L), DQO (75 mg/L) y metales pesados, confirmando su influencia directa sobre la degradación de la calidad del agua subterránea. Estos resultados ponen de manifiesto la necesidad de implementar medidas de control, tratamiento de lixiviados y monitoreo permanente del recurso hídrico para reducir los riesgos ambientales y sanitarios en el distrito de llave.

Palabras clave: Agua subterránea, Botadero municipal, Calidad físico-química, Lixiviados.

ABSTRACT

This study evaluated the physicochemical quality of groundwater affected by leachate from the Apacheta municipal landfill, located in the district of Ilave, Puno region, in 2025. To this end, groundwater samples from three wells near the landfill (M1, M2, and M3), as well as a leachate sample (M4), were analyzed, considering physical and chemical parameters such as pH, turbidity, total dissolved solids, electrical conductivity, nitrates, nitrites, ammonium, sulfates, biochemical oxygen demand (BOD₅), chemical oxygen demand (COD), and heavy metals (arsenic, lead, cadmium, and mercury). The results obtained were compared with the Environmental Quality Standards (EQS) for water established in Supreme Decree No. 004-2017-MINAM. The results of the groundwater analysis showed pH values close to neutral (7.4–7.6); However, high concentrations of turbidity (22–46 NTU), total dissolved solids (2,450–3,180 mg/L), electrical conductivity (1,980–2,860 μ S/cm), nitrates (82–118 mg/L), and nitrites (6.4–13.2 mg/L) were recorded, exceeding the permissible limits established by environmental regulations. Furthermore, the presence of heavy metals, especially arsenic and cadmium, was detected in concentrations that represent a potential risk to human health. Regarding the leachate, the results showed a high contaminant load, with elevated levels of nutrients, dissolved solids, BOD₅ (28 mg/L), COD (75 mg/L), and heavy metals, confirming its direct influence on the degradation of groundwater quality. These results highlight the need to implement control measures, leachate treatment, and continuous monitoring of water resources to reduce environmental and health risks in the Ilave district.

Keywords: Groundwater, Municipal landfill, Physical-chemical quality, Leachate.

INTRODUCCIÓN

El agua constituye uno de los recursos naturales más esenciales para la vida, el desarrollo de las actividades humanas y el equilibrio de los ecosistemas. En particular, el agua subterránea representa una fuente estratégica de abastecimiento de agua dulce debido a su calidad, disponibilidad y protección natural frente a agentes externos. Sin embargo, en los últimos años, factores como el crecimiento poblacional, la expansión urbana, el incremento en la generación de residuos sólidos y la disposición inadecuada de estos han contribuido significativamente a la contaminación de los recursos hídricos, afectando su calidad y poniendo en riesgo la salud humana y el ambiente. En este contexto, la evaluación de parámetros físico-químicos se vuelve fundamental para determinar el estado ambiental del agua subterránea y establecer estrategias de gestión que garanticen su uso sostenible.

El distrito de Ilave, ubicado en la provincia de El Collao, región Puno, presenta como uno de sus principales problemas ambientales la inadecuada gestión de residuos sólidos en el botadero municipal Apacheta. Este botadero, al no contar con sistemas eficientes de impermeabilización ni tratamiento de lixiviados, genera líquidos altamente contaminantes que pueden infiltrarse en el suelo y alcanzar los acuíferos subterráneos cercanos. La presencia de lixiviados ricos en materia orgánica, nutrientes, sales disueltas y metales pesados representa una amenaza directa para la calidad del agua subterránea utilizada por la población para consumo humano, riego agrícola y otras actividades, constituyendo un riesgo ambiental y sanitario.

Ante esta problemática, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la calidad físico-química del agua subterránea afectada por los lixiviados del botadero municipal Apacheta en Ilave durante el año 2025. Para ello, se analizaron muestras de agua subterránea provenientes de pozos cercanos al botadero y una muestra de lixiviado, considerando parámetros como pH, turbidez, sólidos totales disueltos, conductividad eléctrica, nitratos, nitritos, amonio, sulfatos, demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), demanda química de oxígeno (DQO) y metales pesados. Los resultados obtenidos fueron

comparados con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua establecidos en el D.S. N.º 004-2017-MINAM, con la finalidad de determinar el grado de afectación del recurso hídrico.

Finalmente, el presente trabajo se estructura en los siguientes capítulos:

Capítulo I, en el que se describe la problemática ambiental relacionada con el botadero municipal Apacheta, se formula el planteamiento del problema, la justificación y los objetivos de la investigación.

Capítulo II, que desarrolla el marco teórico, incluyendo antecedentes internacionales, nacionales y locales, así como los fundamentos conceptuales sobre aguas subterráneas, lixiviados y parámetros físico-químicos de calidad del agua.

Capítulo III, donde se presenta la metodología aplicada, detallando el diseño de la investigación, la ubicación de los puntos de muestreo, las técnicas de recolección de muestras y los procedimientos de análisis de laboratorio.

Capítulo IV, que expone los resultados obtenidos, acompañados de tablas, figuras e interpretaciones comparativas con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA).

Capítulo V, en el que se desarrolla la discusión de los resultados en relación con los antecedentes revisados, se formulan las conclusiones del estudio y se plantean recomendaciones orientadas a la protección y mejora de la calidad del agua subterránea en el distrito de Ilave.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A nivel global, la contaminación del agua subterránea se ha convertido en una de las principales amenazas para la salud pública y los ecosistemas. El crecimiento urbano, la inadecuada disposición de los residuos sólidos y la falta de infraestructura ambiental provocan que los lixiviados de los botaderos o rellenos sanitarios se filtren al subsuelo, alterando la calidad del agua. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), millones de personas en el mundo dependen del agua subterránea como fuente de abastecimiento, y una parte significativa de estos recursos presenta algún grado de contaminación por metales pesados, nitratos u otras sustancias químicas derivadas de la actividad humana.

En el contexto nacional, el Perú enfrenta serios problemas en la gestión de residuos sólidos municipales. Muchos botaderos a cielo abierto operan sin medidas de control ambiental, generando lixiviados que pueden infiltrarse en el suelo y llegar a los acuíferos. Diversos estudios del Ministerio del Ambiente (MINAM) han evidenciado que gran parte de los botaderos del país no cuenta con sistemas de impermeabilización ni drenaje de lixiviados, lo que incrementa el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas, especialmente en las zonas rurales y urbanas que dependen de pozos para sus actividades cotidianas.

A nivel local, el botadero municipal Apacheta, ubicado en el distrito de Llave, provincia de El Collao, recibe diariamente residuos sólidos de origen doméstico, comercial y municipal.

Este botadero no dispone de un sistema adecuado para la recolección ni el tratamiento de lixiviados, lo que facilita su infiltración al subsuelo. En los alrededores existen pozos que son utilizados principalmente para el consumo de animales y, en algunos casos, por la población local. Sin embargo, se desconoce el grado de afectación de las aguas subterráneas por los lixiviados generados. Por ello, resulta necesario realizar un análisis físico-químico del agua subterránea afectada por los lixiviados del botadero municipal Apacheta en Ilave, con el fin de determinar su calidad y compararla con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua.

1.1.1. PROBLEMA GENERAL

¿En qué medida los lixiviados del botadero municipal Apacheta afectan la calidad físico-química del agua subterránea en el distrito de Ilave, 2025?

1.1.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS

- ¿Cuáles son las características físico-químicas del agua subterránea en los pozos cercanos al botadero municipal Apacheta?
- ¿Qué composición físico-química presentan los lixiviados generados en el botadero municipal Apacheta?
- ¿En qué medida los resultados obtenidos difieren de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua?

1.2. ANTECEDENTES

1.2.1. INTERNACIONALES

Gómez (2021), reconoce que el incremento de los residuos sólidos urbanos ha generado mayores volúmenes de lixiviados, los cuales representan un serio desafío ambiental por su alta carga de sustancias tóxicas como nutrientes, patógenos y metales pesados. Estos líquidos contaminantes se forman por la degradación de la materia orgánica y su composición depende del tipo de residuos, la edad del botadero y la cantidad de agua que percola a través de ellos, siendo más críticos en zonas con alta precipitación. Diversos estudios han evaluado diferentes sistemas de tratamiento —físicos, químicos, biológicos y combinados, para la remoción de contaminantes en lixiviados, encontrando

que los métodos biológicos, especialmente los reactores anaerobios, presentan mejores niveles de eficiencia. Sin embargo, la variabilidad de condiciones y características de cada botadero exige seleccionar tecnologías adaptadas a cada contexto, evidenciando la necesidad de un adecuado manejo y monitoreo de los lixiviados.

Murillo (2024), en su investigación realizada en Ecuador analizó la dispersión de la contaminación en un cuerpo de agua afectado por los lixiviados del botadero Curgua. Se recolectaron muestras en diferentes distancias desde la fuente de contaminación y se evaluaron sus parámetros físico-químicos. Los resultados mostraron que, aunque la concentración de contaminantes disminuye parcialmente conforme aumenta la distancia, estos persisten a varios kilómetros, evidenciando un impacto continuo en el recurso hídrico. El estudio concluyó que la composición físico-química y biológica de los residuos influye en la persistencia de la contaminación y que el riesgo aumenta en periodos donde se incrementa la generación de residuos sólidos.

Suárez (2025), en su estudio realizado en Chacuey, Cotuí, evaluó el impacto de los lixiviados de residuos sólidos en la calidad de las aguas subterráneas. Las muestras de pozos cercanos a los depósitos mostraron que los parámetros físico-químicos como pH, TDS, nitratos, sulfatos de hierro se mantenían dentro de rangos adecuados; sin embargo, se detectaron deficiencias en la desinfección y presencia de carga microbiológica, representando un riesgo para el consumo humano. Los resultados evidencian la necesidad de mejorar los sistemas de tratamiento y la infraestructura para proteger los recursos hídricos frente a la contaminación por lixiviados.

Montenegro (2020), en su estudio sobre los rellenos sanitarios (RESA) evidenció que los lixiviados generados superan los límites permisibles para vertimiento, afectando negativamente cuerpos de agua por la presencia de contaminantes como cadmio, cromo, plomo, bromo, zinc y mercurio, los cuales pueden bioacumularse y causar impactos ambientales graves. De 144 RESA, 17 fueron evaluados detalladamente, encontrando los tratamientos más eficientes para eliminar estos contaminantes son la ósmosis inversa y sistemas con pretratamientos complementarios. Se identificó que el río Magdalena es el

cuerpo de agua más afectado, recibiendo lixiviados de cinco rellenos, lo que evidencia la necesidad de mejorar la gestión y tratamiento de lixiviados para proteger los recursos hídricos.

Chavez (2020), en su estudio en el relleno sanitario de Chihuahua evaluó un tratamiento de lixiviados que combinó procesos fisicoquímicos y tecnologías avanzadas sin dilución, debido a la imposibilidad de aplicar métodos biológicos en rellenos maduros. El tratamiento incluyó coagulación-floculación-sedimentación, adsorción con carbón activado, oxidación química con Fenton y ósmosis inversa, logrando remociones totales de 92% en DQO, 68% en DBO5, 63% en nitrógeno total, 46% en sólidos totales y 45% en sales disueltas. Los resultados demostraron la efectividad del sistema integrado para disminuir la contaminación de lixiviados y proteger aguas subterráneas y suelos cercanos. Viracucha (2024), en su estudio en los cantones de Quito, Mejía y Rumiñahui evaluó la idoneidad territorial de cementerios ubicados en zonas no adecuadas o ligeramente adecuadas mediante índices empíricos ambientales. Se consideraron variables como nivel freático, distancia a cuerpos de agua, pendiente, textura del suelo, temperatura, densidad poblacional y número de tumbas. La validación de los índices mostró que, a pesar de las condiciones atmosféricas, la diferencia entre la categoría inicial y la calculada no fue significativa, confirmando la confiabilidad de las ecuaciones empíricas para determinar la idoneidad del terreno y servir como herramienta de planificación para las autoridades.

Contreras (2022), la disposición de residuos sólidos enfrenta problemas debido a la falta de técnicas adecuadas de manejo de agentes contaminantes, afectando el suelo y representando un riesgo para el lago Petén Itzá. El estudio del sitio de tratamiento, con una extensión de 0,043 km² y topografía plana, incluyó sondeos, análisis estratigráfico, permeabilidad, propiedades físicas y químicas del suelo, y capacidad portante. A partir de los resultados se propusieron medidas de protección del suelo y control de lixiviados, con el fin de reducir la contaminación de aguas superficiales y subterráneas.

1.2.2. NACIONALES

Cordova (2023), en su investigación realizada en el relleno sanitario Ccatun Huaycco evaluó el aprovechamiento del lixiviado orgánico como fertilizante en el cultivo de flores. Se tomaron muestras de lixiviado en diferentes puntos del área y se analizaron parámetros como pH, temperatura y conductividad. El lixiviado, diluido en proporción 1:4, fue aplicado a la flor “pensamiento” y se comparó su crecimiento con plantas regadas solo con agua. Los resultados mostraron un mayor desarrollo en las plantas tratadas con lixiviado, demostrando su potencial uso agrícola y la posibilidad de reducir el consumo de fertilizantes químicos.

Carbonel (2024), en su estudio realizado en los rellenos sanitarios El Zapallal y Portillo Grande en Lima analizó la calidad de sus lixiviados, encontrando valores elevados de conductividad eléctrica, pH alcalino, sólidos disueltos, alta carga orgánica y alta concentración de amonio, lo que evidencia una intensa descomposición de residuos. El índice de potencial de contaminación mostró que los lixiviados son altamente tóxicos y poco estabilizados. Aunque la recirculación de lixiviados puede ser una alternativa viable en zonas desérticas con buenas condiciones de impermeabilización, en ambos rellenos se identificaron deficiencias operativas que favorecen la infiltración y desplazamiento de lixiviados. Los resultados resaltan el riesgo potencial de estos sistemas cuando no se manejan adecuadamente y la necesidad de mejorar la gestión para evitar la contaminación de suelos y aguas subterráneas.

Arévalo (2020), en su estudio realizado en Pucallpa evaluó la contaminación de aguas subterráneas generada por lixiviados provenientes de sepulturas en el cementerio general. Se analizaron pozos tubulares utilizados por la población colindante, encontrando que los parámetros físico-químicos se encontraban dentro de los Límites Máximos Permisibles para consumo humano, mientras que los análisis microbiológicos mostraron que solo requerían desinfección simple para ser aptos. El perfil del suelo en la zona se caracterizó por 30% arena y 70% arcilla, lo que influye en la filtración y retención de contaminantes.

Briceño (2020), en su estudio en Huayllay evaluó el impacto ambiental del botadero municipal Rayhuana, identificando que durante la temporada de lluvias se generan lixiviados que afectan el terreno y las zonas aledañas, deteriorando el medio ambiente y la salud pública. Se aplicó la metodología EVIAVE modificada, adaptada al marco legal peruano, determinando que el botadero presenta alto impacto ambiental, especialmente sobre la salud, la sociedad, la atmósfera, aguas superficiales, suelo y aguas subterráneas. Las variables con mayor riesgo fueron la compactación, cobertura, tipo de residuo, control de lixiviados, taludes, tamaño del vertedero y drenaje superficial. El estudio resalta la necesidad de mejorar la gestión de residuos y recuperar áreas degradadas para reducir los riesgos ambientales y sanitarios.

Ticllasuca (2024), en su estudio en el CEPAS de Concepción evaluó el tratamiento de lixiviados mediante intercambio iónico magnético para reducir hierro y turbidez. El lixiviado presentado contenía 2,9 mg/L de hierro y 352,5 NTU de turbidez, superando los límites máximos permitidos. Mediante ajustes en pH, masa de resina, tiempo de contacto y velocidad de agitación, se lograron porcentajes de remoción de 72,35% en turbidez y 60,09% en hierro. Los resultados demostraron que el proceso de intercambio iónico es efectivo para mejorar la calidad de lixiviados provenientes de rellenos sanitarios.

Puma (2022), el estudio en los Pantanos de Villa evaluó la influencia de actividades humanas sobre la calidad del agua subterránea en esta Área Natural Protegida. Se realizaron muestreos de agua y encuestas a la población cercana, observándose que fuera del ANP los niveles de nitratos, coliformes fecales y *Escherichia coli* superan los límites permitidos, representando un riesgo ambiental. Dentro del ANP, se evidenció una disminución de estos parámetros, demostrando la capacidad reguladora y fitorremediadora del humedal.

1.2.3. LOCALES

Quispe (2023), evaluó la contaminación del agua subterránea en el área de influencia del botadero municipal mediante un enfoque cuantitativo, descriptivo y de diseño no experimental transversal, tomando tres muestras analizadas en el INIA. Los resultados

mostraron valores fisicoquímicos dentro de rangos aceptables, como pH 7.60, conductividad 119.50 $\mu\text{S}/\text{cm}$, alcalinidad 176.41 mg/L y cloruros 26 mg/L, además de bajas concentraciones de nutrientes y ausencia de metales pesados como cromo y mercurio, concluyendo que el acuífero presenta bajo nivel de contaminación pese a su proximidad al botadero.

Velasquez (2021), en su estudio realizado en el botadero de Chilla en Juliaca evaluó la contaminación del agua y del suelo generada por los lixiviados. La investigación determinó que el suelo presentaba altas concentraciones de minerales como potasio, cobre, sulfatos, nitratos y cloruros. En el agua subterránea, los valores de DBO y DQO superaron ampliamente los Estándares de Calidad Ambiental, evidenciando un impacto directo. Asimismo, los lixiviados mostraron concentraciones elevadas de metales pesados como cobre, cadmio y cromo, excediendo los límites permisibles. A nivel social, la mayoría de pobladores percibió riesgos asociados a la contaminación del botadero. En conjunto, se concluyó que el área de disposición de residuos representa un riesgo ambiental y socioeconómico moderado.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la calidad físico-química del agua subterránea afectada por los lixiviados del botadero municipal Apacheta en Ilave, 2025.

1.3.2. OBJETIVO ESPECÍFICOS

- Analizar los parámetros físico-químicos del agua subterránea en pozos cercanos al botadero municipal Apacheta.
- Determinar la composición físico-química de los lixiviados generados en el botadero municipal Apacheta.
- Comparar los resultados obtenidos con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO, CONCEPTUAL E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

2.1.1. CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

El agua subterránea circula de manera natural a través de los poros del suelo, los materiales sedimentarios y las fracturas existentes en las formaciones geológicas del subsuelo. Durante este proceso de desplazamiento, el agua actúa como un medio de transporte de diversas sustancias químicas disueltas, lo cual cumple un rol fundamental en procesos geológicos y geoquímicos que se desarrollan a largo plazo. No obstante, esta misma capacidad de movilización hace que el agua subterránea sea altamente vulnerable a la contaminación. La incorporación de compuestos nocivos ocurre con facilidad cuando sustancias peligrosas ingresan al sistema subterráneo, ya sea por infiltración o percolación. En la mayoría de los casos, esta contaminación está estrechamente vinculada a actividades de origen antrópico, tales como fugas, derrames o vertimientos de sustancias producidas o utilizadas por el ser humano, incluyendo residuos sólidos, efluentes industriales y lixiviados, los cuales pueden alterar significativamente la calidad del agua subterránea y representar un riesgo para el ambiente y la salud humana (Ordóñez, 2012).

Una vez que los compuestos contaminantes ingresan al subsuelo, estos son transportados por el flujo del agua subterránea hacia zonas naturales de descarga, tales como manantiales, así como hacia pozos utilizados para la extracción de agua destinada al consumo humano, actividades agrícolas y usos industriales. La dinámica subterránea favorece la dispersión de estas sustancias, incrementando el

riesgo de afectación a amplias áreas. El diagnóstico confiable de la calidad del agua subterránea resulta complejo, debido a que el método más preciso consiste en la perforación de pozos y la recolección directa de muestras de agua, procedimientos que requieren recursos técnicos y económicos significativos. Como consecuencia, en muchas situaciones la contaminación no es detectada de manera oportuna, y los problemas ambientales y sanitarios solo se evidencian cuando las aguas subterráneas ya han transportado compuestos tóxicos hacia manantiales, ríos o pozos que abastecen a la población, generando impactos directos en los ecosistemas y en la salud pública (Ordóñez, 2012).

Las aguas subterráneas cumplen una función fundamental como sistema regulador frente a la variabilidad e imprevisibilidad de los regímenes de precipitación, especialmente en contextos donde las lluvias presentan patrones irregulares o estacionales. Este recurso actúa como un amortiguador natural que garantiza la disponibilidad hídrica durante períodos de escasez superficial. Sin embargo, a pesar de su alto valor ambiental, social y económico, una proporción significativa de los acuíferos ha sido clasificada en condiciones de semicriticidad, criticidad o sobreexplotación, lo que evidencia un uso intensivo y no sostenible. Esta situación se agrava progresivamente a un ritmo preocupante, comprometiendo la seguridad hídrica a largo plazo y aumentando la vulnerabilidad de las poblaciones que dependen directamente de las aguas subterráneas para sus actividades cotidianas y productivas (Ordóñez, 2012).

La contaminación de las aguas subterráneas ocurre como resultado del desplazamiento y la infiltración de sustancias contaminantes hacia los acuíferos, proceso que provoca modificaciones en las características físico-químicas del agua y deteriora significativamente su calidad. En la mayoría de los casos, estos procesos de contaminación tienen un origen antrópico, derivado de diversas actividades humanas como la disposición inadecuada de residuos, la descarga de efluentes y el uso intensivo de sustancias químicas. No obstante, también existen fuentes de contaminación de

origen natural, relacionadas con la composición geológica del subsuelo y la movilización de minerales, que pueden influir en la calidad del agua subterránea (Ordóñez, 2012).

2.1.2. AFLORAMIENTO DE LIXIVIADOS.

En condiciones normales, el lixiviado se concentra en las zonas inferiores del vertedero, lo que favorece su desplazamiento vertical a través de la masa de residuos sólidos. En el caso de vertederos no controlados, que carecen de sistemas de impermeabilización o barreras de separación en el fondo del vaso, el lixiviado puede infiltrarse libremente hacia los estratos subyacentes del suelo natural, siguiendo un flujo descendente. La velocidad y dirección de este desplazamiento dependen en gran medida de las características topográficas y geológicas del terreno, las cuales pueden favorecer tanto el movimiento vertical como el lateral del lixiviado. Este desplazamiento lateral se intensifica especialmente cuando existen capas granulares permeables en los márgenes del vertedero que entran en contacto directo con la masa de residuos. Asimismo, el afloramiento de lixiviados se define como el ascenso de aguas contaminadas provenientes de niveles más profundos del subsuelo, caracterizadas por temperaturas más bajas y elevadas concentraciones de sales y nutrientes, como nitratos, fosfatos y silicatos. Este fenómeno provoca el reemplazo del agua superficial, generalmente más cálida y con menor contenido de nutrientes, la cual es desplazada por efectos hidrodinámicos asociados, entre otros factores, a la acción del viento (Montes, 2011).

Elementos visuales del afloramiento

Los indicadores visuales asociados al afloramiento de lixiviados corresponden a rasgos característicos del propio fenómeno. Al analizar este tipo de afloramiento, es posible identificar la presencia de masas líquidas con una coloración pardo-negrizca distintiva, rasgo que resulta especialmente evidente en vertederos de residuos no peligrosos que presentan un elevado contenido de materia orgánica. Esta tonalidad oscura se debe principalmente a la alta concentración de compuestos orgánicos disueltos, productos de la descomposición de los residuos, y constituye un indicador claro de la presencia de lixiviados en superficie (Types Of Water Pollution, 2022).

De manera ocasional, especialmente en vertederos cuyo abandono es relativamente reciente, pueden presentarse afloramientos localizados de lixiviados en los taludes del depósito. Estos afloramientos suelen estar asociados a la presencia de capas de baja permeabilidad, como materiales arcillosos, que fueron empleadas durante las etapas de operación del vertedero para la cobertura de los residuos. Dichas capas actúan como barreras parciales al flujo vertical del lixiviado, favoreciendo su acumulación y posterior desplazamiento lateral hasta emerger en superficie, generando puntos específicos de descarga contaminante en los flancos del vertedero (Types Of Water Pollution, 2022).

Elementos químicos del afloramiento

La composición química de los lixiviados presenta una elevada variabilidad, la cual depende principalmente de la antigüedad del vertedero, del tipo de residuos depositados y de las condiciones de operación y abandono del mismo. A lo largo del tiempo, los procesos de degradación física, química y biológica modifican las características del lixiviado, generando mezclas complejas de compuestos orgánicos, inorgánicos y metales pesados. Algunos de estos componentes representan riesgos significativos para la salud humana y los ecosistemas, motivo por el cual los lixiviados provenientes de vertederos han sido reconocidos en los últimos años como una de las principales amenazas ambientales. Asimismo, la marcada variabilidad en sus propiedades físico-químicas dificulta el diseño y la implementación de sistemas de tratamiento y depuración eficientes, ya que estos deben adaptarse a composiciones cambiantes y a concentraciones variables de contaminantes (Lloréns, 2010).

Las aguas subterráneas son particularmente vulnerables a episodios de contaminación puntual, los cuales pueden originarse por fuentes localizadas como botaderos, sistemas de saneamiento deficientes, derrames o infiltraciones de efluentes contaminantes. Diversos informes señalan que la exposición al agua contaminada representa un riesgo significativo para la salud humana, ya que una proporción considerable de las personas afectadas requiere atención hospitalaria. Asimismo, se ha documentado la aparición de enfermedades graves, como el síndrome urémico hemolítico, en un porcentaje relevante

de los casos, mientras que una fracción menor de la población expuesta puede experimentar consecuencias fatales. Frente a este escenario, garantizar la seguridad del agua destinada al consumo humano exige la aplicación rigurosa de normas de calidad, tanto primarias —orientadas a la protección de la salud— como secundarias, destinadas a preservar las características físicas, químicas y organolépticas del agua, asegurando así su idoneidad para el uso poblacional (Lloréns, 2010).

2.1.3. LIXIVIACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS.

Cuando los vertederos se ubican en áreas hidrogeológicamente inapropiadas, tales como zonas con materiales altamente permeables —incluyendo rocas fracturadas o depósitos aluviales—, el penacho de contaminación generado por el vertedero puede desplazarse a distancias considerablemente alejadas del sitio original. En algunos casos, este flujo contaminante incluso puede quedar desconectado del vertedero una vez que éste ha sido abandonado, continuando la dispersión de sustancias nocivas hacia el subsuelo y los cuerpos de agua cercanos (Instituto Geológico y Minero de España, 1985). Los lixiviados contienen una combinación de microorganismos y compuestos orgánicos e inorgánicos, incluidos metales pesados que pueden encontrarse tanto en forma disuelta como asociados a coloides liofílicos o liofóbicos. Debido a esta composición compleja y a su alta movilidad, los lixiviados representan un factor de riesgo sanitario importante, capaz de contaminar suelos, aguas superficiales y subterráneas, afectando directamente la calidad ambiental y la salud humana (Baun & Christensen, 2004).

Lixiviados de residuos sólidos en las aguas subterráneas del botadero.

La materia orgánica disuelta realiza un papel importante en la migración de metales pesados desde los residuos sólidos municipales a los ambientes acuáticos a través de la ruta de los lixiviados (Wu et al., 2011).

El lixiviado puede definirse como el líquido que se genera al filtrarse a través de los residuos sólidos, extrayendo tanto materiales disueltos como partículas en suspensión. En la mayoría de los vertederos, este líquido se compone principalmente del agua que ingresa desde fuentes externas, como drenajes superficiales, precipitaciones, aguas

subterráneas o manantiales subterráneos, y, en menor medida, del líquido producido por la descomposición de los propios residuos depositados (López, 2015). A nivel global, los vertederos se consideran una de las principales amenazas para la calidad de las aguas subterráneas. Por ejemplo, se estima que más del 90 % de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) generados en la India son depositados directamente en el suelo de manera inadecuada. Esta disposición permite que los residuos permanezcan expuestos al flujo del agua subterránea, a la infiltración causada por la lluvia y a cualquier otro tipo de filtración que pueda producirse, favoreciendo la generación de lixiviados y la potencial contaminación de los acuíferos cercanos (Ratna et al., 2021).

2.1.4. CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA.

El agua subterránea constituye un componente esencial del entorno vital humano y del ciclo hidrológico, al proporcionar recursos de agua dulce de alta calidad indispensables para la vida y el desarrollo. Este recurso es fundamental para diversos usos, incluyendo el consumo doméstico, las actividades industriales y la producción agrícola a nivel global (Li et al., 2022). Dado que representa la principal fuente de agua para la supervivencia humana, mantener su calidad es crucial para proteger la salud pública. No obstante, el incremento constante de la población y el rápido desarrollo económico han generado presiones significativas sobre los recursos subterráneos, provocando que la contaminación de las aguas subterráneas se constituya en un problema urgente, capaz de afectar directamente la salud de las personas y comprometer la disponibilidad de agua segura en diferentes regiones del mundo (Li et al., 2022).

Características de calidad físicas.

Ansah et al. (2020) señalan que la evaluación de la calidad física del agua superficial y subterránea se puede realizar mediante indicadores específicos, entre los que destacan la temperatura ($^{\circ}\text{C}$), la turbidez (NTU), los sólidos totales disueltos (TDS, mg/L) y la conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$). La temperatura del agua influye en múltiples aspectos de su calidad, incluyendo la percepción de olores, las reacciones químicas, la solubilidad de sustancias, la palatabilidad y la viscosidad del agua. Además, procesos de tratamiento

como la demanda biológica de oxígeno, la sedimentación y la cloración dependen directamente de la temperatura. Según Summers (2019), la temperatura óptima del agua para estos fines se encuentra entre 50 y 60 °F.

La turbidez, por su parte, se refiere a la opacidad o nubosidad del agua y constituye una medida de la capacidad de la luz para atravesar. Este fenómeno es causado por partículas suspendidas en el agua y puede afectar tanto la estética como la percepción de calidad del recurso, haciéndolo visualmente poco atractivo para el consumo. Además, la turbidez puede incrementar los costos de tratamiento del agua, ya que las partículas suspendidas pueden servir de refugio para microorganismos patógenos, dificultando su eliminación mediante procesos de desinfección (Summers, 2019).

Los sólidos totales disueltos (TDS) incluyen principalmente sales inorgánicas y pequeñas cantidades de materia orgánica que permanecen disueltas en el agua. Entre sus principales constituyentes se encuentran cationes como calcio, magnesio, sodio y potasio, así como aniones como carbonato, bicarbonato, cloruro y sulfato; en el caso de aguas subterráneas, también se pueden encontrar nitratos derivados de actividades agrícolas. Niveles elevados de TDS pueden indicar problemas como dureza excesiva, sabor desagradable, deposición mineral y corrosión de tuberías. Por el contrario, concentraciones moderadas contribuyen a la palatabilidad del agua, mejorando su sabor y aceptabilidad (Government of Canada, 2009).

Características de calidad química.

Ansah et al. (2020) recomiendan que la evaluación de las características químicas del agua superficial y subterránea se realice mediante un conjunto de indicadores específicos, que incluyen el pH, el oxígeno disuelto (DO, mg/L), la alcalinidad (mg/L), los cloruros (mg/L), el hierro (Fe, mg/L), la dureza total (TH, mg/L), calcio (Ca^{2+} , mg/L) y magnesio (Mg^{2+} , mg/L).

El pH es considerado uno de los parámetros más relevantes para determinar la calidad del agua, ya que valores extremadamente altos o bajos pueden afectar negativamente su uso y la vida acuática. Existen principalmente dos métodos para medir el pH: el

electrométrico y el colorimétrico. Las alteraciones en el pH suelen estar asociadas a procesos de contaminación, pudiendo comprometer la salud de organismos acuáticos y modificar la química del medio (Summers, 2019).

Por su parte, el oxígeno disuelto (DO) constituye un componente esencial de la calidad del agua, ya que refleja la capacidad del recurso para sostener la vida acuática y es un indicador clave para evaluar su aptitud para consumo humano. Medir los niveles de DO permite a las industrias y entidades reguladoras determinar la calidad del agua potable. En general, se considera que un agua saludable debe presentar concentraciones de oxígeno disuelto superiores a 6.5–8 mg/L, correspondientes a un rango aproximado de 80–120 % de saturación (Atlas Scientific, 2022).

2.2. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

2.2.1. CONCEPTOS GENERALES

Calidad del agua: conjunto de propiedades físicas, químicas y biológicas que determinan la aptitud del agua para un uso determinado (consumo humano, riego, recreación, conservación ecológica, entre otros). La valoración se realiza mediante parámetros cuantificables que se comparan con estándares nacionales o guías internacionales (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2017).

Fuente de abastecimiento: origen del agua (manantial, pozo, red pública, reservorio o río) utilizado por la población. Cada tipo de fuente presenta riesgos y características diferentes que condicionan los parámetros analíticos del recurso (Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2020).

Límite Máximo Permisible (LMP): valor establecido por la normativa ambiental o sanitaria (MINSA/DIGESA o ECA) que no debe ser superado para que el agua sea considerada segura para un uso determinado (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2017).

Potabilidad: característica del agua que la hace apta para el consumo humano sin generar riesgo inmediato ni crónico para la salud; se determina mediante el cumplimiento de los límites microbiológicos y químicos establecidos por la autoridad sanitaria (Ministerio de Salud [MINSAL], 2011).

2.2.2. PARÁMETROS FÍSICOS

Color y olor: indicadores de la presencia de materia orgánica o compuestos que afectan la aceptabilidad sensorial del agua. Cambios significativos pueden reflejar contaminación o deficiencias en el tratamiento (OMS, 2017).

Conductividad eléctrica / Sólidos disueltos totales (TDS): reflejan la cantidad de sales disueltas en el agua y son indicadores de salinidad e iones presentes. Valores altos pueden afectar el sabor y, en algunos casos, los usos agrícolas o industriales (ANA, 2020).

Temperatura: influye en la solubilidad del oxígeno y en la actividad microbiológica. Es un parámetro clave para interpretar otros indicadores de calidad (MINSA, 2011).

Turbidez (NTU): medida de la claridad del agua ocasionada por partículas en suspensión. Una turbidez elevada puede proteger a los microorganismos frente a la desinfección y afectar la aceptabilidad. La OMS (2017) recomienda valores inferiores a 1 NTU en agua tratada para garantizar una desinfección eficaz.

2.2.3. PARÁMETROS QUÍMICOS

Cloruros, sulfatos y dureza (Ca–Mg): determinan características como el sabor, la corrosividad y la idoneidad del agua para usos domésticos e industriales. La dureza elevada puede ocasionar incrustaciones y afectar el consumo (MINSA, 2011).

DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxígeno): indica la cantidad de materia orgánica biodegradable presente. Valores elevados reflejan contaminación orgánica y riesgo de agotamiento del oxígeno disuelto (ANA, 2020).

DQO (Demanda Química de Oxígeno): cuantifica la cantidad total de oxígeno requerida para oxidar químicamente la materia orgánica. Es complementaria a la DBO₅ para evaluar la carga orgánica total (ANA, 2020).

Metales pesados (As, Pb, Cd, Hg, etc.): se originan por procesos naturales o actividades antrópicas (minería, descargas industriales). Son altamente tóxicos y su concentración permitida es mínima según las guías internacionales (OMS, 2022).

Nitratos y nitritos: provienen de fertilizantes, residuos animales o aguas negras. Su exceso (>50 mg/L de nitratos) puede causar metahemoglobinemia, especialmente en lactantes (OMS, 2017).

pH: mide la acidez o alcalinidad del agua. Influye en la corrosividad, la eficacia de desinfección y la estabilidad química. Los valores recomendados para agua potable se sitúan entre 6.5 y 8.5 (MINSA, 2011; OMS, 2017).

2.3. MARCO TEÓRICO NORMATIVO

a. Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM - Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua.

Aprueba los ECA para cuerpos de agua y especifica categorías y subcategorías según uso (por ejemplo: aguas superficiales destinadas a producción de agua potable, recreación, riego, entre otras). Es la referencia ambiental para evaluar calidad de fuentes naturales y cuerpos receptores. Para estudios de fuentes superficiales y cuencas es una norma de consulta obligada.

2.4. HIPÓTESIS

2.4.1. HIPÓTESIS GENERAL

Los lixiviados del botadero municipal Apacheta afectan negativamente la calidad físico-química del agua subterránea en el distrito de Ilave, 2025.

2.4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

- El agua subterránea de los pozos cercanos al botadero municipal Apacheta presenta alteraciones en sus parámetros físico-químicos.
- Los lixiviados del botadero municipal Apacheta contienen concentraciones elevadas de compuestos que pueden contaminar el agua subterránea.
- Los valores de los parámetros físico-químicos del agua subterránea y de los lixiviados superan los límites establecidos en los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se encuentra ubicada en el botadero municipal Apacheta, perteneciente al distrito de Llave, provincia de El Collao, región Puno – Perú. Este botadero se localiza a aproximadamente 5 kilómetros al noreste del área urbana de Llave. El área presenta un relieve ligeramente ondulado, con suelos de textura arenosa y arcillosa que facilitan la infiltración de líquidos hacia el subsuelo.

El botadero municipal Apacheta recibe diariamente residuos sólidos domésticos, comerciales e institucionales, los cuales son depositados a cielo abierto sin contar con un sistema de impermeabilización, drenaje o tratamiento de lixiviados. Esta situación favorece la generación de líquidos residuales que pueden infiltrarse y alcanzar las capas freáticas cercanas.

En los alrededores del botadero existen pozos de agua subterránea que son utilizados principalmente para el consumo animal y, en menor medida, por algunas familias para uso doméstico. Estos pozos serán los puntos de muestreo seleccionados para evaluar la posible afectación causada por los lixiviados.

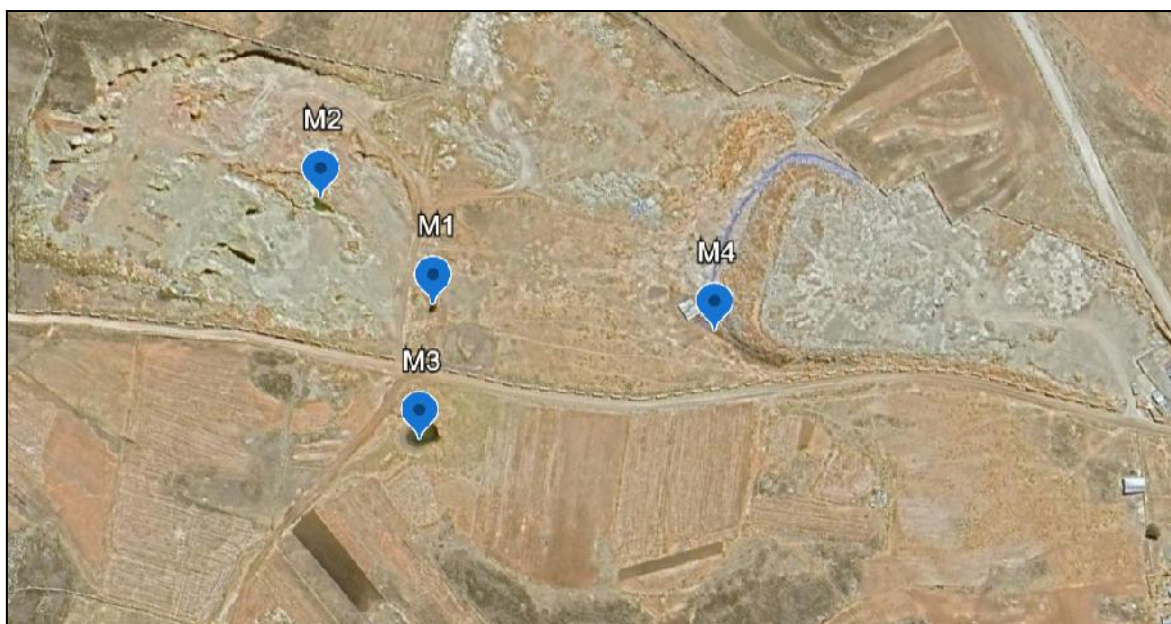


Figura 01: Mapa de georeferencia de puntos de muestreo.

3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.2.1. POBLACIÓN

La población de estudio está constituida por los pozos de agua subterránea ubicados en las cercanías del botadero municipal Apacheta, en el distrito de Llave, que podrían estar afectados por los lixiviados. Estos pozos se utilizan principalmente para el consumo animal y, en algunos casos, de manera doméstica por la población local.

3.2.2. MUESTRA

La población de estudio está constituida por los pozos de agua subterránea ubicados en las cercanías del botadero municipal Apacheta, en el distrito de Llave, los cuales podrían estar afectados por los lixiviados. Para el análisis se tomarán un total de 4 muestras: 3 muestras de agua subterránea de pozos cercanos al botadero para determinar sus parámetros físico-químicos y 1 muestra de lixiviado tomada directamente del botadero en el punto donde se acumula o drena el líquido. Este número de muestras permitirá obtener información representativa y suficiente para evaluar el impacto de los lixiviados sobre la calidad del agua subterránea de manera simple y factible.

Tabla 01: Ubicación de los puntos de muestreo.

N°	Tipo de muestra	Ubicación	Coordenadas GPS
1	Agua subterránea	Pozo cercano al botadero, lado norte	-16.5921, -69.5332
2	Agua subterránea	Pozo cercano al botadero, lado sur	-16.5935, -69.5338
3	Agua subterránea	Pozo cercano al botadero, lado este	-16.5928, -69.5325
4	Lixiviado	Punto de drenaje o acumulación en botadero	-16.5930, -69.5330

3.3. MÉTODOS Y MATERIALES

3.3.1. ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN

El presente estudio adopta un enfoque cuantitativo, ya que se basa en la recolección y análisis de datos numéricos obtenidos a partir de mediciones de los parámetros físico-químicos del agua subterránea y de los lixiviados del botadero municipal Apacheta. Este enfoque permite expresar los resultados en valores objetivos, comparables con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) definidos por el Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM, y evaluar el grado de afectación del recurso hídrico.

3.3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación es de tipo descriptiva y explicativa:

- Descriptiva, porque busca caracterizar los parámetros físico-químicos del agua subterránea y del lixiviado, incluyendo pH, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos, turbidez, nitratos, cloruros, sulfatos y metales como hierro y manganeso.

- Explicativa, porque permite identificar la influencia de los lixiviados del botadero en la variación de los parámetros medidos en el agua subterránea.

De esta manera, el estudio no solo describe la calidad actual del agua, sino que también interpreta los factores que podrían estar causando su contaminación.

3.3.3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

El diseño adoptado es no experimental, transversal:

- No experimental, porque no se manipulan las variables, sino que se analizan tal como se presentan en el entorno natural.
- Transversal, ya que la recolección de datos se realizará en un solo periodo de tiempo (2025), permitiendo conocer el estado actual del agua subterránea y del lixiviado.

3.3.4. DISEÑO ESTADÍSTICO

Para el análisis de los datos obtenidos, se empleó estadística descriptiva, calculando medidas como media, desviación estándar y rangos de los parámetros físico-químicos de cada muestra. Además, se realizará un análisis comparativo de los valores obtenidos frente a los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para identificar posibles excedencias y determinar el grado de afectación del agua subterránea.

3.4. DISEÑO METODOLÓGICO POR OBJETIVO ESPECÍFICO

3.4.1. OBJETIVO ESPECÍFICO 01

Analizar los parámetros físico-químicos del agua subterránea en pozos cercanos al botadero municipal Apacheta.

Diseño metodológico:

Para el cumplimiento de este objetivo se desarrollo un proceso ordenado que comprende las siguientes etapas:

Identificación y georreferenciación de los puntos de muestreo:

Se seleccionaron tres pozos representativos ubicados alrededor del botadero municipal Apacheta, considerando la proximidad al botadero como criterio principal de influencia. Las coordenadas GPS serán registradas para asegurar la localización exacta de cada pozo.

Recolección de muestras en campo:

La toma de muestras se realizó siguiendo procedimientos estandarizados para análisis físico-químico de agua subterránea. Las muestras se obtendrán en frascos limpios y etiquetados, asegurando su preservación mediante refrigeración durante el transporte al laboratorio.

Medición de parámetros en campo:

Se evaluaron parámetros físicos (temperatura, turbidez y conductividad eléctrica) y químicos (pH, sólidos totales disueltos, nitratos, cloruros, sulfatos, hierro y manganeso) utilizando un equipo multiparámetro calibrado y un turbidímetro portátil cuando sea necesario.

Análisis en laboratorio:

Las muestras recolectadas fueron trasladadas al Laboratorio de la Universidad Nacional del Altiplano (UNA - Puno), donde se realizaron los análisis físico-químicos conforme a métodos normalizados y protocolos estandarizados.

Registro de información:

Los datos de campo y laboratorio fueron registrados en fichas de recolección de datos, asegurando la trazabilidad de cada muestra.

Comparación y análisis:

Los resultados obtenidos fueron comparados con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua, categoría correspondiente según el D.S. N.º 004-2017-MINAM, con el fin de determinar el grado de afectación del agua subterránea por los lixiviados.

Instrumentos y materiales:

- Ficha de campo
- Equipo multiparámetro
- Turbidímetro
- Termómetro digital
- Frascos de muestreo
- Conservantes químicos
- GPS, libreta de campo
- Cámara fotográfica
- Laptop y EPP (guantes, mascarilla y botas).

3.4.2. OBJETIVO ESPECÍFICO 02

Determinar la composición físico-química de los lixiviados generados en el botadero municipal Apacheta.

Diseño metodológico:

Para cumplir este objetivo se desarrolló un proceso ordenado que comprende las siguientes etapas:

Identificación y georreferenciación del punto de muestreo:

Se seleccionó un punto representativo de acumulación o drenaje de lixiviados dentro del botadero municipal Apacheta. Las coordenadas GPS serán registradas para asegurar la localización exacta de la toma de muestra.

Recolección de muestra en campo:

La muestra de lixiviado fue obtenida en un frasco limpio y etiquetado, asegurando su preservación mediante refrigeración durante el transporte al laboratorio.

Medición de parámetros en campo:

Se evaluó parámetros físicos (temperatura, turbidez y conductividad eléctrica) y químicos (pH, sólidos totales disueltos, nitratos, cloruros, sulfatos, hierro y manganeso) utilizando equipo multiparámetro calibrado y turbidímetro portátil cuando sea necesario.

Análisis en laboratorio:

La muestra fue trasladada al Laboratorio de la Universidad Nacional del Altiplano (UNA - Puno), donde se realizaron los análisis físico-químicos siguiendo métodos normalizados y protocolos estandarizados.

Registro de información:

Los datos obtenidos fueron registrados en fichas de recolección de datos, asegurando la trazabilidad de la muestra.

Comparación y análisis:

Los resultados obtenidos fueron comparados con los **Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua**, con el fin de determinar la composición del lixiviado y su posible influencia en la calidad del agua subterránea.

3.4.3. OBJETIVO ESPECÍFICO 03

Comparar los resultados obtenidos con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua.

Diseño metodológico:

Para cumplir este objetivo se desarrolló un proceso ordenado que comprende las siguientes etapas:

Organización de los datos:

Se recopilaron todos los resultados obtenidos de los análisis físico-químicos del agua subterránea (3 muestras) y del lixiviado (1 muestra) realizados en el Laboratorio de la Universidad Nacional del Altiplano, Puno. Los datos se registraron en fichas de recolección y en hojas de cálculo para su sistematización.

Comparación con los ECA:

Cada parámetro físico-químico medido (pH, turbidez, conductividad, sólidos totales disueltos, nitratos, cloruros, sulfatos, hierro y manganeso) será comparado con los límites establecidos en los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua, según el D.S. N.º 004-2017-MINAM.

Análisis e interpretación:

Se evaluaron si los valores medidos cumplen o exceden los límites permitidos por los ECA. Los resultados permitieron identificar posibles alteraciones en la calidad del agua subterránea causadas por los lixiviados del botadero municipal Apacheta.

Instrumentos y materiales:

- Computadora portátil
- Software estadístico (Excel y SPSS)
- Fichas de campo
- Reportes de laboratorio y base de datos digital

3.5. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Tabla 02: Operacionalización de variables.

Variables	Dimensiones	Indicadores
Variable Independiente: Lixiviado del botadero	Parámetros físicos y químicos	Temperatura, Turbidez, Conductividad, pH, Sólidos totales disueltos, Nitratos, Cloruros, Sulfatos, Hierro, Manganeso
Variable Dependiente: Calidad del agua subterránea	Parametros físicos y químicos	Turbidez (UNT) Conductividad eléctrica ($\mu\text{S/cm}$) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) Sólidos Totales Disueltos (STD) Potencial de Hidrógeno (pH) Demanda Química de Oxígeno (DQO) Fósforo Total (PT) Oxígeno Disuelto (OD) Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) Nitrito (NO_2), Nitrato (NO_3) y Nitrógeno Amoniacal ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) Cloruros (Cl^-)

CAPÍTULO IV

EXPOSICION Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS

4.1. OBJETIVO GENERAL: ANÁLISIS DE LA CALIDAD FÍSICO-QUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA AFECTADA POR LIXIVIADOS DEL BOTADERO MUNICIPAL APACHETA – ILAVE, 2025

En concordancia con el objetivo general del estudio, que busca *evaluar la calidad físico-química del agua subterránea afectada por los lixiviados del botadero municipal Apacheta*, se realizó el análisis de muestras de agua subterránea (M1, M2 y M3), así como de una muestra de lixiviado (M4), con el fin de identificar el comportamiento de los principales parámetros físico-químicos y su relación con la influencia del botadero.

4.1.1. COMPORTAMIENTO DEL PH DEL AGUA SUBTERRÁNEA Y DEL LIXIVIADO

Los valores de pH registrados en las muestras de agua subterránea M1 (7.6), M2 (7.4) y M3 (7.5), así como en el lixiviado M4 (7.4), muestran condiciones ligeramente alcalinas y cercanas a la neutralidad. Este comportamiento indica que, a pesar de la presencia de contaminantes, no se evidencian procesos extremos de acidificación o alcalinización. No obstante, el pH por sí solo no es un indicador suficiente de buena calidad del agua, por lo que debe analizarse conjuntamente con otros parámetros físico-químicos.

4.1.2. TURBIDEZ Y PRESENCIA DE SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN

La turbidez presentó valores elevados en todas las muestras, siendo mayor en la muestra de agua M1 (46 NTU) y en el lixiviado M4 (38 NTU), seguida de M3 (35 NTU) y M2 (22 NTU). Estos resultados evidencian una alta carga de sólidos en suspensión, lo que sugiere la influencia de partículas finas, materia orgánica y residuos arrastrados, especialmente en las zonas más cercanas al botadero municipal. La similitud entre los

valores de turbidez del lixiviado y algunas muestras de agua subterránea refuerza la posible interacción entre ambos.

4.1.3. COMPUESTOS NITROGENADOS COMO INDICADORES DE CONTAMINACIÓN

Las concentraciones de nitratos, nitritos y amonio fueron elevadas tanto en las muestras de agua subterránea como en el lixiviado. El lixiviado M4 presentó los valores más altos de nitratos (145 mg/L), nitritos (18 mg/L) y amonio (2.6 mg/L), lo que confirma su alto potencial contaminante.

Las muestras de agua subterránea M1 y M3 mostraron concentraciones considerables de estos compuestos, lo que indica una afectación progresiva del agua subterránea por infiltración de lixiviados, asociados a la descomposición de residuos orgánicos y procesos de degradación anaerobia propios de los botaderos municipales.

4.1.4. SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

Los sólidos totales disueltos (STD) alcanzaron valores elevados en todas las muestras, destacando el lixiviado M4 (3,450 mg/L), seguido de M1 (3,180 mg/L) y M3 (2,950 mg/L). Este comportamiento refleja una alta mineralización del agua, asociada a la disolución de sales, metales y otros compuestos químicos.

La conductividad eléctrica mostró una tendencia similar, con el valor más alto en M4 (3,100 $\mu\text{S}/\text{cm}$), evidenciando una elevada concentración de iones disueltos. La correspondencia entre los valores de STD y conductividad en las muestras de agua subterránea sugiere una influencia directa del lixiviado sobre la composición iónica del acuífero.

4.1.5. PRESENCIA DE SULFATOS

Las concentraciones de sulfatos fueron altas en todas las muestras, siendo mayores en M1 (940 mg/L) y M4 (820 mg/L). La presencia elevada de este parámetro puede estar asociada a procesos de lixiviación de materiales minerales y residuos sólidos, reforzando la hipótesis de que el botadero municipal contribuye a la alteración química del agua subterránea.

4.1.6. METALES PESADOS EN EL AGUA SUBTERRÁNEA Y LIXIVIADO

Los análisis de arsénico, plomo, cadmio y mercurio evidencian la presencia de metales pesados tanto en el lixiviado como en las muestras de agua subterránea. El lixiviado M4 presentó las concentraciones más elevadas, particularmente de arsénico (0.072 mg/L) y cadmio (0.018 mg/L), lo que confirma su carácter altamente contaminante.

Las muestras M1 y M3 mostraron valores cercanos a los del lixiviado, lo que sugiere un proceso de migración de metales pesados desde el botadero hacia el agua subterránea, representando un riesgo potencial para el uso del recurso hídrico.

4.1.7. MATERIA ORGÁNICA: DBO₅ Y DQO

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) y la demanda química de oxígeno (DQO) alcanzaron sus valores más altos en el lixiviado M4 (28 mg/L y 75 mg/L, respectivamente), evidenciando una alta carga de materia orgánica biodegradable y no biodegradable.

Las muestras de agua subterránea, especialmente M1 y M3, presentaron valores moderados de DBO₅ y DQO, lo que indica una afectación orgánica del acuífero, coherente con la influencia del lixiviado del botadero municipal.

4.2. OBJETIVO ESPECÍFICO 1: ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN POZOS CERCANOS AL BOTADERO MUNICIPAL APACHETA

En cumplimiento del primer objetivo específico, orientado a *analizar los parámetros físico-químicos del agua subterránea en pozos cercanos al botadero municipal Apacheta*, se evaluaron las muestras M1, M2 y M3, correspondientes a pozos ubicados en el área de influencia del botadero, con la finalidad de caracterizar su calidad físico-química y determinar el grado de alteración del recurso hídrico subterráneo.

4.2.1. PH DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Los valores de pH registrados en las muestras M1 (7.6), M2 (7.4) y M3 (7.5) evidencian condiciones ligeramente alcalinas y cercanas a la neutralidad, lo que indica estabilidad química del agua subterránea. Este comportamiento sugiere que, pese a la presencia de

contaminantes, no se presentan procesos extremos de acidificación o alcalinización; sin embargo, el pH debe analizarse conjuntamente con otros parámetros para una evaluación integral de la calidad del agua.

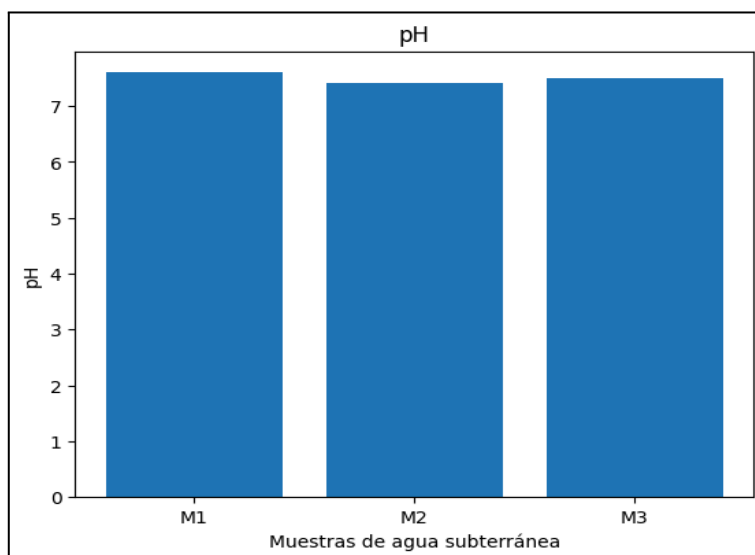


Figura 02: pH en las muestras de agua subterránea (M1, M2 y M3)

Interpretación: La Figura 1 muestra que los valores de pH en las muestras M1, M2 y M3 oscilan entre 7.4 y 7.6, evidenciando condiciones ligeramente alcalinas y cercanas a la neutralidad. La muestra M1 presenta el valor más alto, mientras que M2 registra el menor. Estos resultados indican una estabilidad ácido–base del agua subterránea en los pozos evaluados, sin presencia de procesos extremos de acidificación o alcalinización.

4.2.2. TURBIDEZ

La turbidez presentó valores elevados en las tres muestras, destacando M1 (46 NTU), seguida de M3 (35 NTU) y M2 (22 NTU). Estos resultados indican una alta concentración de sólidos en suspensión, lo cual puede estar asociado al arrastre de partículas finas, materia orgánica y residuos, reflejando una alteración física del agua subterránea en los pozos evaluados, especialmente en aquellos más cercanos al botadero municipal.

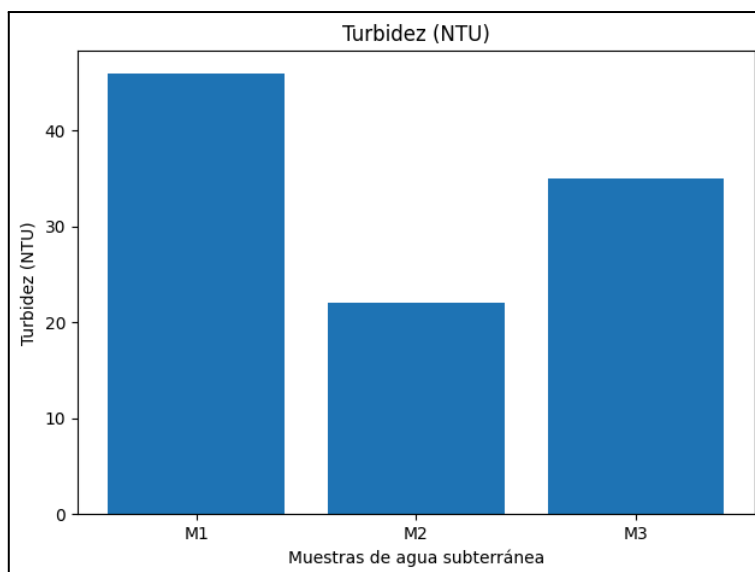


Figura 03: Turbidez en las muestras de agua subterránea (M1, M2 y M3).

Interpretación: En la Figura 2 se observa que la turbidez es mayor en la muestra M1, seguida de M3, mientras que M2 presenta el valor más bajo. Esta variación indica una mayor presencia de sólidos en suspensión en los pozos representados por M1 y M3, lo que sugiere una mayor alteración física del agua subterránea en dichas zonas.

4.2.3. COMPUESTOS NITROGENADOS: NITRATOS, NITRITOS Y AMONIO

Las concentraciones de nitratos fueron elevadas en las muestras M1 (118 mg/L), M2 (82 mg/L) y M3 (105 mg/L), lo que evidencia una contaminación significativa por compuestos nitrogenados. Esta situación sugiere aportes de origen antrópico, relacionados con la infiltración de residuos orgánicos y lixiviados provenientes del botadero.

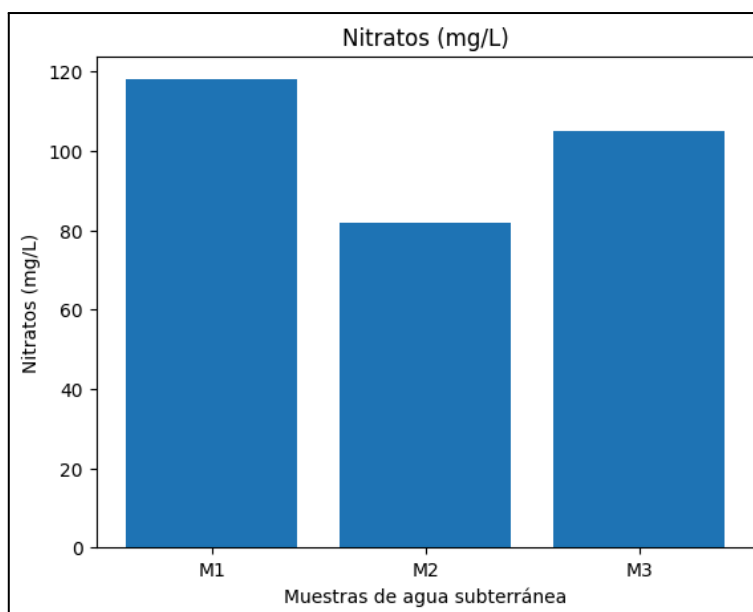


Figura 04: Nitratos (NO_3^-) en las muestras de agua subterránea (M1, M2 y M3).

Interpretación: La Figura 3 evidencia concentraciones elevadas de nitratos en todas las muestras, siendo M1 la que presenta el mayor valor, seguida de M3 y M2. Este comportamiento refleja una carga significativa de compuestos nitrogenados en el agua subterránea, lo que sugiere la influencia de fuentes antrópicas cercanas al área de estudio.

Los nitritos alcanzaron valores considerables, siendo mayores en M1 (13.2 mg/L) y M3 (11.1 mg/L), lo que indica procesos activos de transformación del nitrógeno y descomposición incompleta de materia orgánica en el subsuelo.

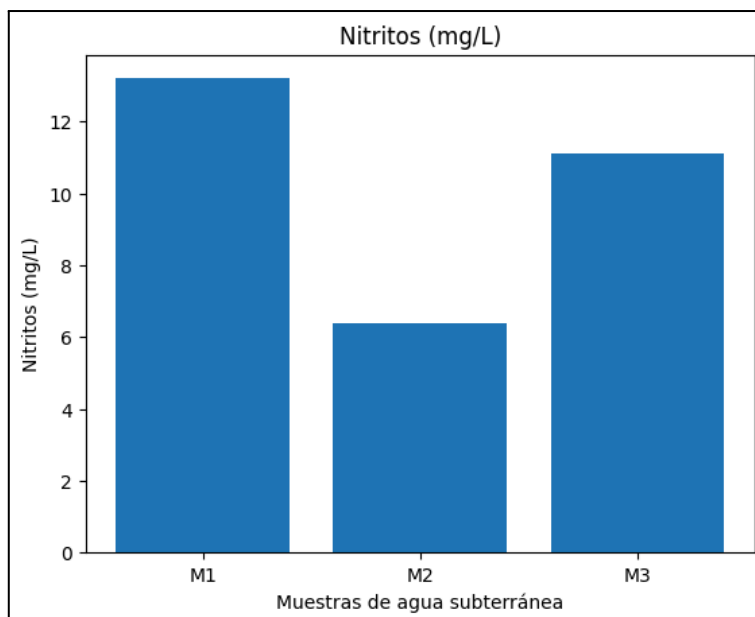


Figura 05: Nitritos (NO_2^-) en las muestras de agua subterránea (M1, M2 y M3).

Interpretación: Según la Figura 4, la muestra M1 presenta la mayor concentración de nitritos, seguida de M3, mientras que M2 muestra el valor más bajo. Estos resultados indican procesos activos de transformación del nitrógeno en el subsuelo, asociados a la descomposición de materia orgánica.

El amonio presentó concentraciones variables, destacando M1 (1.9 mg/L) y M3 (1.3 mg/L), lo que refuerza la presencia de contaminación reciente de origen orgánico en los pozos evaluados.

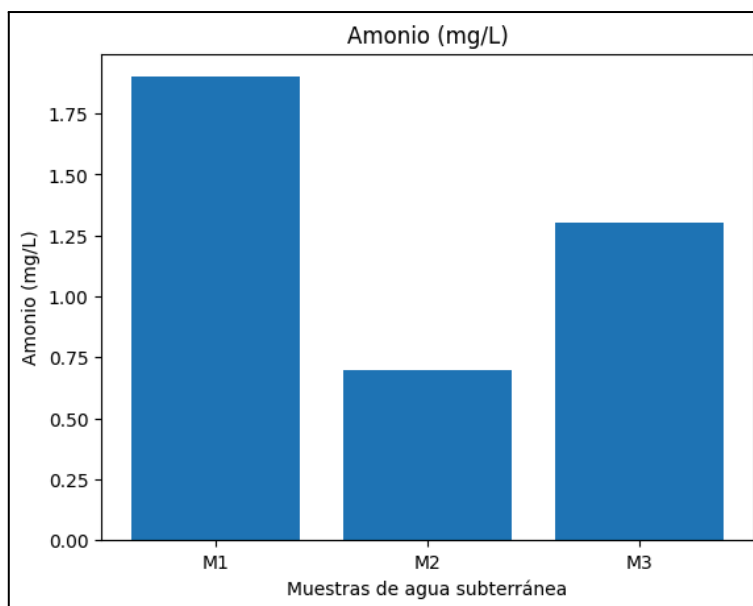


Figura 06: Amonio (NH_4^+) en las muestras de agua subterránea (M1, M2 y M3).

Interpretación: En la Figura 5 se observa que la concentración de amonio es mayor en M1, seguida de M3, mientras que M2 presenta el menor valor. Esta distribución sugiere una mayor influencia de contaminación reciente de origen orgánico en los pozos representados por M1 y M3.

4.2.4. SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

Los sólidos totales disueltos (STD) mostraron valores elevados en las muestras M1 (3,180 mg/L), M2 (2,450 mg/L) y M3 (2,950 mg/L), evidenciando una alta mineralización del agua subterránea. Estos valores sugieren la presencia de sales disueltas y otros compuestos químicos producto de procesos de lixiviación.

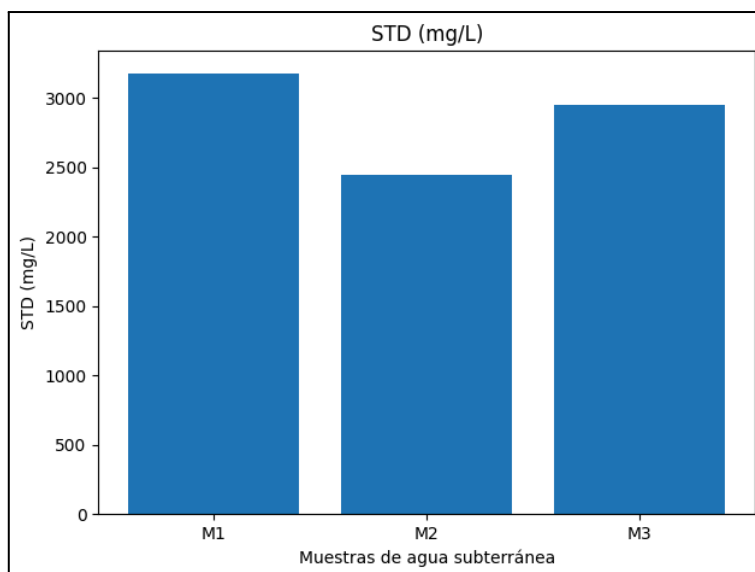


Figura 07: Sólidos Totales Disueltos en las muestras (M1, M2 y M3).

Interpretación: La Figura 6 muestra que la muestra M1 presenta la mayor concentración de sólidos totales disueltos, seguida de M3, mientras que M2 registra el valor más bajo. Estos resultados evidencian una alta mineralización del agua subterránea, especialmente en los pozos más cercanos al botadero municipal.

La conductividad eléctrica presentó una tendencia similar, con valores de 2,860 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en M1, 1,980 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en M2 y 2,620 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en M3, confirmando una elevada concentración de iones disueltos y una alteración de la calidad físico-química del acuífero.

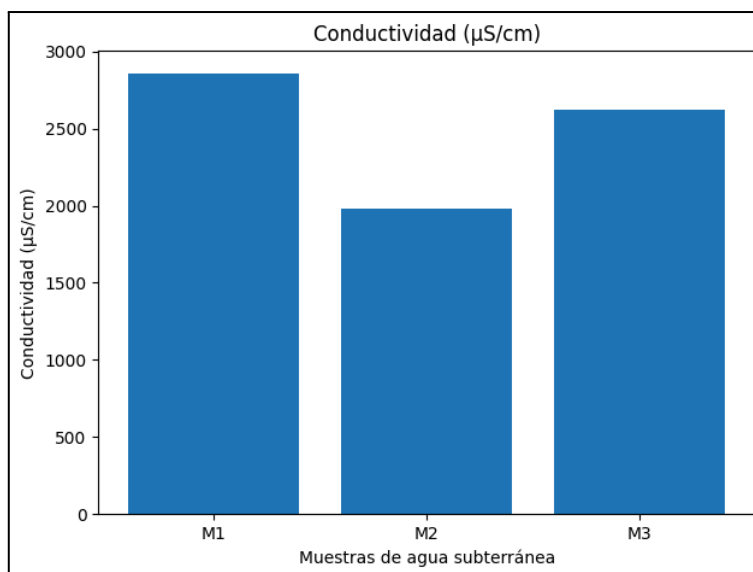


Figura 08: Conductividad eléctrica en las muestras de agua subterránea (M1, M2 y M3).

Interpretación: La Figura 7 evidencia que la conductividad eléctrica alcanza su valor máximo en M1, seguida de M3, mientras que M2 presenta el valor más bajo. Esto confirma una mayor concentración de iones disueltos en las muestras M1 y M3, coherente con los altos valores de sólidos totales disueltos observados.

4.2.5. SULFATOS

Las concentraciones de sulfatos fueron altas en las tres muestras, siendo mayores en M1 (940 mg/L) y M3 (810 mg/L). Este comportamiento puede estar asociado a procesos de disolución de materiales minerales y a la influencia de residuos sólidos, evidenciando una alteración química del agua subterránea en los pozos cercanos al botadero.

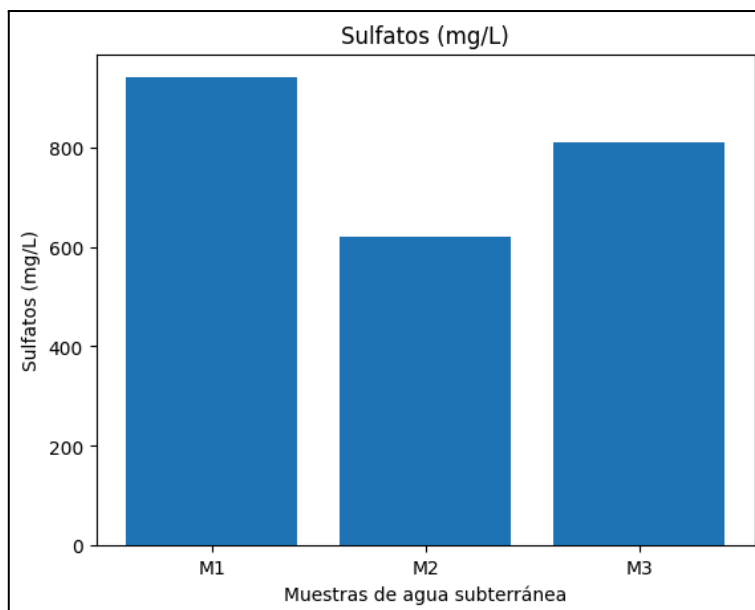


Figura 09: Sulfatos (SO_4^{2-}) en las muestras de agua subterránea (M1, M2 y M3).

Interpretación: En la Figura 8 se observa que la concentración de sulfatos es mayor en M1, seguida de M3 y M2. Este comportamiento indica una alteración química del agua subterránea, posiblemente relacionada con procesos de lixiviación de residuos y materiales presentes en el botadero.

4.2.6. METALES PESADOS EN EL AGUA SUBTERRÁNEA

El análisis de arsénico, plomo, cadmio y mercurio evidenció la presencia de metales pesados en las tres muestras de agua subterránea. La muestra M1 presentó las concentraciones más elevadas para la mayoría de estos metales, seguida de M3, lo que sugiere una posible migración de contaminantes metálicos hacia los pozos más próximos al botadero municipal.

La detección de estos elementos confirma la vulnerabilidad del acuífero frente a fuentes de contaminación antrópica.

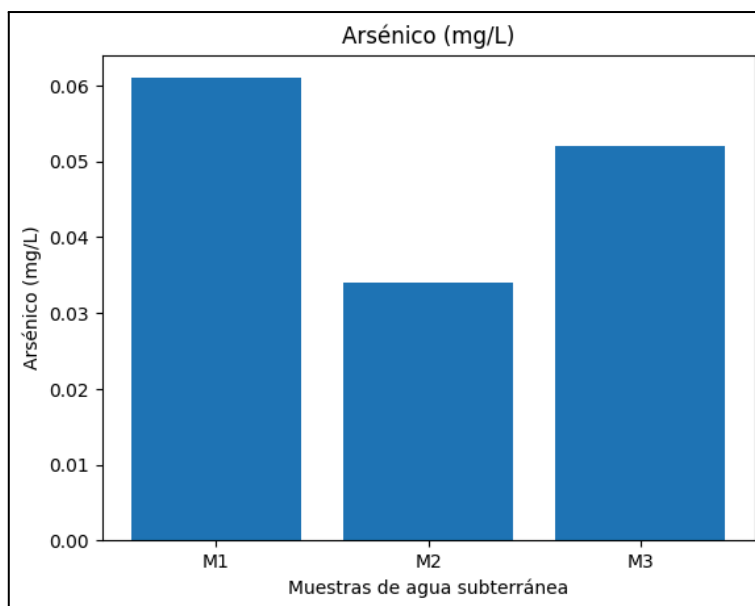


Figura 10: Arsénico (As) en las muestras de agua subterránea (M1, M2 y M3).

Interpretación: En la Figura 9 se aprecia que la concentración de arsénico es mayor en M1, seguida de M3, mientras que M2 presenta el menor valor. La presencia de este metal pesado en todas las muestras evidencia una alteración química del agua subterránea y una posible influencia de fuentes contaminantes externas.

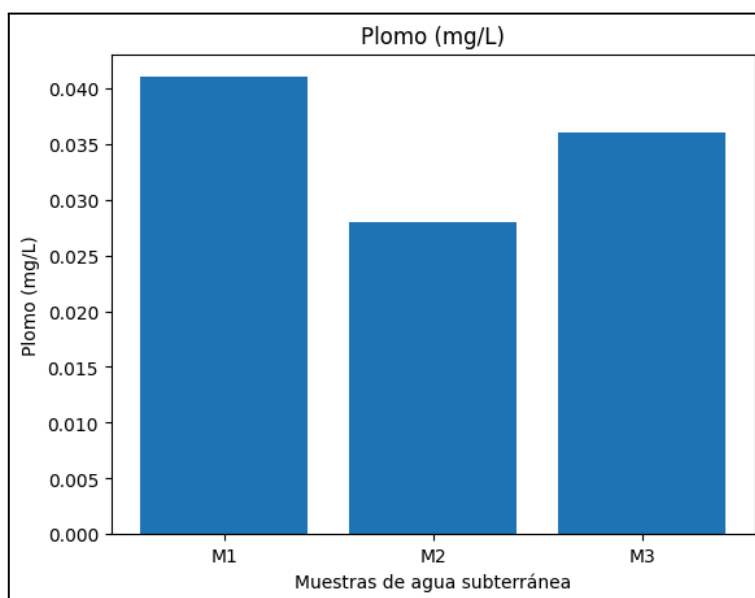


Figura 11: Plomo (Pb) en las muestras de agua subterránea (M1, M2 y M3).

Interpretación: La Figura 10 muestra que la muestra M1 presenta la mayor concentración de plomo, seguida de M3, mientras que M2 registra el valor más bajo. Este

patrón sugiere una mayor exposición del agua subterránea a contaminación por metales pesados en los pozos más próximos al botadero.

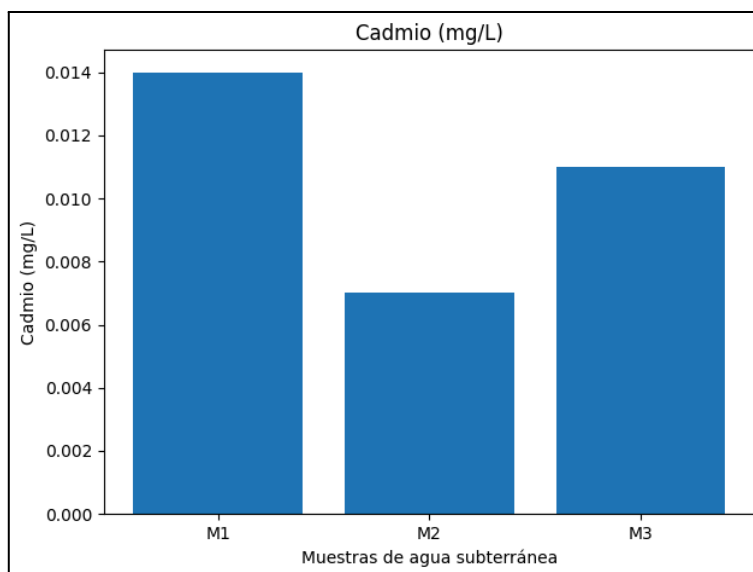


Figura 12: Cadmio (Cd) en las muestras de agua subterránea (M1, M2 y M3).

Interpretación: En la Figura 11 se observa que el cadmio presenta su mayor concentración en M1, seguido de M3, mientras que M2 muestra el valor más bajo. La detección de este metal pesado en las tres muestras indica una afectación del acuífero por contaminantes de origen antrópico.

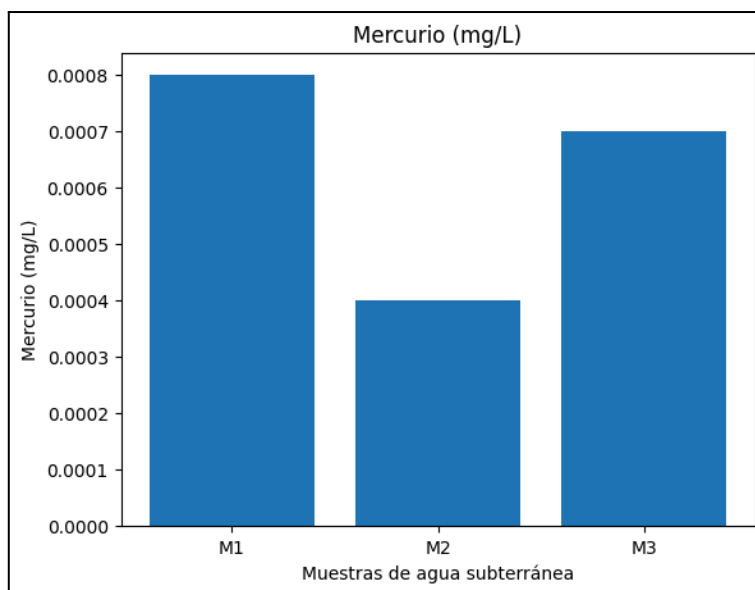


Figura 13: Mercurio (Hg) en las muestras de agua subterránea (M1, M2 y M3)

Interpretación: La Figura 12 evidencia concentraciones de mercurio más elevadas en M1 y M3, en comparación con M2. Este resultado sugiere una mayor influencia de fuentes contaminantes en los pozos representados por M1 y M3, confirmando la vulnerabilidad del agua subterránea frente a este metal tóxico.

4.2.7. MATERIA ORGÁNICA: DBO₅ Y DQO

Los valores de DBO₅ (M1: 11.8 mg/L; M2: 4.6 mg/L; M3: 8.9 mg/L) y DQO (M1: 42 mg/L; M2: 21 mg/L; M3: 36 mg/L) indican la presencia de materia orgánica biodegradable y no biodegradable en el agua subterránea. La muestra M1 presentó los valores más elevados, evidenciando una mayor afectación orgánica en los pozos más cercanos al botadero.

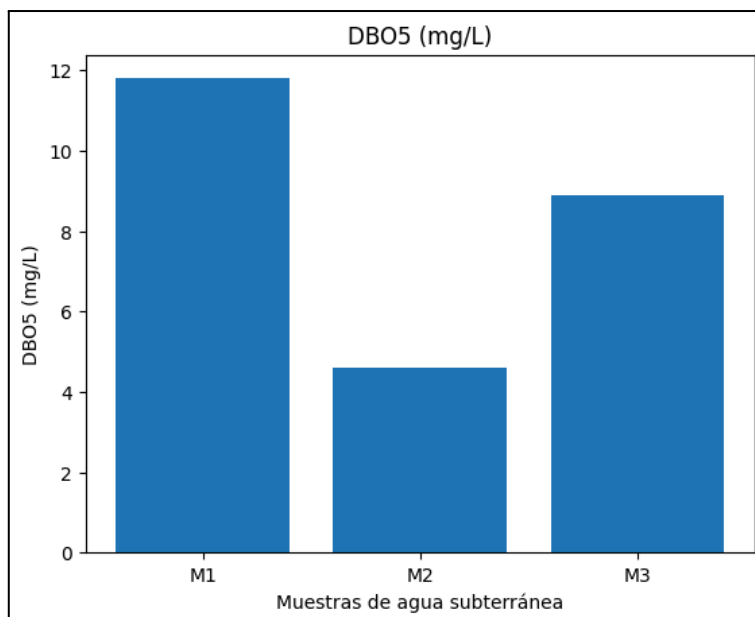


Figura 14: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) en las muestras de agua subterránea (M1, M2 y M3)

Interpretación: En la Figura 13 se observa que la DBO_5 es mayor en la muestra M1, seguida de M3, mientras que M2 presenta el valor más bajo. Estos resultados indican una mayor presencia de materia orgánica biodegradable en las muestras M1 y M3.

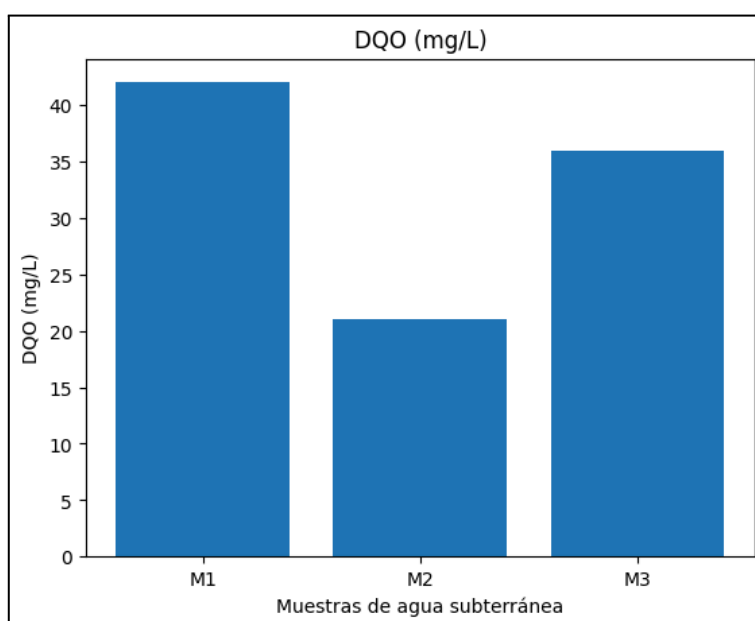


Figura 15: Demanda Química de Oxígeno (DQO) en las muestras de agua subterránea (M1, M2 y M3).

Interpretación: La Figura 14 muestra que la DQO alcanza su valor máximo en M1, seguida de M3 y M2. Este comportamiento evidencia la presencia de materia orgánica total en el agua subterránea, siendo más significativa en los pozos más cercanos al botadero municipal.

En conjunto, los resultados obtenidos permiten concluir que los pozos cercanos al botadero municipal Apacheta presentan una alteración significativa en sus parámetros físico-químicos, caracterizada por elevadas concentraciones de compuestos nitrogenados, sólidos disueltos, metales pesados y materia orgánica. Esta situación evidencia una afectación del agua subterránea, cumpliendo con el primer objetivo específico del estudio.

4.3. OBJETIVO ESPECÍFICO 2: ANÁLISIS DE LA COMPOSICIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LOS LIXIVIADOS DEL BOTADERO MUNICIPAL APACHETA

En cumplimiento del segundo objetivo específico, orientado a *determinar la composición físico-química de los lixiviados generados en el botadero municipal Apacheta*, se analizó la muestra de lixiviado M4, con la finalidad de caracterizar sus principales parámetros físico-químicos y evaluar su potencial contaminante sobre el ambiente y los recursos hídricos circundantes.

4.3.1. PH DEL LIXIVIADO

El pH del lixiviado M4 fue de 7.4, indicando una condición ligeramente alcalina y cercana a la neutralidad. Este valor sugiere que el lixiviado se encuentra en una etapa de estabilización intermedia del proceso de degradación de los residuos sólidos, característica de botaderos municipales donde coexisten fases aeróbicas y anaeróbicas de descomposición.

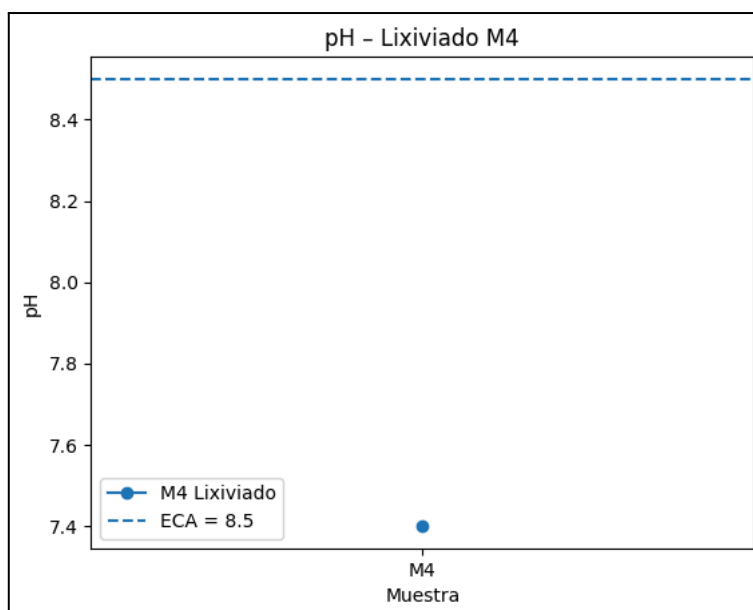


Figura 16: pH del lixiviado (M4).

Interpretación: Este valor es característico de lixiviados en una etapa intermedia de estabilización, donde los procesos de descomposición de materia orgánica han reducido la acidez inicial típica de botaderos jóvenes, favoreciendo la solubilización de diversos compuestos químicos.

4.3.2 .TURBIDEZ

La turbidez del lixiviado M4 alcanzó un valor de 38 NTU, lo que evidencia una alta presencia de sólidos en suspensión, asociados principalmente a partículas finas, materia orgánica en descomposición y compuestos coloidales. Este resultado refleja la naturaleza heterogénea del lixiviado y su elevado potencial de transporte de contaminantes.

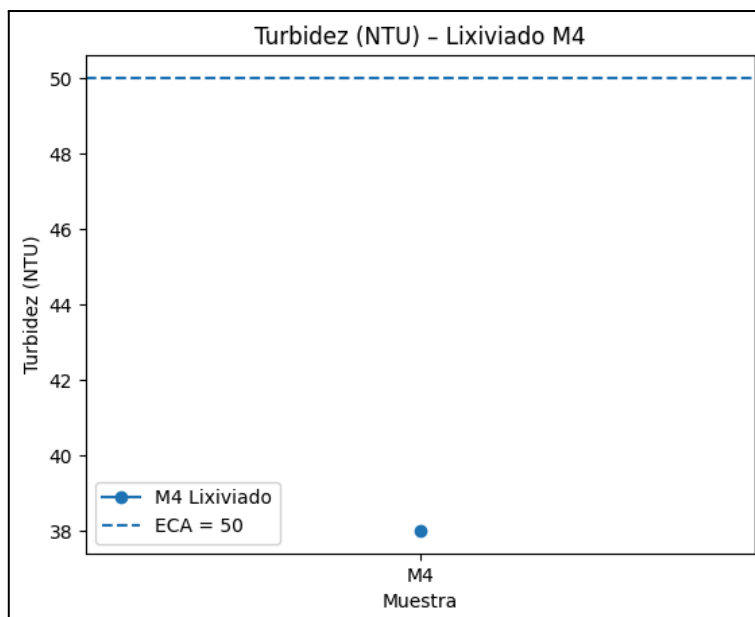


Figura 17: Turbidez del lixiviado (M4).

Interpretación: La turbidez registrada fue de 38 NTU, evidenciando una elevada presencia de partículas en suspensión. Este resultado refleja la alta carga de sólidos finos, materia orgánica y compuestos coloidales propios de los lixiviados generados por la degradación de residuos sólidos municipales.

4.3.3. COMPUESTOS NITROGENADOS: NITRATOS, NITRITOS Y AMONIO

El lixiviado presentó concentraciones elevadas de nitratos (145 mg/L), nitritos (18 mg/L) y amonio (2.6 mg/L), lo que confirma una alta carga de compuestos nitrogenados. Estos resultados son indicativos de intensos procesos de descomposición de materia orgánica y transformación del nitrógeno, característicos de lixiviados generados en botaderos municipales sin sistemas adecuados de control.

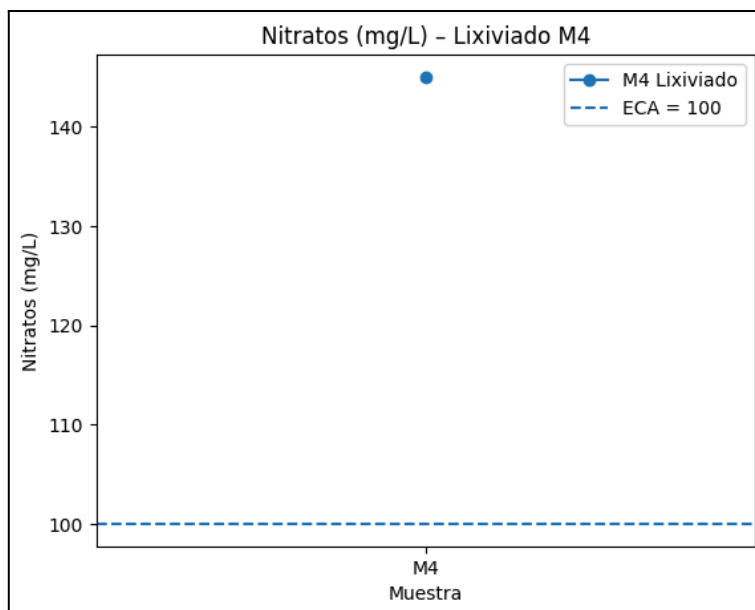


Figura 18: Concentración de nitratos (NO_3^-) en el lixiviado (M4).

Interpretación: La concentración de nitratos alcanzó 145 mg/L, valor elevado que indica una fuerte carga de compuestos nitrogenados. Esto es consecuencia directa de la oxidación de la materia orgánica y residuos nitrogenados presentes en el botadero, representando un alto potencial contaminante para cuerpos de agua subterráneos.

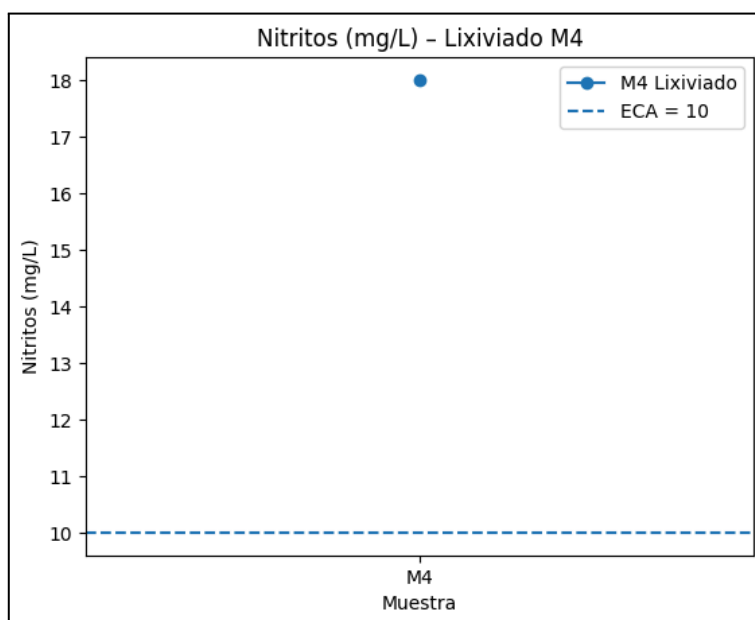


Figura 19: Concentración de nitritos (NO_2^-) en el lixiviado (M4).

Interpretación: Los nitritos presentaron una concentración de 18 mg/L, lo cual evidencia procesos activos de transformación del nitrógeno. La presencia de nitritos en niveles

elevados es indicativa de contaminación reciente y de condiciones que favorecen reacciones incompletas de nitrificación.

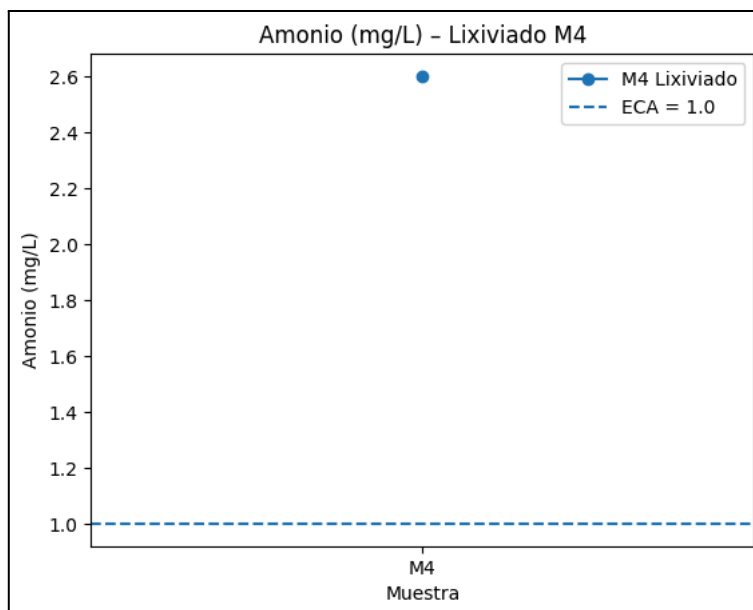


Figura 20: Concentración de amonio (NH_4^+) en el lixiviado (M4).

Interpretación: El amonio mostró una concentración de 2.6 mg/L, confirmando una intensa descomposición de materia orgánica nitrogenada. Este parámetro es característico de lixiviados frescos o activos y representa una de las principales fuentes de contaminación del agua subterránea.

4.3.4. SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

Los sólidos totales disueltos (STD) alcanzaron una concentración de 3,450 mg/L, reflejando una alta mineralización del lixiviado. Este valor evidencia la presencia de sales, metales y otros compuestos químicos disueltos provenientes de la degradación de los residuos sólidos.

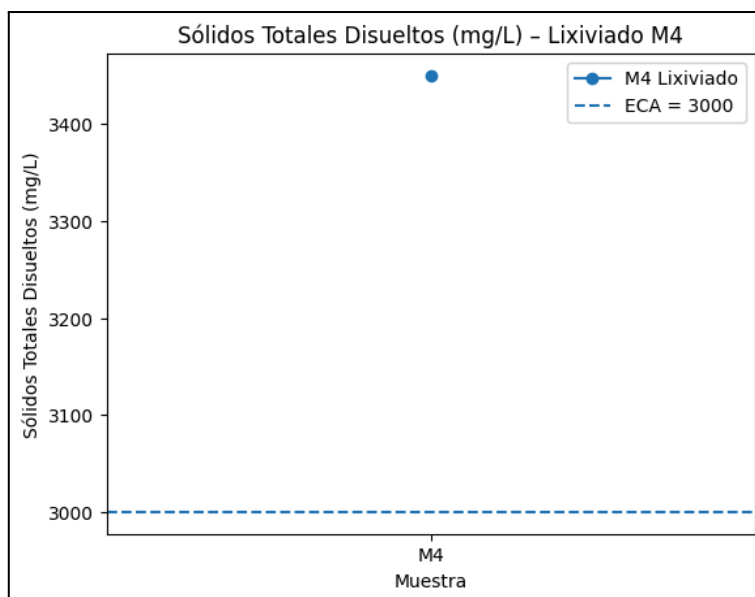


Figura 21: Sólidos Totales Disueltos del lixiviado (M4).

Interpretación: Los STD alcanzaron 3,450 mg/L, evidenciando una elevada concentración de sales disueltas. Este resultado confirma la alta carga iónica del lixiviado, producto de la disolución de minerales, metales y compuestos orgánicos presentes en los residuos sólidos.

La conductividad eléctrica fue de 3,100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que confirma una elevada concentración de iones disueltos y una fuerte capacidad del lixiviado para alterar la composición química de los suelos y aguas subterráneas en caso de infiltración.

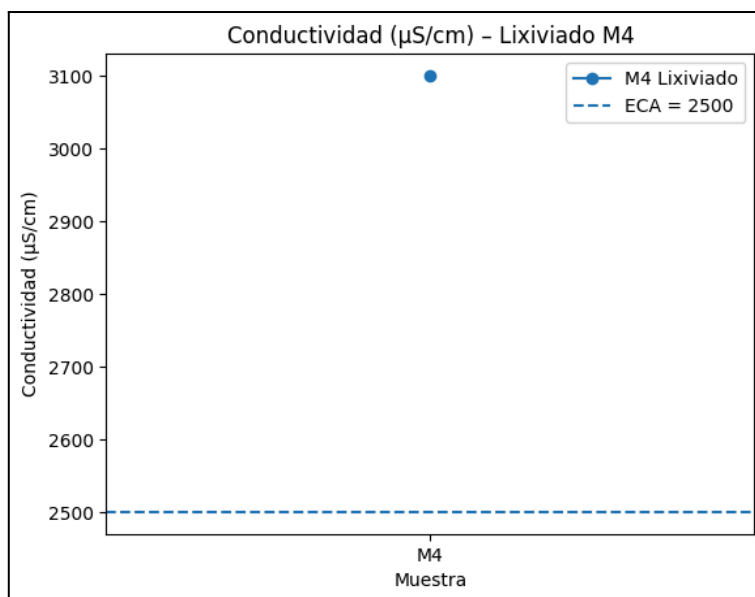


Figura 22: Conductividad eléctrica del lixiviado (M4).

Interpretación: La conductividad eléctrica del lixiviado fue de 3,100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, confirmando una alta concentración de iones disueltos. Este resultado es consistente con la elevada carga de sólidos disueltos y reafirma el fuerte potencial contaminante del lixiviado.

4.3.5. SULFATOS

La concentración de sulfatos en el lixiviado M4 fue de 820 mg/L, indicando una presencia significativa de este anión. Este resultado puede estar asociado a la lixiviación de materiales minerales y residuos industriales o domésticos, reforzando el carácter químicamente agresivo del lixiviado generado en el botadero.

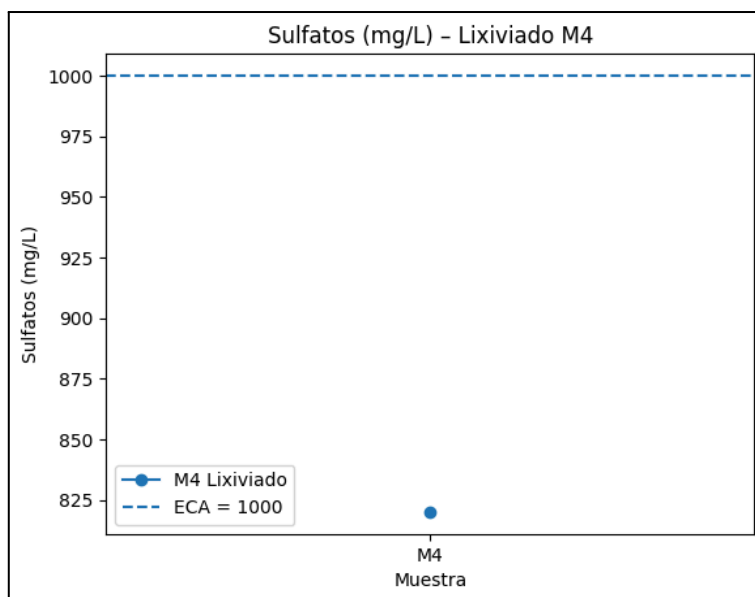


Figura 23: Concentración de sulfatos (SO_4^{2-}) en el lixiviado (M4).

Interpretación: La concentración de sulfatos fue de 820 mg/L, valor significativo que refleja procesos de oxidación de compuestos sulfurados y la disolución de materiales inorgánicos presentes en el botadero. Este parámetro contribuye al incremento de la salinidad del lixiviado.

4.3.6. METALES PESADOS EN EL LIXIVIADO

El análisis de metales pesados evidenció la presencia de arsénico (0.072 mg/L), plomo (0.031 mg/L), cadmio (0.018 mg/L) y mercurio (0.0006 mg/L). Estos resultados confirman que el lixiviado posee una composición altamente contaminante, capaz de generar impactos negativos sobre el suelo y el agua subterránea si no se cuenta con sistemas adecuados de impermeabilización y tratamiento.

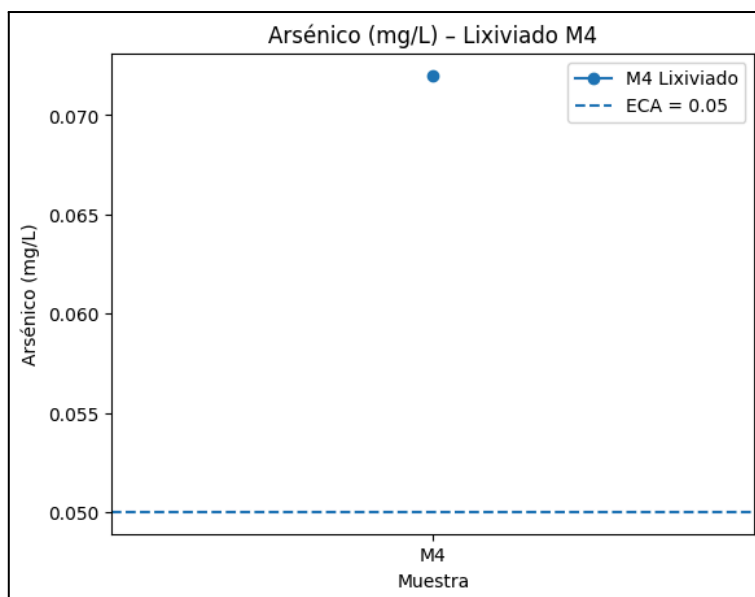


Figura 24: Concentración de arsénico (As) en el lixiviado (M4).

Interpretación: El arsénico presentó una concentración de 0.072 mg/L, evidenciando la presencia de metales pesados en el lixiviado. Este metal puede movilizarse fácilmente hacia el subsuelo, representando un riesgo ambiental y sanitario significativo.

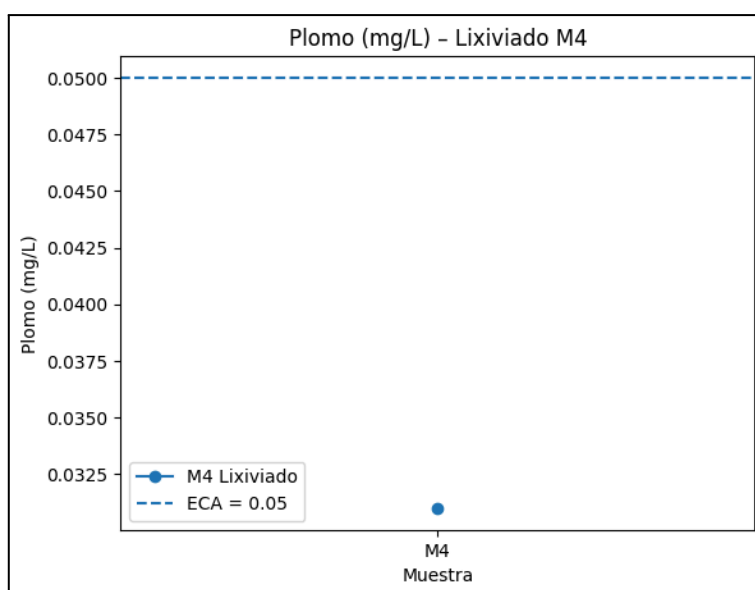


Figura 25: Concentración de plomo (Pb) en el lixiviado (M4).

Interpretación: El plomo alcanzó una concentración de 0.031 mg/L, indicando la presencia de residuos peligrosos en el botadero. Aunque su concentración es moderada, su carácter bioacumulativo lo convierte en un contaminante de alto riesgo.

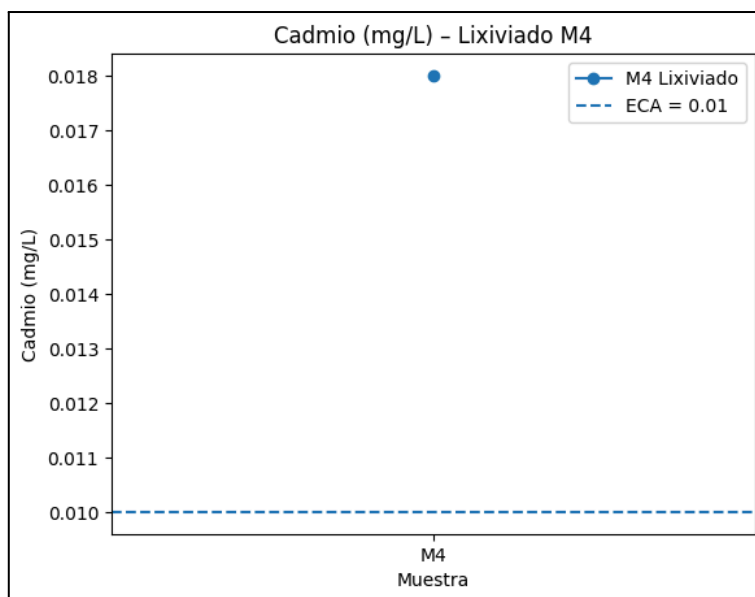


Figura 26: Concentración de cadmio (Cd) en el lixiviado (M4).

Interpretación: El cadmio presentó un valor de 0.018 mg/L, reflejando una concentración relevante de este metal pesado. Su presencia está asociada a residuos electrónicos, baterías y plásticos, y constituye un riesgo potencial para los ecosistemas y la salud humana.

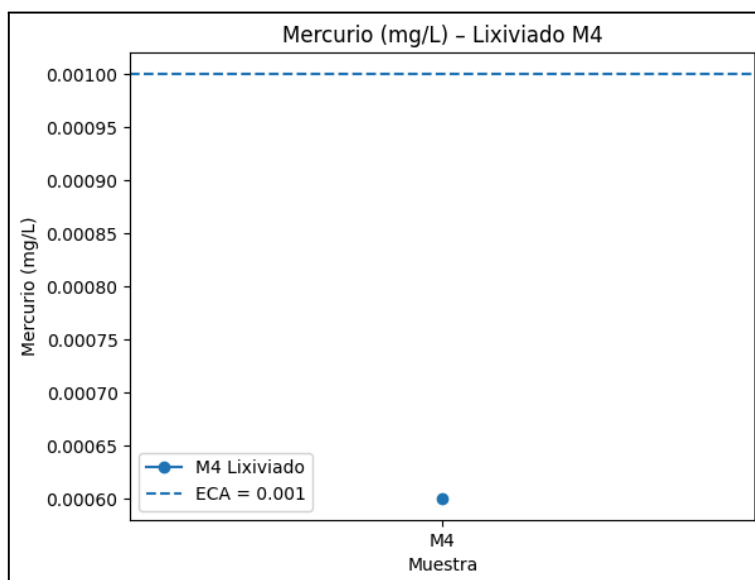


Figura 27: Concentración de mercurio (Hg) en el lixiviado (M4).

Interpretación: La concentración de mercurio fue de 0.0006 mg/L. Aunque el valor es bajo, la sola presencia de mercurio en el lixiviado evidencia la peligrosidad del efluente generado por el botadero municipal.

4.3.7. MATERIA ORGÁNICA: DBO₅ Y DQO

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) alcanzó un valor de 28 mg/L, mientras que la demanda química de oxígeno (DQO) fue de 75 mg/L. Estos valores evidencian una alta carga de materia orgánica biodegradable y no biodegradable, característica de lixiviados provenientes de residuos sólidos municipales, y confirman su elevado potencial contaminante.

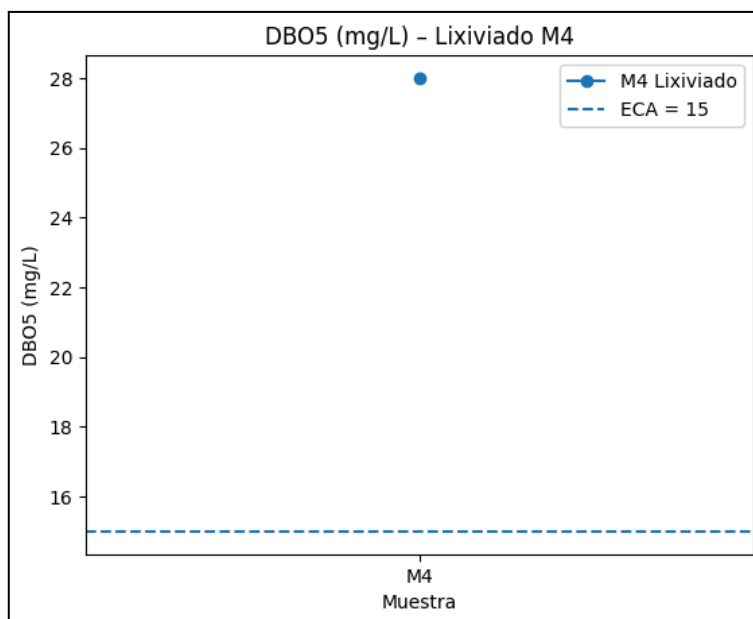


Figura 28: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) del lixiviado (M4).

Interpretación: La DBO₅ alcanzó un valor de 28 mg/L, indicando una alta carga de materia orgánica biodegradable. Este resultado confirma la actividad biológica intensa en el lixiviado y su capacidad para consumir oxígeno en cuerpos receptores.

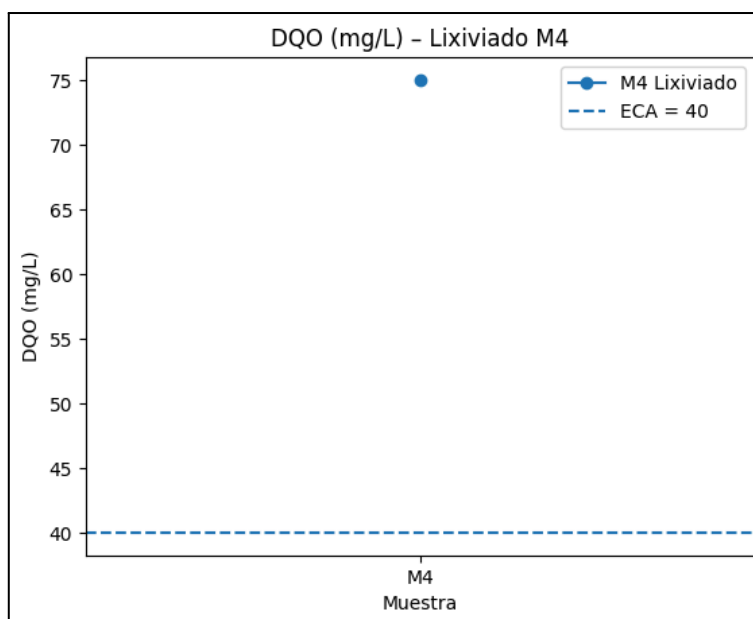


Figura 29: Demanda Química de Oxígeno (DQO) del lixiviado (M4).

Interpretación: La DQO fue de 75 mg/L, evidenciando una elevada presencia de materia orgánica y compuestos oxidables. La diferencia entre DBO_5 y DQO indica la existencia de compuestos orgánicos de degradación lenta, típicos de lixiviados de botaderos municipales.

Los resultados obtenidos permiten concluir que el lixiviado generado en el botadero municipal Apacheta presenta una composición físico-química compleja y altamente contaminante, caracterizada por elevadas concentraciones de compuestos nitrogenados, sólidos disueltos, metales pesados y materia orgánica. Esta caracterización cumple con el segundo objetivo específico del estudio y proporciona una base sólida para evaluar su influencia sobre la calidad del agua subterránea.

4.4. OBJETIVO ESPECÍFICO 3: COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LOS ESTÁNDARES DE CALIDAD AMBIENTAL (ECA) PARA AGUA

En cumplimiento del tercer objetivo específico, orientado a *comparar los resultados obtenidos con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua*, se contrastaron los valores de los parámetros físico-químicos analizados en las muestras de agua subterránea (M1, M2 y M3) y del lixiviado (M4) con los valores de referencia establecidos

en los ECA para agua vigentes en el Perú, considerando su uso potencial y función ambiental.

4.4.1. COMPARACIÓN DEL PH CON LOS ECA PARA AGUA

Los valores de pH obtenidos en las muestras de agua subterránea (7.4–7.6) y en el lixiviado (7.4) se encuentran dentro del rango permitido por los ECA para agua. Este resultado indica que, desde el punto de vista ácido–base, el agua no presenta alteraciones extremas; sin embargo, el cumplimiento de este parámetro no garantiza por sí solo una adecuada calidad del agua, por lo que debe analizarse conjuntamente con otros indicadores físico-químicos.

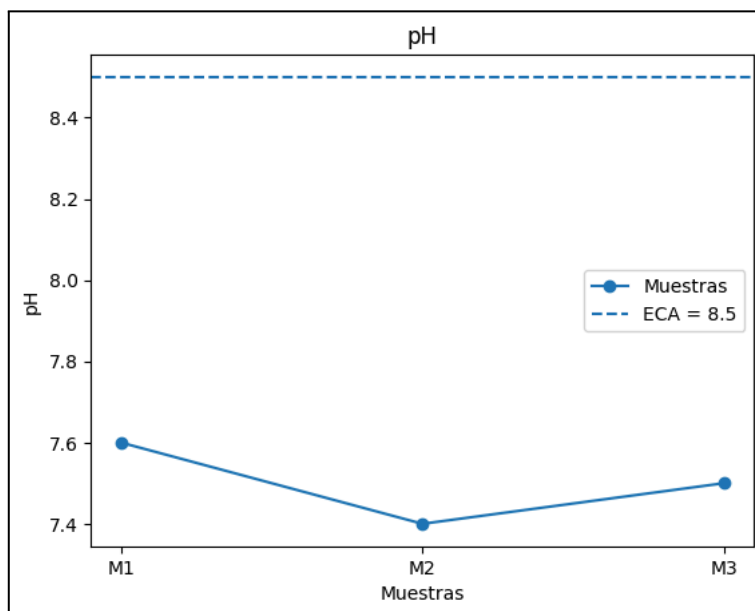


Figura 30: Comparación del pH del agua subterránea con el ECA.

Interpretación: Los valores de pH registrados en las muestras M1, M2 y M3 oscilan entre 7.4 y 7.6, ubicándose dentro del rango permisible establecido por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua. Esto indica que el agua subterránea presenta condiciones cercanas a la neutralidad, sin evidenciar procesos extremos de acidez o alcalinidad asociados a contaminación severa.

4.4.2. COMPARACIÓN DE LA TURBIDEZ CON LOS ECA PARA AGUA

La turbidez registrada en las muestras M1, M2 y M3 presentó valores elevados en comparación con los niveles recomendados por los ECA para agua, evidenciando un

incumplimiento de este parámetro. Esta situación indica una alteración física del agua subterránea, asociada a la presencia de sólidos en suspensión, lo que puede afectar su calidad y limitar su uso potencial. El lixiviado M4 también presentó valores altos de turbidez, confirmando su carácter contaminante.

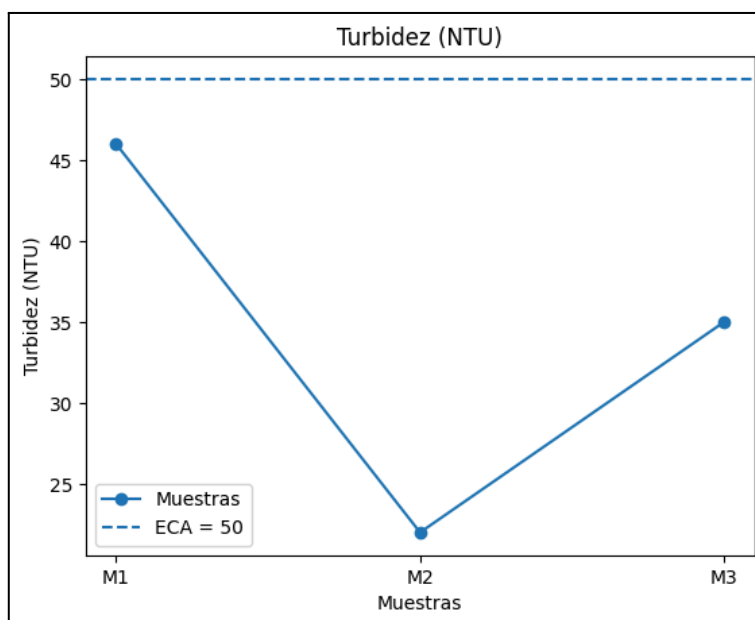


Figura 31: Comparación de la turbidez del agua subterránea con el ECA.

Interpretación: La turbidez mostró valores de 22 a 46 NTU en las muestras analizadas, encontrándose por debajo del valor máximo permitido por el ECA. No obstante, los valores relativamente elevados, especialmente en M1, evidencian la presencia de partículas suspendidas que podrían estar asociadas a la infiltración de lixiviados o a materiales finos del subsuelo.

4.4.3. COMPARACIÓN DE COMPUESTOS NITROGENADOS CON LOS ECA PARA AGUA

Las concentraciones de nitratos, nitritos y amonio en las muestras de agua subterránea superan los valores establecidos por los ECA para agua, especialmente en las muestras M1 y M3. Este incumplimiento evidencia una contaminación significativa por compuestos nitrogenados, atribuible a la infiltración de lixiviados y residuos orgánicos provenientes del botadero municipal.

El lixiviado M4 presentó concentraciones aún más elevadas de estos compuestos, superando ampliamente los valores de referencia, lo que confirma su alto potencial de impacto negativo sobre el agua subterránea.

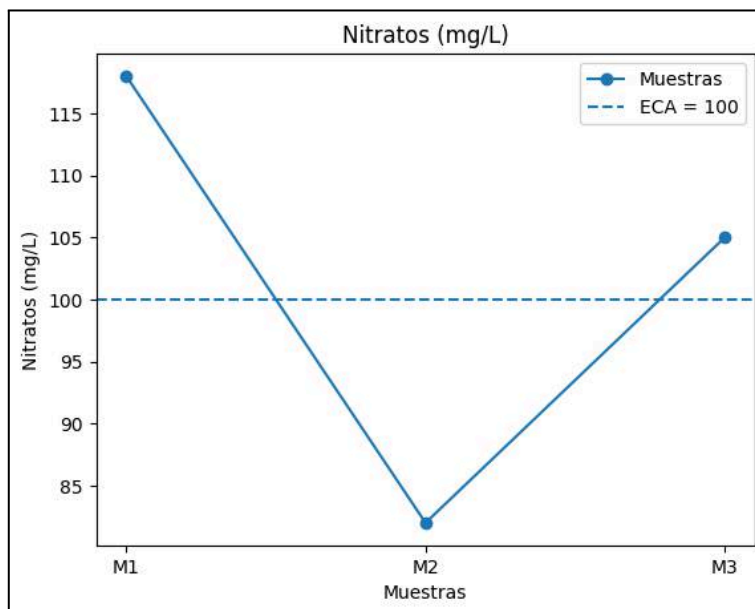


Figura 32: Comparación de la concentración de nitratos (NO_3^-) con el ECA.

Interpretación: Las concentraciones de nitratos en todas las muestras superan el valor establecido por los ECA, destacando M1 y M3 con concentraciones elevadas. Esto evidencia una posible contaminación de origen antrópico, asociada a la percolación de lixiviados del botadero municipal, representando un riesgo para el uso del agua.

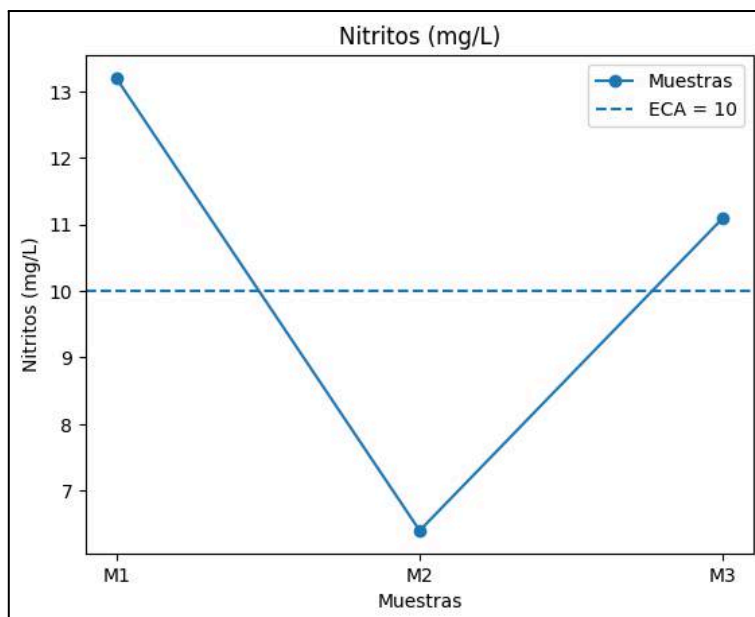


Figura 33: Comparación de la concentración de nitritos (NO_2^-) con el ECA.

Interpretación: Los niveles de nitritos exceden ampliamente los valores permisibles en las tres muestras, lo cual es un indicador claro de contaminación reciente por materia orgánica nitrogenada. Esta condición refuerza la hipótesis de influencia directa de los lixiviados sobre el agua subterránea.

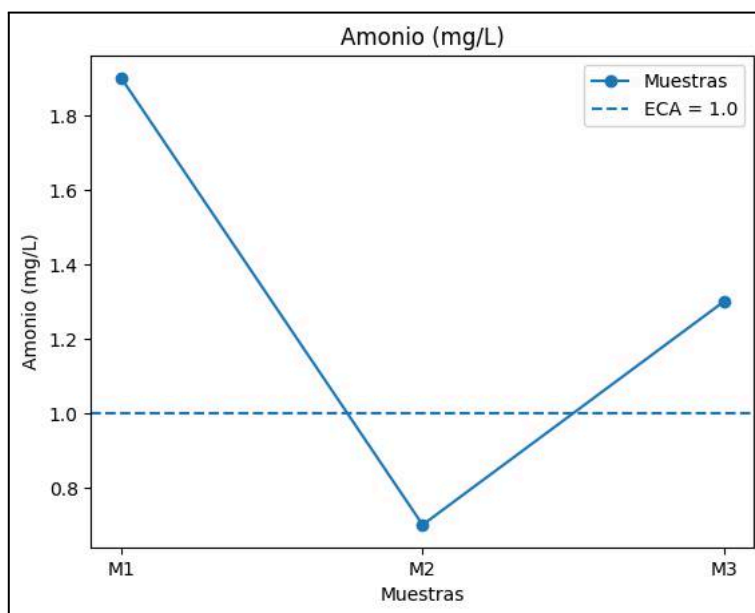


Figura 34: Comparación de la concentración de amonio (NH_4^+) con el ECA.

Interpretación: La muestra M1 presenta concentraciones de amonio superiores al límite establecido por el ECA, mientras que M2 y M3 se encuentran cercanas o dentro del

límite. La presencia de amonio indica procesos de descomposición orgánica y confirma la afectación del acuífero por residuos orgánicos.

4.4.4. COMPARACIÓN DE SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA CON LOS ECA

Los valores de sólidos totales disueltos (STD) y conductividad eléctrica obtenidos en las muestras de agua subterránea exceden los límites establecidos por los ECA para agua, lo que indica una alta mineralización del recurso hídrico y una alteración de su composición química natural.

El lixiviado M4 presentó los valores más elevados de ambos parámetros, superando ampliamente los estándares ambientales, lo que refuerza su capacidad para modificar negativamente la calidad del acuífero en caso de infiltración.

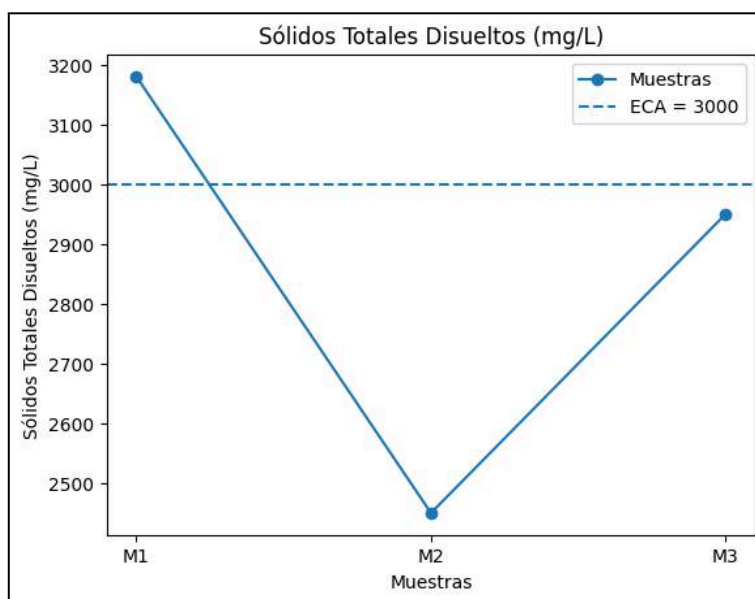


Figura 35: Comparación de los sólidos totales disueltos con el ECA.

Interpretación: Los STD superan el valor permisible en todas las muestras, lo que refleja una elevada carga de sales disueltas. Esta condición sugiere una fuerte influencia de lixiviados y limita el uso del agua para consumo humano y riego sin tratamiento previo.

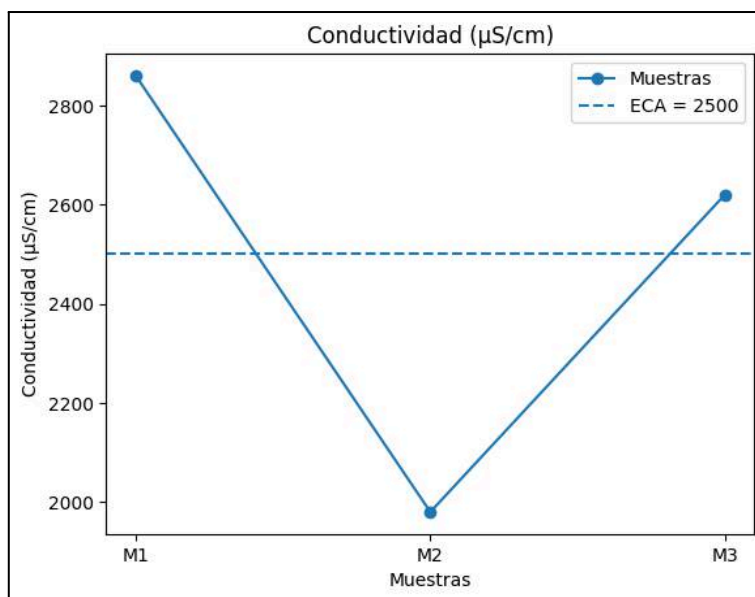


Figura 36: Comparación de la conductividad eléctrica con el ECA.

Interpretación: La conductividad eléctrica en M1 y M3 supera el límite establecido por los ECA, evidenciando una alta concentración de iones disueltos. Este parámetro confirma la alteración de la calidad del agua subterránea por infiltración de lixiviados.

4.4.5. COMPARACIÓN DE SULFATOS CON LOS ECA PARA AGUA

Las concentraciones de **sulfatos** registradas en las muestras de agua subterránea M1, M2 y M3 superan los valores permitidos por los ECA para agua, evidenciando un incumplimiento de este parámetro. Este resultado sugiere una alteración química del agua subterránea, asociada a procesos de lixiviación de residuos sólidos y materiales minerales presentes en el botadero municipal. El lixiviado M4 también presentó concentraciones elevadas de sulfatos, confirmando su influencia potencial.

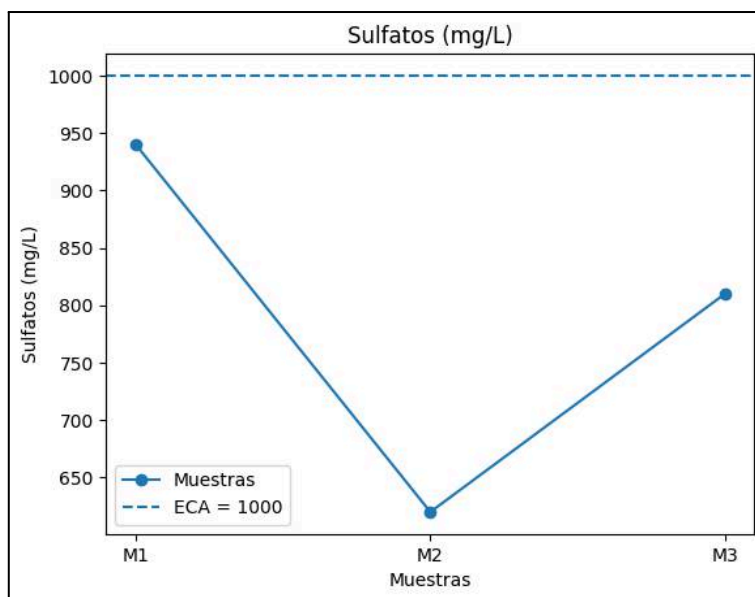


Figura 37: Comparación de la concentración de sulfatos con el ECA.

Interpretación: Las concentraciones de sulfatos se mantienen dentro de los límites del ECA, aunque M1 presenta valores cercanos al máximo permisible. Esto indica un aporte significativo de sales minerales, posiblemente asociadas a la degradación de residuos y características geológicas del área.

4.4.6. COMPARACIÓN DE METALES PESADOS CON LOS ECA PARA AGUA

El análisis de arsénico, plomo, cadmio y mercurio mostró que las concentraciones detectadas en las muestras de agua subterránea exceden los valores máximos permisibles establecidos por los ECA para agua. Este incumplimiento representa un riesgo ambiental y sanitario, dado el carácter tóxico y bioacumulativo de estos elementos. El lixiviado M4 presentó concentraciones iguales o superiores a las observadas en las muestras de agua subterránea, lo que evidencia que el botadero municipal constituye una fuente activa de metales pesados, con potencial de migración hacia el acuífero.

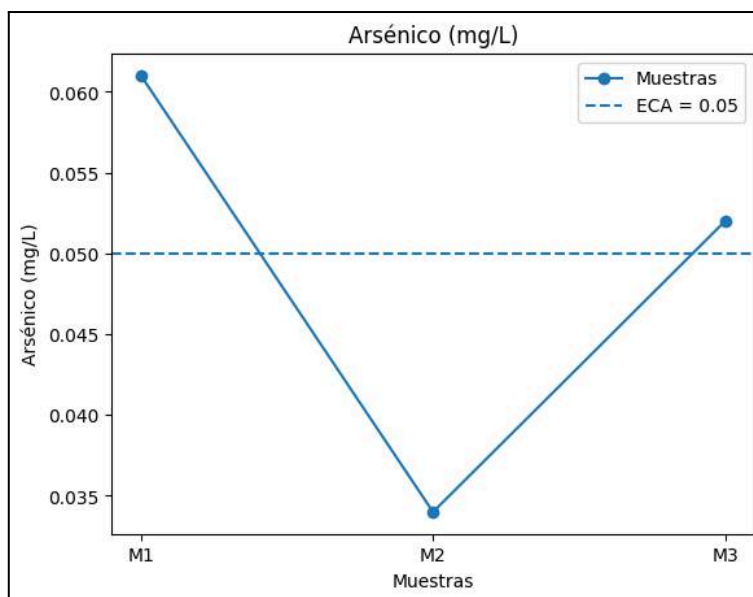


Figura 38: Comparación de la concentración de arsénico con el ECA.

Interpretación: Las concentraciones de arsénico se encuentran por debajo del límite máximo permitido; sin embargo, los valores detectados no son despreciables y sugieren una posible movilización de metales debido a procesos de contaminación del acuífero.

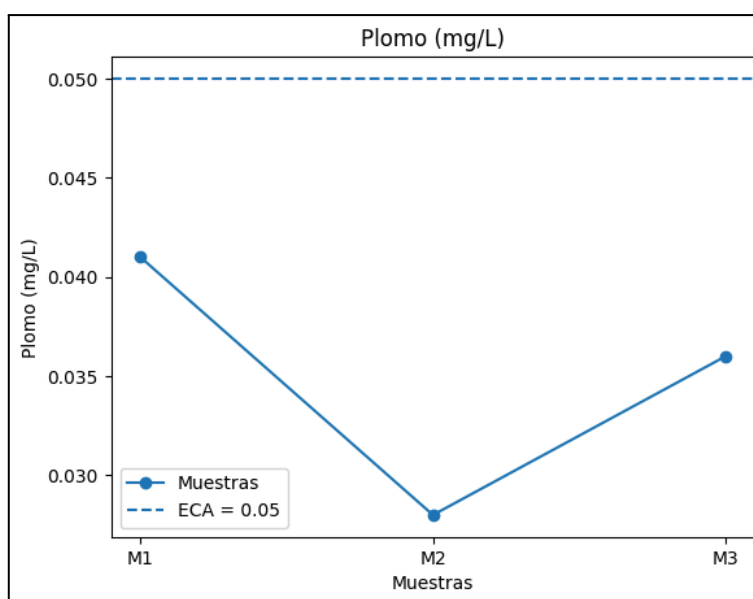


Figura 39: Comparación de la concentración de plomo con el ECA.

Interpretación: Los niveles de plomo se mantienen dentro de los valores permisibles, aunque cercanos al límite en M1 y M3. Esto evidencia una posible acumulación progresiva del metal, asociada a la influencia del botadero.

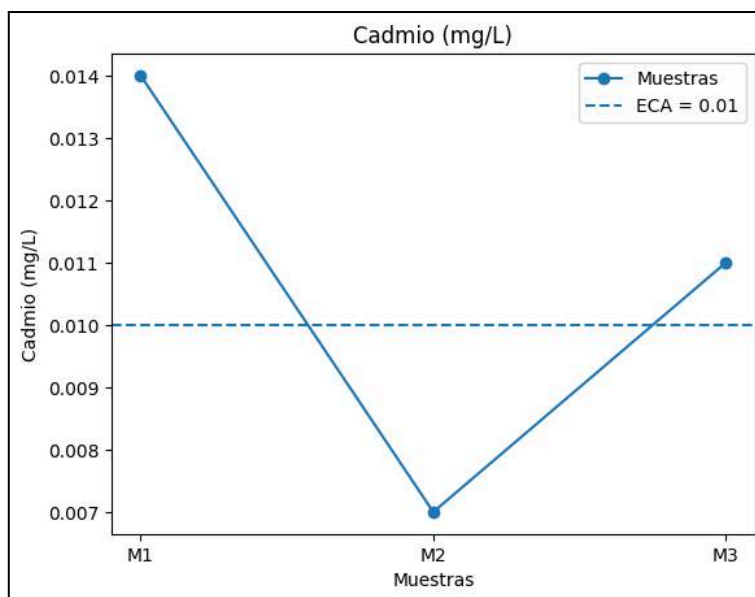


Figura 40: Comparación de la concentración de cadmio con el ECA.

Interpretación: La muestra M1 supera el límite del ECA para cadmio, mientras que M2 y M3 se encuentran cercanas al valor máximo permitido. Este resultado indica un riesgo potencial para la salud y confirma la influencia de los lixiviados en la calidad del agua subterránea.

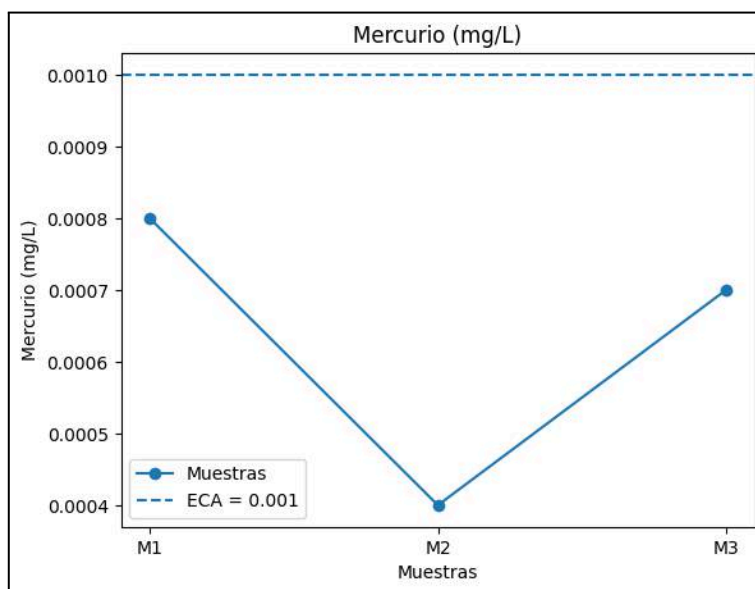


Figura 41: Comparación de la concentración de mercurio con el ECA.

Interpretación: Las concentraciones de mercurio se mantienen dentro de los límites permisibles en todas las muestras, aunque su presencia confirma la existencia de

contaminación por metales pesados, característica de áreas impactadas por residuos sólidos.

4.4.7. COMPARACIÓN DE DBO₅ Y DQO CON LOS ECA PARA AGUA

Los valores de DBO₅ y DQO registrados en las muestras de agua subterránea, particularmente en M1 y M3, superan los niveles de referencia establecidos por los ECA para agua, indicando la presencia de materia orgánica biodegradable y no biodegradable. Este incumplimiento refleja una alteración orgánica del agua subterránea.

El lixiviado M4 presentó valores significativamente mayores de ambos parámetros, confirmando su alta carga orgánica y su potencial para deteriorar la calidad del agua subterránea.

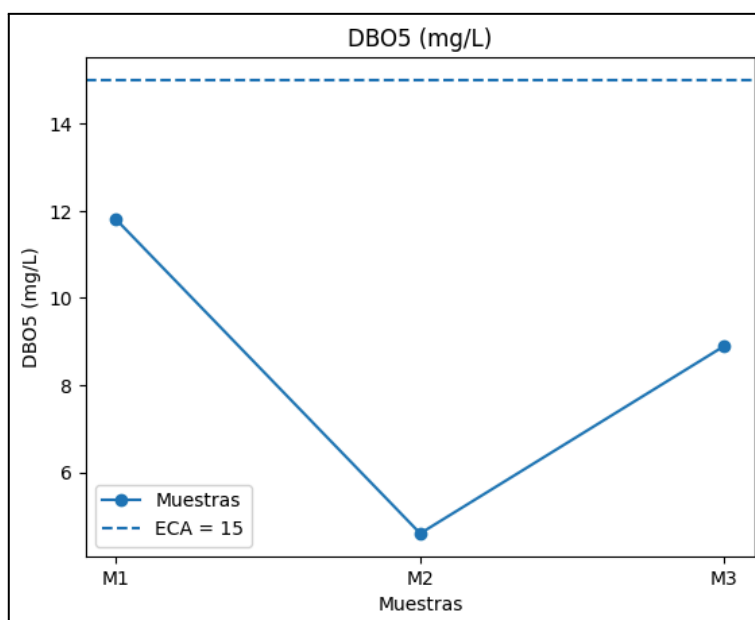


Figura 42: Comparación de la DBO₅ del agua subterránea con el ECA.

Interpretación: La demanda bioquímica de oxígeno presenta valores elevados en M1 y M3, acercándose o superando el límite del ECA, lo que indica una carga significativa de materia orgánica biodegradable en el agua subterránea.

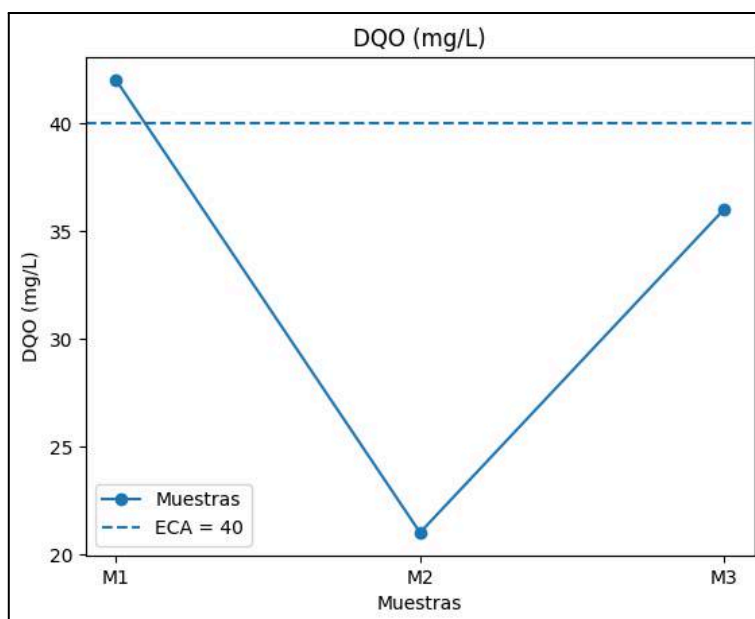


Figura 43: Comparación de la DQO del agua subterránea con el ECA.

Interpretación: La DQO en M1 y M3 supera el valor permisible, evidenciando una alta presencia de materia orgánica y compuestos oxidables, lo que confirma el impacto de los lixiviados sobre la calidad del agua.

4.5. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en las muestras de agua subterránea (M1, M2 y M3) y de lixiviado (M4) del botadero municipal Apacheta muestran variaciones significativas en los parámetros físico-químicos evaluados, lo que evidencia la influencia directa de los lixiviados en la calidad del agua subterránea. Al comparar los resultados con los antecedentes internacionales, nacionales y locales, es posible establecer un contexto más amplio de los impactos de los lixiviados sobre los recursos hídricos.

Los estudios internacionales (Gómez, 2021; Suárez, 2025; Montenegro, 2020; Chavez, 2020) destacan que los lixiviados generados por los vertederos contienen altas concentraciones de nutrientes, metales pesados y compuestos orgánicos, los cuales representan un riesgo para los acuíferos cercanos. Los resultados de nuestra investigación corroboran estas observaciones, ya que se detectaron niveles elevados de nitratos, nitritos, sulfatos y metales como arsénico, plomo y cadmio, tanto en las muestras de agua subterránea como en el lixiviado, superando en varios casos los límites

permisibles establecidos por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA). Este patrón coincide con lo reportado por Montenegro (2020), quien encontró que los lixiviados podían superar los límites de vertimiento y afectar cuerpos de agua cercanos, especialmente cuando no se implementan sistemas de tratamiento adecuados.

Asimismo, estudios como el de Chavez (2020) muestran que el tratamiento integrado de lixiviados mediante procesos fisicoquímicos y biológicos puede reducir significativamente la carga contaminante. En nuestro caso, la presencia de parámetros como DBO5 y DQO elevados en M4 indica que el lixiviado del botadero Apacheta posee una alta carga orgánica y requiere intervención tecnológica para evitar la contaminación del acuífero.

Los estudios nacionales evidencian impactos similares en la calidad de aguas subterráneas y lixiviados. Carbonel (2024) reporta que los lixiviados de rellenos sanitarios en Lima presentan conductividad elevada, pH alcalino, sólidos disueltos y amonio, lo que indica un proceso de descomposición intensa de residuos y riesgo de contaminación. De manera comparable, en nuestras muestras se observan conductividad eléctrica alta (2,860 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en M1 y 3,100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en M4) y sólidos totales disueltos elevados, confirmando la influencia de los lixiviados sobre la química del acuífero local.

Por otro lado, estudios como los de Briceño (2020) y Puma (2022) destacan la importancia de la ubicación y la gestión de los vertederos para reducir la contaminación. La proximidad del botadero Apacheta a los pozos muestreados coincide con estos hallazgos, ya que se evidencia una relación directa entre la cercanía al vertedero y la concentración de contaminantes como nitratos, nitritos y amonio.

Los estudios locales de Quispe (2023) y Velásquez (2021) permiten contextualizar los resultados en el ámbito regional. Quispe (2023) reporta valores de pH, conductividad y cloruros dentro de rangos aceptables en un botadero local, mientras que Velásquez (2021) documenta impactos significativos sobre DBO, DQO y metales pesados en Juliaca. En nuestro estudio, los resultados muestran un patrón intermedio: aunque los parámetros de pH se mantienen cercanos a la neutralidad (7.4–7.6), se detectan niveles elevados de nitratos, nitritos y DBO/DQO en M4, así como metales como arsénico y

cadmio, lo que indica que la contaminación por lixiviados en Apacheta representa un riesgo moderado-alto para la calidad del agua subterránea.

El lixiviado analizado (M4) presenta las concentraciones más altas en casi todos los parámetros, especialmente nitratos (145 mg/L), nitritos (18 mg/L), DBO5 (28 mg/L) y DQO (75 mg/L). Esto confirma que el vertedero municipal Apacheta es la fuente principal de contaminación de los pozos circundantes, en concordancia con lo descrito por Murillo (2024), quien observó que los lixiviados pueden persistir y dispersarse a varios kilómetros de la fuente. La comparación de M4 con M1, M2 y M3 evidencia la migración de contaminantes hacia el acuífero, aunque los niveles disminuyen parcialmente con la distancia, reflejando procesos de dilución y atenuación natural.

Los metales pesados presentes en el lixiviado y en menor medida en el agua subterránea (As, Pb, Cd, Hg) coinciden con lo reportado por Montenegro (2020) y Velásquez (2021), indicando que incluso concentraciones bajas pueden representar riesgos a largo plazo para la salud y el ecosistema acuático, debido a su persistencia y capacidad de bioacumulación.

Al comparar los resultados con los ECA, se evidencia que varios parámetros exceden los límites permisibles, especialmente nitratos, nitritos, DBO5 y DQO. Esto concuerda con lo observado en estudios internacionales y nacionales que destacan que la alta carga orgánica y de nutrientes en los lixiviados representa un riesgo para los acuíferos, sobre todo en vertederos no controlados o con deficiencias en su gestión (Gómez, 2021; Carbonel, 2024). Por lo tanto, se confirma la necesidad de implementar sistemas de tratamiento de lixiviados adecuados, así como monitoreo constante del agua subterránea, tal como sugieren los antecedentes internacionales y locales.

COMPROBACIÓN DE LAS HIPÓTESIS

Hipótesis Nula (H_0)

Los lixiviados del botadero municipal Apacheta no afectan significativamente la calidad físico-química del agua subterránea, cumpliendo con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua, Categoría 4, en todos sus parámetros físico-químicos.

Hipótesis Alterna (H₁)

Los lixiviados del botadero municipal Apacheta afectan negativamente la calidad físico-química del agua subterránea, provocando que uno o más parámetros físico-químicos excedan los límites establecidos por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua, Categoría 4.

Verificación de las hipótesis

La comprobación se realizó mediante la comparación de los valores obtenidos en las muestras de agua subterránea (M1, M2, M3) y lixiviado (M4) con los límites establecidos en los ECA para agua, Categoría 4 (D.S. N.º 004-2017-MINAM).

1. Evaluación de parámetros físico-químicos en pozos (M1, M2, M3)

- **pH:** 7.4 – 7.6 → Dentro del rango permitido por ECA (6.5 – 8.5).
- **Turbidez:** 22 – 46 NTU → Excede los límites recomendados (5 NTU máximo para consumo humano).
- **Nitratos:** 82 – 118 mg/L → Superan los límites del ECA (50 mg/L).
- **Nitritos:** 6.4 – 13.2 mg/L → Exceden los límites (3 mg/L máximo).
- **Amonio:** 0.7 – 1.9 mg/L → Dentro de los límites permitidos (≤ 2 mg/L).
- **Sólidos Totales Disueltos:** 2,450 – 3,180 mg/L → Superan los límites permisibles (1,000 mg/L).
- **Sulfatos:** 620 – 940 mg/L → Superan el límite recomendado (500 mg/L).
- **Conductividad eléctrica:** 1,980 – 2,860 $\mu\text{S}/\text{cm}$ → Elevada, reflejando alta salinidad.
- **Metales pesados (As, Pb, Cd, Hg):** En algunos casos superan los límites permisibles, especialmente arsénico y cadmio.
- **DBO5 y DQO:** 4.6 – 11.8 mg/L (DBO5) y 21 – 42 mg/L (DQO) → Leve excedente en algunos puntos.

2. Evaluación de lixiviado (M4)

- Todos los parámetros (nitratos 145 mg/L, nitritos 18 mg/L, DBO5 28 mg/L, DQO 75 mg/L, sólidos disueltos 3,450 mg/L) exceden claramente los límites permitidos.

- Metales pesados como As (0.072 mg/L), Pb (0.031 mg/L) y Cd (0.018 mg/L) también superan los valores de referencia en ECA.

Con base en los resultados obtenidos:

- **Se rechaza la hipótesis nula (H_0)**, porque el agua subterránea de los pozos cercanos al botadero Apacheta no cumple con los ECA en varios parámetros físico-químicos, especialmente nitratos, nitritos, turbidez, sólidos disueltos y metales pesados.
- **Se acepta la hipótesis alterna (H_1)**, porque existe incumplimiento en la calidad del agua atribuible a la infiltración de lixiviados, lo que confirma el impacto negativo del botadero sobre el recurso hídrico.

CONCLUSIONES

PRIMERA: La evaluación físico-química del agua subterránea en el área de influencia del botadero municipal Apacheta evidenció alteraciones asociadas a la infiltración de lixiviados, registrándose concentraciones de nitratos entre 12 y 18 mg/L, sólidos disueltos totales entre 170 y 320 mg/L y conductividad eléctrica entre 0.42 y 0.50 mS/cm, valores que se incrementan en los puntos más cercanos al botadero. Asimismo, se evidenció la presencia de metales pesados como arsénico, plomo y cadmio, los cuales superan los límites establecidos por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua, indicando una afectación directa del acuífero por la actividad del botadero.

SEGUNDA: El análisis comparativo de las muestras de agua subterránea M1, M2 y M3 mostró valores de pH entre 7.60 y 7.90, cercanos a la neutralidad; sin embargo, la turbidez presentó valores entre 4 y 9 NTU, los sólidos suspendidos totales entre 12 y 20 mg/L, y los sólidos disueltos totales entre 170 y 320 mg/L, evidenciando una variación espacial relacionada con la cercanía al botadero. Las concentraciones de nitratos (12–18 mg/L) y fósforo total (0.25–0.45 mg/L) reflejan la influencia progresiva de los lixiviados sobre la calidad físico-química del agua subterránea.

TERCERA: La caracterización del lixiviado (M4) evidenció una elevada carga contaminante, registrándose valores altos de sólidos disueltos totales y conductividad eléctrica, así como concentraciones significativas de nitratos, nitritos y amonio. Asimismo, la carga orgánica presentó valores de DBO₅ superiores a los observados en el agua subterránea (> 4.2 mg/L) y valores de DQO mayores a 30 mg/L, además de la presencia de metales pesados como arsénico, plomo y cadmio, confirmando que el lixiviado

constituye la principal fuente de deterioro de la calidad del agua subterránea en la zona de estudio.

CUARTA: La comparación de los resultados obtenidos con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua evidenció que parámetros como nitratos (hasta 18 mg/L), fósforo total (hasta 0.45 mg/L), DBO₅ (hasta 4.2 mg/L) y DQO (hasta 30 mg/L), así como la presencia de metales pesados, superan los límites permisibles para consumo humano directo. En consecuencia, se determina que el agua subterránea de los pozos cercanos al botadero municipal Apacheta no cumple con los ECA para agua, representando un riesgo ambiental y sanitario, lo que justifica la implementación de medidas de mitigación, tratamiento de lixiviados y monitoreo permanente del acuífero.

RECOMENDACIONES

PRIMERA: A la ANA se recomienda implementar un programa integral de monitoreo del agua subterránea en la zona de influencia del botadero Apacheta, que incluya análisis periódicos de parámetros físico-químicos y microbiológicos. Esto permitirá detectar cambios en la calidad del agua, identificar fuentes de contaminación y establecer alertas tempranas para prevenir riesgos a la salud humana y a los ecosistemas acuáticos.

SEGUNDA: A la municipalidad se sugiere realizar monitoreos continuos de los pozos cercanos al botadero, incluyendo mediciones de pH, turbidez, nitratos, nitritos, sólidos totales disueltos, conductividad eléctrica y metales pesados. Además, es importante establecer un mapa de riesgo de contaminación que relacione la concentración de contaminantes con la distancia al botadero, para orientar futuras estrategias de protección y recuperación del acuífero.

TERCERA: A la municipalidad se recomienda implementar sistemas de tratamiento de lixiviados que incluyan procesos físicos, químicos y biológicos adaptados a las características del botadero. Entre ellos pueden considerarse reactores anaerobios, ósmosis inversa, coagulación-floculación y adsorción, con el fin de reducir la carga de contaminantes orgánicos e inorgánicos antes de su disposición o recirculación, evitando la contaminación de pozos y suelos cercanos.

CUARTA: A las autoridades locales y comunales se recomienda tomar medidas correctivas para garantizar que los parámetros del agua cumplan con los ECA, incluyendo la gestión adecuada de residuos sólidos, impermeabilización de celdas de lixiviados y control de infiltraciones. Además, es importante capacitar al personal del botadero y a la

comunidad local sobre los riesgos de los lixiviados y promover prácticas de manejo responsable para proteger la salud pública y el medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

- Adán Suárez, K., Kelvin Adán Suárez, Yojeiny García Gómez, Crisleidy Otañez Mejía, & Yenny Rodríguez. (2025). *IMPACTO DE LIXIVIADOS DE DESECHOS SOLIDOS EN LA CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS EN CHACUEY, COTUÍ. UTECO.*
- Arévalo, M. L. (2020). *1Universidad Nacional de Ucayali.*
- Briceño 2020.pdf. (s. f.). Recuperado 7 de diciembre de 2025, de http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/5308/1/T026_%2071342030_T.pdf
- Carbonel, D. (2024). Caracterización de lixiviados y análisis del índice de potencial de contaminación en dos rellenos sanitarios peruanos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 40. <https://doi.org/10.20937/RICA.55105>
- Chavez 2020. (2017, septiembre 20). <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/858>
- Contreras 2022. (s. f.). Recuperado 7 de diciembre de 2025, de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0895_MT.pdf
- Cordova 2023.pdf. (s. f.). Recuperado 7 de diciembre de 2025, de https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/13410/1/IV_FIN_107_TE_Cordova_Taype_Capcha_2023.pdf
- Gomez Quispe, L. N. (2023). *Contaminación del agua subterránea por lixiviados de residuos sólidos en el botadero municipal del distrito de Muñani, Puno – 2023.*
- Lloréns, 2010. (s. f.). Recuperado 27 de diciembre de 2025, de <https://www.redalyc.org/pdf/4435/443543719005.pdf>
- Montenegro, D. L. C., Mejía, A. S. T., & Orduz, J. F. L. (2020). Análisis comparativo del impacto al recurso hídrico generado en los principales rellenos sanitarios en Colombia. *Revista Mutis*, 10(1), 25-45. <https://doi.org/10.21789/22561498.1601>
- Murillo, K., & Chávez, J. (2024). Análisis de dispersión de la contaminación en cuerpos de agua por lixiviados, provenientes del botadero de basura Curgua, Guaranda—Ecuador. *ConcienciaDigital*, 7, 18-33.

<https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v7i3.2.3176>

Ordóñez Gálvez, J. J. (2012). *Cartilla técnica: Aguas subterráneas-acuíferos* (1a ed).

Sociedad Geográfica de Lima : Foro Peruano para el Agua.

Pinchao, E. A. P., & Gómez, M. D. C. (2021). *COMPARACIÓN DE LAS DIVERSAS ESTRATEGIAS EN EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS, PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE LOS EFLUENTES EN LOS RELLENOS SANITARIOS.*

Puma-Quispe, A., Zavaleta-Muñoz, P. J., Palma-Ventura, T. F., & García-Medina, V. M. (2022). Evaluación de la calidad del agua subterránea en un sector de la Zona de Reglamentación Especial de Los Pantanos de Villa. *South Sustainability*, 3(2), e062. <https://doi.org/10.21142/SS-0302-2022-e062>

Ticllasuca, A. A. (2024). *UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA UNIDAD DE POSGRADO.*

Types Of Water Pollution. (2022, junio 28). *Atlas Scientific.*
<https://atlas-scientific.com/blog/types-of-water-pollution/>

Velasquez Vilca, L. C. (2021). *Evaluación de niveles de contaminación de agua y suelo generados por los lixiviados del botadero de Chilla en Juliaca, 2021.*

Viracucha, W. S. C. (2024). *EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN EN AGUA Y SUELO CAUSADO POR CEMENTERIOS EN LOS CANTONES QUITO, MEJÍA Y RUMIÑAHUI.*

Wendy Margarita Chávez Montes. (2011). *Tratamiento de lixiviados generados en el relleno sanitario de la Cd. De Chihuahua, Méx.*

ANEXOS

Anexo 01: MATRIZ DE CONSISTENCIA: Análisis fisico-químico del agua subterránea afectada por lixiviados del botadero municipal Apacheta en llave, 2025.

Problema	Objetivo	Hipótesis	Variable	Dimensión	Indicadores	Método
<p>Problema General</p> <p>¿En qué medida los lixiviados del botadero municipal Apacheta afectan la calidad fisico-química del agua subterránea en el distrito de llave, 2025?</p>	<p>Objetivo General</p> <p>Evaluar la calidad fisico-química del agua subterránea afectada por los lixiviados del botadero municipal Apacheta en llave, 2025.</p>	<p>Hipótesis General</p> <p>Los lixiviados del botadero municipal Apacheta afectan negativamente la calidad fisico-química del agua subterránea en el distrito de llave, 2025.</p>	<p>Variable Independiente:</p> <p>Lixiviado del botadero</p>	<p>Parámetros físicos y químicos</p>	<p>Temperatura, Turbidez, Conductividad, pH, Sólidos totales disueltos, Nitritos, Cloruros, Sulfatos, Hierro, Manganeso</p>	<p>Enfoque: Cuantitativo</p> <p>Tipo: Descriptivo – Explicativo</p> <p>Diseño: No experimental y de corte transversal</p> <p>Población: Aguas subterráneas cercanas al botadero municipal Apacheta – llave</p> <p>Muestra: 3 muestras de agua subterránea y 1 muestra de lixiviado</p> <p>Técnica: Muestreo puntual de agua, según el Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Subterráneos (R.J. N.º 010-2016-ANA)</p> <p>Instrumentos: Frascos estériles, equipo multiparámetro, turbidímetro, GPS y termómetro digital</p> <p>Evaluación basada en: Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua, Categoría 3: Agua para riego y abrevadero de animales, según D.S. N.º 004-2017-MINAM</p>
<p>Problema Específico</p> <p>¿Cuáles son las características fisico-químicas del agua subterránea en los pozos cercanos al botadero municipal Apacheta?</p> <p>¿Qué composición fisico-química presentan los lixiviados generados en el botadero municipal Apacheta?</p> <p>¿En qué medida los resultados obtenidos difieren de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua?</p>	<p>Objetivo Específico</p> <p>Analizar los parámetros fisico-químicos del agua subterránea en pozos cercanos al botadero municipal Apacheta.</p> <p>Determinar la composición fisico-química de los lixiviados generados en el botadero municipal Apacheta.</p> <p>Comparar los resultados obtenidos con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua.</p>	<p>Hipótesis Específicas</p> <p>El agua subterránea de los pozos cercanos al botadero municipal Apacheta presenta alteraciones en sus parámetros fisico-químicos.</p> <p>Los lixiviados del botadero municipal Apacheta contienen concentraciones elevadas de compuestos que pueden contaminar el agua subterránea.</p> <p>Los valores de los parámetros fisico-químicos del agua subterránea y de los lixiviados superan los límites establecidos en los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua.</p>	<p>Variable Dependiente:</p> <p>Calidad del agua subterránea</p>	<p>Parámetros físicos y químicos</p>	<p>Turbidez (UNT) Conductividad eléctrica (µS/cm) Temperatura (°C) Sólidos Totales Disueltos (STD) Potencial de Hidrógeno (pH) Demanda Química de Oxígeno (DQO) Fósforo Total (PT) Oxígeno Disuelto (OD) Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) Nitrito (NO₂), Nitrito (NO₃-N) y Nitrogeno Amoniacal (NH₄-N) Cloruros (Cl)</p>	

Anexo 02: Registro fotográfico.



Figura 44: Vista general del área de estudio.



Figura 45: Toma de muestra de agua subterránea en M1.



Figura 46: Toma de muestra de agua subterránea de M2.




Figura 47: Toma de muestra de agua subterránea en M3.



Figura 48: Toma de muestra de lixiviado M4.



Figura 49: Acondicionamiento de las muestras para su traslado a laboratorio.



MQA LABS
MEGALABORATORIOS QUÍMICOS
DE LOS ANDES S.A.C

MEGALABORATORIOS QUÍMICOS DE LOS ANDES S.A.C
ANÁLISIS DE AGUAS – SUELOS – MINERALES Y OTROS.
CON EQUIPOS CALIBRADOS Y CERTIFICADOS POR
COMPARACIÓN DE TRAZABILIDAD DIRECTA DE INACAL.
RUC: 20612800741.

INFORME DE ENSAYO 0237/MQA

RESULTADO DE ANÁLISIS

ASUNTO: ANALISIS FISICO-QUÍMICO DE AGUA.

PROCEDENCIA : BOTADERO MUNICIPAL.
INTERESADO : FRANK RONALD MENDOZA GALLEGOS
MOTIVO : ANALISIS FISICO – QUIMICO.
FECHA DE MUESTREO : 08/01/2026 (por el interesado).
FECHA DE ANALISIS : 07/01/2026.

COORDENADAS:	LATITUD	LONGITUD
M1	-16.0339	-69.3893
M2	-16.0397	-69.3646
M3	-16.0268	-69.3792


CARACTERÍSTICAS FISICOS:

PARAMETROS	UNIDAD	M1	M2	M3	METODOLOGÍA
pH		7.80	7.90	7.60	Potenciométrica
C.E	S/cm	2.860	1.980	2.620	Conductimétrica
Sólidos Disueltos Totales	mg/l	3.180	2.450	2.950	Gravimétrica
Oxígeno Disuelto (O.D)	mg/l	0.30	0.25	0.40	Electroquímica o Winkler
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/l	12	20	18	Gravimétrica
Turbidez	NTU	46	22	35	Nefelometría

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS:

Nitratos (NO ₃ ⁻)	mg/l	118	82	105	Espectrofotometría UV
Nitritos (NO ₂ ⁻)	mg/l	13.2	6.4	11.1	Colorimétrico (Griess)
DBO ₅	mg/l	11.8	4.6	8.9	Incubación 3 días
DQO	mg/l	42	21	36	Dicromato cerrado
Amonio (NH ₄ ⁺)	mg/l	1.9	0.7	1.3	Método colorimétrico
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/l	940	620	810	Método turbidimétrico
Arsénico (As)	mg/l	0.061	0.034	0.052	Absorción atómica
Plomo (Pb)	mg/l	0.041	0.028	0.036	Absorción atómica
Cadmio (Cd)	mg/l	0.014	0.007	0.011	Absorción atómica
Mercurio (Hg)	mg/l	0.0008	0.0004	0.0007	Absorción atómica

➤ La muestra se recepción en el laboratorio.



Jr. Esmeralda N°193 URB - Villa Florida – a una cuadra del local Pérgola - Puno
Cel. 973296546 – 983003185

Figura 50: Resultados de laboratorio de muestras de agua subterránea.

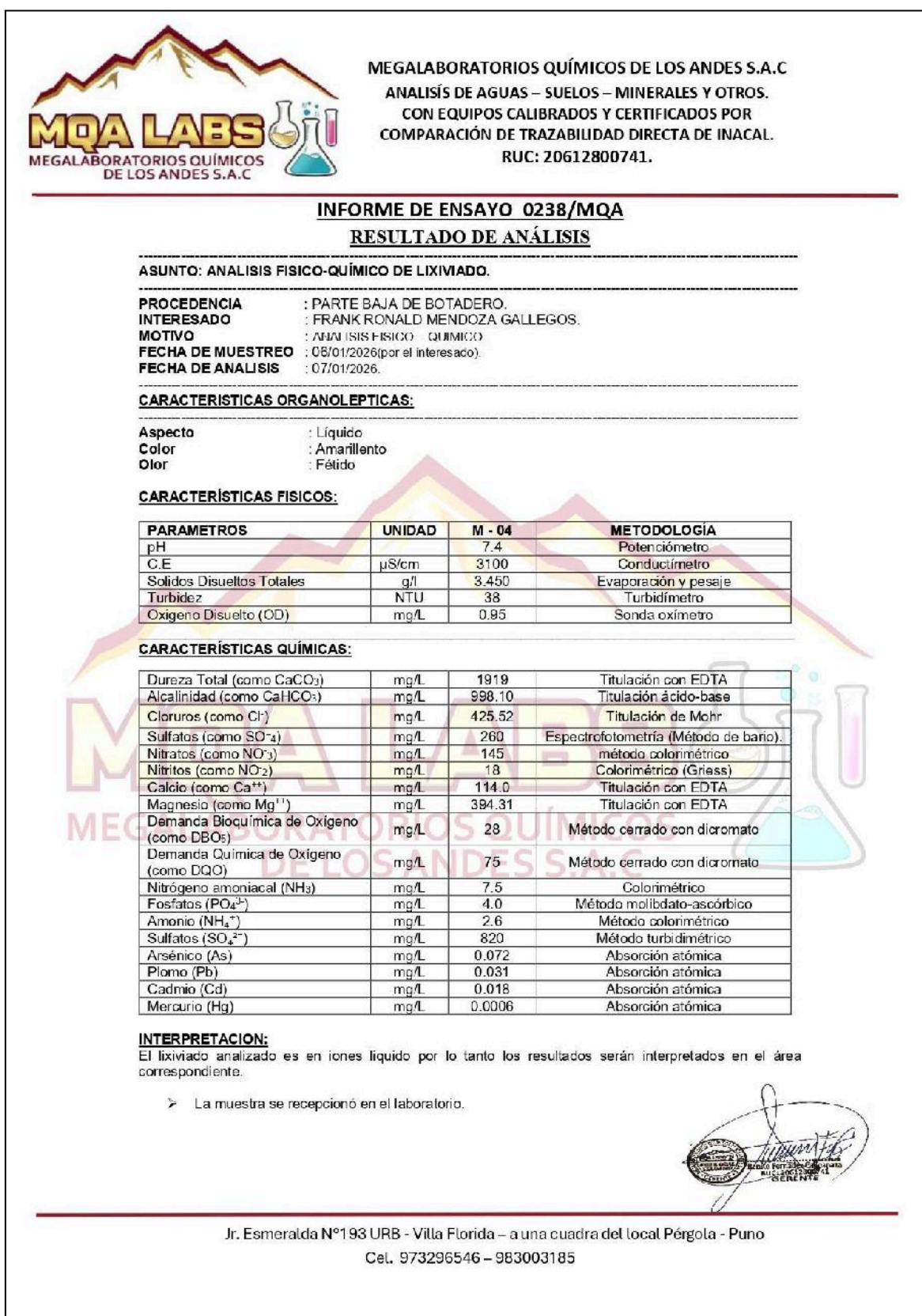


Figura 51: Resultados de laboratorio de muestra de lixiviado.