

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**“EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA Y PROPUESTA DE
TRATAMIENTO DE LA FUENTE SUBTERRÁNEA USADA PARA
ABASTECIMIENTO DE UN CAMPAMENTO MINERO”**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL**

JOSELYN ARACELY FLORES MORALES

joselynaraflares@gmail.com

DIRECTOR: M.SC. ISAÍAS MARCELO MUÑOZ RODRÍGUEZ

marcelo.munoz@epn.edu.ec

CODIRECTOR: M.SC. MARÍA BELÉN ALDÁS SANDOVAL

maria.aldas@epn.edu.ec

Quito, septiembre 2020

DECLARACIÓN

Yo, Joselyn Aracely Flores Morales, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

JOSELYN ARACELY FLORES MORALES

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Joselyn Aracely Flores Morales, bajo mi supervisión.

**M.SC. ISAÍAS MARCELO MUÑOZ
RODRÍGUEZ
DIRECTOR DEL PROYECTO**

**M.SC. MARÍA BELÉN ALDÁS
SANDOVAL
CODIRECTOR DEL PROYECTO**

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi fuente principal de fortaleza y perseverancia, porque mi fe en él me ha brindado los triunfos más satisfactorios y porque me ha enseñado que de su mano todo lo imposible se puede alcanzar.

A todas las personas que creyeron en mí, que me motivaron con sus palabras y acciones, aquellas que me apoyaron en toda mi etapa formativa profesional y personal de forma real y sincera.

Finalmente, dedico este proyecto de titulación a la comunidad del campamento minero objeto de este estudio, anhelo que mi trabajo aporte en la toma de decisiones para que accedan a un agua segura.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios y a la vida misma por esta satisfacción personal tan grande y por ponerme a las personas correctas en el camino.

Doy infinitas gracias a mi familia, por todo su apoyo, porque a pesar de nuestras múltiples diferencias siempre han anhelado lo mejor para mí, porque del mismo modo su apoyo económico y moral ha sido fundamental para concluir mi etapa universitaria. Ha sido un sueño compartido alcanzar un título profesional y hemos arrimado nuestros hombros para hoy cristalizarlo, valoro mucho el esfuerzo de mi padre, la dedicación de mi madre por el hogar y el cariño de mi hermana, gracias por enseñarme el valor del trabajo y por inculcarme la humildad.

A mis amigos: Carol, Fabri, Adrián, Vivi, Majo y Dany con quienes tuve la fortuna de compartir los momentos más memorables y gratos de la universidad, ustedes han hecho de esta etapa la mejor de mi vida y su amistad ha contribuido en mi crecimiento personal. A Cristy, mi mejor amiga, que a pesar de la distancia me ha demostrado que las verdaderas amistades derrumban muros y fronteras para mantenerse intactas.

A la persona que me ha brindado todo su amor, mi compañero de aventuras y socio. Gracias Beto por tantas alegrías, tanto apoyo en momentos tormentosos y tanta motivación para terminar este proyecto de titulación y no decaer en ninguno de mis planes.

A la EPN y a todos los docentes quienes han contribuido con mi formación profesional, gracias por impartirme sus conocimientos. A los ingenieros: Marcelo Muñoz y María Belén Aldás quienes me han brindado toda su ayuda y guía durante este proceso, gracias por su paciencia, por enseñarme y por su gran aporte.

Finalmente, quiero expresar un profundo agradecimiento a la Ing. Katherine Salazar por su colaboración y auspicio en este proyecto de titulación.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN	I
CERTIFICACIÓN	III
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS	V
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABLAS	XI
LISTA DE ANEXOS	XIII
SIGLAS Y SIMBOLOGÍA	XIV
RESUMEN	XVI
ABSTRACT	XVII
PRESENTACIÓN	XVIII
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. OBJETIVOS	3
1.2.1. OBJETIVO GENERAL	3
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.3. ALCANCE	3
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	4
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO	6
2.1. AGUAS SUBTERRÁNEAS	6
2.1.1. ORIGEN.....	6
2.1.2. USOS.....	6
2.1.3. FUENTES DE CONTAMINACIÓN: NATURALES Y ANTROPOGÉNICAS	8
2.1.4. PREOCUPACIONES DE SALUD PÚBLICA Y MEDIO AMBIENTALES	14
2.2. MUESTREO.....	16
2.2.1. MÉTODOS DE MUESTREO.....	16
2.2.2. TIPOS DE MUESTRAS	18

2.2.3. PROCEDIMIENTO PARA TOMA DE MUESTRAS EN UNA FUENTE SUBTERRÁNEA	19
2.2.4. PRESERVACIÓN Y TRANSPORTE DE LAS MUESTRAS	21
2.2.5. MEDIDAS DE PREVENCIÓN GENERALES	25
2.3. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA.....	26
2.3.1. CRITERIOS DE CALIDAD DEL AGUA	26
2.3.2. PARÁMETROS FÍSICOS EN EL AGUA	26
2.3.3. PARÁMETROS QUÍMICOS EN EL AGUA	28
2.3.4. PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS EN EL AGUA	34
2.3.5. ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AGUA (ICA).....	35
2.4. POTABILIZACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA	36
2.4.1. FUENTES DE AGUA CRUDA	36
2.4.2. CAPTACIÓN Y TRANSPORTE	36
2.4.3. TRATAMIENTO	37
2.4.4. DISTRIBUCIÓN DE AGUA TRATADA.....	45
2.5. LEGISLACIÓN SOBRE AGUA DE CONSUMO HUMANO	45
2.5.1. ACUERDO MINISTERIAL 097.....	45
2.5.2. NORMA NTE INEN 1108:2014	46
CAPITULO 3 METODOLOGÍA	47
3.1. LÍNEA BASE DE LA ZONA DE ESTUDIO	47
3.1.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA	47
3.1.2. HIDROGEOLOGÍA.....	48
3.1.3. DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES	48
3.1.4. CAPTACIÓN Y USO DEL AGUA SUBTERRÁNEA	50
3.2. MUESTREO	52
3.2.1. SELECCIÓN DE PUNTOS DE MUESTREO	52
3.2.2. MATERIALES Y EQUIPOS DE MUESTREO	54
3.2.3. PROCEDIMIENTO DE LA CAMPAÑA DE MUESTREO.....	55
3.2.4. MEDICIÓN DE CAUDAL.....	56
3.3. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA	57
3.3.1. SELECCIÓN DE PARÁMETROS A EVALUAR	57

3.3.2. MÉTODOS DE ANÁLISIS PARA LOS ENSAYOS FÍSICOS, QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS	58
3.3.3. CORRELACIÓN ESTADÍSTICA “T DE STUDENT”	60
3.3.4. CÁLCULO DE ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA (ICA)	60
3.3. SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA ÓPTIMA DE TRATAMIENTO	63
CAPITULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	65
4.1. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA FUENTE SUBTERRÁNEA	65
4.2. ANÁLISIS DE CAUDAL	67
4.3. COMPARACIÓN CON LA NORMATIVA ECUATORIANA PARA AGUA DE CONSUMO HUMANO Y USO DOMÉSTICO	69
4.3.1. PARÁMETROS FÍSICOS.....	70
4.3.2. PARÁMETROS QUÍMICOS.....	70
4.4. RESULTADOS DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA (ICA).....	73
4.5. SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO.....	74
4.4.1. CRITERIOS DE SELECCIÓN.....	74
4.4.2. MATRICES DE SELECCIÓN.....	75
4.6. PROPUESTA DE TRATAMIENTO	79
4.5.1. DESCRIPCIÓN DEL TRATAMIENTO.....	79
4.5.2. BASES DE DISEÑO	87
4.5.3. COSTOS.....	89
4.5.4. IDENTIFICACIÓN Y VALORACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES	93
CAPITULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	96
5.1. CONCLUSIONES.....	96
5.2. RECOMENDACIONES.....	97
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
ANEXOS	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1. Zonas del agua subterránea.....	6
Figura 2. 2. Extracción total de agua subterránea en USA, 2005.....	7
Figura 2. 3. Esquema de contaminación industrial de aguas subterránea	12
Figura 2. 4. Condición de equilibrio agua dulce – agua salada	13
Figura 2. 5. Avance de la intrusión marina producido por bombeo excesivo	14
Figura 2. 6. Tipos de muestreo.....	18
Figura 2. 7. Diagrama de flujo del procedimiento de muestreo para una fuente subterránea	21
Figura 2. 8. Cambios en la muestra del agua después de la recolección	22
Figura 2. 9. Esquema de los componentes de un sistema de suministro de agua	36
Figura 2. 10. Planta convencional de tratamiento de agua cruda.....	37
Figura 2. 11. Modelo de un sistema de intercambio iónico.....	42
Figura 2. 12. Esquema de un humedal construido	44
Figura 3. 1. Ubicación del campamento minero	47
Figura 3. 2. Caja de captación.....	50
Figura 3. 3. Tanque de almacenamiento	50
Figura 3. 4. Reservorio de regulación.....	51
Figura 3. 5. Caja de distribución	51
Figura 3. 6. Captación y distribución de agua subterránea en el campamento minero.....	52
Figura 3. 7. Promedio anual de precipitación pluviométrica (2007-2013).....	54
Figura 3. 8. Medición de caudal por método volumétrico	56

Figura 4. 1. Resultados de la caracterización para las épocas: seca y lluviosa	66
Figura 4. 2. Caudales para época seca y lluviosa	68
Figura 4. 3. Comparación de parámetros físicos	70
Figura 4. 4. Comparación de parámetros químicos	72
Figura 4. 5. Comparación de parámetros químicos	72
Figura 4. 6. Diagrama de flujo para el proceso de Intercambio Iónico.....	77
Figura 4. 7. Diagrama de flujo para el proceso de adsorción en medios de AA.....	77
Figura 4. 8. Diagrama de flujo para el proceso de membrana de Ósmosis Inversa.....	78
Figura 4. 9. Diagrama de flujo para los procesos de precipitación	78
Figura 4. 10. Tren de tratamiento propuesto	79
Figura 4. 11. Solubilidad de cationes metálicos.....	83
Figura 4. 12. Mezclador hidráulico con pantalla	84
Figura 4. 13. Filtro lento de arena de flujo descendente.....	86
Figura 4. 14. Costos de capital para la cloración.....	89
Figura 4. 15. Costos de OyM para la cloración.....	90
Figura 4. 16. Costos de capital para el proceso de coagulación/filtración	91
Figura 4. 17. Costos de OyM para el proceso de coagulación/filtración.....	92

LISTA DE TABLAS

Tabla 2. 1. Contaminantes de las aguas subterráneas, fuentes y principales efectos sobre la salud humana y los ecosistemas.....	14
Tabla 2. 2. Resumen de los requisitos especiales de muestreo y manipulación para muestras de agua y aguas residuales	24
Tabla 2. 3. Clasificación simplificada de microorganismos en agua	34
Tabla 2. 4. Operaciones involucradas en el pretratamiento	38
Tabla 2. 5. Principales mecanismos de desinfección.....	40
Tabla 2. 6. Procesos de filtración por membrana.....	41
Tabla 2. 7. Procesos de precipitación química.....	43
Tabla 2. 8. Límites permisibles de agua para consumo humano y doméstico – AM 097	45
Tabla 2. 9. Límites permisibles de agua para agua potable – NTE INEN 1108:2014.....	46
Tabla 3. 1. Procesos mineros que se realizan en el área de estudio.....	49
Tabla 3. 2. Registro de precipitaciones mensuales para el periodo 2007-2013	53
Tabla 3. 3. Materiales usados para cada campaña de muestreo.....	55
Tabla 3. 4. Criterios para la ejecución del programa de muestreo.....	56
Tabla 3. 5. Análisis para selección de parámetros significativos	58
Tabla 3. 6. Parámetros seleccionados y métodos de análisis	59
Tabla 3. 7. Factores del índice CCME – WQI	61
Tabla 3. 8. Clasificación CCME – WQI	62
Tabla 3. 9. Criterios, factores y descripción de evaluación	63
Tabla 3. 10. Formato de matriz de selección	64
Tabla 4. 1. Resultados de la caracterización y valores de “p” para “t de student”	65

Tabla 4. 2. Medición de caudales	68
Tabla 4. 3. Comparación de los resultados con las normativas de calidad del agua	69
Tabla 4. 4. Determinación del ICA	73
Tabla 4. 5. Resultados del F1, F2 y F3 para cálculo del ICA	73
Tabla 4. 6. Matriz de comparación para tecnologías de sorción y membrana	75
Tabla 4. 7. Matriz de comparación para tecnologías de precipitación	76
Tabla 4. 8. Matriz de evaluación y selección de la alternativa óptima.....	78
Tabla 4. 9. Comparación de agentes oxidantes.....	80
Tabla 4. 10. Datos referenciales de pH y dosis efectiva para coagulantes	82
Tabla 4. 11. Principales características del sistema de filtración propuesto	85
Tabla 4. 12. Cálculo de parámetros de diseño para el tratamiento propuesto	88
Tabla 4. 13. Presupuesto estimado para la implementación de la propuesta	92
Tabla 4. 14. Criterios y calificaciones para matriz de Leopold	93
Tabla 4. 15. Matriz de Identificación y evaluación de impactos ambientales	94

LISTA DE ANEXOS

Anexo I - Mapa hidrogeológico Machala	108
Anexo II – Protocolo de muestreo	111
Anexo III – Manejo de datos	115
Anexo IV - Informes de resultados	122
Anexo V – Ejemplo de valor “p” para “t de student” con ayuda de Microsoft Excel 2016	133
Anexo VI – Desglose de caudales para época seca y lloviaosa.....	135
Anexo VII – Cálculo del Índice de Calidad del Agua (CCME – WQI).....	137

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

"	Pulgadas
°C	Grados centígrados
µg	Microgramos
A	Amperios
Al	Aluminio
AM	Acuerdo ministerial
As	Arsénico
Ca	Calcio
CICAM	Centro de Investigaciones y Control Ambiental
Cl	Cloro
CN ⁻	Cianuro
CO ₂	Dióxido de carbono
COT	Carbono orgánico total
cps	Centipoise
Cr	Cromo
Cu	Cobre
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DEMEX	Departamento de Metalurgia Extractiva
DIGESA	Dirección General de Salud Ambiental
DQO	Demanda Química de Oxígeno
EPA	Agencia de Protección Ambiental
g	Gramos
gal	Galones
HCl	Ácido clorhídrico
HP	Caballo de fuerza
IEOS	Instituto Ecuatoriano de Obras Sanitarias
IGME	Instituto Geológico y Minero de España
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
K	Potasio
K ₂ CO ₃	Carbonato potásico
KCl	Cloruro potásico
KMnO ₄	Permanganato de potasio
l	Litro
LDIA	Laboratorio Docente de Ingeniería Ambiental
m ³	Metro cúbico
MAE	Ministerio del Ambiente

Mg	Magnesio
mgd	Millones de galones por día
ml	Mililitros
Na	Sodio
NA	No aplica
NaCN	Cianuro de sodio
NaOH	Hidróxido de sodio
NH₄⁺	Amonio
NMP	Número más probable
NO₂⁻	Nitritos
NO₃⁻	Nitratos
NTE	Norma Técnica Ecuatoriana
OD	Oxígeno disuelto
OMS	Organización Mundial de la Salud
OSP	Oferta de Servicios y Productos UCE
OyM	Operación y mantenimiento
PAHs	Hidrocarburos aromáticos policíclicos
Pb	Plomo
PCBs	Policlorobifenilos
Pd	Paladio
PET	Tereftalato de polietileno
pH	Potencial hidrógeno
PO₄⁻³	Fosfatos
s	Segundo
SAAM	Sustancias activas al azul de metileno
SDT	Sólidos disueltos totales
SST	Sólidos suspendidos totales
TPHs	Hidrocarburos totales de petróleo
THM	Trihalometanos
uma	Unidad de masa atómica
V	Voltios
Zn	Zinc

RESUMEN

El cantón Camilo Ponce Enríquez, alberga numerosos campamentos mineros, muchos de los cuales, acuden a fuentes subterráneas para satisfacer su demanda de agua, sin embargo, su calidad es desconocida y carecen de un adecuado tratamiento. Este proyecto evaluó la calidad del agua de una fuente específica a través de 29 parámetros durante las épocas: seca y lluviosa, identificándose diferencias no significativas entre las mismas ($p>0,05$). El índice CCME – WQI categorizó al agua de la fuente subterránea como “contaminada” prohibiendo su ingesta sin un óptimo tratamiento. La comparación entre los resultados de caracterización y los criterios establecidos por las Norma INEN 1108 y el AM 097 revelaron que los parámetros Cd, As y coliformes fecales se encuentran sobrepasando los límites máximos permitidos. Una vez conocido el problema de la fuente se evaluaron y compararon alternativas de tratamiento, resultando como óptima la tecnología de coagulación - filtración mejorada, cuyo tren de tratamiento involucra la pre - oxidación de As mediante cloración, mezcla rápida, coagulación – precipitación con cal y cloruro férrico, y la filtración directa (filtro de arena lento de flujo descendente), procesos que removerán el 95% de As, 90% de Cd y 99% de microorganismos patógenos, brindando agua segura a sus consumidores.

Palabras clave: Minería, agua subterránea, calidad del agua, índice CCME – WQI, potabilización, coagulación/filtración

ABSTRACT

The Camilo Ponce Enriquez canton is home to numerous mining camps, many of which go to underground sources to satisfy their demand for water, however, their quality is unknown and they lack adequate treatment. This project evaluated the water quality of a specific source through 29 parameters during the seasons: dry and rainy, identifying non-significant differences between them ($p > 0.05$). The CCME - WQI index categorized the water from the underground source as "contaminated", prohibiting its ingestion without optimal treatment. The comparison between the characterization results and the criteria established by the INEN 1108 and AM 097 standards revealed that the parameters Cd, As and fecal coliforms are exceeding the maximum allowed limits. Once the source problem was known, treatment alternatives were evaluated and compared, resulting as optimal coagulation - filtration technology, whose treatment train involves the pre - oxidation of As by chlorination, rapid mixing, coagulation - precipitation with lime and ferric chloride, and direct filtration (slow down-flow sand filter), processes that will remove 95% of As, 90% of Cd and 99% of pathogenic microorganisms, providing safe water to your consumers.

Keywords: Mining, groundwater, water quality, CCME - WQI index, purification, coagulation / filtration

PRESENTACIÓN

El presente proyecto evalúa y analiza la calidad del agua de la fuente subterránea que abastece a un campamento minero y con base a los resultados obtenidos presenta una propuesta de potabilización con el fin de brindar a los consumidores seguridad alimentaria. El estudio se divide en 5 capítulos detallados a continuación:

El Capítulo 1 abarca un breve estudio introductorio descrito a través de: antecedentes, objetivos, alcance y justificación.

El Capítulo 2 desarrolla el marco teórico, abordando temas como: generalidades del agua subterránea, materia de muestreo, caracterización del agua, procesos dirigidos a la potabilización: tratamientos convencionales y no convencionales, y los criterios normados por la legislación aplicable para agua de consumo humano y uso doméstico.

El Capítulo 3 presenta la metodología empleada, se empieza por la generación de una corta línea base de la zona estudiada, para proseguir con los procedimientos de muestreo y evaluación de la calidad del agua, también se describe las herramientas para analizar la variabilidad de resultados y la metodología a seguir para el cálculo del ICA y la selección de la alternativa óptima de tratamiento.

El Capítulo 4 expone los resultados obtenidos respecto a la evaluación de la calidad del agua, sus parámetros problema resultantes de la comparación con las normativas aplicables, la variación entre los resultados logrados para los muestreos en época seca y lluviosa, la valoración del ICA y la selección y desarrollo de la propuesta de tratamiento.

Finalmente, el Capítulo 5 presenta las deducciones obtenidas a lo largo del desarrollo del proyecto plasmadas en conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

El cantón Camilo Ponce Enríquez, ubicado en el extremo suroccidental de la provincia del Azuay, una de las zonas donde se concentra el mayor potencial aurífero del país (Sandoval, 2012), alberga numerosas empresas mineras, muchas de las cuales, para satisfacer su demanda de agua, acuden al recurso hídrico subterráneo. Este tipo de cuerpos de agua atenúan la escasez de agua superficial proporcionando el líquido vital para consumo humano y uso doméstico (Ojeda, 2009).

Las aguas subterráneas, en su estado natural, no suelen tener constituyentes en concentraciones tóxicas (Várela, 1993). Sin embargo, la calidad de estas aguas, en ocasiones se puede ver influenciada por los estratos litológicos del acuífero al que pertenece, a medida que el agua fluye a través del acuífero arrastra metales pesados y otros minerales existentes en la roca (Payán, 2016). Por otro lado, los niveles de contaminación en el agua subterránea pueden incrementarse por fuentes antrópicas como: efluentes de escorrentía agrícola procedentes del uso de fertilizantes artificiales nitrogenados y de excretas animales, la emisión de motores de combustión que condicionan la composición de agua lluvia, misma que constituye una fuente principal de recarga en los acuíferos, la infiltración de lixiviados producto de una mala gestión de residuos sólidos y los vertidos de aguas servidas sin tratamiento (Ávila y Cabrera, 2003).

La mayoría de las empresas que hacen uso de este recurso desconocen la calidad del agua subterránea captada para consumo humano y uso doméstico. Las características físicas evidenciadas en el agua por los consumidores de uno de los campamentos de la zona como brillo y turbidez leve crean la necesidad de evaluar la misma, ya que la ingesta de agua subterránea con altos niveles de contaminantes puede afectar la salud humana (Sahuquillo, 1994). Así, por ejemplo, el agua con un excesivo contenido de nitratos provoca metahemoglobina infantil, y la posible formación de nitrosaminas que eleva el riesgo de cáncer de estómago (Mohseni, Elliott y Zazouli, 2013). También, una elevada concentración de metales pesados en el agua provoca retrasos en el desarrollo, varios tipos de cáncer y daños en el riñón (Remache, 2013). Desde este enfoque, el agua con potencial uso de consumo humano, debe cumplir con los requisitos mínimos estipulados en las normativas correspondientes (Acuerdo ministerial 097. Tabla 1 y la Norma NTE INEN

1108:2014) (MAE, 2015; INEN, 2014). De no ser el caso, deberá ser sometida a tratamientos que eliminen o disminuyan la concentración de elementos nocivos para el ser humano (Romero, 2013).

El agua para ser apta de consumo humano requiere de una serie de tratamientos que se establecen acordes a su calidad inicial (Leal, 2000). Para determinar la necesidad de tratamiento y la correcta tecnología, los contaminantes específicos en el agua deben ser identificados y medidos (Aly, Al-Omran y Alharby, 2015). La calidad del agua se determina caracterizando parámetros físicos, químicos y microbiológicos, con los que se conoce el estado de un cuerpo de agua (Guevara, 1996) y sus posibles usos, sean estos para consumo humano, uso industrial, agrícola, recreacional, etc., así como su capacidad para asimilar cargas contaminantes (Romero, 2006).

Existen diversos tipos de tratamientos para la potabilización, tanto sus ventajas como sus limitaciones son los que definen sus campos de aplicación (Leal, 2000). El tren de tratamiento de una planta de potabilización convencional está conformado por un pretratamiento que separa física o mecánicamente material de gran tamaño (Piedras, 2015); se continúa con un proceso de coagulación – floculación que agrupa partículas muy pequeñas dispersas en otras más voluminosas y pesadas que puedan ser separadas más fácilmente; después la filtración permite la obtención de agua clara y ayuda a la eliminación del hierro, manganeso, color, sabor y olor. Finalmente, se culmina el tratamiento con la desinfección para suministrar agua limpia, blanda y libre de patógenos (Rodríguez, 2008). Sin embargo, cuando estos tratamientos no son suficientes se acude a tecnologías no convencionales como: membranas, sistemas de adsorción, intercambio iónico, desinfección con luz ultravioleta, ósmosis inversa, nanofiltración, electrodiálisis, entre otras, dependiendo del tipo de agua a tratar (Santiago, Bracho y Torres, 2013).

El presente trabajo está orientado a evaluar la calidad del agua subterránea captada por un campamento minero del cantón Camilo Ponce Enríquez para consumo humano y uso doméstico, e identificar los parámetros problema con el fin proponer un tratamiento idóneo para su potabilización de tal forma que cumpla con la normativa aplicable y que asegure la salud de quienes la consuman, reduciendo el riesgo de contraer enfermedades hídricas. Así mismo, se pretende determinar el presupuesto, plantear las bases de diseño e identificar y valorar los impactos ambientales de dicha propuesta.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la calidad del agua de la fuente subterránea empleada para consumo humano y uso doméstico que abastece a un campamento minero y con base a los resultados obtenidos proponer un sistema de tratamiento.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar campañas de muestreo para el agua subterránea de un campamento minero del cantón Camilo Ponce Enríquez siguiendo los lineamientos de las normas NTE INEN 2169 y NTE INEN 2176 en puntos significativos para ejecutar una evaluación precisa de la calidad del agua.
- Caracterizar la fuente subterránea del campamento minero en cuestión mediante análisis de laboratorio y comparar los resultados obtenidos con la normativa nacional vigente para determinar su carga contaminante actual.
- Realizar matrices de selección considerando aspectos técnicos, económicos y ambientales con el fin de seleccionar el tipo de tratamiento óptimo requerido para la potabilización de la fuente subterránea.

1.3. ALCANCE

El presente trabajo procura caracterizar el agua de la fuente subterránea que abastece a un campamento minero del cantón Camilo Ponce Enríquez, a través del análisis de parámetros claves físicos, químicos y microbiológicos, debido a que hasta el momento es desconocida la calidad de la misma.

De esta forma, se pretende generar la información necesaria para evaluar alternativas de tratamiento bajo criterios técnicos, económicos y ambientales, con el fin de definir un tratamiento adecuado, acorde a las necesidades de la comunidad minera y a su realidad económica, que potabilice el agua bajo los criterios establecidos por la norma INEN 1108 y reduzca el riesgo de intoxicaciones y demás efectos adversos a la salud provocados por enfermedades hídricas.

1.4. JUSTIFICACIÓN

El campamento minero escenario de este estudio, desconoce hasta el momento la calidad del recurso hídrico subterráneo que los provee de agua para consumo humano y uso doméstico, por tal motivo este trabajo técnico – experimental tiene como propósito realizar una caracterización y evaluación de la misma con el fin de levantar una corta línea base de la calidad del acuífero del cual proviene el agua subterránea, así como un análisis de los problemas de contaminación presentes, los mismos que ponen en riesgo la salud de quienes consumen el agua. Por otro lado, se pretende conocer o identificar los procesos de potabilización necesarios para plantear una propuesta de tratamiento que permita la remoción de agentes objetables que permita proporcionar al usuario un agua segura.

En la primera fase del proyecto, correspondiente a la actividad de muestreo, se aplicarán las guías de las normas técnicas ecuatorianas INEN 2176 e INEN 2169 (INEN, 2013), ya que estas representan una fuente confiable de procedimientos a seguir durante el muestreo.

Para la evaluación fisicoquímica y microbiológica de la calidad del agua, se seleccionarán parámetros con base a fuentes bibliográficas, normativa, costos de análisis y disponibilidad de reactivos e instrumentos de laboratorio (Arbitto, 2014). Los métodos que se utilizarán para la caracterización, están definidos en el Manual de Análisis de Agua Hach y Métodos Estándar para la Examinación de Agua y Aguas Residuales, con el fin de obtener resultados aceptables y fácilmente comparables con las normas técnicas de calidad asociadas al estudio para establecer su cumplimiento: Acuerdo ministerial 097. Tabla 1 y Norma INEN 1108:2011 (Merizalde, 2017; Reolon, 2010).

La determinación del Índice de la Calidad del Agua (ICA) se realizará de acuerdo a la metodología del índice CCME – WQI. Canadian Council of Ministers of Environmental – Water Quality Index, debido a que se muestra como una valoración simplificada, resumida y comprensible del estado actual de la calidad del agua que contribuye a un mejor manejo y gestión de los recursos hídricos subterráneos. (CCME, 2001). Éste índice será determinado con el fin de atribuirle a la calidad del

agua de la fuente subterránea un valor descriptivo o clasificación en función de un conjunto de parámetros, para de esta manera simplificar la información a fin de que sea más comprensible al público del campamento minero. Además, el ICA permitirá identificar la tendencia del cambio de la calidad y el grado de contaminación de la fuente subterránea, lo que contribuirá y orientará en la toma de decisiones para implementar o mejorar acciones de manejo o programas de control del riesgo sanitario del agua (Salcedo, Garrido, Esteller y Martínez, 2015).

Finalmente, una vez conocida la calidad del agua de la fuente subterránea, se planteará la elección de la alternativa óptima mediante matrices de selección que analizarán con base a bibliografía disponible: criterios técnicos, ambientales y económicos (EPA, 2002). En dichas matrices se ponderarán los criterios sobre un puntaje de 100, la alternativa que obtenga mayor puntaje será la seleccionada y en ella se enfocará la descripción del proceso, bases de diseño, costos e identificación y valoración de impactos ambientales (García y Gonzáles, 2019).

Los hallazgos de la presente investigación permitirán definir un tratamiento idóneo de potabilización que alcance los lineamientos establecidos en la norma INEN 1108, con el objetivo principal de reducir el riesgo de contraer enfermedades hídricas asociadas a la ingesta de agua de una fuente de abastecimiento de dudosa calidad. De igual forma, el estudio representará el principal precedente para el análisis de factibilidad y la posterior implementación de la propuesta en el lugar mencionado.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. AGUAS SUBTERRÁNEAS

2.1.1. ORIGEN

El agua subterránea es un recurso que se encuentra debajo de la superficie terrestre. La mayor parte de esta agua proviene de la lluvia y la nieve derretida que percola gracias a la gravedad y penetra en el suelo. El agua llena los espacios entre las rocas y las partículas del suelo (poros), formando un "acuífero" (EPA, 2002).

La figura 2.1. muestra que mientras mayor cantidad de agua penetra en el suelo, el nivel de la misma se eleva bajo tierra y forma dos zonas distintas de agua subterránea: la zona no saturada, que se encuentra debajo de la superficie terrestre, y contiene aire y agua en los poros; y la zona saturada, en la que todos los poros y las fracturas de la roca están llenas de agua, se encuentra por debajo de la zona no saturada (EPA, 2002; McDougal, 2008).

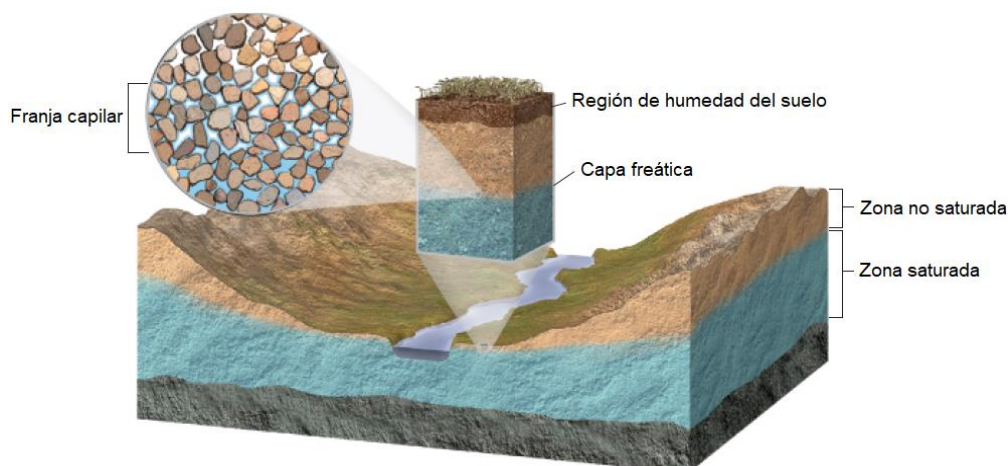


Figura 2. 1. Zonas del agua subterránea

Fuente: (McDougal, 2008)

2.1.2. USOS

El agua subterránea representa el 95% del total de masa de agua dulce del planeta, con un volumen más grande que las aguas superficiales retenidas en ríos o lagos, es agua de fácil acceso, su costo de extracción es bajo y generalmente tiene una buena calidad (Caraballo y Xavier, 2012; Burbano, Becerra y Pasquel, 2014).

Esta agua llega a la superficie terrestre de forma natural a través de manantiales, o mediante la intervención del hombre con la construcción de pozos (verticales y horizontales: galerías filtrantes y zanjas de drenaje), es captada para números usos y con el fin de satisfacer demandas determinadas (Caraballo y Xavier, 2012).

En Estados Unidos, por ejemplo (ver figura 2.2.), el agua subterránea suministra agua potable al 51% de la población total y el 99% de la población rural; el 64% del agua subterránea se usa para irrigación de cultivos y es un componente importante en muchos procesos industriales (The Groundwater Foundation, 2005).

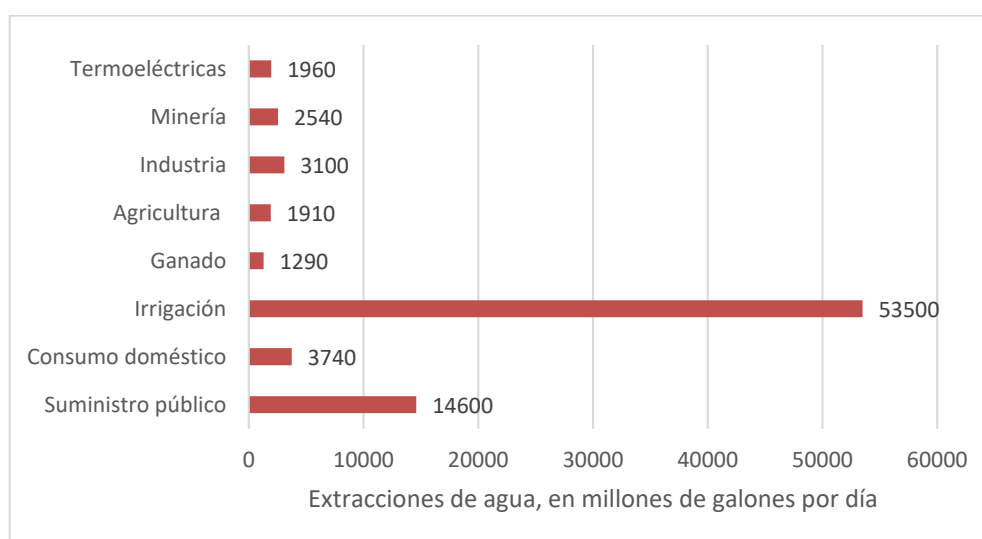


Figura 2. 2. Extracción total de agua subterránea en Estados Unidos, 2005

Fuente: (The Groundwater Foundation, 2005)

2.1.2.1. Uso del agua subterránea en Ecuador

En ciertas zonas del Ecuador, el agua subterránea es el único recurso accesible que garantiza la seguridad alimentaria a comunidades, pues proporciona agua para consumo humano, uso doméstico e irrigación de cultivos (Burbano et al., 2014).

El Instituto Ecuatoriano de Obras Sanitarias (IEOS) ha perforado más de 500 pozos en diferentes puntos del país para satisfacer la demanda de agua potable de varias poblaciones ecuatorianas. El mayor número de obras se llevó a cabo entre 2004 y 2005 en las provincias de Manabí, Guayas y Los Ríos, debido a periodos extensos de sequía (Burbano et al., 2014).

En la capital, a partir 1942, las fuentes subterráneas son empleadas para suministro de agua potable en un 50%, 30% en uso industrial y el 20% restante en otros usos. La región litoral constituye una unidad hidrogeológica de características benéficas, en esta zona se genera la mayor perforación de pozos a nivel nacional, cuyas profundidades superan los 100 metros en la mayoría de casos, el recurso hídrico obtenido es usado para abastecimiento y fines agrícolas. En contraste, la zona que se ubica en la franja costanera externa, a la que pertenecen Manabí y Santa Elena, posee acuíferos pobres, de poca extensión y aislados (Burbano et al., 2014).

2.1.3. FUENTES DE CONTAMINACIÓN: NATURALES Y ANTROPOGÉNICAS

El término contaminación hace referencia a la modificación de la calidad natural del agua subterránea en forma nociva a causa de la introducción de sustancias extrañas que afectan al ecosistema negativamente (Stefanakis, Zouzias y Marsellos, 2015).

La degradación de la calidad del agua es el resultado de varias fuentes contaminantes, tanto naturales como antropogénicas.

2.1.3.1. Fuentes naturales

La concentración y el tipo de contaminantes naturales en el agua subterránea dependen de la naturaleza de los materiales geológicos que se encuentran rodeando el cuerpo de agua. Las condiciones locales regulan los niveles de estos componentes en las aguas subterráneas (Megremi et al., 2013).

Se puede encontrar naturalmente nitritos y nitratos, provenientes de la descomposición de los compuestos de nitrógeno en el suelo. Asimismo, las rocas y los suelos sedimentarios generalmente indican la presencia de arsénico, cadmio, plomo, magnesio, calcio, cloruros e incluso cromo en bajas concentraciones. En contraste elementos disueltos como el fluoruro y el selenio han sido detectados en concentraciones relativamente altas. El fluoruro se puede liberar especialmente de rocas y cenizas volcánicas ácidas dispersas, cuando la dureza del agua es baja (Stefanakis et al., 2015).

Por otro lado, la contaminación radiactiva por radón se genera por parte de las rocas plutónicas que están en contacto con el acuífero, las variaciones de concentración se relacionan con el grado de meteorización en las rocas y los suelos, y con el aumento y la caída de la capa freática local (Stefanakis et al., 2015). También, minerales con alto contenido de uranio (circonitas) pueden existir en rocas ígneas y metamórficas o en suelos, mientras que las fallas y fracturas en un lecho de roca rico en uranio facilitan la migración de altas concentraciones al agua subterránea (Richon et al., 2010).

Además, la degradación de los acuíferos costeros de agua dulce puede darse de forma natural gracias a la intrusión de agua de mar debido al efecto del cambio climático y la presencia de mercurio e iones como Na^+ , Mg^{+2} , Ca^{+2} , K^+ , Cl^- entre otros (Werner et al., 2013).

2.1.3.2. Fuentes antropogénicas

De acuerdo al tipo de actividades humanas, las fuentes que producen la contaminación del agua subterránea se pueden agrupar en cuatro grupos, que se detallan a continuación:

2.1.3.2.1. Contaminación urbana y doméstica

Los residuos sólidos y líquidos generados por las actividades humanas constituyen una amenaza directa para la alteración de la calidad de las aguas subterráneas (IGME, 1985).

Residuos sólidos urbanos y domésticos: Los lixiviados producidos en vertederos mal aislados tienen gran cantidad de elementos contaminantes como sólidos disueltos que pueden contaminar el agua cuando alcanzan la superficie freática, aumentando la mineralización del acuífero, también eleva su temperatura, cambia de color, se torna de olor desagradable y eleva su contenido de NH_4^+ , DBO, DQO (IGME, 1985; Mandeep, Samanpreet y Sooch, 2003).

Residuos líquidos urbanos y domésticos: Las aguas residuales de los núcleos poblacionales contienen sales minerales, materia orgánica, restos de compuestos

no biodegradables, microorganismos fecales, entre otros contaminantes. Estos residuos líquidos son eliminados a través de redes de alcantarillado, directamente en cauces superficiales o en pozos sépticos, y en la mayor parte de los casos sin un previo tratamiento de depuración. Se genera contaminación indirecta por recarga de acuíferos por aguas superficiales o en caso de conexión acuífero – río (IGME, 1985).

Existe un mayor riesgo de contaminación de agua subterránea debido a pérdidas de las redes de alcantarillado o por la infiltración de los pozos sépticos mal ejecutados, al igual que las malas prácticas de regadío con aguas residuales. Sin embargo, esto depende y se agrava cuando las pérdidas se producen en zonas hidrogeológicamente favorables para la infiltración (Mandeep et al., 2003).

2.1.3.2.2. Contaminación agrícola y ganadera

Las prácticas agrícolas y ganaderas son las causas más comunes del deterioro de la calidad del agua subterránea debido a: el inapropiado uso de fertilizantes nitrogenados y fosforados, así como de pesticidas en suelos altamente permeables, con poca capacidad de adsorción y acuíferos libres, las malas prácticas de regadío intensivo con agua reciclada o agua residual y los vertidos de residuos animales y de cosechas en suelos vulnerables (IGME, 1985; Mandeep et al., 2003).

Los compuestos nitrogenados provenientes de los fertilizantes, incorporan en el agua subterránea amonio (NH_4^+), nitritos (NO_2^-) y principalmente nitratos (NO_3^-) a través de la lixiviación por el agua lluvia o por el riego, mientras los fertilizantes fosforados, de sulfato amónico $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$, cloruro potásico (KCl) o carbonato potásico (K_2CO_3) aportan fósforo, sulfatos y cloruros (IGME, 1985).

Por otro lado, el regadío intensivo y el reciclaje de agua para riego, además de introducir nitratos, provocan el aumento de sales en los acuíferos debido a que las plantas no aprovechan en su totalidad las sales del agua de riego que tiene gran capacidad para lixiviar fertilizantes y pesticidas, así como para disolver sales del terreno (IGME, 1985).

Finalmente, el vertido de los residuos animales (residuos líquidos y materia orgánica) sin tratamiento y en zonas inadecuadas, por fugas en los sistemas de almacenamiento o malas prácticas agrícolas genera contaminación por su gran contenido de sólidos suspendidos, alta carga orgánica (DBO_5) y elevadas concentraciones de coliformes fecales y nitratos, contaminantes que son arrastrados desde la zona edáfica del suelo por las aguas de infiltración (IGME, 1985; Ávila y Cabrera, 2003).

2.1.3.2.3. Contaminación industrial

Las actividades industriales en función del tipo de producción generan múltiples agentes contaminantes sólidos, líquidos y gaseosos, que pueden ingresar a las fuentes de agua subterránea por pérdidas durante el almacenamiento, el transporte o los accidentes no controlados (Nysten, 1991; Auge, 2006).

En general, en el caso de los residuos sólidos, los contaminantes disueltos por el agua lluvia infiltrada en las escombreras pueden alcanzar el acuífero más cercano alterando su calidad (IGME, 1985). Los residuos líquidos, por otra parte, son inyectados directamente en acuíferos salinos, acuíferos secos o son eliminados en vertederos no controlados, excavaciones, tanques de almacenamiento o conducciones que al momento de presentar fugas liberan los contaminantes que posteriormente, debido a que son escasamente retenibles en el suelo, alcanzan el nivel freático del acuífero (Auge, 2006).

Cabe mencionar que los residuos gaseosos emanados por los motores de combustión de las grandes industrias, aunque en menor medida, también influyen en la contaminación de las aguas subterráneas, ya que condicionan la composición de agua lluvia que es principal fuente de recarga de los acuíferos (IGME, 1985; Nysten, 1991).

La caracterización de los vertidos industriales tiene cierto grado de dificultad debido a su amplia variedad (Auge, 2006). El esquema presentado en la figura 2.3. muestra los agentes contaminantes más comunes de las industrias de mayor incidencia que pueden alcanzar los acuíferos y alterar el recurso hídrico subterráneo.



Figura 2. 3. Esquema de contaminación industrial de aguas subterránea

Fuente: (IGME, 1985; Auge, 2006)

Elaboración: Flores, J.

2.1.3.2.4. Contaminación inducida por bombeo

El agua subterránea también puede contaminarse por la invasión de agua salina, procedente de terrenos yesíferos o descargas industriales en acuíferos de agua dulce continentales, y en mayor proporción por la invasión de agua de mar en acuíferos costeros (IGME, 1985).

En los acuíferos costeros, de forma natural, el agua de mar tiende a introducirse bajo el agua dulce a causa de su mayor densidad, dando lugar a la formación de una sección que separa el agua dulce del agua salada y se extiende tierra adentro llamada “cuña salina”. Entre el agua dulce y la parte superior de la cuña salina se desarrolla una “interfase”, que se mueve en función de los cambios de presión en

cada sistema (Hernández, González, González y Romero, 2000; López y Gómez, 2007). En condiciones de equilibrio (ver figura 2.4.), el agua de mar permanece estacionaria mientras el agua dulce fluye hacia el mar, en periodos de menor recarga del acuífero el frente de agua salada avanza tierra adentro y retrocede al mar cuando la recarga es mayor (López y Gómez, 2007).

La intrusión marina resulta de actividades humanas como la construcción de canales de drenaje y en mayor proporción se genera por la extracción de acuíferos mediante bombeo excesivo (Hernández et al., 2000). Esto provoca que la cuña salina penetre lentamente tierra adentro y que la interfase ascienda produciendo la disminución del flujo de agua dulce hacia el mar, si este flujo cesa, el agua salada desplaza al agua dulce y rellena todo el acuífero, hasta el nivel del mar (ver figura 2.5.) (López y Gómez, 2007). Si continua el bombeo excesivo, cabe la posibilidad de que se produzca un abombamiento en la interfase conocido como “domo salino”, provocando una captación directa de agua salada en el pozo (IGME, 1985).

Las consecuencias directas de este fenómeno recaen en un aumento de Cl^- , Mg^{++} y SO_4^{2-} en el agua que generan inconvenientes futuros (IGME, 1985; López y Gómez, 2007). Según el IGME (1985), un porcentaje de intrusión del 2% de agua salina provoca graves problemas de potabilización del agua dulce, mientras un 5% vuelve al agua inutilizable para la mayoría de usos.

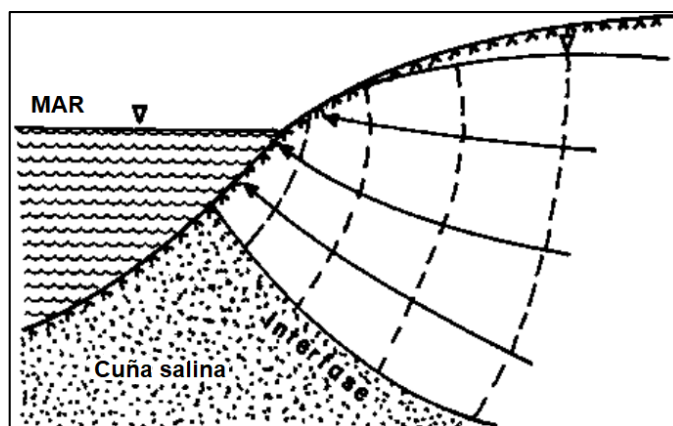


Figura 2. 4. Condición de equilibrio agua dulce – agua salada

Fuente: (IGME, 1985)

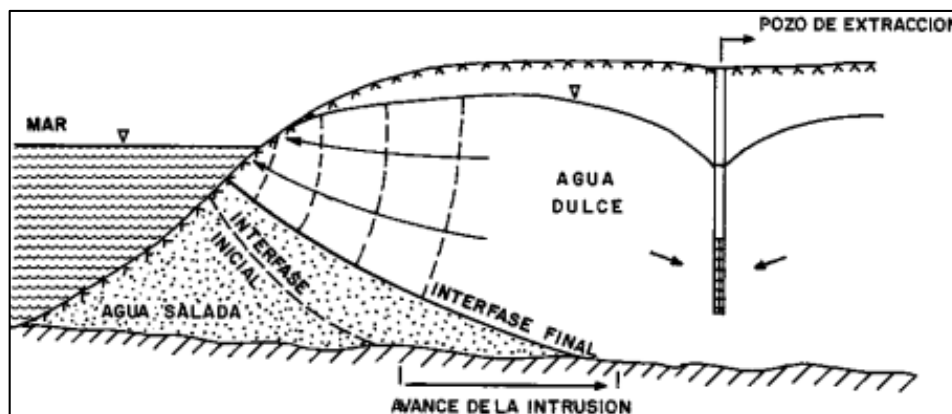


Figura 2. 5. Avance de la intrusión marina producido por bombeo excesivo

Fuente: (IGME, 1985)

2.1.4. PREOCUPACIONES DE SALUD PÚBLICA Y MEDIO AMBIENTALES

De acuerdo con Stefanakis et al. (2015), los contaminantes más comunes del agua subterránea son:

- Metales pesados (Hg, Pd, Cd, Cr, Cu, etc.)
- Compuestos tóxicos (As, Se, CN⁻ etc.)
- Compuestos inorgánicos (NO₃⁻, NO₂⁻, PO₄⁻³ etc.)
- Compuestos orgánicos sintéticos (fenoles, hidrocarburos clorados, detergentes, pesticidas, colorantes, productos derivados del petróleo, etc.)
- Sustancias radiactivas (radón causado por la descomposición de las series de uranio y torio)
- Microorganismos patógenos (bacterias y virus)

A continuación, la tabla 2.1. resume los contaminantes mencionados, sus fuentes y principales efectos sobre la salud humana y los ecosistemas.

Tabla 2. 1. Contaminantes de las aguas subterráneas, fuentes y principales efectos sobre la salud humana y los ecosistemas

CONTAMINANTE	FUENTE DE CONTAMINACIÓN	EFECTO
Metales pesados y compuestos tóxicos	Industria de abonos, fertilizantes y plaguicidas, fundidoras, fábricas de automóviles y pinturas, combustión de carbón, minería, agricultura y riego	Arsénico (As): Tóxico en forma inorgánica, cancerígeno (piel, vejiga y pulmones), provoca lesiones cutáneas, neurotoxicidad, diabetes y enfermedades pulmonares y cardiovasculares (dosis letal: ~ 130 mg). Cadmio (Cd): Elemento cancerígeno, causa afecciones renales y cardiovasculares (hipertensión), anemia y alteraciones hepáticas debido a que es acumulativo en hígado, riñón y páncreas (dosis letal: ~ 9 g). Reemplaza bioquímicamente al cinc.

		<p>Cianuro (CN): Afecta al sistema nervioso, produce alteraciones tiroideas, cefalea, vértigo, vómito, náuseas y dermatitis (dosis letal: ~ 50 mg).</p> <p>Cobre (Cu): Causa vómito y problemas al sistema digestivo, daños al riñón e hígado. Tóxico en algas y plantas.</p> <p>Cromo (Cr): Posible agente cancerígeno, efectos corrosivos en el intestino (dosis letal: ~ 0,5 g).</p> <p>Hierro (Fe): No es tóxico, pero genera turbidez y sabor desagradable a concentración > a 0,1 mg/l. Fitotóxico.</p> <p>Manganeso (Mn): Produce manganismo, enfermedad que consiste en una afección al sistema nervioso. Puede causar improducción de suelos y manchas marrón en las hojas de las plantas.</p> <p>Plata (Ag): Genera daños al hígado, riñón, piel y mucosas.</p> <p>Plomo (Pb): Posible cancerígeno, tóxico en niños y embarazadas, afecta al sistema nervioso y al riñón, produce desajustes reproductores, daños cerebrales, hipertensión y anemia. Afecta la reproducción de especies marinas invertebradas.</p> <p>Selenio (Se): Provoca selenosis, cuyos efectos son cabello quebradizo, deformidades de las uñas y anormalidades neurológicas (dosis letal: ~ 200 ug/día). Acumulable en la cadena alimenticia.</p> <p>Zinc (Zn): Ocasiona debilidad muscular. Fitotóxico.</p>
Compuestos inorgánicos	<p>Actividades agrícolas, riego, emisión de motores de combustión, infiltración de lixiviados</p> <p>Sobre extracción de acuíferos, intrusión de agua de mar</p>	<p>Nitritos (NO₂) y Nitratos (NO₃): Provoca metahemoglobinemia infantil y la posible formación de nitrosaminas que eleva el riesgo de cáncer de estómago.</p> <p>Cloruros (Cl): Produce vómito y es perjudicial en personas con enfermedades cardíacas.</p> <p>Sales minerales: Tiene efectos laxantes. Muerte de peces, disminución de oxígeno, aumento de la tasa de metabolismo de los organismos, disminución de los niveles de agua subterránea.</p>
Compuestos orgánicos sintéticos	<p>Industria química, alimentaria, farmacéutica y del papel, aguas residuales, combustión de desechos sólidos</p>	<p>Fenoles, PAHs, PCBs, amoníaco, detergentes, fibras de papel: Agentes cancerígenos. Limitan la cantidad de oxígeno en el agua y la biodiversidad, producen eutrofización.</p> <p>Fertilizantes, herbicidas y pesticidas: Pueden provocar cáncer y enfermedades del sistema nervioso. Aumentan iones de nitrato.</p>

	municipales, refinerías.	Antibióticos y otros productos farmacéuticos: Trastornan el sistema inmunitario. Dioxinas: Pueden producir cáncer. Hidrocarburos, petróleo, benceno, asfalto: Elementos cancerígenos. Destruyen fauna y flora, y obstaculizan la oxigenación del agua.
Sustancias radioactivas	Plantas de energía nuclear	Radón (²²⁶Ra): Tiene un periodo radiactivo de 1600 años, afecta principalmente a los huesos y produce alteraciones genéticas. Se acumula en la cadena alimenticia.
Microorganismos patógenos	Mataderos, rellenos sanitarios, aguas residuales domésticas	Virus Virus A: Hepatitis epidérmica Coxsackievirus: Afecciones gastrointestinales Adenovirus: Conjuntivitis en las piscinas Bacterias Salmonella typhi: Fiebre tifoidea Salmonella paratyphi: Fiebres paratíficas Shigella dysenteriae: Disentería bacilar Vibrio cholerae: Cólera

Fuente: (IGME, 1985; Ramírez, 2010; Remache, 2013, Stefanakis et al., 2015; Londoño Franco, Londoño y Muñoz, 2016)

Elaboración: Flores, J.

2.2. MUESTREO

El muestreo hace referencia a la recolección de una porción representativa de agua siguiendo un protocolo que considera su preservación, transporte y almacenamiento para un posterior análisis de laboratorio que determinará las características físicas, químicas y biológicas del agua en cuestión (INEN, 2013).

2.2.1. MÉTODOS DE MUESTREO

2.2.1.1. Muestreo manual

Es llevado a cabo cuando los puntos de recolección de muestras son de fácil acceso o en su defecto cuando a través de adaptaciones simples se puede tomar las muestras sin mayor complicación. El muestreo manual requiere de un mínimo de equipo y permite al encargado de la recolección de la muestra observar el comportamiento de las características del agua (material flotante, cambios de caudales, color, olor, etc.). Sin embargo, en programas de muestreo rutinarios o de gran escala resulta excesivamente costoso (Candela, 2016).

Este tipo de método de muestreo únicamente se acepta para los criterios de vigilancia y control del agua, donde la muestra representativa es única para el sitio en particular y para el tiempo seleccionado (Pitt, 2007; Nava, 2011).

2.2.1.2. Muestreo automático

El muestreo automático es aconsejado en puntos de complejo acceso o cuando un muestreador automático está disponible dentro de los recursos del proyecto, tiene la ventaja de una mejor precisión en la toma de muestras y permite aumentar la frecuencia del muestreo, pero presenta limitaciones en relación a su calibración, montaje y continuos controles que previenen fallos y atascamientos del equipo (Nava, 2011; Pitt, 2007).

Además, este tipo de muestreo puede resultar costoso de implementar debido a que la mayoría de equipos de muestreo automático (equipos secuenciales para muestras compuestas en lapsos largos de tiempo, equipos para detección de pesticidas mediante monitoreo lineal, muestreadores pasivos, etc.) requiere la instalación de accesorios tales como paneles solares o antenas y herramientas computacionales de software y licencias de transmisión (Nava, 2011).

2.2.1.3. Muestreo mixto

Se llama muestreo mixto al acoplamiento del muestreo manual y automático en la ejecución de una campaña de toma de muestras. Esta fusión complementa el sistema de muestreo, convirtiéndolo en un procedimiento integrado que logra verificar manualmente los resultados obtenidos por medios automáticos, dicha verificación se lleva a cabo mediante la elección aleatoria de muestras, y permite ajustar, calibrar y dar mantenimiento a los equipos automáticos para generar resultados certeros y confiables (Nava, 2011).

La figura 2.6. muestra de forma gráfica los diferentes tipos de muestreo descritos anteriormente.



Figura 2. 6. Tipos de muestreo

Fuente: (Pitt, 2007; Nava, 2011)

Elaboración: Flores, J.

2.2.2. TIPOS DE MUESTRAS

2.2.2.1. Muestra simple o puntual

Es una muestra individual que representa la calidad y composición del agua exclusiva del lugar, tiempo y circunstancias en las que fue captada, los valores no son extrapolables a otras situaciones (Nava, 2011; INEN, 2013). Es esencial para determinar si la calidad del agua de un parámetro específico sobrepasa los límites permisibles de una normativa de interés (Nava, 2011).

Una muestra simple es funcional en aguas tanto estancadas como corrientes y se recomienda cuando el flujo de agua no es uniforme o si los parámetros de interés no se mantienen constantes, los intervalos de tiempo con que se toman las muestras deben reflejar la frecuencia, duración y extensión de las variaciones. Se sugiere cuando se determinan parámetros inestables como: concentración de cloro residual, sulfitos solubles, temperatura, potencial hidrógeno y gases disueltos (INEN, 2013).

2.2.2.2. Muestra compuesta

Muestra dependiente del flujo, localización, volumen o tiempo, se conforma por la unión de dos o más submuestras simples tomadas continuamente en el mismo sitio, pero en diferentes tiempos (generalmente dentro de un periodo de 24 horas y en volúmenes contantes o proporcionales al caudal) (Cabanelas y Aznar, 2008; Calderón, 2016). Aporta el valor de la composición promedio del agua, pero se aleja de los valores punta del sistema, por ello resulta trascendente verificar previo a la mezcla si los parámetros de interés no varían significativamente durante el muestreo, preservación y almacenamiento (INEN, 2013).

Este tipo de muestra es conveniente cuando la conformidad con un límite permisible se fundamenta en la calidad promedio del agua, también abarata costos en comparación con el análisis de laboratorio por separado de un gran número de muestras puntuales y subsecuentes cálculos promediales, recomendada en aguas estancadas y corrientes (INEN, 2013).

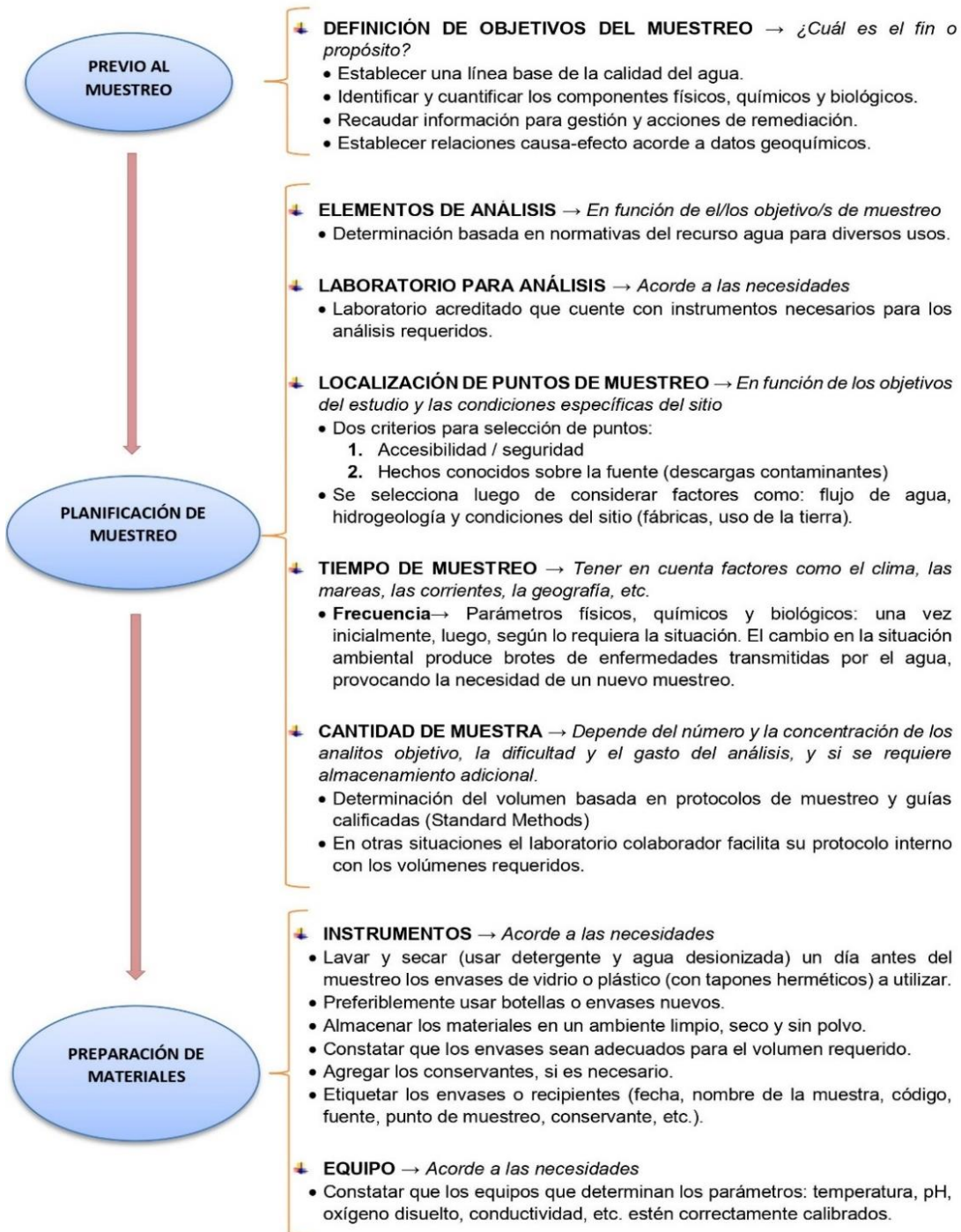
2.2.2.3. Muestra en serie

Muestra conveniente para el análisis de aguas estancadas, se emplea para crear perfiles de profundidad tomando una serie de muestras a distintos calados en un punto específico; y perfiles de área tomando una serie de muestras a profundidad específica en diversos puntos del cuerpo de agua (INEN, 2013).

2.2.3. PROCEDIMIENTO PARA TOMA DE MUESTRAS EN UNA FUENTE SUBTERRÁNEA

La recolección de muestras debe ser guiada por protocolos (procedimientos y métodos) predeterminados para cumplir con el propósito de la investigación (Gallo, Rosas, Zamar y Bazán, 2009).

A continuación, se presenta la figura 2.7. que detalla cada una de las etapas de un protocolo o procedimiento de muestreo para una fuente subterránea.



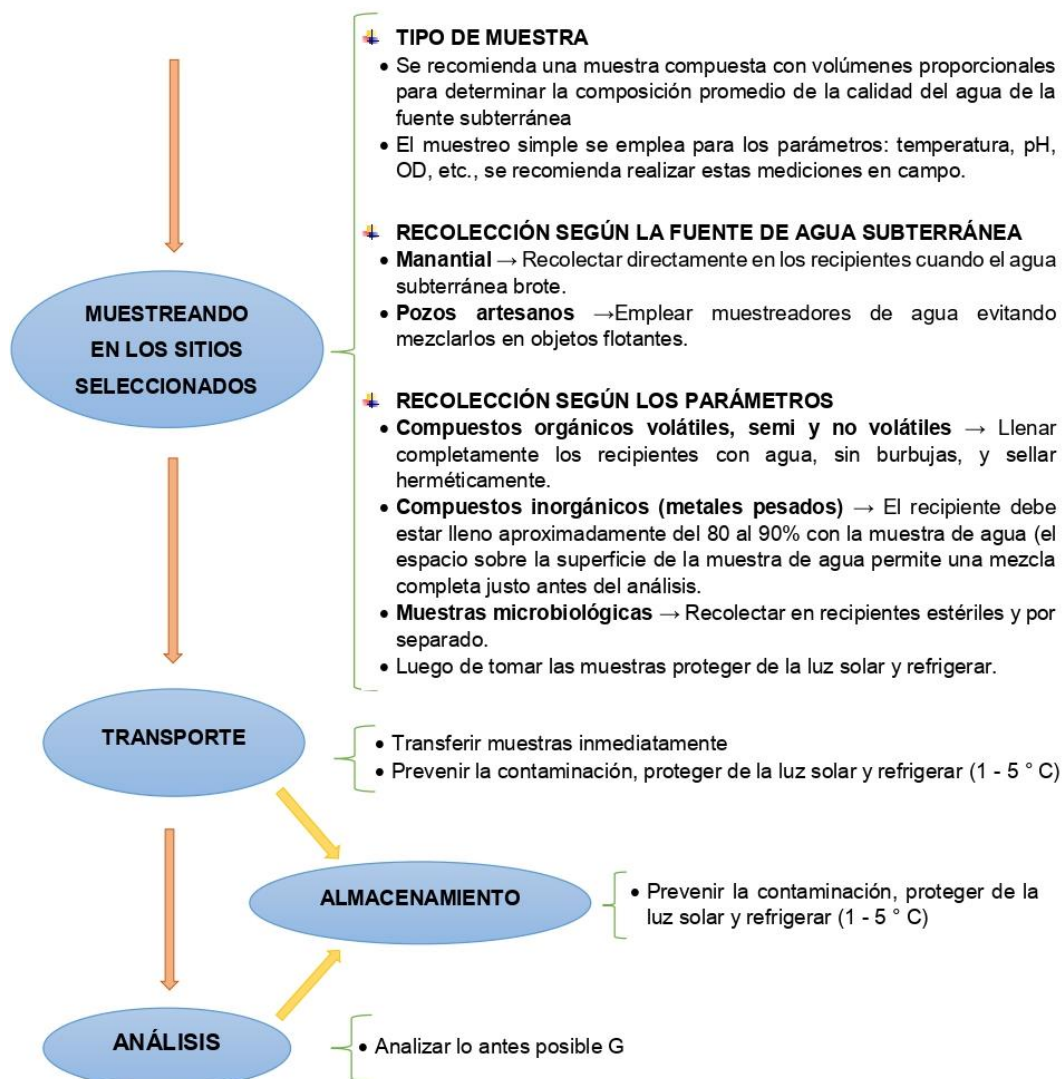


Figura 2. 7. Diagrama de flujo del procedimiento de muestreo para una fuente subterránea

Fuente: (SGEMC, s.f; Rainwater y Thatcher, 1960; WHO, 1997; Pitt, 2007; Candela, 2016)

Elaboración: Flores, J.

2.2.4. PRESERVACIÓN Y TRANSPORTE DE LAS MUESTRAS

2.2.4.1. Preservación

Una vez extraída la muestra de su fuente y conforme transcurre el tiempo, inevitablemente se producen cambios químicos y biológicos (ver figura 2.8.) que pueden comprometer los resultados analíticos. Las técnicas de preservación retardan dichos cambios, su elección depende de la naturaleza de la muestra y de los analitos objetivo (Calderón, 2016).

CAMBIOS QUÍMICOS	CAMBIOS BIOLÓGICOS
<ul style="list-style-type: none"> • Los cationes metálicos pueden: formar complejos con otros elementos, precipitar como hidróxidos y adsorberse en la superficie de los contenedores (Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Pb, Mg, Ag y Zn). • Ciertos componentes se disuelven o volatilizan. • El estado de valencia de los iones puede cambiar bajo ciertas condiciones reductoras u oxidantes. 	<ul style="list-style-type: none"> • La actividad microbiológica provoca: descenso en la concentración de fenoles y DBO, reducción de sulfato a sulfuro y cambios en el contenido de nitrógeno (nitrato – nitrito - amonio). • Cambio en el estado de la valencia de un radical o elemento. • Conversión de constituyentes solubles en materiales que se enlazan orgánicamente a estructuras celulares. • Alteración en los ciclos de nitrógeno y fósforo.

Figura 2. 8. Cambios en la muestra del agua después de la recolección

Fuente: (Calderón, 2016)

Elaboración: Flores, J.

Ciertos análisis como: CO₂, cloro residual, OD, yodo, nitrito, ozono, pH y temperatura deben realizarse dentro de unas pocas horas de la recolección o preferiblemente en el sitio (in situ), otros análisis como los metales pesados y compuestos orgánicos pueden ejecutarse después de largos periodos de tiempo al almacenar la muestra después de la preservación (Pitt, 2007). Mientras menor sea el lapso entre la recolección de la muestra y la ejecución de sus análisis, los resultados son más precisos, especialmente en aquellos analitos cuyas concentraciones son del orden µg / l (Calderón, 2016).

2.2.4.1.1. Técnicas de preservación

2.2.4.1.1.1. Refrigeración y congelación de las muestras

Idealmente, todas las muestras deben enfriarse en hielo o sustitutos comerciales después de la recolección, usando cajas térmicas o refrigeradores de campo, este procedimiento minimiza la biodegradación y volatilización de los constituyentes. Se debe evitar el uso del hielo seco ya que puede alterar el pH de las muestras o congelarlas provocando que los recipientes de vidrio se rompan (Calderón, 2016).

- **Enfriamiento simple** (*rango de temperatura 2°C y 5°C*): Conjuntamente con el almacenamiento en un lugar oscuro, conservan la muestra por un corto periodo de tiempo antes de llevarse a cabo los análisis. No es un método útil

si se pretende almacenar la muestra tiempos extensos especialmente en aguas residuales (INEN,2013).

- **Congelamiento** (*temperatura de -20 °C*): Aumenta el periodo de almacenamiento, los procesos de congelamiento y descongelamiento requieren control para regresar la muestra a su condición de equilibrio inicial Únicamente se recomienda para recipientes plásticos (INEN, 2013).

2.2.4.1.1.2. Filtración de muestras

La filtración remueve sedimentos, algas, microorganismos y material suspendido del agua mediante membranas filtrantes, papel filtro o centrifugación, también se usa para determinar la relación entre formas insolubles y solubles de una sustancia. No es aplicable si el filtro retiene otros componentes que requieren ser analizados (INEN, 2013).

Para evitar una posible contaminación de la muestra, el filtro debe ser lavado cuidadosamente antes de su uso y las membranas deben manipularse con precaución ya que sus compuestos solubles pueden desprenderse y causar alteraciones, además la materia orgánica y algunos metales pesados se pueden adsorber en su superficie (INEN, 2013).

2.2.4.1.1.3. Adición de preservativos químicos

Algunos componentes físicos y químicos se estabilizan añadiendo preservativos químicos como: ácidos, soluciones básicas, biácidos y reactivos especiales, se sugiere usarlos siempre que no interfieran en análisis posteriores, si no hay seguridad de aquello se deben realizar pruebas de compatibilidad, su adición es preferible en soluciones concentradas a fin de manipular volúmenes pequeños que no interfieran en las diluciones de la muestra (INEN, 2013; Calderón, 2016).

Los compuestos químicos se pueden agregar de forma directa a la muestra una vez que esta es recolectada o previamente en el recipiente vacío con el fin de que cada porción de muestra que sea introducida se preserve de inmediato (Calderón, 2016).

La tabla 2.2. muestra los métodos de preservación para distintos parámetros, contenedor, tamaño mínimo y tipo de muestra, y período máximo de almacenamiento recomendados por los Métodos estándar para el examen de agua y aguas residuales (Standard Methods).

Tabla 2. 2. Resumen de los requisitos especiales de muestreo y manipulación para muestras de agua y aguas residuales

Parámetro	Contenedor ¹	Tamaño de muestra mínimo (ml)	Tipo de muestra ²	Preservación ³	Almacenamiento máximo recomendado/ Regulatorio ⁴
Acidez	P, V (B)	100	G	Refrigerar	24h / 14d
Aceite y grasas	V, boca ancha calibrada	1000	G, C	Agregar HCl hasta pH<2, refrigerar	28d / 28d
Alcalinidad	P, V	200	G	Refrigerar	24h / 14d
Boro	P	100	G, C	No se requiere	28 d / 6 meses
Bromuro	P, V	100	G, C	No se requiere	28d / 28d
Carbono orgánico total	V	100	G, C	Analizar inmediatamente o refrigerar y agregar H ₂ PO ₄ o H ₂ SO ₄ hasta pH<2	7d / 28d
Cianuro: total	P, V	500	G, C	Agregar NaOH hasta pH>12, refrigerar en la oscuridad	24h / 14d; 24h si hay sulfuro presente
Cloruro	P, V	50	G, C	Ninguno requerido	28d
Cloro, residual	P, V	500	G	Analizar inmediatamente	0.5h / stat
Cloro, dióxido	P, V	500	G	Analizar inmediatamente	0.5 h / N.S.
Clorofila	P, V	500	G, C	30 d en oscuridad	30d / N.S.
Color	P, V	500	G, C	Refrigerar	48h / 48h
Compuestos Orgánicos:					
Sustancias activas de azul de metileno	P, V	250	G, C	Refrigerar	48h
Pesticidas	V (S), tapa forrada de TFE	1000	G, C	Refrigerar; agregue 1000 mg de ácido ascórbico / l si hay cloro residual	7d / 7d hasta la extracción 40d después de la extracción
Fenoles	P, V	500	G, C	Refrigerar; agregue H ₂ SO ₄ hasta pH<2	N.S. / 28d
Purgables por purga y trampa	V, tapa forrada de TFE	240	G	Refrigerar; agregue HCl hasta pH<2; agregue 1000 mg de ácido ascórbico / l si hay cloro residual	7d / 14d
Conductividad	P, V	500	G, C	Refrigerar	28d / 28d
DBO	P, V	1000	G	Refrigerar	6h / 48h
DQO	P, V	100	G, C	Analizar lo antes posible, o agregue H ₂ SO ₄ hasta pH<2, refrigerar	7d / 28d
Dióxido de carbono	P, V	100	G	Analizar inmediatamente	Stat / N.S.
Dureza	P, V	100	G, C	Agregar HNO ₃ hasta pH<2	6 meses / 6 meses
Fluoruro	P	300	G, C	No se requiere	28d / 28d
Fosfato	V (A)	100	G	Para fosfato disuelto filtrar inmediatamente, refrigerar	48h / N.S.
Metales generales	P (A), V (A)	500	G	Para metales disueltos filtrar inmediatamente, agregue HNO ₃ hasta pH<2	6 meses / 6 meses
Cromo VI	P (A), V (A)	300	G	Refrigerar	24h / 24h
Mercurio	P (A), V (A)	500	G, C	Agregar HNO ₃ hasta pH<2, 4°C, refrigerar	28d / 28d
Nitrógeno:					
Amoniaco	P, V	500	G, C	Analizar lo antes posible o agregue H ₂ SO ₄ hasta pH<2, refrigerar	7d / 28d
Nitrato	P, V	100	G, C	Analizar lo antes posible o refrigerar	48h / 48h (28d para muestras cloradas)
Nitrato + nitrito	P, V	200	G, C	Agregar H ₂ SO ₄ hasta pH<2, refrigerar	Ninguno / 28d
Nitrito	P, V	100	G, C	Analizar lo antes posible	Ninguno / 48h
Orgánico Kjeldahl	P, V	500	G, C	Refrigerar, agregue H ₂ SO ₄ hasta pH<2	7d / 28d
Oxígeno Disuelto:					
Electrodo	Botella			Analizar inmediatamente	0.5h / stat
Winkler				La titulación puede retrasarse después de la acidificación	8h / 8h
Ozono	V	1000	G	Analizar inmediatamente	0.5h / N.S.
pH	P, V	50	G	Analizar inmediatamente	2h / stat
Salinidad	V, sello de cera	240	G	Analizar inmediatamente o usar sello de cera	6 meses / N.S.
Silice	P	200	G, C	Refrigerar; no congelar	28d / 28d
Sólidos	P, V	200	G, C	Refrigerar	7d / 2-7d
Sulfato	P, V	100	G, C	Refrigerar	28d / 28d
Sulfuro	P, V	100	G, C	Refrigerar; agregar 4 gotas 2N acetato de zinc/100 ml; añadir NaOH hasta pH=9	28d / 7d
Temperatura	P, V	-	G	Analizar inmediatamente	Stat / stat
Turbidez	P, V	100	G, C	Analizar el mismo día, almacenar en oscuro hasta 24 h, refrigerar	24h / 48h
Yodo	P, V	500	G, C	Analizar inmediatamente	0.5h / N.S.

¹ P = plástico (polietileno o equivalente); V = vidrio; V (A) o P (A) = enjuagado con 1 + 1 HNO₃; V (B) = vidrio, borosilicato; V (S) = vidrio, enjuagado con solventes orgánicos u homeado.

² G = muestra aleatoria en cualquier muestra individual (Grab); C = compuesta.

³ Refrigerar = almacenamiento a 4 °C, en la oscuridad.

⁴ Los tiempos listados son los periodos máximos que pueden transcurrir antes del análisis para considerarlo válido. Agencia de Protección Ambiental, Reglas y Regulaciones, 40 CFR, partes 100-149, 1 de julio de 1992. Consulte esta cita para ver las posibles diferencias con respecto a los requisitos de contenedores y preservación.

N.S. = no se indica en la referencia citada;

stat = no se permite almacenamiento; analizar de inmediato.

Fuente: (Baird y Bridgewater, 2017)

2.2.4.2. Transporte

Las muestras recolectadas deben ser empacadas y protegidas con el fin de evitar durante el transporte el deterioro por contaminación externa o la pérdida de volumen a causa de una ruptura del recipiente o un mal sello del mismo; un ambiente fresco de hielo triturado o sustitutos y la protección de luz solar

proporcionan un ambiente óptimo (SGEMC, s.f; Pitt, 2007). Si el tiempo máximo de preservación es excedido por el tiempo de viaje, los resultados analíticos deben ser interpretados bajo esta condición, reportando el lapso entre la recolección y el análisis (INEN, 2013).

Una vez que las muestras lleguen al laboratorio destinado para llevar a cabo los análisis, en caso de no poder realizar las pruebas de forma inmediata las muestras deben almacenarse en refrigeradoras o lugares fríos y oscuros para prevenir cambios en su contenido (INEN, 2013).

2.2.5. MEDIDAS DE PREVENCIÓN GENERALES

Existen ciertas medidas que deben ser tomadas en cuenta para recolectar una muestra que asegure resultados analíticos confiables (Calderón, 2016).

- Para la recolección de la muestra siempre usar guantes de nitrilo.
- Purgar los recipientes 2 o 3 veces antes del muestreo, de preferencia usar recipientes nuevos.
- Etiquetar las botellas antes de tomar las muestras.
- Evitar tocar el interior de los recipientes y de las tapas, así como colocarlas en el suelo mientras se toman las muestras.
- Las muestras microbiológicas deben ser recolectadas antes que otras.
- Antes de recoger una muestra de un sistema de distribución, hacer fluir el agua por un tiempo suficiente (al menos 1 minuto) para limpiar el sistema y no tocar la boca de los envases con los grifos de donde se toma la muestra.
- Para compuestos orgánicos llenar el recipiente completamente (excepto si son el centro de la investigación, en ese caso dejar un espacio para expansión térmica en el transporte), para análisis microbiológicos dejar un espacio útil para aireación o mezcla.
- No permitir el ingreso de hojas, ramas u otro tipo de sólidos grandes a los recipientes.
- Una vez recolectada la muestra, cerrar los recipientes herméticamente.

- No utilizar la muestra para medir la temperatura ni ningún otro parámetro de campo, ya que puede contaminarla.
- Si hay alguna razón para sospechar que se ha producido contaminación durante el muestreo, desechar la muestra y tomar otra usando un nuevo recipiente (Rainwater y Thatcher, 1960; Gallo et al., 2009; INEN, 2013).

2.3. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA

La caracterización del agua se centra en conocer las propiedades físicas, químicas y microbiológicas que definen el estado de un determinado recurso hídrico, sus posibles usos e incluso su capacidad para asimilar cargas contaminantes (Romero, 2006).

2.3.1. CRITERIOS DE CALIDAD DEL AGUA

Los criterios del control de la calidad del agua son establecidos con el propósito de definir los requisitos mínimos a satisfacer para que el agua sea apta de un uso específico. Se establecen por medio de la medición de parámetros físicos, químicos y microbiológicos, así como a través de los métodos empleados para dichas determinaciones. El criterio de calidad a utilizarse es dado por el propósito actual que se le atribuye al agua y su valor como fuente para otros usos. (Guevara, 1996).

2.3.2. PARÁMETROS FÍSICOS EN EL AGUA

Los parámetros físicos identifican las características del agua por medio de los sentidos como la vista, tacto, gusto y olfato (Zlatunova, 2005). Entre estos parámetros se encuentran los siguientes:

2.3.2.1. Color

El color es principalmente un problema de la calidad del agua por razones estéticas. Por lo general, la presencia de color se debe a la materia orgánica del suelo o de origen vegetal en diferentes fases de descomposición (Zlatunova, 2005). Se reconocen dos tipos de color en las aguas:

Color real	Contenido de sólidos disueltos
Color aparente	Contenido de sólidos suspendidos y disueltos

Fuente: (Romero, 2013)

2.3.2.2. Conductividad

Es la habilidad del agua para conducir corriente eléctrica; depende de la temperatura y de la concentración de sustancias ionizadas en dilución, por esta razón este parámetro es usado para una rápida estimación de la concentración de sólidos disueltos en el agua (Romero, 2013).

2.3.2.3. Olor y sabor

Son parámetros que determinan cualitativamente la calidad del agua de consumo, su presencia puede indicar una posible fuente de contaminación y anticipar la respuesta del consumidor (Romero, 2013). Las sales, los sulfatos de sodio y magnesio, el sulfuro de hidrógeno y los fenoles al igual que la biodegradación de los materiales orgánicos, provenientes de escorrentías, caída de hojas, algas u hongos y descargas domésticas, son fuentes de sabores y compuestos que liberan olores, su intensidad aumenta con la temperatura (Zlatunova, 2005).

2.3.2.4. Sólidos

El agua puede contener tanto partículas en suspensión como compuestos solubilizados (Romero, 2013).

2.3.2.4.1. Sólidos totales

Cantidad de material disuelto y no disuelto. Remanente producto de la evaporación del agua y el secado del residuo hasta un peso constante, en un rango de temperatura de 103°C a 105°C (Romero, 2013).

2.3.2.4.2. Sólidos suspendidos

Material no filtrable. Se determinan gravimétricamente mediante filtración (a vacío o presión) con filtros de fibra de vidrio pasando un volumen conocido de muestra, el residuo que queda en el filtro se coloca en una cápsula, se seca y evapora a

105°C, el incremento de peso respecto al peso inicial de la cápsula representa el contenido de sólidos suspendidos (Romero, 2013).

2.3.2.4.3. Sólidos disueltos

Material filtrable, resultado de la diferencia entre los sólidos totales y los sólidos suspendidos. Para su obtención directa, se filtra la muestra para descartar los sólidos suspendidos, la fracción que atraviesa el filtro se coloca en un crisol, se seca y evapora a 105°C, el incremento de peso respecto al peso inicial del crisol representa el contenido de sólidos disueltos (Romero, 2013).

2.3.2.5. Temperatura

Factor que influye en algunas de las características más importantes del agua (capacidad térmica, densidad, peso específico, viscosidad, tensión superficial, conductividad, salinidad, solubilidad de los gases disueltos, etc.), interviene en las reacciones químicas y biológicas, así como en sus velocidades de reacción y regula los procesos vitales de los organismos vivos (Zlatunova, 2005; DIGESA, 2010).

2.3.2.6. Turbiedad

Es una medida de las propiedades ópticas de transmisión de luz del agua. Se produce por la presencia de material suspendido y coloidal que dispersa la luz antes de que sea transmitida a través de la suspensión. Se relaciona con la transparencia del agua y es importante por razones de salud y estética (Romero, 2013).

2.3.3. PARÁMETROS QUÍMICOS EN EL AGUA

Las características químicas del agua dependen de su reacción al ponerse en contacto con otros compuestos. Las actividades humanas alteran la composición química natural del agua (Zlatunova, 2005).

2.3.3.1. Arsénico

Metalóide de procedencia hidrotermal. Se presenta naturalmente en forma de arsénico III en el agua subterránea, en concentraciones de 1µg/l hasta 12 mg/l (OMS, 2006), o a causa de actividades antropogénicas como la minería (extracción

y fundición del oro), su uso como plaguicida, la combustión del carbón y la obtención de acero y hierro. Si se incrementa el pH del agua la concentración de arsénico disuelto también lo hace (DIGESA, 2010).

2.3.3.2. Alcalinidad

Se define como una medida de la capacidad que tiene el agua para neutralizar ácidos (Romero, 2013) y su resistencia inherente al cambio de pH (capacidad de amortiguación). Un agua con baja amortiguación tendrá una alcalinidad baja y será susceptible a la reducción del pH (EPA, 2001).

La alcalinidad depende principalmente del contenido, carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos del agua. Sin embargo, en un agua natural subterránea generalmente se debe a la presencia de bicarbonatos formados en reacciones en los suelos a través de los cuales se filtra el agua (EPA, 2001).

2.3.3.3. Bario

Elemento presente en rocas sedimentarias e ígneas a niveles traza. Se encuentra en la naturaleza generalmente en forma de sulfatos de bario y tiene un amplio uso en la industria del petróleo - gas (fabricación de lodos de perforación) y de la fabricación de pinturas. La solubilidad de sus compuestos aumenta cuando existe un descenso de pH. En el agua subterránea su concentración puede sobrepasar el 1 mg/l de forma natural (OMS, 2006; DIGESA, 2010).

2.3.3.4. Cadmio

Elemento que se deriva de la extracción del zinc, plomo y cobre. Es usado en la industria de plásticos y del acero para la elaboración de revestimientos, soldaduras y aleaciones. La acidez del agua y la fuente de emanación determinan la persistencia de este elemento en el recurso hídrico (DIGESA 2010).

2.3.3.5. Cianuro

Grupo químico reactivo y altamente tóxico que en cantidades excesivas causa mortalidad inmediata en humanos y peces. Es un componente común de los desechos industriales, especialmente de los procesos de enchapado de metales y

la fabricación de componentes electrónicos. Puede estar presente en el agua de consumo, esencialmente por contaminación industrial (OMS, 2006).

2.3.3.6. Cloruro

Ión de importancia en la calidad del agua debido a que su presencia en altos niveles (mayor a 250 mg/l) provoca un sabor salobre y corroe las tuberías del sistema de distribución de agua potable (EPA, 2001). Está presente en las aguas naturales debido a: las formaciones de suelo y rocas magmáticas que contienen minerales con contenido de cloro, el rocío marino que introduce los iones cloruros desde la atmósfera al agua a través de la interacción entre la precipitación y el suelo, y las descargas industriales de desechos (EPA, 2001; Romero, 2013).

2.3.3.7. Cobre

Metal buen conductor de calor y electricidad. Es usado en aleaciones, cables eléctricos, tuberías y monedas (Fonfría, Sans y Ribas, 1989). Su importancia radica en temas estéticos de la calidad del agua, ya que cuando está presente en excesivas cantidades en aguas de consumo causa un sabor y color avinagrado desagradable (DIGESA, 2010).

2.3.3.8. Cromo

Elemento que se encuentra en la naturaleza en forma de compuestos que son de amplio uso en curtiembres, textileras, galvanizados, aceros inoxidable y en el procesamiento de cromita. En el agua de consumo suele aparecer en concentraciones inferiores a 2 µg/l (OMS, 2006).

2.3.3.9. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

Es un parámetro que mide la cantidad de oxígeno requerido por los microorganismos para mineralizar u oxidar la materia orgánica biodegradable (material orgánico carbónico, compuestos químicos reductores y nitrógeno oxidable) bajo condiciones aerobias. Comúnmente es determinado luego de 5 días de reacción a 20°C, conociéndose como DBO₅ (Romero, 2013).

2.3.3.10. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Refleja la cantidad de oxígeno requerido para oxidar tanto la materia orgánica como la inorgánica de una muestra de agua, razón por la cual su valor siempre será mayor al de la DBO₅. Para ello, se emplea un oxidante, que generalmente es el dicromato de potasio (K₂Cr₂O₇), en un medio ácido. Guarda una relación estrecha con la DBO y es un ensayo más rápido que considera menos variables que el ensayo biológico (DIGESA, 2010).

2.3.3.11. Dureza

La dureza es una característica natural causada por la presencia de calcio y magnesio en el agua que puede interferir en su sabor y la consecuente aceptabilidad del consumidor para beberla (EPA, 2001). Asimismo, impide que el agua al contacto con un producto jabonoso genere abundante espuma, debido a que iones metálicos divalentes reaccionan y forman precipitados; también es posible la formación de incrustaciones al reaccionar los mismos iones mencionados con ciertos aniones presentes en el agua (Romero, 2013).

2.3.3.12. Fluoruro

Ion cuya concentración en aguas naturales es baja (no supera los 10 mg/l). La contaminación por fluoruro surge casi exclusivamente de la fluoración de los suministros públicos de agua y de descargas industriales de producción de aluminio y elaboración de fertilizantes fosfatados (OMS, 2006).

Los estudios de salud han demostrado que la adición de fluoruro a los suministros de agua en niveles superiores a 0,6 mg/l conduce a una reducción de la caries dental en niños en crecimiento y que el efecto beneficioso óptimo ocurre alrededor de 1 mg/l. En niveles superiores a 1,5 mg/l surgen manchas en los dientes (EPA, 2001).

2.3.3.13. Hierro

Es un metal maleable cuya presencia en el agua provoca coloraciones rojizas y precipitaciones indeseadas. Existe en fuentes hídricas dulces naturales en

concentraciones que pueden ir desde 0,5 a 50 mg/l (OMS, 2006). En las aguas subterráneas el carbonato ferroso (FeCO_3) es el compuesto del hierro más susceptible a disolverse gracias a la elevada presencia de CO_2 (Romero, 2013).

2.3.3.14. Manganeso

Elemento abundante de la corteza terrestre, se presenta naturalmente en rocas en forma de óxidos, carbonatos y silicatos. En aguas subterráneas se encuentra como manganeso II, en concentraciones muy bajas (DIGESA, 2010). De encontrarse en cantidades importantes el agua carece de oxígeno disuelto y tiene un alto contenido de CO_2 . También está presente en las descargas residuales domésticas e industriales (Romero, 2013).

2.3.3.15. Mercurio

Elemento altamente tóxico y bioacumulable (Fonfría et al., 1989). Naturalmente proviene de actividades volcánicas, mineralización de las rocas y erosión. Sus fuentes antropogénicas abarcan la minería, la agricultura y las industrias químicas, de papel y metálicas (DIGESA, 2010).

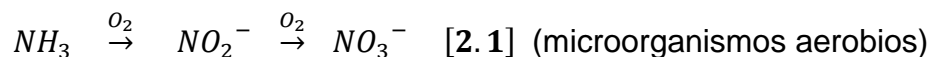
2.3.3.16. Nitrato

Los nitratos (NO_3^-) son el resultado de la oxidación bacteriológica de materiales nitrogenados (amoníaco - NH_3) (Romero, 2013). Poco del nitrato que se encuentra en las aguas subterráneas es de origen mineral, la mayoría proviene de fuentes orgánicas (descargas de desechos) e inorgánicas (fertilizantes artificiales) que alcanzan el nivel freático, o también de la oxidación bacteriana y la fijación de nitrógeno por las plantas (Ávila y Cabrera, 2003).

Las concentraciones por encima de los 50 mg/l de nitratos en las aguas que se usan para beber se vuelven peligrosos para los bebés, ya que inducen el síndrome del "bebé azul" también conocida como metahemoglobinemia (EPA, 2001).

2.3.3.17. Nitrito

Los nitritos (NO_2^-) se producen en la naturaleza por la acción de bacterias nitrificantes, en una etapa intermedia en la formación de nitratos (Romero, 2013).



En aguas naturales sus concentraciones son muy bajas, por debajo de 0,03 mg/l, principalmente porque el nitrógeno tenderá a existir en las formas más reducidas (amoníaco - NH₃) o más oxidadas (nitrato - NO₃), valores superiores pueden indicar contaminación por aguas residuales (EPA, 2001).

2.3.3.18. Potencial hidrógeno (pH)

El pH es el logaritmo negativo de la concentración de iones de hidrógeno de una solución y, por lo tanto, es una medida de la acidez o la alcalinidad de un líquido. La escala de pH varía de 0 (muy ácido) a 14 (muy alcalino), siendo 7 el estado de neutralidad. El rango de pH natural encontrado con mayor frecuencia en aguas dulces es de 6,5 a 8 (DIGESA, 2010).

2.3.3.19. Plomo

Metal persistente de alta toxicidad cuya principal fuente natural de producción es el mineral denominado galena. En aguas subterráneas alcanza concentraciones menores a 0,1 mg/l (Remache, 2013). La minería, las fundiciones y los derivados orgánicos de los combustibles son las principales fuentes antropogénicas que aportan plomo a las aguas (DIGESA, 2010; Londoño et al., 2016).

2.3.3.20. Selenio

Elemento que está presente en la corteza terrestre en forma de seleniuros de elementos pesados y generalmente en asociación con minerales que contienen azufre. Tiene un amplio uso en aparatos fotoeléctricos, barnices y esmaltes, insecticidas, tratamientos dérmicos y para el aumento de la resistencia a la abrasión del caucho vulcanizado. Las concentraciones naturales en el agua subterránea varían mucho de acuerdo a las zonas geográficas, pero en general suelen ser mucho menores que 0,01 mg/l (OMS, 2006; DIGESA, 2010).

2.3.3.21. Sulfatos

Los aniones sulfatos (SO₄²⁻) comúnmente se derivan de los sulfuros de metales pesados (Fe, Ni, Cu y Pb). Se encuentran en el agua subterránea, a menudo en

altas concentraciones, debido a que los sulfuros de hierro presentes en rocas sedimentarias, pueden oxidarse a sulfatos en climas húmedos y filtrarse en los cursos de agua (EPA, 2001).

El incremento de su concentración produce cambios en algunas características físicas del agua como su sabor, olor, etc., que tiene una influencia negativa sobre el consumo humano. El magnesio y el sodio están presentes en muchas aguas, si se combinan con el sulfato tendrá un efecto laxante, por ello se debe controlar que su concentración no sobrepase los 250 mg/l (Romero, 2013).

2.3.4. PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS EN EL AGUA

Los parámetros microbiológicos determinan la presencia de microorganismos causantes de algunas de las enfermedades más virulentas transmitidas a los humanos directamente a través del agua (Zlatunova, 2005).

La tabla 2.3. resume los principales grupos de microorganismos que pueden encontrarse en el agua natural.

Tabla 2. 3. Clasificación simplificada de microorganismos en agua

REINO	MIEMBROS REPRESENTATIVOS
Animal	Crustáceos Gusanos Rotíferos
Vegetal	Plantas acuáticas enraizadas Plantas con semillas Helechos Musgos
Protista	Protozoos Algas Hongos (mohos y levaduras) Alga verde azul Bacterias
Virus	Hepatitis A Adenovirus Enterovirus Reovirus Rotavirus

Fuente: (Tchobanoglous y Schroeder, 1985)

Elaboración: Flores, J.

2.3.4.1. Grupo Coliforme

Son bacterias aeróbicas y/o facultativas gram negativas, no formadoras de esporas y en forma de bastón que fermentan la lactosa en gas en un lapso de 48 horas, con un rango de temperatura de 35 a 37 °C (Romero, 2013).

2.3.4.1.1. Coliformes fecales

La *Escherichia coli* es la bacteria que se usa comúnmente como organismo indicador de la posible presencia de materia fecal y de microorganismos patógenos en el agua, ya que este organismo está presente en el intestino de los animales de sangre caliente, incluidos los humanos (EPA, 2001).

2.3.4.1.2. Coliformes totales

Los coliformes totales incluyen la *Escherichia coli* y también otras bacterias con propiedades similares que se originan en el suelo y no son de origen fecal. Su ensayo se realiza para dar una indicación de carácter general de los microorganismos que pueden estar presentes en el agua y que pueden ser patógenos o no (EPA, 2001).

2.3.5. ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AGUA (ICA)

El índice de calidad del agua (ICA) califica un recurso hídrico determinado, en un tiempo específico, atribuyéndole un valor descriptivo o clasificación a su calidad en función de un conjunto de parámetros, con el fin de simplificar la información para que sea comprensible al público (Salcedo et al., 2015).

La determinación del ICA de una fuente subterránea permite identificar la tendencia del cambio de la calidad y el grado de contaminación de sus aguas, hecho esencial que orienta en la toma de decisiones gubernamentales para implementar o mejorar acciones de manejo o programas de control del riesgo sanitario del agua, valiéndose de procesos potabilizadores para ofrecer a las comunidades de usuarios un agua segura. También apoya las estrategias para proteger y remediar un acuífero (Lozada, Vélez, Escobar, Vidal y Patiño, 2010).

Existen diversos índices de calidad, la elección del apropiado depende de su flexibilidad en cuanto al número y tipo de variables considerados de interés en función de los objetivos de aprovechamiento, cumplimiento de las normativas y las características de la fuente (Lozada et al., 2010).

2.4. POTABILIZACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Se conoce como potabilización a la transformación de las características físicas, químicas y biológicas del agua cruda para que sea apta de consumo humano, mediante varios procesos unitarios (SENAGUA, 2014). Antes de que el agua llegue al consumidor atraviesa un sistema ordenado cuyos componentes se detallan en la figura 2.9.



Figura 2. 9. Esquema de los componentes de un sistema de suministro de agua

Fuente: (Nava, 2011)

Elaboración: Flores, J.

2.4.1. FUENTES DE AGUA CRUDA

Las aguas subterráneas pueden ser extraídas de fuentes naturales como manantiales, nacientes, aljibes a través de galerías filtrantes y pozos naturales o construidos (Nava, 2011).

2.4.2. CAPTACIÓN Y TRANSPORTE

El agua cruda puede ser captada de dos formas:

1. **Por bombeo:** usado cuando la bocatoma se ubica por encima del nivel de agua, este debe ser elevado para conectarse al sistema de transporte.
2. **Por gravedad:** usado cuando la bocatoma está ubicada por debajo del nivel de agua, la topografía del terreno juega un papel importante.

El transporte o aducción se realiza a través de conductos cerrados como túneles y tuberías, o canales a cielo abierto. El flujo del agua puede ser de régimen libre, a presión o ambos (Nava, 2011).

2.4.3. TRATAMIENTO

Se trata el agua cruda con el fin de eliminar sus impurezas y producir agua potable que cumpla reglamentaciones nacionales e internacionales de consumo humano (Rodríguez, 2008).

2.4.3.1. Tratamiento convencional

El agua cruda, por lo general, es tratada en plantas potabilizadoras convencionales, como la planta expuesta en la figura 2.10. La variación de sus procesos depende de la calidad inicial del agua (Nava, 2011).

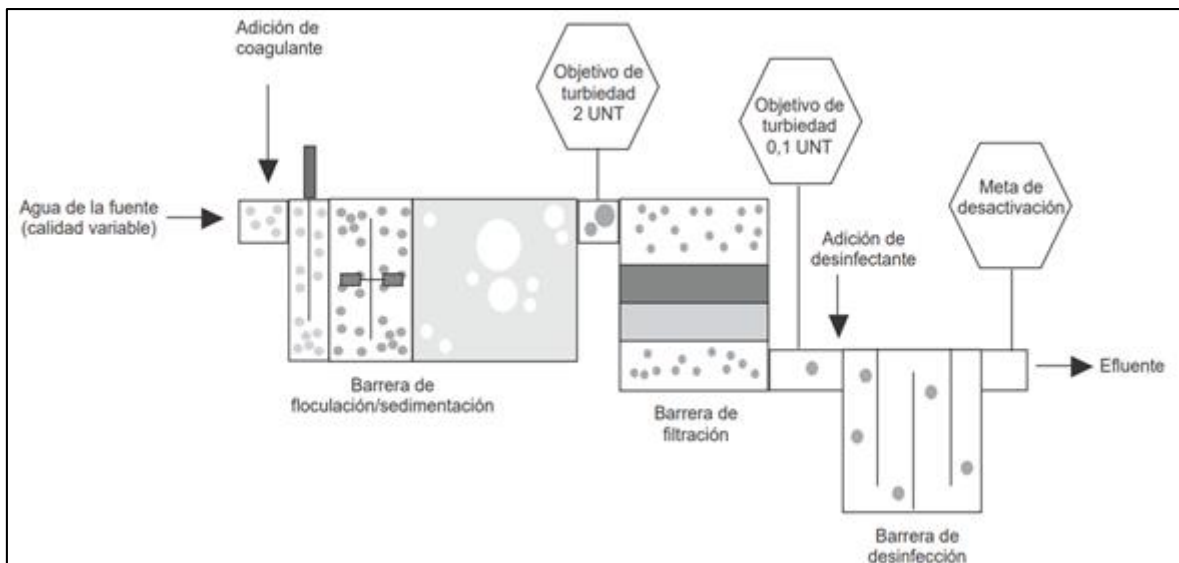


Figura 2. 10. Planta convencional de tratamiento de agua cruda

Fuente: (Nava, 2011)

Las operaciones unitarias de una planta potabilizadora convencional son:

2.4.3.1.1. Pretratamiento

Conjunto de operaciones físicas y mecánicas que retiran del agua elementos que, debido a su naturaleza o tamaño, pueden causar problemas en fases posteriores del tratamiento (Rodríguez, 2008). La tabla 2.4. detalla los procesos involucrados en el pretratamiento.

Tabla 2. 4. Operaciones involucradas en el pretratamiento

OPERACIÓN	DESCRIPCIÓN
Desbaste	<ul style="list-style-type: none"> • Separa y evacúa objetos grandes por medio de rejillas manuales o mecánicas para evitar obstrucciones. • Según la separación de los barros: <ul style="list-style-type: none"> Desbaste fino: (3 – 10) mm Desbaste medio: (10 – 25) mm Predebaste: (50 – 100) mm
Tamizado	<ul style="list-style-type: none"> • Filtración empleando un soporte delgado. • Según el tamaño de los orificios del tamiz: <ul style="list-style-type: none"> Macrotamizado: > a 0,3 mm. Retiene material suspendido flotante, restos vegetales y animales, insectos, ramas, etc. Microtamizado: < a 100 µm. Retiene material suspendido muy pequeño (plancton).
Desarenado	<ul style="list-style-type: none"> • Remueve partículas sólidas finas minerales > a 200 µm (arena, grava, etc.). • Previene la formación de sedimentos en conducciones y canales. • Evita la abrasión y la sobrecarga en aparatos de fases subsecuentes.
Desaceitado y desengrase	<ul style="list-style-type: none"> • Separa la grasa y el aceite del agua mediante aparatos de superficie tranquila que disminuyen la velocidad de flujo. • Arrastra los aceites y grasas a la superficie mediante la inyección de burbujas de aire. • Se recoge por arrastre con cinta sin fin, vertido, rasado, etc.

Fuente: (Rodríguez, 2008)

Elaboración: Flores, J.

2.4.3.1.2. Coagulación, floculación y decantación

Existen partículas muy pequeñas dispersas en el agua que, debido a su tamaño y peso específico no sedimentan pronto. Frente a este problema, es necesario emplear los siguientes procesos, que a su vez son eficientes en la remoción de la turbidez, color, patógenos, olor y sabor (Rodríguez, 2008).

- **Coagulación:** Hace referencia a la neutralización de las cargas negativas que desestabiliza a las partículas coloidales y elimina las fuerzas de repulsión que las mantiene separadas, gracias a la adición de coagulantes como sales de aluminio o hierro (Rodríguez, 2008).

- **Floculación:** Consiste en la formación de agregados de mayor masa y velocidad de sedimentación (flóculos) a través de la agrupación de partículas pequeñas, empleando floculantes poliméricos o polielectrolitos cuya dosis óptima es determinada a partir de las pruebas de jarras (Rodríguez, 2008).
- **Decantación:** En tanques sedimentadores, las partículas discretas y las floculadas son separadas y eliminadas del agua cuando sedimentan, gracias a su peso y por acción de la gravedad (Rodríguez, 2008).

2.4.3.1.3. Filtración

La filtración permite obtener agua clara libre de microorganismos, y ayuda a la eliminación de hierro, manganeso, sabor y olor, debido a que el material suspendido del agua es retenido cuando atraviesa un medio poroso filtrante (Rodríguez, 2008). Generalmente, se utilizan dos tipos de filtros:

- **Filtro de arena lento:** Sistema de purificación biológica de alta eficiencia y bajos costos de mantenimiento, trata caudales bajos y utiliza arena sobre grava como medio filtrante. Los lodos biológicos formados en la superficie de la arena retienen los contaminantes (Blacio y Palacios, 2011).
- **Filtro de arena rápido:** Su operación es más compleja que los filtros lentos por lo que sus costos de mantenimiento son más elevados, trata caudales altos y ocupa menor espacio, (Blacio y Palacios, 2011). La profundidad del lecho filtrante (arena) mínimo es de 300 mm y maneja velocidades de filtración de 5 a 15 m/h ($\text{m}^3/\text{m}^2/\text{h}$) (Rodríguez, 2008).

Dos etapas son importantes en la cinética de la eliminación del material suspendido a través de los poros del lecho filtrante:

1. **Transporte:** La floculación generada en las grietas del filtro y la distancia corta de recorrido de las partículas para sedimentar ayudan al transporte (Rodríguez, 2008). Los mecanismos que siguen las partículas suspendidas para llegar a la superficie del medio filtrante son:
2. **Fijación:** Se genera químicamente cuando las partículas se ponen en contacto con el lecho filtrante. Está influida por la estructura iónica del agua,

el pH, la dosis y origen del polímero, el estado de la superficie del medio filtrante y la edad del floc (Rodríguez, 2008).

2.4.3.1.4. Desinfección

Es la operación unitaria final de la potabilización del agua. Su objetivo es exterminar por completo los organismos patógenos (virus y bacterias) que no fueron depurados en los procesos anteriores, con el fin de evitar la transmisión de enfermedades mediante el consumo de agua (Nava, 2011). La tabla 2.5. enlista y describe los principales mecanismos de desinfección de aguas.

Tabla 2. 5. Principales mecanismos de desinfección

TRATAMIENTO	DESCRIPCIÓN
Cloración	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil manejo, bajo costo y seguro. • El ácido hipocloroso y los iones hipocloritos son los encargados de la esterilización. • Previene y destruye olores desagradables. • Su actividad bactericida se modifica a pH altos y bajas temperaturas. • Puede aplicarse directamente al agua cruda antes de cualquier tratamiento y luego en la etapa final para mejores resultados.
Ozonización	<ul style="list-style-type: none"> • Más eficiente que la cloración en la oxidación de materia orgánica e inorgánica y en la eliminación de Mg y Fe, olor, sabor, color y microorganismos patógenos. • Requiere menor concentración y tiempo de contacto. • Recomendable si el agua contiene fenoles y trihalometanos. • No altera el pH del agua y mejora la coagulación. • Mayor costo de operación. • Puede formar subproductos nocivos como los bromatos y aldehídos, y óxido o ácido nítrico que causa corrosión.
Rayos ultravioleta	<ul style="list-style-type: none"> • Eficientes únicamente en la destrucción de bacterias y virus. • Proceso automatizado y seguro, no maneja productos químicos y tiene bajos tiempos de contacto. • Costos altos de operación. • No funciona en aguas de alta turbidez.
Calor	<ul style="list-style-type: none"> • No es práctico a gran escala y es de costo elevado.
Ultrasonidos	<ul style="list-style-type: none"> • Frecuencias de 20 a 400 kHz en tiempo de retención de 1 hora logran la esterilización completa del agua. • Costos excesivamente elevados.

Fuente: (Rodríguez, 2008)

Elaboración: Flores, J.

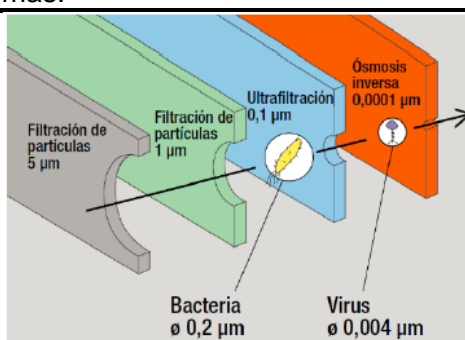
2.4.3.2. Tratamientos no convencionales o especiales

2.4.3.2.1. Filtración por Membrana

Representa una tecnología de alta eficiencia que emplea poco espacio, no es selectiva y de operación sencilla, sin embargo, genera gran cantidad de lodos que contienen metales. Generalmente se emplea para tratar y recuperar sales metálicas de residuos galvanoplásticos, en el reciclaje de aceites, en la industria alimenticia y en la explotación y producción de hidrocarburos (Ji, 2015). La tabla 2.6. muestra las tecnologías de filtración más utilizadas y sus principales características.

Tabla 2. 6. Procesos de filtración por membrana

PROCESO	CARACTERÍSTICAS
Electrodiálisis	Remueve componentes iónicos de hasta 0,0001 μm de soluciones acuosas usando membranas permeables selectivas en un campo eléctrico constante.
Osmosis Inversa	Mecanismo de permeación que elimina los contaminantes mediante cribado o difusión controlada a través de una membrana que selecciona y separa elementos de hasta 0,0001 mm, lo que le atribuye gran capacidad de tratamiento.
Nanofiltración	Para su funcionamiento usa membranas con poros <1 nm y requiere presiones en el rango de 10-50 bar, rechaza iones inorgánicos, posee la presión de funcionamiento más baja, mayor flujo y consume menos energía que la ósmosis inversa.
Ultrafiltración	Proceso de fraccionamiento selectivo que emplea presiones de hasta 145 psi. Usada en el fraccionamiento proteico de leche y suero, concentra sólidos en suspensión y solutos de peso molecular mayor a 1000 umas.



Fuente: (Rubio, Calderón, Gualtero, Acosta y Sandoval, 2015).

Elaboración: Flores, J.

2.4.3.2.2. Procesos de tratamiento por sorción

Se abordan las siguientes tres formas de tratamiento de sorción:

A. Intercambio Iónico

Proceso físico que emplea resinas de materiales orgánico sintéticos, inorgánicos o poliméricos naturales que contienen grupos funcionales iónicos intercambiables. La resina es empaquetada en una columna y, a medida que el agua contaminada pasa a través de la misma, los iones contaminantes se intercambian por otros iones como el cloruro o el hidróxido (ver figura 2.11.). El intercambio iónico suele ir precedido de tratamientos como la filtración para eliminar los compuestos orgánicos, sólidos en suspensión y otros contaminantes que pueden dañar las resinas y reducir su eficiencia. Entre sus ventajas más destacables se encuentran: recuperación del metal, baja producción de lodos y selectividad (EPA, 2002).

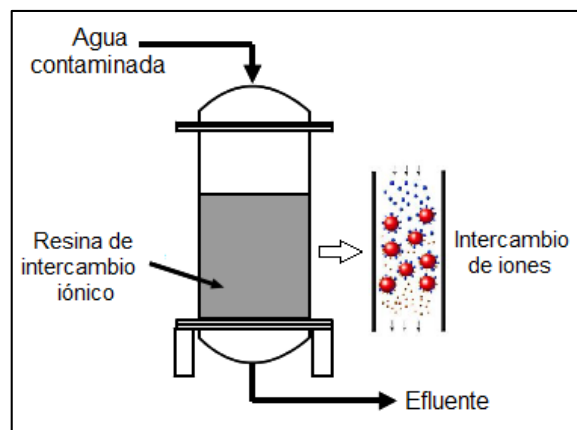


Figura 2. 11. Modelo de un sistema de intercambio iónico

Fuente: (EPA, 2002)

B. Adsorción en medios de alúmina activada (AA)

La alúmina activada es un material granular poroso con propiedades de intercambio iónico. El medio, trióxido de aluminio, se prepara mediante la deshidratación de hidróxido de aluminio a altas temperaturas. Los granos de AA tienen un diámetro típico de 0,3 a 0,6 mm y una gran superficie.

En el tratamiento del agua potable, la adsorción de AA en lecho compacto se usa comúnmente para eliminar sílice, materia orgánica y fluoruro. La remoción de metales como As y Cd por adsorción de AA puede lograrse pasando agua continuamente a presión a través de uno o más lechos empaquetados con este material (EPA, 2002).

C. Adsorción en medios de hidróxido férrico granular (HFG)

Es una técnica de tratamiento emergente para metales pesados, por medio de quimiosorción irreversible que se aplica en columnas de presión de lecho fijo, similares a las de AA. Estudios realizados revelan que la afinidad del HFG especialmente por el arsénico es fuerte en condiciones de pH natural, en relación con el AA. Esta característica permite que el GFH trate volúmenes de lecho mucho más altos sin necesidad de ajustar el pH (EPA, 2002).

2.4.3.2.3. Precipitación química

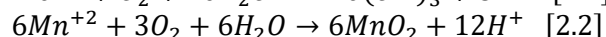
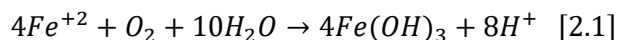
La precipitación / coprecipitación es una tecnología de tratamiento ex situ de sencilla operación, económica y selectiva diseñada para funcionar con la adición química de un coagulante o precipitante y la eliminación de lodos de rutina, que generalmente requiere tratamiento, como deshidratación y eliminación posterior.

La precipitación de hidróxido, es de costo bajo, fácil control de pH y eliminación por floculación y sedimentación, mientras la precipitación por sulfuros, es empleada con solubilidades bajas y precipitados no anfóteros (EPA, 2002; Rubio et al., 2015). Existen diversos procesos de precipitación química como los que se evidencian y describen en la tabla 2.7.

Tabla 2. 7. Procesos de precipitación química

PROCESO	CARACTERÍSTICAS
Coagulación + Filtración Mejorada	Los procesos de coagulación / filtración pueden optimizarse para eliminar el As y otros metales disueltos del agua. El mecanismo implica la adsorción de As y Cd a un precipitado de aluminio o hidróxido férrico. El arsenito (As III) no se elimina efectivamente debido a su carga neutra en condiciones de pH natural. Por lo tanto, se recomienda la oxidación previa. En general, estos procesos optimizados son capaces de eliminar el 90% de As y producir agua con menos de 5 µg/l.
Coagulación + Microfiltración	Utiliza el mismo proceso de coagulación descrito anteriormente. Sin embargo, en lugar de la etapa de filtración de medios granulares, el agua es forzada a través de una membrana semipermeable por un diferencial de presión que retiene el flóculo formado en la etapa de coagulación. La principal preocupación de la eliminación de arseniato y otros metales por este proceso es la presencia de sílice, que compite agresivamente por los sitios de sorción de los precipitados.

El proceso de aireación provocando la oxidación del Fe y Mn.



Oxidación

(aireación)/Filtración Si el arsénico está presente en el agua, también puede eliminarse mediante dos mecanismos principales: adsorción sobre el hidróxido de hierro y luego, a medida que el hidróxido de hierro precipita, el arsénico queda atrapado (coprecipitación) y finalmente se filtra de la solución. La eficiencia de remoción depende de la cantidad de Fe en el agua.

Suavizado de cal mejorado

El ablandamiento de la cal es un proceso de tratamiento físico-químico utilizado para eliminar los cationes de calcio y magnesio de la solución. La adición de cal aumenta el pH, lo que provoca un cambio en el equilibrio del carbonato y la formación de precipitados de carbonato de calcio e hidróxido de magnesio, el proceso puede mejorarse para la eliminación de arsénico y otros metales. El mecanismo de eliminación implica la adsorción de arseniato a partículas de hidróxido de magnesio. Estas partículas se generan en presencia de exceso de cal dentro del rango de pH 10.5 – 11, sin embargo, la remoción es pobre.

Fuente: (EPA, 2002; Burbano y Sánchez, 2007)

Elaboración: Flores, J.

2.4.3.2.4. Fitorremediación

Tecnología moderna, eficiente y sustentable que reduce las cantidades y efectos tóxicos de los contaminantes mediante el uso de plantas y microbios del suelo (ver figura 2.12.), ofrece diversas ventajas en relación a los métodos físicoquímicos por su amplia aplicabilidad y bajos costos (Rubio et al., 2015).



Figura 2. 12. Esquema de un humedal construido

Fuente: (Rubio et al., 2015)

2.4.4. DISTRIBUCIÓN DE AGUA TRATADA

El agua tratada llega a los domicilios o a las pilas públicas de los consumidores mediante un sistema de distribución que deriva de un sistema de conducción y se compone de tuberías, tanques de almacenamiento, estaciones eventuales de refuerzo y bombeo, y accesorios de control. Se ubica subterráneamente a lo largo de calles o veredas (Nava, 2011).

2.5. LEGISLACIÓN SOBRE AGUA DE CONSUMO HUMANO

2.5.1. ACUERDO MINISTERIAL 097

Esta norma reforma el Texto Unificado de Legislación Secundaria (TULSMA) y abarca en la Tabla 1 del documento oficial, los criterios de calidad que deben cumplir las aguas captadas para ser seleccionadas como aguas aptas de consumo humano y uso doméstico (ver tabla 2.8.), entendiéndose que después de un adecuado tratamiento con eficiencias óptimas estas aguas puedan ser usadas para bebida, preparación de alimentos y satisfacción de necesidades domésticas como limpieza e higiene personal (MAE, 2015).

Tabla 2. 8. Límites permisibles de agua para consumo humano y doméstico – AM 097

PARÁMETROS	EXPRESADO COMO	UNIDAD	CRITERIO DE CALIDAD
Aceites y grasas	Sustancias solubles en hexano	mg/l	0,3
Arsénico	As	mg/l	0,1
Bario	Ba	mg/l	1
Cadmio	Cd	mg/l	0,02
Cianuro	CN ⁻	mg/l	0,1
Cobre	Cu	mg/l	2
Coliformes fecales	NMP	NMP/100 ml	1000
Color	Color real	Unidades de Platino - Cobalto	75
Cromo hexavalente	Cr ⁺⁶	mg/l	0,05
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5días)	DBO ₅	mg/l	<2
Demanda Química de oxígeno	DQO	mg/l	<4
Fluoruro	F	mg/l	1,5
Hierro total	Fe	mg/l	1
Mercurio	Hg	mg/l	0,006
Nitrato	NO ₃	mg/l	50
Nitrito	NO ₂	mg/l	0,2
Plomo	Pb	mg/l	0,01
Potencial de hidrógeno	pH	Unidades de pH	6 - 9
Hidrocarburos totales de petróleo	TPH	mg/l	0,2
Selenio	Se	mg/l	0,01
Sulfatos	SO ₄ ⁻²	mg/l	500
Turbiedad	Unidades nefelométricas de turbiedad	UTN	100

Fuente: (MAE, 2015)

2.5.2. NORMA NTE INEN 1108:2014

El Instituto Ecuatoriano de Normalización expidió la norma técnica NTE INEN 1108, quinta revisión en 2014, misma que comprende los requisitos físicos, químicos y microbiológicos que debe cumplir el agua después de haber sido tratada (ver tabla 2.9.), también llamada “agua potable”, para garantizar seguridad alimentaria (INEN, 2014).

Tabla 2. 9. Límites permisibles de agua para agua potable – NTE INEN 1108:2014

PARÁMETROS	UNIDAD	LÍMITE MÁXIMO PERMITIDO	PARÁMETROS	UNIDAD	LÍMITE MÁXIMO PERMITIDO
Características físicas			Plaguicidas		
Color	Unidades de color aparente (Pt - Co)	15	Atrazina y sus metabolitos cloro -s- triazína	mg/l	0,1
Turbiedad	NTU	5	Isoproturón	mg/l	0,009
Olor	...	No objetable	Lindano	mg/l	0,002
Sabor	...	No objetable	Pendimetalina	mg/l	0,02
Inorgánicos			Pentaclorofenol	mg/l	0,009
Antimonio, Sb	mg/l	0,02	Dicloroprop	mg/l	0,1
Arsénico, As	mg/l	0,01	Alacloro	mg/l	0,02
Bario, Ba	mg/l	0,7	Aldicarb	mg/l	0,01
Boro, B	mg/l	2,4	Aldrin y Dieldrin	mg/l	0,00003
Cadmio, Cd	mg/l	0,003	Carbofuran	mg/l	0,007
Cianuro, CN	mg/l	0,07	Clorpirifós	mg/l	0,03
Cloro libre residual	mg/l	0,3 a 1,5	DDT y metabolitos	mg/l	0,001
Cobre, Cu	mg/l	2	1,2 - Dibromo - 3 - cloropropano	mg/l	0,001
Cromo, Cr (cromo total)	mg/l	0,05	1,3 - Dicloropropeno	mg/l	0,02
Fluoruros	mg/l	1,5	Dimetoato	mg/l	0,006
Mercurio, Hg	mg/l	0,006	Endrin	mg/l	0,0006
Niquel, Ni	mg/l	0,07	Terbutilazina	mg/l	0,007
Nitrato, NO ₃	mg/l	50	Clordano	mg/l	0,0002
Nitrito, NO ₂	mg/l	3	Hidroxiatrazina	mg/l	0,2
Plomo, Pb	mg/l	0,01	Residuos Desinfectantes		
Radiación total α	Bq/l	0,5	Monocloramina,	mg/l	3
Radiación total β	Bq/l	1	Si pasa de 1,5 mg/l investigar: N-Nitrosodimethylamine	mg/l	0,000 1
Selenio, Se	mg/l	0,04	Subproductos de desinfección		
Orgánicos			2,4,6-triclorofenol	mg/l	0,2
Hidrocarburos policíclicos aromáticos HAP			Trihalometanos totales	mg/l	0,5
Benzo (a) pireno	mg/l	0,0007	Si pasa de 0,5 mg/l investigar:	mg/l	0,06
Hidrocarburos:	mg/l	0,01	• Bromodichlorometano	mg/l	0,3
Benceno	mg/l	0,7	• Cloroformo	mg/l	0,2
Tolueno	mg/l	0,5	Tricloroacetato	mg/l	0,2
Xileno	mg/l	0,02	Cianotoxinas		
Estireno	mg/l	0,03	Microcistina-LR	mg/l	0,001
1,2 Dicloroetano	mg/l	0,0003	Requisitos microbiológicos		
Cloruro de vinilo	mg/l	0,02	Coliformes fecales:		
Tricloroetano	mg/l	0,04	Tubos múltiples ó	NMP/100 ml	< 1,1
Tetracloroetano	mg/l	0,008	Filtración por membrana	ufc/100 ml	< 1
Di (2 - etilhexil) ftalato	mg/l	0,0005	Cryptosporidium,	número de oocistes/l	Ausencia
Acrylamida	mg/l	0,0004	Giardia	número de quistes/l	Ausencia
Epiclorohidrina	mg/l	0,0006			
Hexaclorobutadieno	mg/l	0,0004			
1,2 Dibromoetano	mg/l	0,05			
1,4 - Dioxano	mg/l	0,2			
Ácido Nitrilotriacético	mg/l	0,2			

Fuente: (INEN, 2014)

CAPITULO 3

METODOLOGÍA

3.1. LÍNEA BASE DE LA ZONA DE ESTUDIO

La información presentada en este estudio fue recopilada en coordinación con la empresa minera, misma que facilitó visitas de campo, informes de descripción de procesos, planos del campamento, fotografías, entrevistas con los técnicos, entre otros materiales de apoyo, que permitieron consolidar una pequeña línea base del lugar y su problemática.

3.1.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA

El campamento minero del estudio se ubica entre los 300 y 1300 m.s.n.m. al sur de la Cordillera Occidental, en la Parroquia Camilo Ponce Enríquez, Cantón Ponce Enríquez, como se presenta en la figura 3.1., se encuentra al extremo suroccidental de la Provincia del Azuay, limita al sur con el Río Siete y al norte con el Río Tenguel.

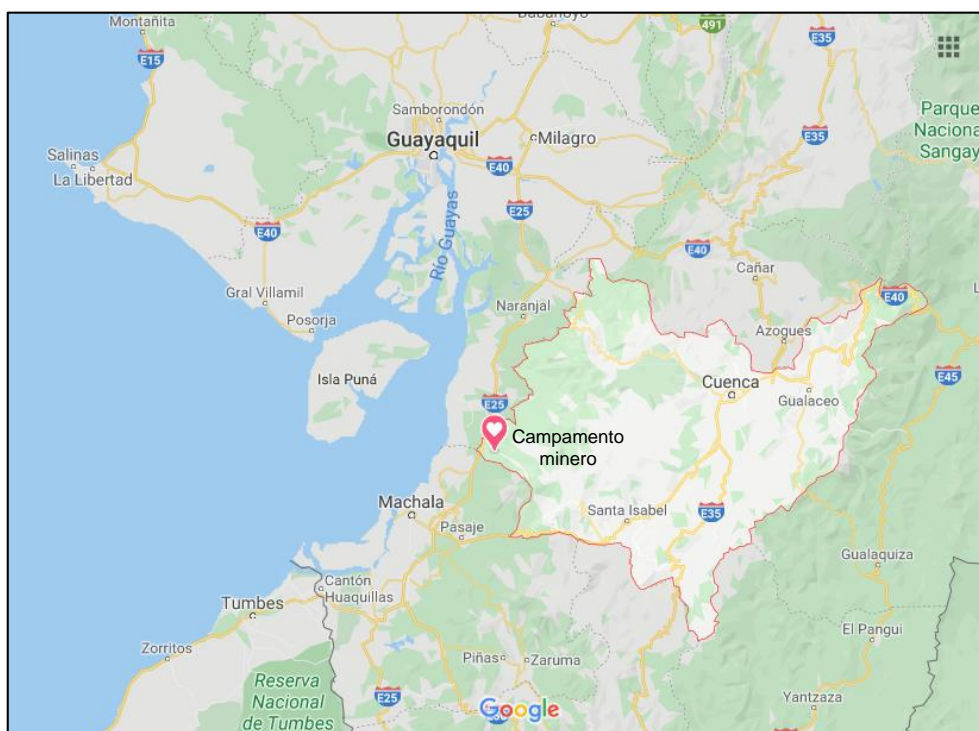


Figura 3. 1. Ubicación del campamento minero

Fuente: Google Maps

3.1.2. HIDROGEOLOGÍA

De acuerdo a estudios basados en la distribución y el comportamiento del agua subterránea en el Ecuador proporcionados por el INHAMI, el campamento minero se asienta dentro de la formación geológica Macuchi y de la unidad hidrogeológica Machala (ver Anexo 1), que se caracteriza por presentar planicies de inundación de notable espesor y buena permeabilidad, su litología se conforma de andesitas, tobas, dacitas y conglomerados.

Los acuíferos asociados a esta zona se caracterizan por ser muy locales y discontinuos, se conforman de rocas clásticas de edad cuaternaria no consolidadas de elevada permeabilidad y naturalmente tienen buena calidad química del agua (Burbano, Becerra y Pasquel, 2014).

3.1.3. DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES

El campamento minero es operado por una compañía dedicada a explotar, procesar y exportar minerales metálicos, principalmente oro y plata. Tiene una extensión de 8 ha y un perímetro de 1189 m, espacio en el que trabajan alrededor de 230 personas (personal operativo y administrativo), con el siguiente horario:

- **Minas** (4 turnos): 07H00 a 13H00, 13H00 a 19H00, 18H00 a 01H00 y 01H00 a 07H00
- **Molinos:** 07h00 a 17H00

En la mina se llevan a cabo los procesos de extracción, trituración, molienda, concentración gravimétrica, desorción, fundición y refinación (revisar tabla 3.1.). Para los procesos de cianuración y absorción con carbón activado el mineral es enviado desde la mina mediante mineraductos, de aproximadamente 800 m de longitud, a dos plantas de beneficio distintas ubicadas en espacios geográficos lejanos a la mina.

Tabla 3. 1. Procesos mineros que se realizan en el área de estudio

PROCESOS	DESCRIPCIÓN
Extracción	<ul style="list-style-type: none"> • Usa medios explosivos y/o mecánicos para obtener fragmentos voluminosos del mineral. • Genera residuos líquidos (drenaje ácido de mina) y desecho de rocas.
Trituración	<ul style="list-style-type: none"> • El mineral extraído se deposita en dos tolvas de recepción con una criba de barrotes. • El diámetro máximo de entrada es de 6" y el de salida de 2". • El material retenido de las cribas es trozado mediante combos.
Molienda	<ul style="list-style-type: none"> • Se emplean molinos de ruedas tipo "trapiche chileno". • La conminución (disminución de tamaño del mineral a malla 40) se produce por el efecto de arrastre, en un medio acuso.
Concentración gravimétrica	<ul style="list-style-type: none"> • Se usan canalones de 6m de longitud con pendiente de 4°, provistos de bayetas, el mineral que ellas retienen se deposita en toneles para luego pasar por la mesa "Wilfley" obteniendo un concentrado rico en oro. • Subproductos obtenidos: relaves compuestos de minerales de ganga (cuarzo, lamas, feldespatos), y sulfuros.
Cianuración y absorción con carbón activado (Fuera del campamento)	
Desorción	<ul style="list-style-type: none"> • El carbón cargado se coloca en las torres de desorción por donde circula una solución con 3% de NaOH y 2% de NaCN que desaloja el cianurato áurico de los microporos del carbón activado, y lo pone nuevamente en solución. • Se completa con una celda electrolítica con cátodos de lana de acero de corriente: 250 A y 5 V, que precipita el oro metálico. • Finalmente se hace un lavado ácido del carbón para quitarle impurezas, sumergiéndolo en 500 gal de agua más 1% a 2,5% de HCl a 90 °C.
Fundición y Refinación	<ul style="list-style-type: none"> • Se disuelve la lana de acero del proceso anterior con una solución de 5 l de agua y 5 kg de H₂SO₄, luego esta solución debe ser neutralizada con varios enjuagues en agua corriente, se seca y se obtiene un polvo conformado por oro, plata, cobre y residuos inorgánicos. • Al polvo se lo coloca en un crisol, se le adiciona bórax y se funde a 1200°C hasta que esté líquido, se vacía el contenido en una lingotera y al enfriarse se obtiene una barra doré (65% oro y 35% plata y cobre). • Para refinar se mezcla tres veces el peso de la barra con cobre o plata y se ataca con ácido nítrico en frío al 10% y después en caliente hasta que no haya reacción química, obteniéndose un polvillo fino café, el cual es secado y fundido generando una barra de oro de 98% a 99% de pureza.

Elaboración: Flores, J.



3.1.4. CAPTACIÓN Y USO DEL AGUA SUBTERRÁNEA

El agua subterránea es captada a un costado de la labor minera (túnel de acceso a la mina) en una estructura a la que se denomina caja de captación, esta se encuentra emplazada a nivel de superficie sobre el afloramiento de la vertiente de agua fresca subterránea (ver figura 3.2.).



Figura 3. 2. Caja de captación

El agua de la caja de captación (Punto 1) es conducida mediante politubo de 2" hacia el tanque de almacenamiento (Punto 2) ubicado en el sector de la bocamina a 690 m.s.n.m., su capacidad es de 14 m³ (ver figura 3.3.).



Figura 3. 3. Tanque de almacenamiento

Posteriormente, el agua es transportada hasta una cota superior mediante una bomba eléctrica de 7,5 HP, este tanque es conocido como reservorio de regulación (Punto 3) y posee 8 m³ de capacidad (ver figura 3.4.).



Figura 3. 4. Reservorio de regulación

Finalmente, el agua pasa a la caja de distribución (Punto 4) donde por gravedad se reparte a comedores, campamento y oficinas como se muestra en la figura 3.5. El agua es usada por el personal del campamento para consumo humano (bebida y preparación de alimentos) y uso doméstico (aseo personal y limpieza).

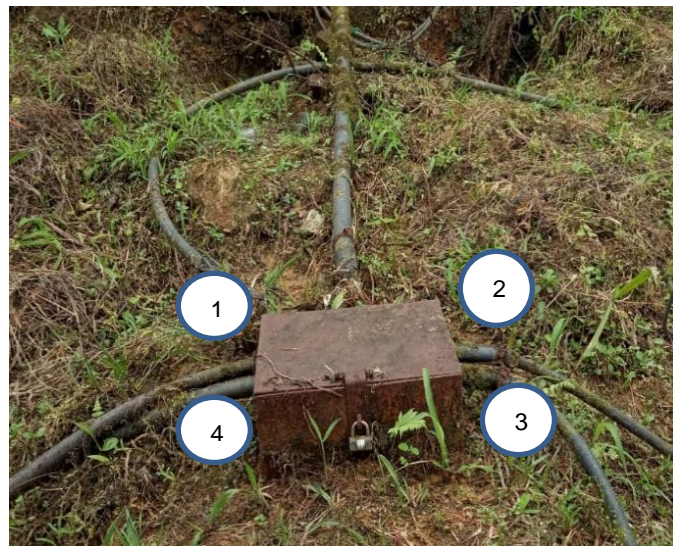


Figura 3. 5. Caja de distribución

1. Oficinas de la mina
2. Villa, comedor 1
3. Campamento y oficinas para el personal de molino, comedor 2
4. Campamento para el personal de mina, comedor 3

La figura 3.6. muestra de forma panorámica el trayecto del agua subterránea desde su captación hasta su distribución en el campamento minero.

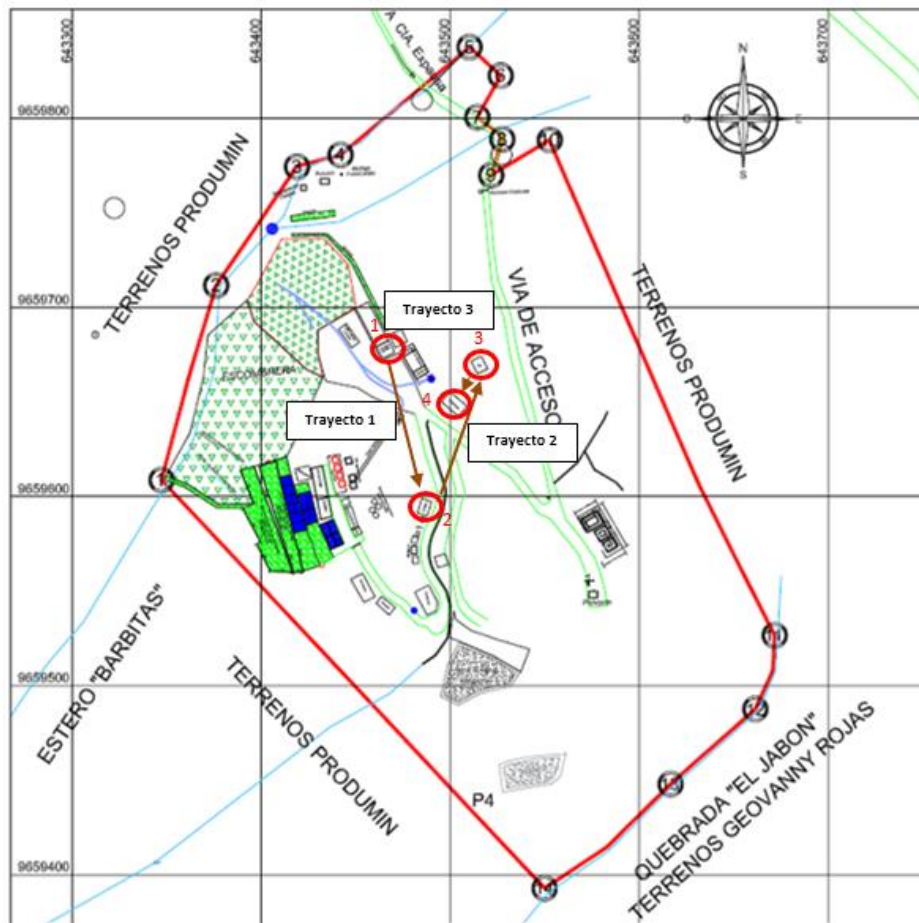


Figura 3. 6. Captación y distribución de agua subterránea en el campamento minero

3.2. MUESTREO

3.2.1. SELECCIÓN DE PUNTOS DE MUESTREO

Mediante una visita preliminar de reconocimiento del campamento minero y del aprovechamiento que tiene la fuente subterránea, se seleccionó como único y principal punto de muestreo al tanque reservorio de regulación (Punto 3), debido a que se ubica en una zona de fácil acceso y primordialmente es el último punto donde se almacena el agua captada del interior de la mina antes de su distribución y posterior consumo.

3.2.1.1. Definición del cronograma de muestreo

Con base a la información hidrogeológica de la zona de estudio, se conoce que el terreno está formado de planicies de inundación y el recurso hídrico subterráneo de rocas de alta permeabilidad, por lo que la precipitación juega un rol importante en la variación de la calidad del agua de la fuente subterránea de donde está siendo extraído el recurso.

Con el fin de visualizar dicha variación y reconocer el escenario más crítico se propusieron realizar campañas de muestreo para dos periodos: época seca y época lluviosa. Para definir las mismas, se empleó la información hidrológica proporcionada por el INAMHI, usando los datos de pluviosidad correspondientes a la estación climatográfica ordinaria más cercana a la zona de estudio M185 Machala-UTM-Pagua para el periodo 2007-2013, como se presenta en la tabla 3.2.

Tabla 3. 2. Registro de precipitaciones mensuales para el periodo 2007-2013

MESES	AÑO							PROMEDIO
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	
Enero	225,6	315,0	208,1	262,4	122,0		190,7	220,6
Febrero		722,7	305,5	412,1	247,3		104,8	358,5
Marzo		437,9	194,8	481,3	54,2		250,1	283,7
Abril		219,1	29,0	268,5	426,8		30,6	194,8
Mayo	70,7	55,5	28,2	101,8			16,4	54,5
Junio	70,8	57,8	7,9	55,8	34,0	28,0	63,4	45,4
Julio			4,9	40,0	70,2	42,2	43,5	40,2
Agosto	46,0	47,0	50,4	40,1	58,0	47,4	67,0	50,8
Septiembre	29,5	65,4	55,2	58,5	36,3	19,1	26,4	41,5
Octubre	53,7	81,3	70,9	70,1	34,5	48,1	70,9	61,4
Noviembre	54,7	50,6	33,1	56,6	35,2	35,9	38,1	43,5
Diciembre	75,2	10,2	106,0	100,0	20,6	38,4	3,5	50,5

Fuente: (Anuarios meteorológicos 2007-2013, INAMHI)

Elaboración: Flores, J.

La figura 3.7. permite evidenciar que las precipitaciones máximas se dan en los meses de febrero y marzo, mientras las mínimas a partir del mes de mayo en adelante.

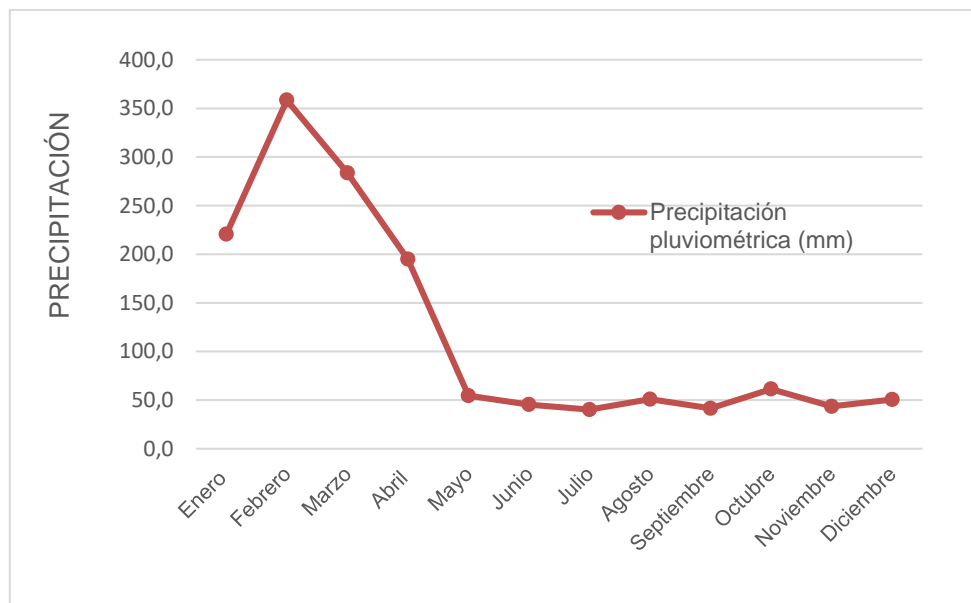


Figura 3. 7. Promedio anual de precipitación pluviométrica (2007-2013)

Fuente: (Anuarios meteorológicos 2007-2013, INAMHI)

Elaboración: Flores, J.

De acuerdo a lo antes expuesto y a la predisposición de la empresa para llevar a cabo las campañas de muestreo se establecieron las siguientes fechas:

Época seca

Muestreo 1: 30 de noviembre de 2019

Muestreo 2: 08 de diciembre de 2019

Época lluviosa







Muestreo 3: 30 de enero de 2020

Muestreo 4: 06 de febrero de 2020

3.2.2. MATERIALES Y EQUIPOS DE MUESTREO

La tabla 3.3. muestra los materiales y equipos usados para la ejecución de las campañas de muestreo propuestas.

Tabla 3. 3. Materiales usados para cada campaña de muestreo

MATERIALES	CANTIDAD	ESPECIFICACIONES
Cooler 	2	Material: poliestireno (espuma) Capacidad: 20 l
Garrafa 	3	Material: PET (Tereftalato de polietileno) Capacidad: 6 l
Botella 	2	Material: PET Capacidad: 100 ml
	1	Material: PET Capacidad: 200 ml
	1	Material: PET Capacidad: 1l
Envase Esterilizado 	1	Material: polipropileno Capacidad: 100 ml
Tiras de pH 	12	Gama de pH de 1 a 14
Hielo refrigerante en gel 	6	Peso: 400 g Color: transparente Viscosidad: 59,400 cps No tóxico
REACTIVO	CANTIDAD	USO
Solución de NaOH concentrada	7 ml	Conservación de las muestras
EQUIPO	CANTIDAD	USO
Cronómetro	1	Toma de muestras compuestas en intervalos exactos de tiempo
Equipo multiparámetro marca Hach (modelo HQ11D)	1	Medición de parámetros de campo: pH, temperatura, conductividad

Elaboración: Flores, J.

3.2.3. PROCEDIMIENTO DE LA CAMPAÑA DE MUESTREO

El protocolo empleado para la recolección de muestras se detalla en el anexo 2 de este documento, fue realizado siguiendo los lineamientos de las normas NTE INEN 2169 y NTE INEN 2176. A continuación, la tabla 3.4. presenta un resumen de los criterios técnicos más sobresalientes en el programa de muestreo planteado:

Tabla 3. 4. Criterios para la ejecución del programa de muestreo

CRITERIOS	DESCRIPCIÓN
Tipo de muestreo	Manual
Tipo de muestras	<ul style="list-style-type: none"> • Compuestas: Alícuotas de volumen constante proporcional a la capacidad de los recipientes. Las muestras parciales se tomaron cada 2,5 horas durante las 8 horas de la jornada laboral (mañana, medio día, tarde). • Simples: Toma puntual a la salida del tanque.
Técnicas de preservación	<ul style="list-style-type: none"> • Enfriamiento simple (4°C) con hielo refrigerante en gel y almacenamiento en oscuro • Adición de preservantes (NaOH) • Filtración
Frecuencia	4 campañas de muestreos (época seca y lluviosa)

Elaboración: Flores, J.

3.2.4. MEDICIÓN DE CAUDAL

Se monitoreó el caudal del tanque de distribución mediante el método de aforo volumétrico, usando un recipiente graduado de 16 l y un cronómetro calibrado (ver figura 3.8). El procedimiento consistió en medir el tiempo que tarda el efluente en llenar un determinado volumen, se realizaron 6 mediciones en el transcurso de las 8 horas laborables del campamento para cada campaña de muestreo (ver Anexo 6).

**Figura 3. 8.** Medición de caudal por método volumétrico

La ecuación 3.1. permitió realizar el cálculo de caudal, definido como la cantidad de flujo que circula por unidad de tiempo:

$$Q = \frac{V}{t} \text{ [3.1.]}$$

3.3. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA

3.3.1. SELECCIÓN DE PARÁMETROS A EVALUAR

En este estudio se realizó una caracterización física, química y microbiológica de la fuente subterránea que abastece al campamento minero, con el fin de proporcionar una visión global de su calidad. Los resultados obtenidos serán comparados con los límites permisibles establecidos por las normativas ecuatorianas vigentes para el agua de consumo humano y uso doméstico, ya que la fuente subterránea tiene este uso específico dentro del campamento. Adicionalmente, se valoraron parámetros para la determinación del ICA y otros que podrían ser útiles en el planteamiento de la propuesta de potabilización (Reolon, 2010).

En la selección de parámetros significativos, plasmada en tabla 3.5., se realizó un análisis con base al Acuerdo Ministerial 028 - Tabla 12, de los parámetros de monitoreo de los efluentes de la industria minera y con base a la Agencia de Protección Ambiental (2002), los parámetros específicos de control en la calidad de agua de consumo humano para las actividades humanas y operaciones mineras específicas que se llevan a cabo en el campamento, considerando que el proceso de cianuración se da fuera del mismo, también abarca parámetros indicativos de la contaminación natural en aguas subterráneas, producto de su geología y composición del terreno.

Además, se consideraron los requisitos establecidos por el Acuerdo Ministerial 097 – Tabla 1, que especifica los lineamientos que debe cumplir el agua captada para considerarse apta de consumo humano y uso doméstico, posterior a un tratamiento. Finalmente, se tomaron en cuenta los criterios de la Norma NTE INEN 1108:2014 para examinar los requisitos que debe cumplir el agua una vez potabilizada.

Tabla 3. 5. Análisis para selección de parámetros significativos

FUENTE	PARÁMETROS DE MONITOREO
AM 028 – Tabla 12 (Sección: Extracción de metales preciosos)	Caudal, DBO, DQO, SST, SAAM, Grasas y aceites, Fenoles, Cianuros, Sulfatos, Sulfuros, Aluminio, Arsénico, Cadmio, Calcio, Cobre, Cromo, Hierro, Manganeseo, Mercurio, Molibdeno, Níquel, Plomo, Zinc
EPA	Arsénico, Asbestos, Bario, Cadmio, Cromo, Cobre, Flúor Mercurio, Nitratos, Nitritos, Plomo, Selenio, Coliformes fecales, Aluminio, Cloruros, Color, Corrosividad, Fluoruros, Hierro, Manganeseo, pH, Plata, Sulfatos, SDT, Zinc
AM 097 – Tabla 1	Aceites y grasas, Arsénico, Bario, Cadmio, Cianuro, Cobre, Coliformes fecales, Color, Cromo hexavalente, DBO, DQO, Fluoruro, Hierro total, Mercurio, Nitrato, Nitrito, Plomo, pH, TPHs, Selenio, Sulfatos, Turbiedad
NTE INEN 1108:2014	Color, Turbiedad, Olor, Sabor, Antimonio, Arsénico, Bario, Boro, Cadmio, Cianuros, Cloro libre residual, Cobre, Cromo, Fluoruros, Mercurio, Níquel, Nitratos, Nitritos, Plomo, Selenio, Coliformes fecales, Cryptosporidium, Giardia

Fuente: (EPA, 2002; INEN, 2014, MAE, 2015)

Elaboración: Flores, J.

Se seleccionaron 29 parámetros claves considerando su coincidencia en los criterios de las diferentes fuentes presentadas, la disponibilidad de reactivos e instrumentos de laboratorio, y los costos de análisis (ver tabla 3.6.).

3.3.2. MÉTODOS DE ANÁLISIS PARA LOS ENSAYOS FÍSICOS, QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS

Para caracterizar el agua de la fuente subterránea y obtener resultados aceptables y comparables con normas técnicas de calidad asociadas a la materia, se emplearon los métodos estandarizados definidos por el “Standard methods for the examination of water and wastewater 23 rd. edition” y los procedimientos del Manual de Análisis de Agua Hach, 7ma. Edición, como se detalla en la tabla 3.6.

Los análisis fueron desarrollados durante el muestreo, en el caso de los parámetros in situ. Por otro lado, los parámetros que requirieron métodos de análisis complejos y equipos sofisticados fueron realizados en laboratorios acreditados por el SAE (CICAM, DEMEX y OSP), con el fin de obtener resultados muy confiables que caractericen de manera certera la calidad del agua de la fuente subterránea, ya que es usada para consumo humano en el campamento minero.

Adicionalmente, otros análisis fueron desarrollados en el Laboratorio Docente de Ingeniería Ambiental de la EPN. En este caso cada análisis fue realizado por triplicado para obtener un valor promedio que se aproxime mejor al valor real de la concentración de los contaminantes en el agua.

Tabla 3. 6. Parámetros seleccionados y métodos de análisis

	PARÁMETRO	SIGLAS	UNIDAD	MÉTODO / PROCEDIMIENTO
FÍSICOS	Color real	-	Pt – Co	SM 2120 C / Espectrofotometría VIS
	Color aparente	-	Pt - Co	SM 2120 C / Espectrofotometría VIS
	Conductividad *	CE	μs	Equipo multiparámetro
	Sólidos disueltos totales	SDT	mg/l	SM 2540 C / Gravimetría
	Temperatura*	T	°C	Equipo multiparámetro
	Turbiedad	-	NTU	SM 2130 B / Nefelometría
QUÍMICOS	Arsénico	As	mg/l	Absorción atómica / Espectrómetro Perkin Elmer modelo Analyst 300
	Alcalinidad	-	mg CaCO ₃ /l	SM 2320 B / Titulación volumétrica
	Bario	Ba	mg/l	Absorción atómica / Espectrómetro Perkin Elmer modelo Analyst 300
	Cadmio	Cd	mg/l	Absorción atómica / Espectrómetro Perkin Elmer modelo Analyst 300
	Cianuro total	CN ⁻	mg/l	SM 4500 CN-E / Espectrofotometría VIS
	Cloruro	Cl ⁻	mg/l	SM 4500 – Cl / Titulación volumétrica
	Cobre	Cu	mg/l	HH 8506 / Espectrofotometría VIS
	Cromo hexavalente	Cr ⁺⁶	mg/l	SM 3500 – Cr B / Espectrofotometría VIS
	Demanda bioquímica de oxígeno	DBO ₅	mg/l	SM 5210 B / Volumetría
	Demanda química de oxígeno	DQO	mg/l	SM 5220 D / Espectrofotometría VIS
	Dureza	-	mg CaCO ₃ /l	SM 2340 C / Titulación volumétrica
	Fluoruro	-	mg/l	HH 8029 / Espectrofotometría VIS
	Hierro total	Fe	mg/l	SM 3500 – Fe B / Espectrofotometría VIS
	Hierro soluble (Hierro 2)	(Fe ⁺⁺)	mg/l	SM 3500 – Fe B / Espectrofotometría VIS
	Manganeso	Mg	mg/l	HH 8029 / Espectrofotometría VIS
	Mercurio	Hg	mg/l	Absorción atómica / Espectrómetro Perkin Elmer modelo Analyst 300
	Nitratos	NO ₃ ⁻	mg/l	SM 4500-NO3-B / Espectrofotometría VIS
	Nitritos	NO ₂ ⁻	mg/l	SM 4500-NO2-B / Espectrofotometría VIS
	Potencial hidrógeno*	pH	N/A	Equipo multiparámetro
	Plomo	Pb	mg/l	Absorción atómica / Espectrómetro Perkin Elmer modelo Analyst 300
Selenio	Se	mg/l	Absorción atómica / Espectrómetro Perkin Elmer modelo Analyst 300	
Sulfatos	SO ₄ ⁻²	mg/l	SM 4500-SO ₄ ⁻² E / Espectrofotometría VIS	
BIOL.	Coliformes fecales	NMP	NMP/100ml	SM 9221 B / Fermentación en tubos múltiples

*: In situ. SM: Standard Methods. HH: Manual Hach. N/A: No aplica

Elaboración: Flores, J.

3.3.3. CORRELACIÓN ESTADÍSTICA “t de Student”

Con el fin de determinar si existe relación o independencia entre los resultados de la caracterización de la época seca con los de la época lluviosa, y considerando que los datos siguen una distribución normal, se llevó a cabo la prueba “t de student” planteando la hipótesis nula de que no existe variación en la concentración de contaminantes entre una época y la otra.

La metodología empleada para este propósito fue el uso de la herramienta de Excel llamada análisis de datos, se seleccionó la prueba t para media de dos muestras emparejadas, se emplearon los datos de las 4 caracterizaciones y se obtuvo el valor de “p” que permitió conocer si las medias de los datos para ambas épocas presentan diferencias significativas o no entre sí, de acuerdo a las siguientes condiciones:

Se acepta la hipótesis nula:

NS: No significativo, cuando $p > 0,05$

No se acepta la hipótesis nula:

* : Significativo, cuando p entre 0,01 y 0,05,

** : Muy significativo, cuando p entre 0,001 y 0,01

*** : Extremadamente significativo, cuando $p < 0,001$ (Tortosa, 2011).

3.3.4. CÁLCULO DE ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA (ICA)

Para categorizar la calidad del agua del presente estudio se empleó el índice CCME – WQI. Canadian Council of Ministers of Environmental – Water Quality Index, mismo que evalúa la calidad del agua en un contexto matemático en relación con los límites permisibles de una normativa acorde al aprovechamiento que tiene el recurso hídrico, basándose en tres factores: alcance, frecuencia y amplitud (ver tabla 3.7.). Es flexible en cuanto al tipo y cantidad de parámetros que se analizarán, periodo de aplicación y tipo de cuerpo hídrico (CCME, 2001).

Tabla 3. 7. Factores del índice CCME – WQI

FACTORES	DESCRIPCIÓN
F1 - Alcance	Porcentaje de parámetros que incumplen con los límites permisibles de la normativa en relación con el número total de parámetros analizados durante un periodo determinado.
F2 - Frecuencia	Porcentaje de ensayos individuales que incumplen con los límites permisibles de la normativa.
F3 - Amplitud	Cantidad total de ensayos que no alcanzan o incumplen los límites permisibles de la normativa.

Fuente: (CCME, 2001)

Elaboración: Flores, J.

Se decidió realizar el cálculo del ICA con base a la Norma INEN 1108 para agua potable, se eligieron 14 parámetros, entre ellos: Turbiedad, As, Ba, Cd, CN⁻ total, Cu, Cr⁺⁶, F⁻, Hg, NO₃⁻, NO₂⁻, Pb, Se, y Coliformes fecales.

El periodo de aplicación se definió para el tramo época seca – época lluviosa muestreado.

El alcance, la frecuencia y la amplitud fueron determinados mediante las siguientes expresiones matemáticas:

$$F_1 = \left(\frac{\# \text{ de parámetros que incumplen la normativa}}{\# \text{ total de parámetros analizados}} \right) * 100 \quad [3.2]$$

$$F_2 = \left(\frac{\# \text{ de ensayos que incumplen la normativa}}{\# \text{ total de ensayos realizados}} \right) * 100 \quad [3.3]$$

El cálculo de F3 se realizó en tres pasos:

- I. Como primer paso se obtuvo la “Desviación anómala”, definida como el número de veces que el resultado de un ensayo individual es mayor (ecuación 3.4) o menor (ecuación 3.5) que su límite permisible.

$$\text{Desviación anómala}_i = \left(\frac{\text{Valor del ensayo individual que incumple la normativa}_i}{\text{Límite permisible}_i} \right) - 1 \quad [3.4]$$

$$\text{Desviación anómala}_i = \left(\frac{\text{Límite permisible}_i}{\text{Valor del ensayo individual que incumple la normativa}_i} \right) - 1 \quad [3.5]$$

- II. Posteriormente, se determinó la suma normalizada de la desviación anómala o NSE mediante la ecuación 3.6, que suma las desviaciones de los ensayos individuales respecto a sus límites permisibles y divide entre el número total

de pruebas. Representa la cantidad colectiva de los ensayos individuales que están fuera de cumplimiento.

$$NSE = \frac{\sum_{i=1}^n \text{desviación anómala}}{\text{número total de ensayos}} \quad [3.6]$$

- III. Luego, F_3 se calculó mediante una función asintótica que escala la suma normalizada de las desviaciones anómalas desde los límites permisibles (NSE) para producir un rango entre 0 y 100, donde 0 representa la "peor" calidad del agua y 100 representa la "mejor".

$$F_3 = \left(\frac{NSE}{0,01 NSE + 0,01} \right) \quad [3.7]$$

Una vez determinados los tres factores, el índice CCME – WQI se calculó de la siguiente manera:

$$CCME\ WQI = 100 - \frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1,732} \quad [3.8]$$

Finalmente, con la obtención del valor del índice global se procedió a calificar la calidad del agua empleando los criterios expuestos en la tabla 3.8.

Tabla 3. 8. Clasificación CCME – WQI

CALIDAD	PUNTUACIÓN	SIGNIFICADO
Excelente	95-100	Ausencia de amenaza o deterioro; condiciones naturales o vírgenes. No requiere tratamiento para consumo.
Buena	80-94	Pequeño grado de amenaza o deterioro; las condiciones raramente se apartan de los niveles naturales o deseables. Tratamiento menor requerido.
Regular	65-79	Amenazada o deteriorada en ocasiones; las condiciones a veces se apartan de los niveles naturales o deseables. Dudoso consumo sin tratamiento.
Contaminada	45-64	Frecuentemente amenazada o deteriorada; las condiciones a menudo se apartan de los niveles naturales o deseables. Tratamiento de potabilización necesaria.
Muy contaminada	0-44	Totalmente amenazada o deteriorada; las condiciones usualmente se apartan de los niveles naturales o deseables. Inaceptable para consumo humano.

Fuente: (CCME, 2001)

Elaboración: Flores, J.

3.3. SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA ÓPTIMA DE TRATAMIENTO

Con el fin de elegir la alternativa óptima de tratamiento que permita obtener agua potable segura para abastecer al campamento minero, se emplearon matrices de comparación y decisión de acuerdo a la metodología del manual de diseño de tecnologías de tratamiento de As para sistemas pequeños la EPA (2002).

La matriz se conformó de 3 columnas (A, B y C), que abarcaron:

- A. **Ponderación:** Asignó un valor de 10 a cada factor de evaluación, su suma fue igual a 100.
- B. **Factores:** Enlistó los criterios de evaluación que se indican y describen a continuación en la tabla 3.9.

Tabla 3. 9. Criterios, factores y descripción de evaluación

CRITERIOS	FACTORES	DESCRIPCIÓN
TÉCNICOS	Concentraciones que pueden tratar	Carga contaminante que es capaz de receptor y tratar con eficiencia
	Eficiencia	Capacidad de eliminar contaminantes y alcanzar los límites requeridos, garantía de operación continua
	Otros contaminantes que influyen	Reacción del proceso frente a variables que pueden influir o cambiar su funcionamiento normal
	Pre-oxidación/post-cloración requerida	Necesidad de incluir pre o post operaciones para optimizar el tratamiento
	Habilidad del operador requerida	Evaluación de la capacidad de un operador acorde a la complejidad de la operación
	Calidad del agua recomendada	Criterios con los que debe cumplir el agua para poder aplicar determinado tratamiento
	Apropiado como tratamiento para sistemas pequeños	Evaluación de la propuesta para ser implementada en espacios pequeños y valoración de la instrumentación que no alargaría la puesta en operación
	Otras consideraciones	Principales problemas que enfrenta la tecnología o proceso
AMBIENTALES	Residuos generados	Residuos o subproductos sólidos, líquidos o gaseosos producto de la operación
ECONÓMICOS	Costos	Inversión, operación y mantenimiento

Fuente: (EPA, 2002)

Elaboración: Flores, J.

C. **Calificación:** Designó un valor a cada aspecto según el criterio del evaluador sustentado en la literatura bibliográfica, de acuerdo a la siguiente escala de valoración:

- 0** = El aspecto de evaluación no aplica
- 2** = El aspecto se cumple deficientemente.
- 6** = El aspecto se cumple adecuadamente.
- 10** = El aspecto de cumple excelentemente.

Finalmente, se obtuvo la calificación global sumando todos los valores de la columna C, la alternativa que obtuvo mayor puntuación fue la seleccionada.

La tabla 3.10. permite evidenciar el formato con el que se llevará a cabo la evaluación de propuestas.

Tabla 3. 10. Formato de matriz de selección

A PONDERACIÓN	B FACTORES	C CALIFICACIÓN		
		PROPUESTA 1	PROPUESTA 2	PROPUESTA 3
CRITERIOS TÉCNICOS				
10	• Concentraciones que puede tratar			
10	• Eficiencia			
10	• Otros contaminantes que influyen			
10	• Pre-oxidación/ post cloración requerida			
10	• Habilidad del operador requerida			
10	• Calidad del agua recomendada			
10	• Apropiado como tratamiento para sistemas pequeños			
10	• Otras consideraciones			
CRITERIOS AMBIENTALES				
10	• Residuos generados			
CRITERIOS ECONÓMICOS				
10	• Costos			
100	TOTAL			

Fuente: (EPA, 2002)

Elaboración: Flores, J.

CAPITULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LA FUENTE SUBTERRÁNEA

Debido a que se llevaron a cabo dos muestreos por época, se realizó un promedio para cada una (ver Anexo 3), cuyos valores se reflejan en la tabla y figura 4.1:

Tabla 4. 1. Resultados de la caracterización y valores de “p” para “t de student”

PARÁMETRO	ÉPOCA SECA	ÉPOCA LLUVIOSA	p	NIVEL DE SIGNIFICANCIA
Color real (Pt – Co)	< 5,000	6,500	0,047	*
Color aparente (Pt – Co)	8,335	13,165	0,022	*
Conductividad (µs)	164,865	176,780	0,042	*
SDT (mg/l)	264,335	272,165	0,014	*
Temperatura* (°C)	25,430	26,385	0,203	NS
Turbiedad (NTU)	0,200	4,960	0,034	*
Arsénico (mg/l)	0,120	0,160	0,070	NS
Alcalinidad (mgCaCO3/l)	75,670	82,665	0,030	*
Bario (mg/l)	0,100	0,100	-	NS
Cadmio (mg/l)	0,010	0,010	-	NS
Cianuro total (mg/l)	< 0,010	< 0,010	-	NS
Cloruro (mg/l)	11,999	15,957	0,109	NS
Cobre (mg/l)	< 0,100	< 0,100	-	NS
Cromo +6 (mg/l)	< 0,050	< 0,050	-	NS
DBO (mg/l)	< 2,000	< 2,000	-	NS
DQO (mg/l)	53,165	15,500	0,144	NS
Dureza (mg CaCO3/l)	147,795	168,148	0,073	NS
Fluoruro (mg/l)	< 0,100	< 0,100	-	NS
Hierro total (mg/l)	< 0,100	0,075	0,131	NS
Hierro soluble (mg/l)	< 0,100	< 0,100	-	NS
Manganeso (mg/l)	< 0,050	0,078	0,033	*
Mercurio (mg/l)	< 0,0001	< 0,0001	-	NS
Nitratos (mg/l)	5,405	2,000	0,008	**
Nitritos (mg/l)	< 0,060	0,008	0,537	NS
pH	7,705	7,710	0,795	NS
Plomo (mg/l)	0,010	0,010	-	NS
Selenio (mg/l)	0,012	0,013	0,079	NS
Sulfatos (mg/l)	54,835	71,335	0,007	**
Coliformes fecales (NMP/100ml)	< 1,100	4,300	0,007	**

NS: no significativo *: significativo **: muy significativo

Elaboración: Flores, J.

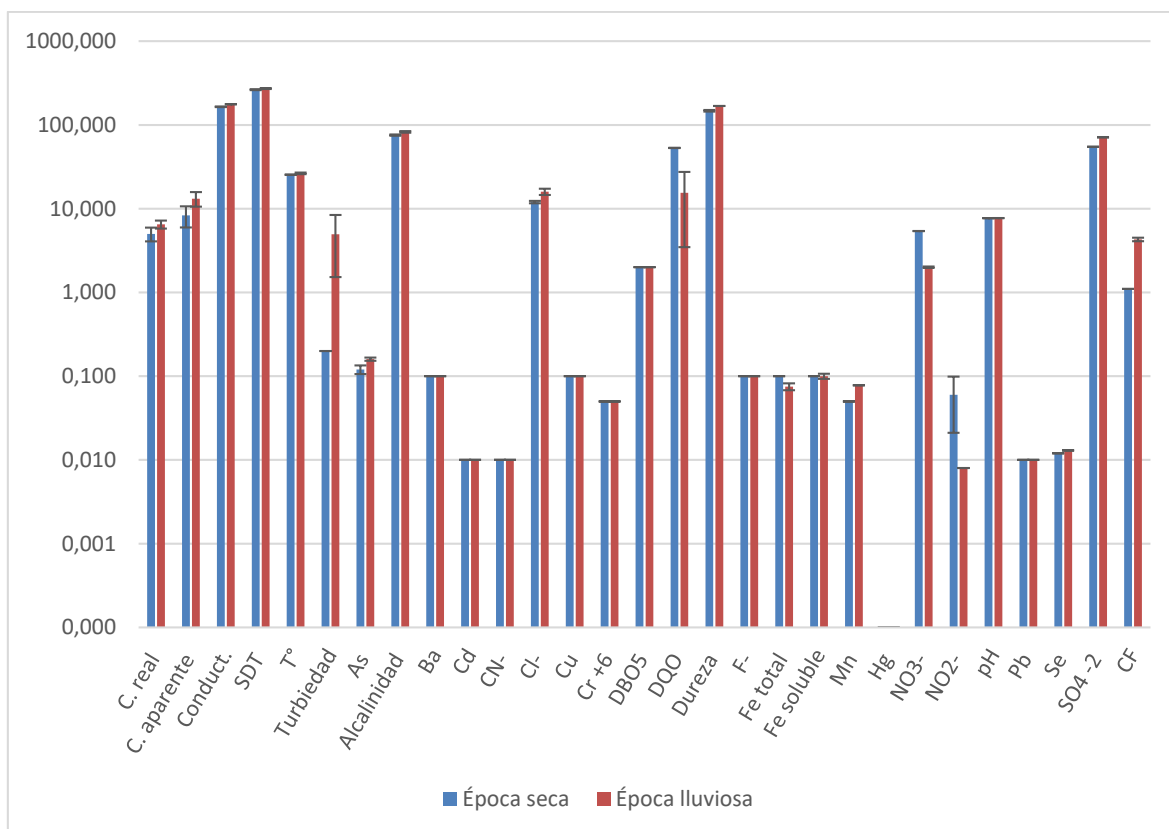


Figura 4. 1. Resultados de la caracterización para las épocas: seca y lluviosa

Elaboración: Flores, J.

Al analizar los resultados de la caracterización de la fuente subterránea del campamento minero para las épocas: seca y lluviosa mediante la correlación estadística “t de student” y la obtención de “p” con “t” al 95% de confianza (ver Anexo 5), se identificó que el mayor número de parámetros presentaron diferencias no significativas de una época a otra ($p > 0,05$), es decir, las variaciones en sus concentraciones son muy pequeñas e incluso se mantienen constantes, hecho que corrobora la hipótesis nula propuesta, la misma que plantea la inexistencia de un cambio en la concentración de contaminantes al evaluar la calidad del agua en distintos periodos.

En este grupo se encuentran los parámetros: temperatura, arsénico, bario, cadmio, cianuro, cloruro, cobre, cromo, DBO, DQO, dureza, fluoruro, hierro total y soluble, mercurio, nitritos, pH, plomo y selenio. Cabe mencionar que el valor del DQO sufre una variación considerable en cifras de una época a otra, sin embargo, su valor de “p” indica que dicha variación no está relacionada entre las muestras, es decir, su

valor pudo variar por un evento externo como una descarga contaminante puntual y no por la transición de épocas (Tortosa, 2011).

Por otro lado, parámetros como: color real, color aparente, conductividad, sólidos disueltos totales, turbiedad, alcalinidad y manganeso presentaron diferencias estadísticas *significativas* (p entre 0,01 y 0,05), mientras los nitratos, sulfatos y coliformes fecales presentaron diferencias *muy significativas* (p entre 0,001 y 0,01), desmintiendo la hipótesis nula, ya que estos parámetros muestran incremento en sus concentraciones durante la época lluviosa, a excepción del nitrato que disminuye su concentración, debido a que en verano los procesos de nitrificación se llevan a cabo de manera intensa, mientras en la época lluviosa o invierno no.

Durante el periodo enero – mayo la lluvia desempeña un rol importante en el aumento de SDT, conductividad y alcalinidad, ya que al fluir en terrenos mineros arrastra hacia la fuente subterránea sales, metales y otros compuestos orgánicos e inorgánicos, del mismo modo acarrea materia orgánica del suelo que al descomponerse en el agua aumentan las concentraciones de color. También ayuda al proceso de lixiviación de descargas residuales domésticas no controladas, mismas que son fuente de incremento de manganeso y coliformes fecales. El aumento de sulfatos, por otro lado, es atribuido a la oxidación de sulfuros de hierro presentes en rocas sedimentarias que se oxidan a sulfatos y se integran al agua durante climas húmedos y con altas precipitaciones (Romero, 2013).

4.2. ANÁLISIS DE CAUDAL

Posterior a emplear el método de aforo volumétrico en la medición y monitoreo de los caudales del tanque de regulación en las épocas: seca y lluviosa, se obtuvieron los siguientes resultados expresados en la tabla 4.2.:

Tabla 4. 2. Medición de caudales

No	HORA DEL DÍA	CAUDAL (l/s)	
		ÉPOCA SECA	ÉPOCA LLUVIOSA
1	07 h 00	0,372	0,421
2	08 h 20	0,378	0,437
3	09 h 40	0,338	0,398
4	11 h 00	0,356	0,435
5	12 h 20	0,346	0,471
6	13 h 40	0,294	0,413
7	15 h 00	0,353	0,410
8	16 h 20	0,371	0,421
PROMEDIO		0,351	0,414

Elaboración: Flores, J.

Es posible visualizar en la figura 4.2. que en la época lluviosa se presentan valores de caudal más altos en contraste a la época seca, esto se debe a que la escorrentía de agua lluvia reabastece a la fuente subterránea, por lo tanto, el volumen de la captación en la vertiente es mayor, al igual que el volumen de agua conducida al tanque de regulación, asimismo se evidencia que el pico de caudal más alto es de 0,471 l/s producido a las 12 h 20. Por otro lado, en la época seca se evidencian valores de caudal relativamente constantes a excepción de las 13 h 40 donde se evidencia el caudal más bajo correspondiente a 0,294 l/s.

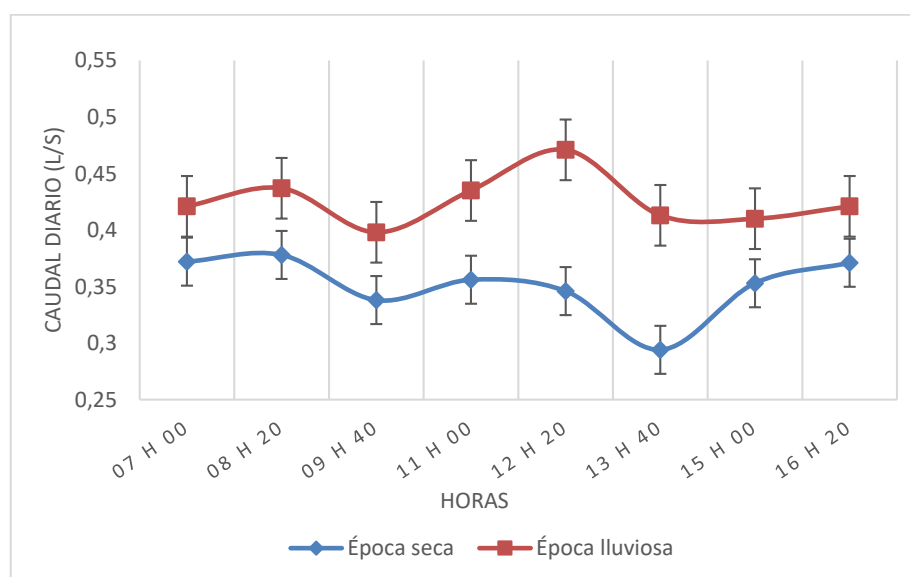


Figura 4. 2. Caudales para época seca y lluviosa

Elaboración: Flores, J.

4.3. COMPARACIÓN CON LA NORMATIVA ECUATORIANA PARA AGUA DE CONSUMO HUMANO Y USO DOMÉSTICO

La tabla 4.3. realiza una comparación entre los resultados obtenidos y los criterios de calidad de las normativas aplicables. Ciertos parámetros son abarcados por una normativa, mientras la otra lo excluye, en este caso considerando que este estudio tiene por objeto plantear una alternativa de tratamiento, se priorizan los criterios de la norma INEN 1108:2014 ya que estos son los límites máximos a alcanzar una vez que el agua haya sido tratada eficientemente.

Tabla 4. 3. Comparación de los resultados con las normativas de calidad del agua

	PARÁMETRO	UNIDAD	ÉPOCA SECA	ÉPOCA LLUVIOSA	AM 097	INEN 1108
FÍSICOS	Color real	Pt – Co	* 5,00	6,50	75,00	-
	Color aparente	Pt - Co	8,33	13,17	-	15,00
	Temperatura	°C	25,43	26,38	28,00	-
	Turbiedad	NTU	0,20	4,96	100,00	5,00
	SDT	mg/l	264,33	272,17	1000,00	-
QUÍMICOS	Arsénico	mg/l	0,12	0,16	0,10	0,01
	Bario	mg/l	0,10	0,10	1,00	0,70
	Cadmio	mg/l	0,01	0,01	0,02	0,003
	Cianuro total	mg/l	* 0,01	*0,01	0,10	0,07
	Cloruro	mg/l	12,00	15,96	250,00	-
	Cobre	mg/l	* 0,10	*0,10	2,00	2,00
	Cromo ⁺⁶	mg/l	* 0,05	0,05	0,05	0,05
	DBO ₅	mg/l	* 2,00	*2,00	*2,00	-
	DQO	mg/l	53,17	15,50	*4,00	-
	Dureza	mgCaCO ₃ /l	147,80	168,15	500	-
	Fluoruro	mg/l	* 0,10	*0,10	1,50	1,50
	Hiero total	mg/l	* 0,10	0,08	1,00	-
	Manganeso	mg/l	* 0,05	0,08	0,10	-
	Mercurio	mg/l	* 0,0001	*0,0001	0,006	0,006
	Nitratos	mg/l	5,41	2,00	50,00	50,00
	Nitritos	mg/l	* 0,06	0,01	0,20	3,00
	pH	N/A	7,71	7,71	9,00	-
	Plomo	mg/l	0,01	0,01	0,01	0,01
Selenio	mg/l	0,0121	0,0129	0,01	0,04	
Sulfatos	mg/l	54,83	71,33	500,00	-	
BIOLÓG.	Coliformes fecales	NMP/100ml	* 1,10	4,60	1000,00	* 1,10

*: menor que : Valores que sobrepasan los límites permisibles

Elaboración: Flores, J.

4.3.1. PARÁMETROS FÍSICOS

Como se observa en la figura 4.3. ningún parámetro físico sobrepasa los límites permisibles establecidos por las normativas ecuatorianas de calidad de agua para consumo humano y uso doméstico: Acuerdo ministerial 097 y Norma NTE INEN 1108:2014, lo que indica que estos parámetros no requieren de ningún tipo de tratamiento para disminuir sus concentraciones y no representan problema alguno en el tema de seguridad alimentaria.

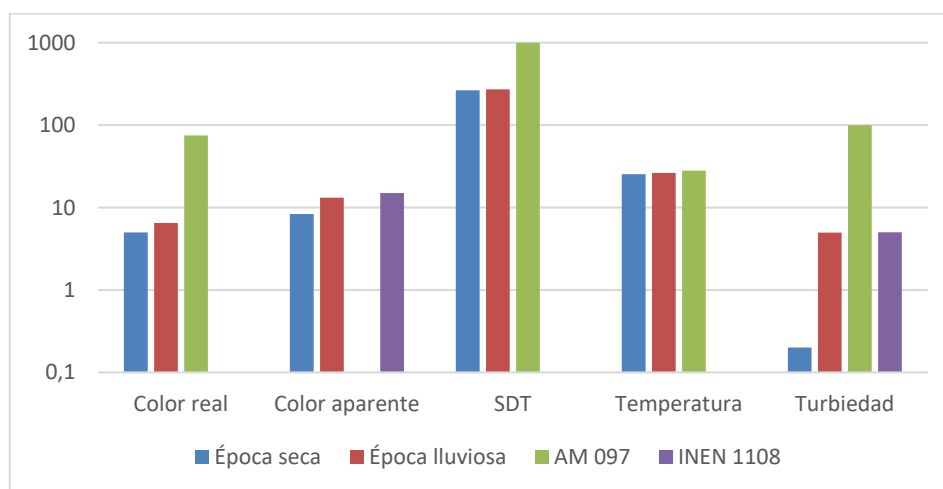


Figura 4. 3. Comparación de parámetros físicos

Elaboración: Flores, J.

4.3.2. PARÁMETROS QUÍMICOS

La figura 4.4. muestra la existencia de parámetros químicos que sobrepasan los límites permisibles en ambas épocas. En el caso del arsénico, se tiene una concentración de 0,12 mg/l en época seca y 0,16 mg/l en época lluviosa mientras el límite del AM 097 es 0,10 mg/l y de la norma INEN 1108 es de 0,01 mg/l. Su presencia puede deberse a causas naturales litológicas y también a procesos mineros de extracción y fundición de oro que se llevan a cabo en el campamento, (emisiones de gases de plantas de ácido y polvos residuales de la fundición) (INEN, 2006). Como es evidente este parámetro requiere un tratamiento con altas eficiencias que permita al agua alcanzar los límites permisibles de agua potable con el fin de prevenir al personal de la mina de enfermedades hídricas asociadas a este

elemento como cáncer de piel, vejiga y pulmones, neurotoxicidad, diabetes y enfermedades pulmonares y cardiovasculares (Remache, 2013).

La demanda química de oxígeno se encuentra excediendo los límites permisibles en altas cantidades, debido a que se registran valores de 53,17 mg/l y 15,50 mg/l en la época seca y lluviosa respectivamente, mientras el AM 097 indica que el valor máximo aceptable es menor a 4 mg/l. Sin embargo, la norma INEN 1108 no especifica un valor referente respecto a este parámetro, por lo que es de suponer que un tratamiento que elimine los otros contaminantes problemas también reducirá proporcionalmente los valores de DQO, convirtiéndolo en un parámetro inofensivo. Sabiendo que el DQO involucra tanto la materia orgánica como inorgánica y comparando los valores de DBO₅ que son menores a 2 mg/l y cumplen con la normativa, se sabe que el alto contenido de DQO en el agua es debido a la presencia de elementos inorgánicos como pueden ser las sales o los metales pesados.

El cadmio es un parámetro que presenta irregularidades en cuanto al cumplimiento únicamente de la norma INEN 1108 de agua potable, ya que con base al AM 097 cumple de forma exitosa el criterio de calidad. La caracterización de la fuente subterránea arrojó un resultado de 0,01 mg/l para ambas épocas mientras la norma mencionada establece un límite de 0,003 mg/l, es decir, su concentración excede 3,33 veces la concentración permitida. La presencia de cadmio en el agua subterránea objeto de esta investigación debe alcanzar los límites permisibles indicados, caso contrario podría causar afecciones renales y cardiovasculares (hipertensión), anemia y alteraciones hepáticas (Remache, 2013).

Por otro lado, se presenta un caso especial para el selenio, debido a que se encuentra sobrepasando los límites permisibles del AM 097, pero no los de la Norma INEN 1108, por esta razón, no se lo considerará como un parámetro problema, ya que cumple con la concentración que debería alcanzar una vez que el agua sea sometida a tratamiento.

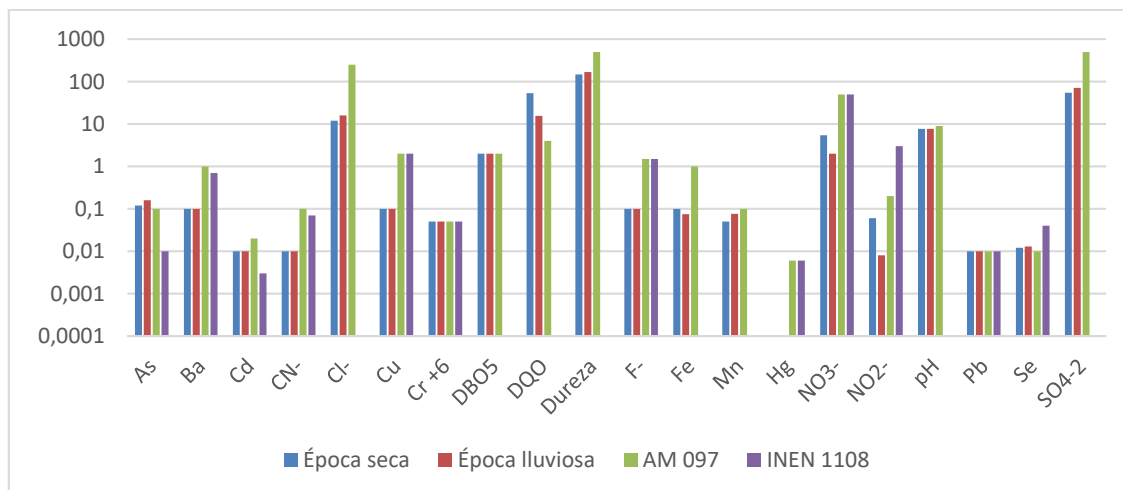


Figura 4. 4. Comparación de parámetros químicos

Elaboración: Flores, J.

4.3.3. PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS

Los resultados obtenidos de los análisis de coliformes fecales, representados en la figura 4.5., demostraron que durante la época lluviosa existe un incremento en la concentración de este parámetro sobrepasando los límites permisibles de agua potable (Norma INEN 1108), los mismos que establecen un valor límite menor a 1,1 NMP/100ml, mientras la concentración específica para esta época es de 4,3 NMP/100ml, es decir cuatro veces mayor a la cantidad permitida, por lo que se debe prestar atención a un proceso de desinfección que evite la transmisión de enfermedades por microorganismos patógenos.

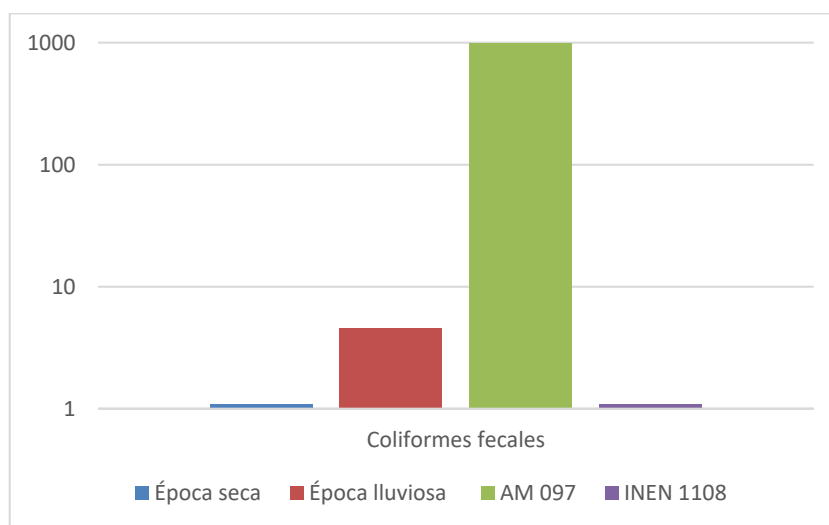


Figura 4. 5. Comparación de parámetros químicos

Elaboración: Flores, J.

4.4. RESULTADOS DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA (ICA)

Tabla 4. 4. Determinación del ICA

PARÁMETROS	FECHA / ENSAYOS INDIVIDUALES				INEN 1108
	30/11/2019	08/12/2019	30/01/2020	06/02/2020	
Turbiedad (NTU)	0,20	0,20	2,53	7,39	5,00
As (mg/l)	0,11	0,13	0,16	0,17	0,01
Ba (mg/l)	0,10	0,10	0,10	0,10	0,70
Cd (mg/l)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,003
CN ⁻ (mg/l)	* 0,01	* 0,01	* 0,01	* 0,01	0,07
Cu (mg/l)	* 0,10	* 0,10	* 0,10	* 0,10	2,00
Cr ⁺⁶ (mg/l)	* 0,05	* 0,05	* 0,05	* 0,05	0,05
F ⁻ (mg/l)	* 0,10	* 0,10	* 0,10	* 0,10	1,50
Hg (mg/l)	* 0,0001	* 0,0001	* 0,0001	* 0,0001	0,006
NO ₃ ⁻ (mg/l)	5,39	5,42	2,03	1,97	50,00
NO ₂ ⁻ (mg/l)	0,01	0,06	0,01	0,01	3,00
Pb (mg/l)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Se (mg/l)	0,0120	0,0121	0,0129	0,0128	0,04
Coliformes fec. (NMP/100ml)	*1,10	*1,10	4,60	4,00	* 1,10

*: menor que; □ Valores que sobrepasan los límites de la norma INEN 1108

Elaboración: Flores, J.

Utilizando las expresiones matemáticas del índice CCME – WQI. Canadian Council of Ministers of Environmental – Water Quality Index y los datos expresados en la tabla 4.4., se determinaron los valores del alcance, la frecuencia y la amplitud, necesarios para el cálculo del ICA (ver cálculos detallados en el Anexo 7), obteniéndose los resultados expresados en la tabla 4.5.:

Tabla 4. 5. Resultados del F1, F2 y F3 para cálculo del ICA

FACTOR	RESULTADO INEN 1108
F1 - Alcance	21,43
F2 - Frecuencia	17,86
F3 - Amplitud	57,26

Elaboración: Flores, J.

Luego,

$$CCME WQI_{INEN 1108} = 100 - \frac{\sqrt{21,43^2 + 17,86^2 + 57,26^2}}{1,732} = 51,60$$

Según la escala de evaluación del índice CCME – WQI, el resultado obtenido se encuentra dentro del rango 45-64, lo que indica que la calidad del agua de la fuente

subterránea del campamento minero está categorizada como “contaminada”, esta agua es frecuentemente amenazada o deteriorada, sus condiciones actuales se apartan de las condiciones naturales o deseables y requiere necesariamente un tratamiento de potabilización adecuado para su ingesta.

4.5. SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO

4.4.1. CRITERIOS DE SELECCIÓN

La evaluación de la calidad del agua permitió identificar que los parámetros problema de la fuente subterránea son principalmente los metales pesados: As y Cd y las coliformes fecales en época lluviosa. Las matrices de selección que se presentan a continuación en las tablas 4.6. y 4.7. comparan y califican con base a criterios técnicos, económicos y ambientales las tecnologías de tratamiento que resultan útiles en la remoción de estos agentes contaminantes.

La presencia relativamente elevada de DQO y la baja concentración de DBO₅, sugiere que el agua posee material inorgánico oxidable, por lo que las tecnologías de oxidación de las formas solubles del As y Cd y la precipitación/coprecipitación, como procesos independientes o complementarios, son mecanismos convencionales hábiles para reducir las concentraciones de los contaminantes mencionados a niveles permisibles. De igual forma las tecnologías no convencionales o tratamientos avanzados como los procesos de sorción y membrana son considerados buenas alternativas para la remoción de metales.

Se debe tomar en cuenta que en el peor escenario la concentración de As sobrepasa 16 veces y la del Cd 3 veces los límites permisibles de la norma INEN 1108 para agua potable, por lo que el tratamiento seleccionado debe presentar eficiencias mayores al 94% y 75%, respectivamente, para alcanzar concentraciones que no representen riesgo para la salud de los consumidores.

Asimismo, durante la época lluviosa, se evidencia una concentración de coliformes fecales 4 veces mayor a la establecida por la norma INEN 1108. La presente investigación, considera la cloración como única alternativa de tratamiento para la remoción y desactivación de microorganismos patógenos del agua subterránea,

debido a que es un método sencillo, de bajo costo y alta eficiencia, mayor a 76% (eficiencia requerida). Además, gracias a su capacidad oxidante, se genera un remanente mínimo de cloro que permanece en el sistema de distribución evitando una recontaminación. Por otro lado, se conoce que el recurso hídrico posee bajo contenido de materia orgánica, lo que puede traducirse en un bajo riesgo de formación de subproductos resultado de la cloración, especialmente de THM.

Según la bibliografía revisada, las tecnologías no convencionales de bajo costo basadas en la fitoremediación y en los procesos biológicos no pueden ser considerados como opciones técnicamente viables para este caso específico, ya que no cumplen con las eficiencias requeridas para que el agua alcance los límites permisibles, y por lo tanto el agua tratada no sería confiable para poder usarla como fuente de consumo humano y doméstico, se tendría que aplicar un tratamiento posterior para que tenga este uso.

4.4.2. MATRICES DE SELECCIÓN

Tabla 4. 6. Matriz de comparación para tecnologías de sorción y membrana

FACTORES	PROCESOS DE SORCIÓN			PROCESOS DE MEMBRANA
	Intercambio iónico	Alúmina activada ¹	Hidróxido férrico granular	Ósmosis inversa
	II	AA	HFG	OI
Puede tratar []s* hasta de:	160 g/l	160 g/l	16-400 g/l	160 g/l
Eficiencia	As, Cd: 95%	As, Cd: 90%	As, Cd: 50-98%	As, Cd: >95%
Otros contaminantes que influyen	SO ₄ ⁻²	F ⁻	PO ₄ ⁻³	SDT
Pre-oxidación requerida	Si	Si	Si	Posiblemente ³
Habilidad de operador requerida	Alto	Bajo	Bajo	Medio
Calidad del agua recomendada	pH 6,5 – 9 < 5 mg/l NO ₂ ⁻ < 5 mg/l NO ₃ ⁻ < 50 mg/l SO ₄ ⁻² < 500 mg/l SDT	pH 5,5 - 6 < 250 mg/l Cl ⁻ < 2 mg/l F ⁻ < 360 mg/l SO ₄ ⁻² < 50 mg/l Silica < 0,5 mg/l Fe ⁺³ < 0,05 mg/l Mn ⁺² < 1,000 mg/l SDT < 4 mg/l COT	pH 6 - 10 < 1 mg/l PO ₄ ⁻³	Sin partículas
Residuos generados	Resina gastada,	Medios gastados,	Medios gastados,	Agua rechazada

	salmuera gastada, agua de retrolavado	agua de retrolavado	agua de retrolavado	
Otras consideraciones	Gran volumen de residuos de salmuera potencialmente peligrosos, picos de nitrato y carbonatos afectan el pH	Los pH del alimento y del producto requieren ajuste, AA modificada disponible	El HFG es muy costoso ²	Alta pérdida de agua (15-75% del agua de alimentación)
Apropiado como tratamiento para sistemas pequeños	Posiblemente	Si	Si	Solo a las entradas de los punto de uso
Costo	Alto	Medio	Medio	Alto

* []s: concentraciones

1. Se supone que la AA funciona en un modo no regenerado.

2. Generalmente, el HFG es fabricada en Europa, por lo que el costo es significativamente alto

3. La pre - oxidación para la OI no siempre es necesaria, pero siempre aumentará la eficiencia de eliminación

Fuente: (EPA, 2000; EPA, 2002; Ellis et al.,2002; Lowry y Lowry, 2002)

Elaboración: Flores, J.

Tabla 4. 7. Matriz de comparación para tecnologías de precipitación

FACTORES	PROCESOS DE PRECIPITACIÓN			
	Coagulación + Microfiltración	Oxidación de Fe y Mn por aireación + Filtración (coprecipitación)	Coagulación + Filtración mejorada	Ablandamiento de cal mejorado
	CF	OxFilt	CFmj	Amj
Puede tratar []s* hasta de:	40 g/l	40 g/l	160 g/l	80 g/l
Eficiencia	As: 90% Cd: 90%	As *Con FeCl ₃ : 80% *Sin FeCl ₃ : 50% Cd:20%	As *Con Alumbre: <90% *Con FeCl ₃ : >95% Cd: 90%	As: 90% Cd: 10-30%
Otros contaminantes que influyen	Fe ⁺³ , PSD, partículas, patógenos	Fe ⁺³ , Mn ⁺² , partículas	Fe ⁺³ , Mn ⁺² , PSD, partículas, patógenos	Ca ⁺³ , Mg ⁺² , partículas
Post - Cloración requerida	Si	Si	Si	Si
Habilidad de operador requerida	Alto	Medio	Medio	Alto

Calidad del agua recomendada	pH 5,5 – 8,5	pH 5 – 8, > 1,5 mg/l Fe^{+3} > 0,05 mg/L Mn^{+2} Fe: As → 20:1 (en masa)	pH 5,5 -8,5	pH 10,5 -11 hasta 5 mg/l Fe^{+3}
Residuos generados	Agua de retrolavado, lodo	Agua de retrolavado, lodo	Agua de retrolavado, lodo	Agua de retrolavado, lodo (gran volumen)
Otras consideraciones	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Agua tratada requiere un ajuste de pH
Apropiado como tratamiento para sistemas pequeños	Si	Si	Si	No
Costo	Medio	Alto	Medio-alto	Alto

PSD: Precusores de subproductos de desinfección

Fuente: (EPA, 2000; EPA, 2002; Ellis et al.,2002; Lowry y Lowry, 2002)

Elaboración: Flores, J.

A continuación, en las figuras 4.6., 4.7., 4.8., y 4.9, se presentan los diagramas de flujo de las propuestas mencionadas, para un mejor enfoque de evaluación.

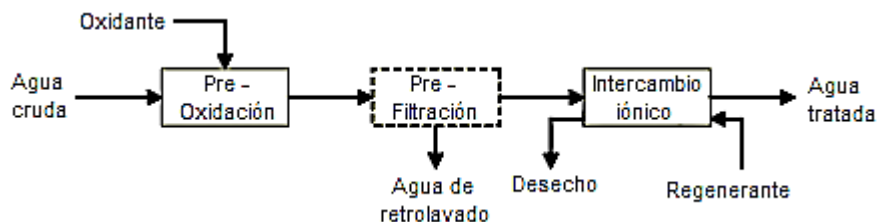


Figura 4. 6. Diagrama de flujo para el proceso de Intercambio Iónico

Fuente: (EPA, 2002)

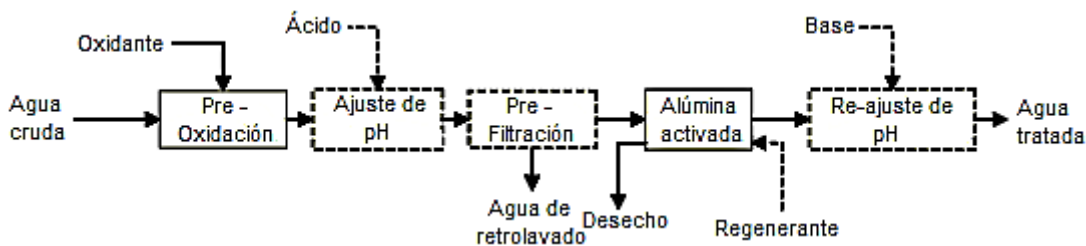


Figura 4. 7. Diagrama de flujo para el proceso de adsorción en medios de AA

Fuente: (EPA, 2002)

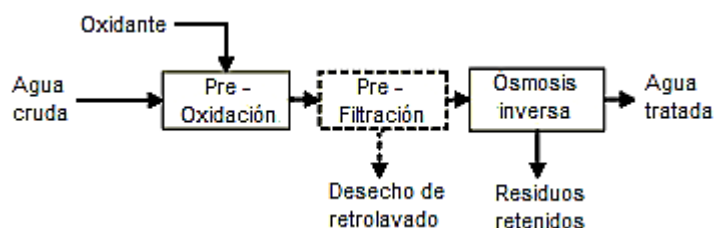


Figura 4. 8. Diagrama de flujo para el proceso de membrana de Ósmosis Inversa

Fuente: (EPA, 2002)

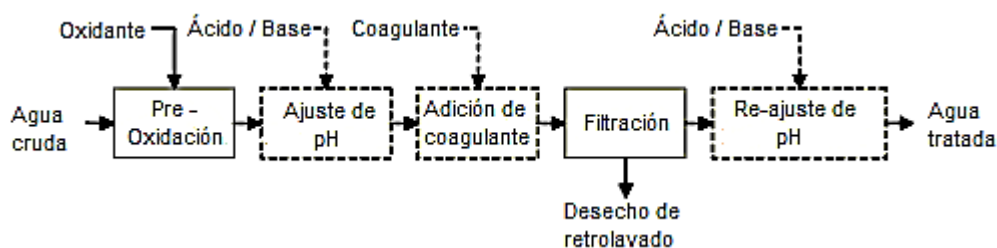


Figura 4. 9. Diagrama de flujo para los procesos de precipitación

Fuente: (EPA, 2002)

Tabla 4. 8. Matriz de evaluación y selección de la alternativa óptima

PNDRC:	FACTORES	CALIFICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS							
		SORCIÓN			MEMBRANA	PRECIPITACIÓN			
		II	AA	HFG	OI	CF	OxFilt	CFmj	Amj
CRITERIOS TÉCNICOS									
10	Concentraciones que puede tratar	10	10	10	10	10	10	10	10
10	Eficiencia	10	6	6	10	6	2	10	6
10	Otros contaminantes que influyen	6	10	6	10	10	10	10	6
10	Pre-oxidación/post-cloración requerida	6	6	6	10	6	6	6	6
10	Habilidad del operador requerida	2	10	10	6	2	6	6	2
10	Calidad del agua recomendada	6	6	6	10	10	2	10	2
10	Apropiado como tratamiento para sistemas pequeños	6	10	10	2	10	10	10	2
10	Otras consideraciones	6	6	6	6	10	10	10	6
CRITERIOS AMBIENTALES									
10	Residuos generados	2	6	6	6	6	6	6	2
CRITERIOS ECONÓMICOS									
10	Costos	2	6	6	2	6	2	6	2
100	TOTAL	56	76	72	72	76	64	84	44

PNDRC: Ponderación

Elaboración: Flores, J.

De acuerdo a la evaluación presentada en la tabla 4.8., la propuesta de tratamiento que obtuvo mayor puntuación (84/100) es la alternativa de Coagulación/Filtración mejorada, convirtiéndose en el tratamiento seleccionado y óptimo capaz de eliminar las concentraciones de As y Cd para convertir el agua de la fuente subterránea del campamento minero en agua potable segura.

4.6. PROPUESTA DE TRATAMIENTO

4.5.1. DESCRIPCIÓN DEL TRATAMIENTO

La figura 4.10. muestra el tren de tratamiento propuesto para la eliminación principalmente de As y Cd, el mismo inicia sometiendo el agua cruda a un proceso de pre - oxidación, que convierte el arsénico en arseniato oxidado, después se procede a la adición de coagulante para la precipitación del Cd y coprecipitación de As, a continuación, el agua pasa a través de filtros (filtración directa) que contienen medios granulares para finalmente ser desinfectada antes de enviarse al sistema de distribución.

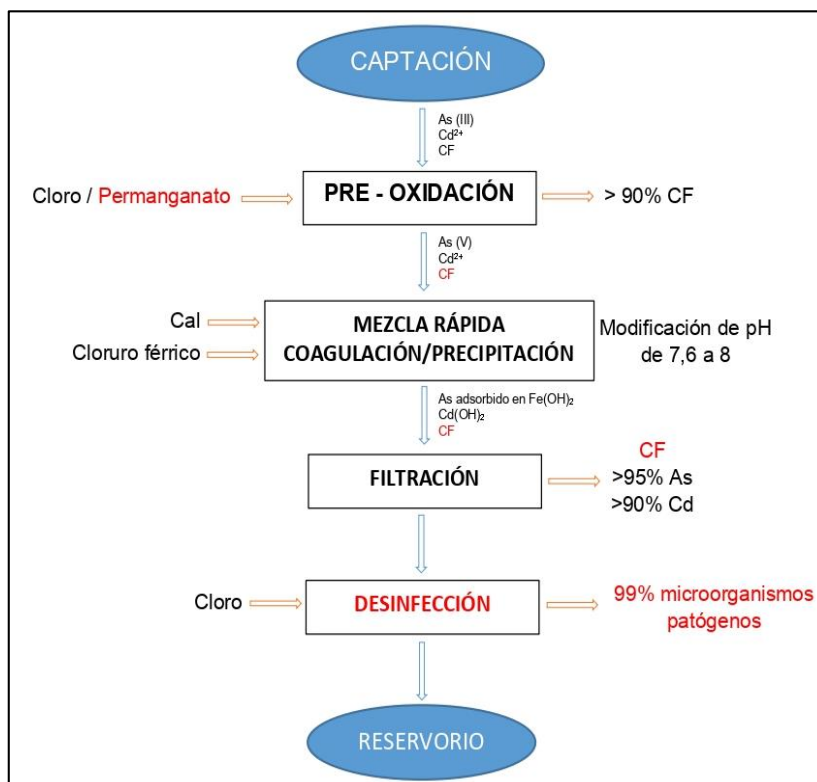


Figura 4. 10. Tren de tratamiento propuesto

Elaboración: Flores, J.

1. Pre – Oxidación

Este proceso se realizará para lograr la remoción de As. En condiciones anaeróbicas, como en el caso de las fuentes subterráneas, este elemento se encuentra principalmente como arsenito (As III). Sin embargo, la especiación química es importante para su tratabilidad, pues las cargas superficiales negativas facilitan la eliminación mediante procesos de adsorción y coprecipitación. Dado que la carga neta del As III es neutra a niveles de pH natural (6-9) no se elimina fácilmente, por lo que la conversión a arseniato (As V) es primordial, ya que esta especie al tener carga molecular negativa (-1 o -2) es eliminada con mayor eficacia. La conversión se logra agregando un agente oxidante como cloro o permanganato, su selección debe considerar costos, integración con el tratamiento existente, requisitos de desinfección y efectos secundarios (EPA, 2002). La tabla 4.9. menciona los principales beneficios e inconvenientes de cada agente oxidante.

Tabla 4. 9. Comparación de agentes oxidantes

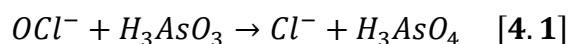
OXIDANTE	BENEFICIOS	INCONVENIENTES
Cloro	✓ Costo relativo bajo (\$ 0,2 /lb)	✓ Formación de subproductos de desinfección
	✓ Capacidad de desinfección primaria	✓ Ensuciamiento de la membrana
	✓ Desinfectante residual secundario	✓ Requisitos especiales de manipulación y almacenamiento
	✓ Regenerante de medios MnOx	
Permanganato	✓ No reactivo con membranas	✓ Alto costo relativo (\$ 1,35 /lb)
	✓ Sin formación de subproductos de desinfección	✓ Sin capacidad de desinfección primaria
	✓ Facilidad de manipulación y almacenamiento	✓ No aporta desinfectante residual secundario
	✓ Regenerante de medios MnOx	✓ Formación de partículas de Mn que se eliminan por filtración

Fuente: (EPA, 2002)

Elaboración: Flores, J.

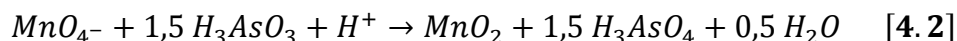
- **Cloro**

Puede ser agregado como gas o como hipoclorito líquido. La alimentación de gas en sistemas pequeños se realiza típicamente con cilindros de 150 lb, o en su defecto el hipoclorito líquido puede generarse in situ ($[] = 0,8\%$) o comprarse como hipoclorito líquido de concentración comercial (12,5%). La demanda de oxidante estequiométrica es de 0,95 $\mu\text{g/l}$ de cloro por $\mu\text{g/l}$ de arsenito (EPA, 2002).



- **Permanganato**

Se usa comúnmente en la eliminación de Fe y Mn. El $KMnO_4$ existe en forma sólida, granular y es fácilmente soluble en agua (60 g/l a T° amb). La demanda de oxidante estequiométrica es de 0,49 $\mu\text{g/l}$ de permanganato por $\mu\text{g/l}$ de arsenito (EPA, 2002).



Estudios indican que ambos oxidantes logran la conversión de más del 95% del arsenito en 1 min en el rango de pH de 6,3 a 8,3; mientras que aplicados en un exceso estequiométrico 3 veces mayor se toman 40s, inclusive en presencia de Fe, Mn, sulfuro y COT (EPA, 2002).

2. Mezcla rápida / Coagulación - precipitación

La precipitación/coprecipitación es un tratamiento muy usado para aguas contaminadas con metales pesados, generalmente implica el ajuste del pH y la adición de un precipitante o coagulante químico, que desestabiliza las cargas superficiales del materia coloidal y suspendido para permitir la aglomeración de partículas que posteriormente serán eliminadas mediante filtración (EPA, 2002).

En la precipitación se emplea coagulantes que transforman los contaminantes disueltos en un sólido insoluble mediante reacciones de óxido-reducción que alteran su estado físico y solubilidad, mientras que, en la coprecipitación, el contaminante objetivo se adsorbe en la especie precipitada (Benefield y Morgan, 2002). Esta propuesta de tratamiento combina ambos procesos para eliminar el As y Cd del agua subterránea.

- **Remoción de As**

Coagulantes como las sales de aluminio y férricas, se hidrolizan y forman partículas de aluminio e hidróxido de hierro, respectivamente. El mecanismo de remoción implica la adsorción del As (V) a un precipitado de aluminio o hidróxido férrico, mediante complejación superficial por enlaces coordinacionales, quedando el contaminante atrapado a medida que la partícula continúa aglomerándose, los productos finales son partículas más grandes, o flóculos, que se filtran o

sedimentan de manera más sencilla. Esta tecnología es capaz eliminar el 95% de As, reduciéndolo a concentraciones menores de 0,010 mg/l (EPA, 2002).

Factores que afectan el rendimiento de remoción

- ✓ **Estado de valencia del As:** La solubilidad del As depende del estado de valencia, pH, compuesto específico y la presencia de otros químicos con los que podría reaccionar. La oxidación a As (V) mejorar su eliminación.
- ✓ **pH:** la eliminación de As se maximiza al pH en que la especie precipitada es menos soluble.
- ✓ **Dosificación de coagulante:** las dosis específicas dependen de la calidad del agua de origen y el pH, sin embargo, hay una relación positiva entre una mayor dosificación de coagulante y la eficiencia de remoción. La tabla 4.10. exhibe datos referenciales de pH y dosis efectivas de coagulantes comunes para la remoción exitosa de metales.

Tabla 4. 10. Datos referenciales de pH y dosis efectiva para coagulantes

COAGULANTE /PRECIPITANTE	CARACTERÍSTICAS	PH ÓPTIMO	DOSIS EFECTIVA
A base de Fe: Sulfato férrico *Cloruro férrico	<ul style="list-style-type: none"> • Más efectivos • La mayor parte de Fe termina en la formación de hidróxidos que son más estables (pH: 5,5 a 8,5) • Eficiencia: 81 – 96 % 	*5 – 8 (7,6 ideal, incluso con menos dosis de coagulante)	*5 a 25 mg/l
A base de Al: Alumbre	<ul style="list-style-type: none"> • Una fracción del aluminio permanece como un complejo soluble, que es incapaz de adsorber As. • Eficiencia: 23 – 71% 	5-7	6 – 40 mg/l

* Datos bibliográficos correspondiente al cloruro férrico

Fuente: (EPA, 2002)

Elaboración: Flores, J.

- ✓ **Presencia de otros contaminantes:** Compuestos como el SO_4^{2-} pueden disminuir la eliminación de As cuando se utiliza cloruro férrico como coagulante, pues compite por los sitios de unión de las superficies del óxido e influyen en la adsorción de trazas de contaminantes, mientras que la presencia de Ca o Fe puede aumentar su eliminación (EPA, 2002).

- **Remoción de Cd**

Este elemento se encuentra en estado de iones y puede precipitar en forma de hidróxido metálico insoluble mediante la adición de cal que eleva su pH hasta el punto de mínima solubilidad (rango de pH óptimo: 7 a 10), el precipitado de Cd es anfotérico y como se evidencia en la figura 4.11. exhibe un punto donde se vuelve a solubilizar (pH>11,2). Se han registrado eficiencias de remoción mayores al 90% del Cd y varios metales aplicando los procesos de precipitación (Corbitt, 2003).

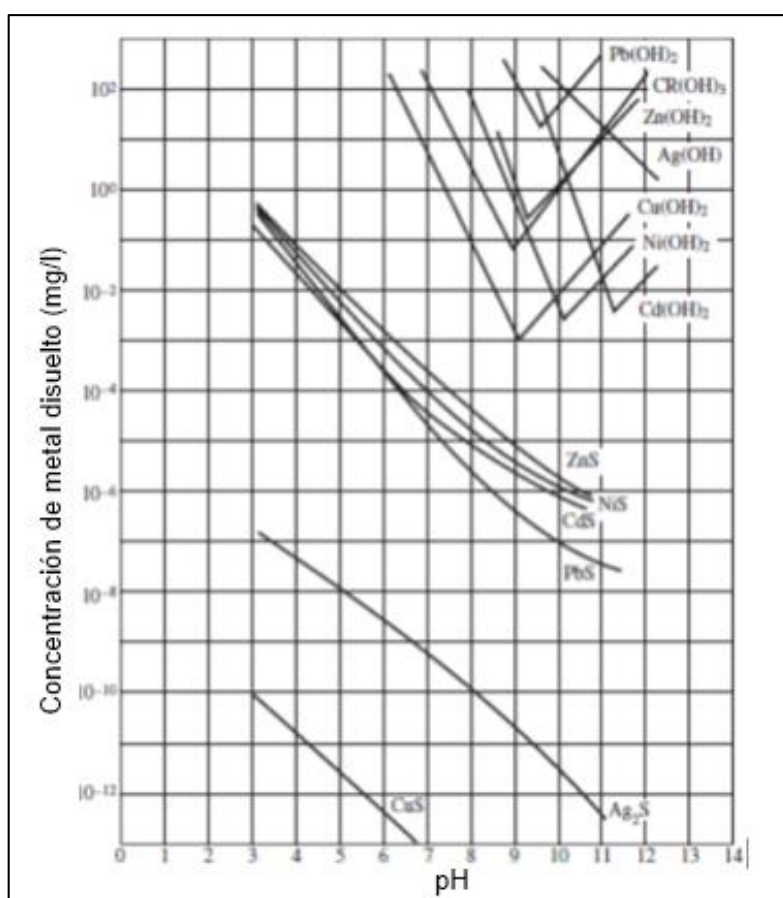
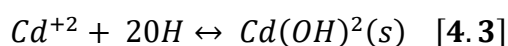


Figura 4. 11. Solubilidad de cationes metálicos

Fuente: (Corbitt, 2003)

También se logra la remoción de Cd añadiendo precipitantes como cloruro o sulfato férrico, los precipitados que se producen son altamente insolubles y estables a pH básicos (entre 8 y 11,) aunque los resultados más efectivos se evidencian a pH>10. Estudios demuestran que cuando el agua tiene tanto As como Cd, existe

interferencia entre el ambos al competir con el sitio activo en el óxido de hierro en el rango de pH de 3-7. Sin embargo, en el rango de pH de 7-10, el Cd (II) se elimina principalmente por precipitación como $\text{Cd}(\text{OH})_2$, lo que aumenta la eliminación de As por coprecipitación (Peña, 2016).

En presencia de carbonato, la precipitación se puede dar en forma de carbonato de Cd, es más efectiva que la precipitación del hidróxido ya que la solubilidad del carbonato de cadmio es mucho menor (Corbitt,2003; Peña, 2016).

- **Agitación y mezcla rápida**

Son operaciones que se emplean para dispersar de manera uniforme el coagulante en el agua, se sugiere el uso de un mezclador hidráulico con pantalla para este fin (ver figura 4.12.).

La eficiencia del proceso de precipitación/coprecipitación y la rapidez con la que las partículas coloidales se adhieren y contactan entre ellas en presencia de un coagulante se determina por la agitación de la mezcla con el mismo, la intensidad y el tiempo de mezcla. Se deben realizar pruebas de jarras o tratabilidad para identificar el pH, coagulante y la dosis adecuada a emplear en la remoción de contaminantes objetivos (EPA, 2002; Romero,2006).

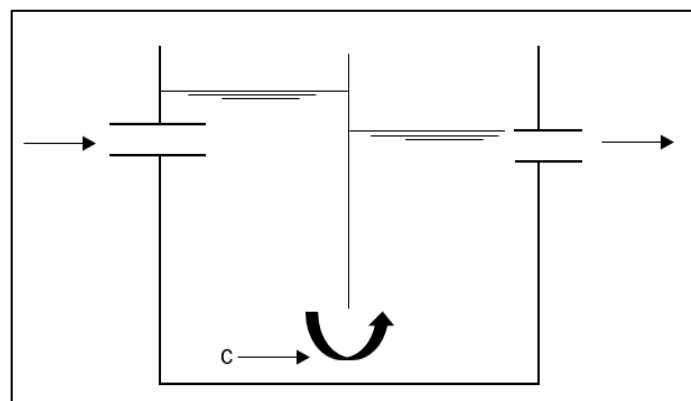


Figura 4. 12. Mezclador hidráulico con pantalla

Fuente: (Romero,2006)

3. Filtración directa

Los componentes principales de una instalación básica de coagulación/filtración incluyen sistemas de alimentación de coagulantes químicos, equipo de mezcla,

floculación, sedimentación y medios filtrantes. Sin embargo, la floculación y sedimentación pueden no ser necesarias en situaciones en las el afluente presenta bajas concentraciones de sólidos suspendidos, además de que la turbidez y el color son inferiores a 20 NTU y 40 unidades Pt-Co respectivamente, a esto se conoce como filtración directa, y en este caso las pocas partículas en suspensión son desestabilizadas por el coagulante y así se adhieren con mayor facilidad al material de filtro, disminuyendo en gran proporción los costos de construcción, operación y mantenimiento del sistema de potabilización del agua (EPA, 2002).

El sistema de filtración que se propone emplear corresponde a un filtro lento de arena de flujo descendente (lecho principal: arena, lecho de soporte: grava), debido a que es una tecnología eficiente y de bajo costo, que trata caudales bajos, como los manejados en el campamento minero, también es apropiada en zonas en donde la mano de obra calificada es escasa (Romero, 2006). El principio de remoción consiste en la formación superficial de una capa biológica en donde coexisten bacterias, protozoos y otros microorganismos, que se encargan de retener los contaminantes y purificar el agua (Blacio y Palacios, 2011). La tabla 4.11. al igual que la figura 4.3., presentan las principales características del filtro mencionado.

Tabla 4. 11. Principales características del sistema de filtración propuesto

CARACTERÍSTICAS	ESPECIFICACIONES
Tasa de filtración	2 - 5 (<12/d)
Medio	Arena
Distribución del medio	No estratificado
Duración carrera	20 - 60 días
Pérdida de carga	Inicial:0,6 m Final:1,2 m
Agua de lavado	No usa
Profundidad del medio	0,6 – 1,0 m
Profundidad de grava	0,30 m
Drenaje	Tubería perforada

Fuente: (Romero, 2016)

Elaboración: Flores, J.

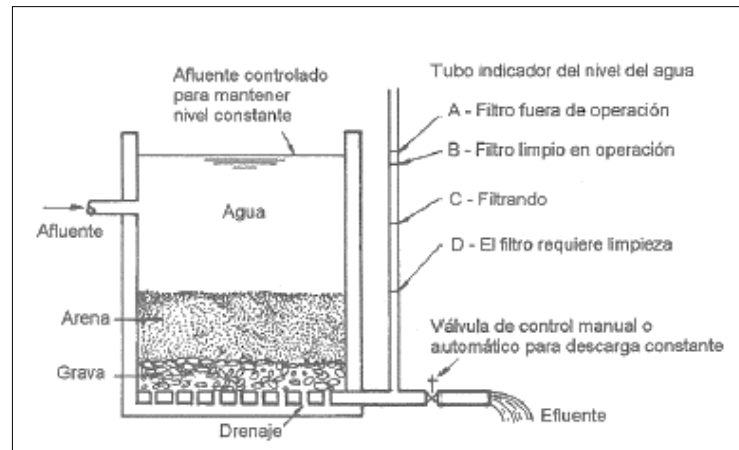


Figura 4. 13. Filtro lento de arena de flujo descendente

Fuente: (Romero,2006)

Es recomendable la instalación de un mínimo de dos filtros en el sistema de tratamiento, ya que si uno requiere limpieza el otro debe permanecer operativo para garantizar un abastecimiento continuo de agua. La limpieza implica la remoción de la capa biológica y una pequeña parte de la de arena cada 2 o 3 meses para que se genere una nueva capa de microorganismo, procedimiento que involucra un periodo de 5 a 10 días, tiempo en el que el filtro se mantendrá inoperativo (Blacio y Palacios, 2011).

4. Desinfección

Si inicialmente, durante el proceso de pre - oxidación se elige como agente oxidante el cloro, se produciría una desinfección primaria y un remante de cloro que estaría presente durante todo el proceso de potabilización evitando la necesidad de una desinfección final en el tren de tratamiento (EPA, 2002). De no ser así el tratamiento descrito hasta el momento debe ser finalizado con un proceso de desinfección mediante cloración, según la dosis recomendada por la CEPIS para agua filtrada que corresponde a 0,4 mg/l, misma que deberá ser adaptada a las condiciones reales de caudal que se manejan en el campamento, este producto químico debe ser suministrado de forma manual y diaria en el tanque reservorio favoreciendo la mezcla del agente desinfectante y el agua que fluye (CEPIS, 2002).

4.5.2. BASES DE DISEÑO

- **Período y población de diseño**

Según la norma CPE INEN 5 (1997), las obras de agua potable son diseñadas para un periodo de 20 años. Sin embargo, para este caso se puede adoptar un periodo distinto, teniendo en cuenta la vida útil de mina que se estima podrían ser 10 años más.

Generalmente, la población de diseño o futura (*Pf*) se determina con base a la población presente y empleando al menos tres métodos de proyección de crecimiento que usan datos estadísticos disponibles (geométrico, exponencial y comparativo). En este caso no se pueden emplear dichos métodos debido a que la variación del personal en la mina depende de varios factores, existe igual posibilidad de que aumente el personal o que disminuya, todo acorde a las necesidades laborales de la empresa y la demanda de su producto. Actualmente, el campamento cuenta con 230 colaboradores y solo para fines prácticos se hablará de un incremento de hasta 25 trabajadores en los próximos 10 años, teniendo una población de diseño de 255 personas.

$$Pf = 255 \text{ hab}$$

- **Selección del nivel de servicio**

El tamaño de la localidad del campamento minero se encuentra estrechamente relacionado con la magnitud de importancia de los sistemas de saneamiento y el nivel de servicio adecuado requerido. De acuerdo a la población de diseño y a los criterios establecidos en la tabla 5.2. de la normativa aplicable para las bases de diseño se determinó el nivel de servicio correspondiente a **1b**: grifos públicos más unidades de agua para lavado de ropa y baño; y letrinas con o sin arrastre de agua.

- **Variaciones de consumo**

Los cálculos que se presentan en la tabla 4.12., se realizaron con base a los criterios establecidos en la Norma INEN 5, (1997):

Tabla 4. 12. Cálculo de parámetros de diseño para el tratamiento propuesto

PARÁMETRO	CÁLCULO / CANTIDAD
Dotación (D)	De acuerdo el Anexo A.2. de la Norma INEN 5, para clima cálido y nivel de servicio lb, se consideró: $D = 100 \text{ l/hab} * \text{día}$
Caudal medio (QM)	$QM = \frac{f * Pf * D}{86400}$ [4.4] $QM = \frac{0,2 * 245 * 100}{86400} = 0,057 \text{ l/s}$ f : factor de fugas según nivel de servicio (20%)
Caudal máximo diario (QMD)	$QMD = KMD * QM$ [4.5] $QMD = 1,25 * 0,057 = 0,071 \text{ l/s}$ KMD : Factor de mayoración máximo diario (1,25)
Caudal máximo horario (QMH)	$QMH = KMH * QM$ [4.6] $QMH = 3 * 0,057 = 0,171 \text{ l/s}$ KMH : Factor de mayoración máximo horario (3)
Caudal mínimo de captación (Qc)	$Qc. \text{Mín.} = 1,2 * QMD$ [4.7] $Qc. \text{Mín.} = 1,2 * 0,071 = 0,085 \text{ l/s}$
Caudal mínimo de tratamiento (Qt)	$Qt. \text{Mín.} = 1,1 * QMD$ [4.8] $Qt. \text{Mín.} = 1,1 * 0,071 = 0,078 \text{ l/s}$
Caudal real de tratamiento ($Qt. \text{real}$)	$Qt. \text{real} = 1,25 * Qt. \text{Mín.}$ [4.9] $Qt. \text{real} = 1,25 * 0,078 = 0,098 \text{ l/s}$

Fuente: (INEN, 1997)

Elaboración: Flores, J.

El sistema operará con un caudal de 0,098 l/s (110% del QMD más 25% de su capacidad por seguridad), y se realizará bajo el régimen de flujo a gravedad y a presión (INEN, 1997).

- **Tanque de almacenamiento primario**

La Norma INEN especifica que la capacidad de almacenamiento del tanque receptor primario debe ser el 50% del volumen medio diario futuro. En ningún caso, este volumen será inferior a 10 m^3 .

$$V_{alm.prim.} = Qt.REAL * tr \quad [4.10]$$

$$V_{alm.prim.} = \frac{1}{2} * \frac{0,098 \text{ l}}{\text{s}} * 1 \text{ día} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} * \frac{86400 \text{ s}}{1 \text{ día}} = 4,23 \text{ m}^3 \approx 10 \text{ m}^3$$

4.5.3. COSTOS

El presente análisis de factibilidad económica para la implementación de la propuesta de tratamiento se realiza con base a la información del Manual la EPA: Tecnologías y costos para la eliminación de As del agua potable, considerando las dos unidades principales del tratamiento: pre - oxidación y coagulación/filtración.

A. Pre - oxidación

El permanganato de potasio se puede utilizar como tecnología de pre - oxidación para la conversión de As (III) en As (V), sin embargo, es más caro que la cloración; \$2700/ton en comparación con \$350 a \$400/ton. De acuerdo a lo expuesto, se recomienda y analiza económicamente el uso de cloro como agente oxidante.

Los costos que se presentan en las gráficas de las figuras 4.14. y 4.15. hacen las siguientes suposiciones:

- Instalación de un nuevo sistema de cloración
- Dosis de 1,5 mg/l de cloro libre al flujo tratado
- Sistemas muy pequeños (menores a 0,1 mgd) usan hipoclorito de sodio al 15% y están diseñados para manejar dosis tan altas como 10 mg/l.
- Sistemas más grandes utilizan cloración de gas.

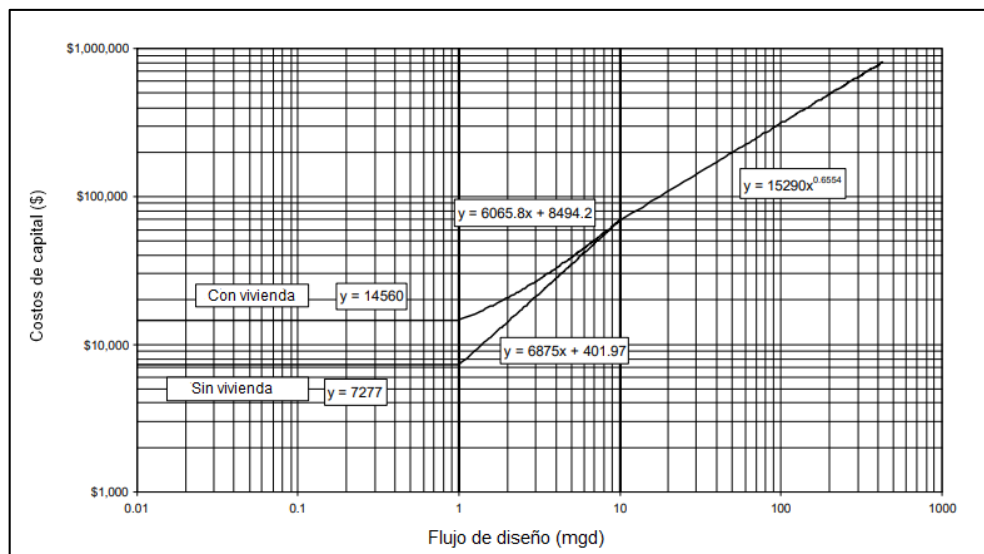


Figura 4. 14. Costos de capital para la cloración

Fuente: (EPA, 2000)

Los costos de vivienda solo se toman en cuenta cuando la cloración se administra desde un punto central. De lo contrario, se asume que el proceso de cloración se ubica en el mismo lugar que el resto del tratamiento.

Debido a que el caudal de diseño que maneja la presente propuesta corresponde a 0,098 l/s ($2,24 \times 10^{-3}$ mgd), se puede evidenciar en la gráfica de costos (figura 4.14.) para el tramo de flujos de diseño menores a 0,01 mgd que los costos de operación para la unidad de cloración sin vivienda es de aproximadamente \$7277.

Por otro lado:

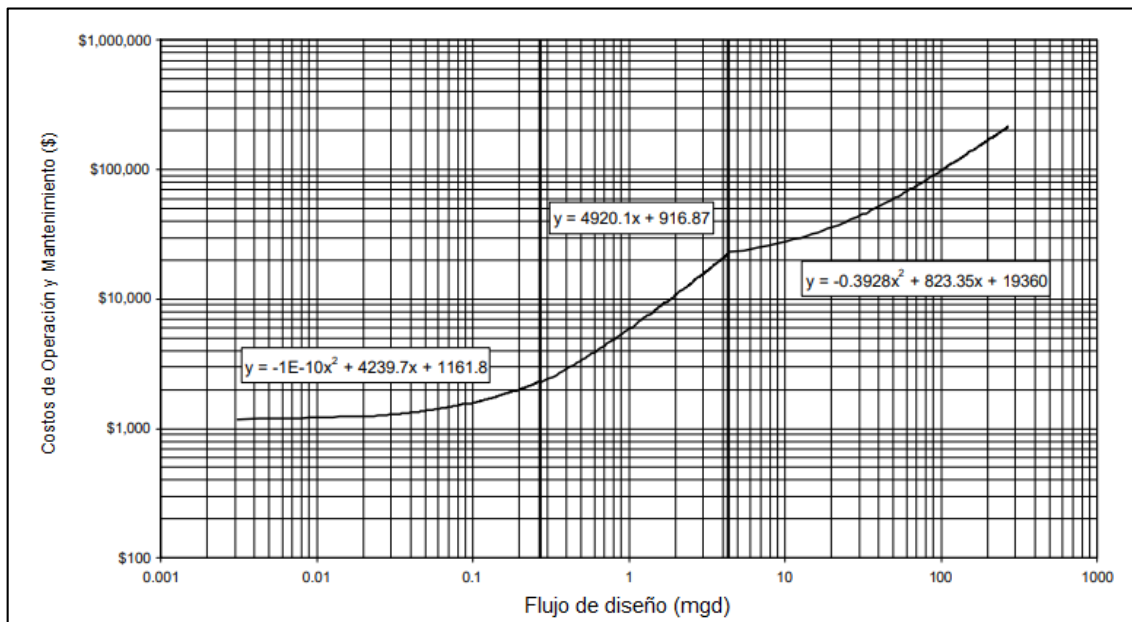


Figura 4. 15.Costos de OyM para la cloración

Fuente: (EPA, 2000)

Considerando que el caudal de diseño de la propuesta de tratamiento es 0,098 l/s ($2,24 \times 10^{-3}$ mgd), se emplea ecuación de la gráfica para flujo de diseño menor a 0,1 mgd, con el fin de obtener una mejor estimación de los costos de OyM:

$$y = -1e - 10x^2 + 4239,7x + 1161,8 \quad [4.11]$$

$$y = -1e - 10 \left(2,24 \times 10^{-3} \right)^2 + 4239,7(2,24 \times 10^{-3}) + 1161,8$$

$$y = 1168,58 \approx \$1170$$

B. Coagulación / filtración

Las gráficas de las figuras 4.16 y 4.17, utilizaron los siguientes criterios para desarrollar estimaciones de costos de capital, OyM en sistemas pequeños (menos de 1 mgd):

- Instalación de un nuevo sistema de mezcla rápida
- Dosis de cloruro férrico, 25 mg/l
- Sistema de alimentación adicional para aumentar la dosis de cloruro férrico;
- Dosis adicional de cal, 10 mg/l para ajuste de pH
- Sistema de alimentación adicional para aumentar la dosis de cal
- Nuevo sistema de filtración (el más simple y económico del mercado): filtro lento de arena de flujo descendente

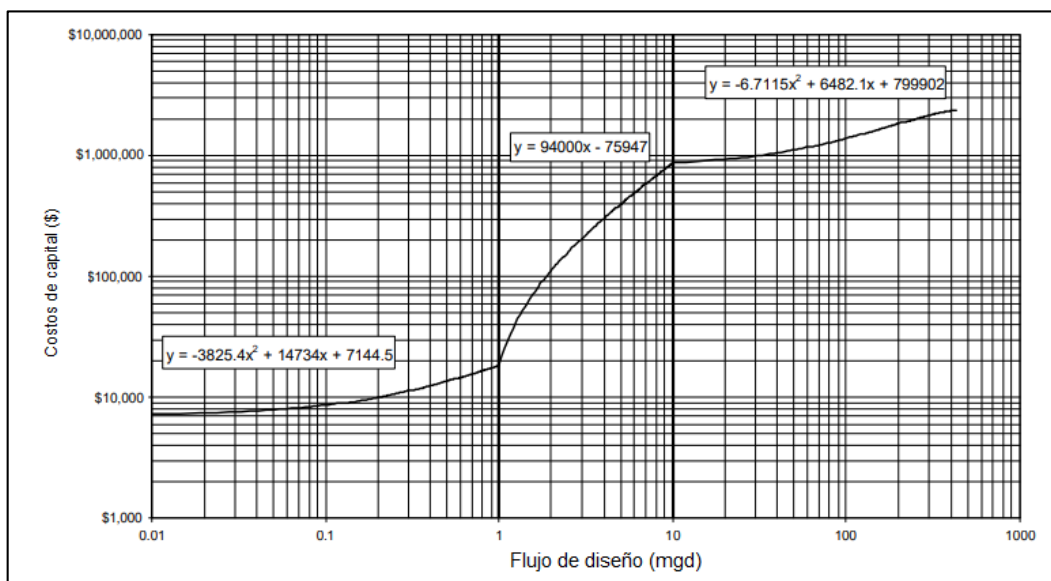


Figura 4. 16. Costos de capital para el proceso de coagulación/filtración

Fuente: (EPA, 2000)

Para el caudal de diseño ($2,24 \times 10^{-3}$ mgd):

$$y = -3825,4x^2 + 14734x + 7144,5 \quad [4.12]$$

$$y = -3825,4 \left(2,24 \times 10^{-3}\right)^2 + 14734(2,24 \times 10^{-3}) + 7144,5$$

$$y = \$7177,48 \approx \$7200$$

Por otro lado:

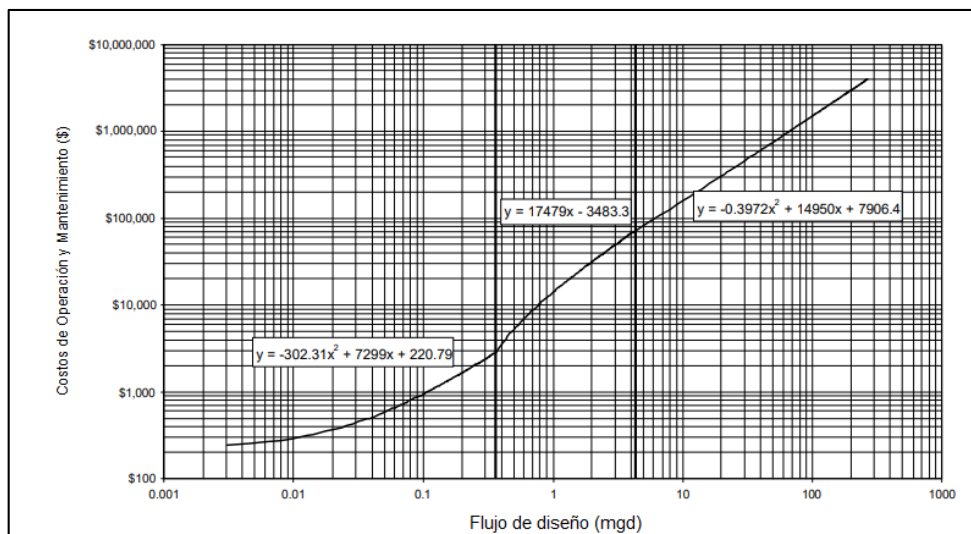


Figura 4. 17. Costos de OyM para el proceso de coagulación/filtración

Fuente: (EPA, 2000)

Para el caudal de diseño ($2,24 \times 10^{-3}$ mgd):

$$y = -302,31x^2 + 7299x + 220,79 \quad [4.13]$$

$$y = -302,31 \left(2,24 \times 10^{-3}\right)^2 + 7299(2,24 \times 10^{-3}) + 220,79$$

$$y = \$237,13 \approx \$240$$

Finalmente, la tabla 4.13. presenta una estimación económica general del sistema de tratamiento propuesto:

Tabla 4. 13. Presupuesto estimado para la implementación de la propuesta

OPERACIONES UNITARIAS	COSTOS (Capital, OyM)
Pre - oxidación con cloración	\$ 8447
Coagulación/filtración	\$7440
TOTAL	\$15887

Elaboración: Flores, J.

Este análisis no comprende la operación unitaria de desinfección, debido a que se considera como agente oxidante elegido al cloro, que cumple la función de desinfección primaria durante el proceso pre oxidativo y también actúa como desinfectante residual secundario evitando la recontaminación del agua durante todo el proceso de potabilización.

4.5.4. IDENTIFICACIÓN Y VALORACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES

La evaluación cualitativa de los impactos ambientales generados por la propuesta de tratamiento se desarrolló mediante una matriz de Leopold modificada, en donde se identificaron y valoraron los posibles impactos al medio que pueden generar las actividades del proyecto en sus diferentes etapas (construcción, operación y cierre), para ello se definieron diferentes criterios y sus respectivas calificaciones, como se muestra en la tabla 4.14.

Tabla 4. 14. Criterios y calificaciones para matriz de Leopold

CRITERIO	CALIFICACIÓN
Carácter del Impacto	positivo (+): Impacto beneficioso negativo (-): Impacto adverso
Duración	8 - 10: Permanente 4 - 7: Temporal 1 - 3: Eventual
Reversibilidad	8 - 10: Largo (> 5 años) 4 - 9: Mediano (> 1 año y < 5 años) 1 - 3: Corto (< 1 año)
Extensión	8 - 10: Extensivo 4 - 7: Localizado 1 - 3: Puntual
$Imp = We \times E + Wd \times D + Wr \times R$	
Importancia	Donde: Imp = Valor calculado de la Importancia del impacto ambiental E = Valor del criterio de Extensión We = Peso del criterio de Extensión D = Valor del criterio de Duración Wd = Peso del criterio de Duración R = Valor del criterio de Reversibilidad Wr = Peso del criterio de Reversibilidad $We + Wd + Wr = 1$ $We = 0,30$ $Wd = 0,40$ $Wr = 0,30$
Magnitud	8 - 10: Alta (dañino) 4 - 7: Media (perjudicial no muy grave) 1 - 3: Baja (insignificante)
$Valor\ del\ Impacto\ (VI) = \pm (Imp \times Mag) \ 0,5$	
Valor del impacto	Categorías: Altamente Significativos: (-), $VI \geq 8$ Significativos: (-), $VI \geq 4$ y $VI < 8$ Despreciables: (-), $VI < 4$ Benéficos: Aquellos de carácter positivo (+)

Fuente: (Leopold, 1999)

Elaboración: Flores, J.

Una vez evaluados los distintos criterios se obtuvo la matriz de valor del impacto, expresada en la tabla 4.15. que permite categorizar un impacto ambiental e identificar los principales factores afectados, así como las actividades más nocivas del proyecto.

Tabla 4. 15. Matriz de Identificación y evaluación de impactos ambientales

COMPONENTE	SUBCOMPONENTE	FACTOR AMBIENTAL	FASE DE CONSTRUCCIÓN							FASE DE OPERACIÓN						FASE DE ABANDONO			Suma Total Impactos por factor
			C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	O1	O2	O3	O4	O5	O6	A1	A2	A3	
			Desbroce	Movimiento de tierras	Excavaciones	Disposición de sobrantes de excavación	Transporte de materiales de construcción	Relleno y compactación	Construcción de infraestructura y facilidades	Pre - oxidación	Ajustes de pH	Mezcla rápida / Coagulación - precipitación	Filtración directa	Desinfección	Limpieza de filtro de arena lento (lodos biológicos)	Clausura y abandono de la planta potabilizadora	Rehabilitación de áreas afectadas	Revegetación del área	
ABIÓTICO	Aire	Calidad del Aire		-3	-3	-3	-2	-3	-3							2	3	3	-8
		Nivel Sonoro							-3	-3						2	2	3	1
	Suelo	Calidad del Suelo	-3	-3	-3	-3	-2	-3	-3						-2	3	3	3	-15
		Geomorfología, topografía y estabilidad del terreno	-3	-3	-3	-3	-2	-3	-3							3	3	3	-12
		Suceptibilidad a la erosión	-2	-3	-3	-3	-2	-2	-2							2	3	3	-10
	Agua	Calidad del agua superficial																	
Calidad de Agua Subterránea			-3	-3	-3		-3	-3	3		3	3	3	-2	2	3	3	3	3
BIÓTICO	Flora	Pérdida de flora	-2	-2	-2	-2		-2	-2							3	3	3	-8
	Fauna	Pérdida de Hábitats y Especies	-2	-2	-2	-2		-2	-2							3	3	3	-8
ANTRÓPICO	Social	Calidad de vida y bienestar		-2	-2	-2		-2	-2	3	3	3	3	3	-2	2	3	3	11
		Salud y seguridad	-2	-2	-2	-2		-2	-2	3	3	3	3	3	-2	2	3	3	9
	Económicos	Empleo	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	-4				36
ESTÉTICO	Perceptivos	Vistas y paisaje	-5	-5	-5	-5	-2	-3	-6	-3		-3	-3	-3	2	3	3	3	-40
Suma Total Impactos por Actividad			-17	-26	-26	-25	-9	-25	-29	9	10	9	9	9	-8	17	29	32	
IMPACTOS			Cantidad																%
Altamente Significativos 8-10			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Significativos 4-7			1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	4,5
Despreciables 1-3			6	9	9	9	5	11	10	1	0	1	1	1	5	0	0	0	51,5
Beneficos (positivos)			1	1	1	1	1	1	1	4	3	4	4	4	1	9	11	11	43,9
																		132	Total

Elaboración: Flores, J.

Se han identificado un total de 132 interacciones, de las cuales el 4,5% son significativas, el 51,5% despreciables y el 43,9% beneficiosas, evidenciándose claramente que la mayor parte de impactos del proyecto son favorables con el componente antrópico e inofensivos con el medio ambiente.

La matriz refleja que los factores ambientales más perjudicados por el proyecto son el suelo y el componente perceptivo ya que muestran los valores sumatorios más altos, mientras que las actividades más agresivas con el medio ambiente recaen en el desbroce de vegetación, movimiento de tierras, excavaciones y el levantamiento de infraestructura durante la etapa constructiva. Por otro lado, el factor beneficiado en mayor proporción durante la ejecución de la planta potabilizadora es el social y el económico a través de la mejora de la calidad de vida y bienestar de los trabajadores del campamento al acceder a un agua de mejor calidad cuidando su salud y seguridad, y la generación de empleo durante las tres etapas. También es evidente que la actividad que mayor beneficio propicia al ambiente es la revegetación del área una vez que el proyecto cumpla su objetivo y alcance su vida útil.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- Con base al análisis de la captación y distribución del agua subterránea en el campamento minero se determinó al tanque de regulación como el punto significativo para la ejecución de 4 campañas de muestreo que permitieron evaluar de forma precisa la calidad de la fuente hídrica.
- La época lluviosa presenta valores de caudal más altos en contraste a la época seca, esto se debe a que la escorrentía de agua lluvia reabastece a la fuente subterránea, por lo tanto, el volumen de captación en la vertiente es mayor, al igual que el volumen de agua conducida al tanque de regulación, donde fueron medidos los caudales.
- La caracterización de la fuente subterránea se realizó con base a 29 parámetros claves: 6 físicos, 22 químicos y 1 biológico, estos fueron seleccionados de acuerdo a fuentes bibliográficas, normativa, costos de análisis y disponibilidad de reactivos e instrumentos de laboratorio.
- Se realizaron 2 campañas de muestreo para cada época (seca y lluviosa). De acuerdo a los resultados obtenidos, se evidenciaron variaciones relacionadas entre sí y otras independientes, y se determinó que la precipitación es un factor que desempeña un rol importante en una zona formada por rocas de elevada permeabilidad, lo que provoca el arrastre y aumento de contaminación del acuífero durante la época lluviosa.
- La comparación de los resultados de la evaluación de la calidad del agua con los valores de los límites máximos permisibles establecidos por el Acuerdo Ministerial 097 y de la norma NTE INEN 1108, permitieron identificar 3 parámetros químicos y 1 biológico que exceden dichos umbrales, estos fueron: arsénico, cadmio, DQO y coliformes fecales, respectivamente.
- La evaluación del índice CCME – WQI ubicó al agua de la fuente subterránea dentro del rango 45 - 64. De acuerdo a la escala que maneja dicho índice, el agua es de calidad es categorizada como “contaminada”.

- Con base a las matrices de comparación y calificación de las distintas alternativas basadas en procesos de sorción, membrana y precipitación, se determinó que la mejor alternativa de tratamiento recae en la tecnología de coagulación/filtración mejorada, que registra eficiencias de remoción superiores al 95% y accesibilidad de implementación en espacios pequeños a bajos costos.
- La especiación química del As es importante para su tratabilidad, debido a que las cargas superficiales negativas facilitan su eliminación mediante procesos de adsorción y coprecipitación, por ello la conversión de As (III) a As (V) es un paso prioritario, esto se logra agregando un agente oxidante como cloro o permanganato.
- La elección del cloro como elemento oxidante resulta económicamente beneficioso, pues este agente químico cumple la función de desinfección primaria durante el proceso pre oxidativo y también actúa como desinfectante residual secundario a lo largo de todo el proceso de potabilización, evitando la recontaminación del agua.
- El tratamiento propuesto contempla el proceso de filtración directa, evitando las operaciones unitarias de floculación y sedimentación debido a que no son necesarias, ya que el afluente presenta bajas concentraciones de sólidos suspendidos, turbidez y color (20 NTU y 40 Pt-Co, respectivamente), lo que disminuye en gran medida los costos de construcción, OyM.
- Con base a la evaluación de impactos ambientales del proyecto, se identificaron un total de 132 interacciones, de las cuales el 4,5% son significativas, el 51,5% despreciables y el 43,9% beneficiosas, evidenciándose claramente que la mayor parte de impactos del proyecto son favorables con el componente antrópico e inofensivos con el medio ambiente.

5.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar un muestreo exhaustivo que abarque más fechas representativas durante las épocas: seca y lluviosa con el fin de corroborar

los resultados obtenidos y realizar un análisis estadístico de correlación más completo.

- El presente trabajo intentó generar una pequeña línea base hidrogeológica del acuífero del cual proviene el agua subterránea con base a datos bibliográficos disponibles de la zona. Sin embargo, un estudio avanzado que abarque aspectos como la conductividad hídrica y dinámica de recarga del acuífero podrían aportar datos importantes que permitan identificar posibles puntos de contaminación de campamentos mineros vecinos que alteren la calidad natural de la fuente subterránea, de esta forma pueden tomarse medidas como la selección de un mejor punto de captación que eluda descargas contaminantes, o en su defecto la adquisición de una nueva fuente con menor contenido de As y Cd.
- La contaminación natural de As en aguas subterráneas es un problema común relacionado a la litología del terreno. Sin embargo, este elemento además de otros como el Cd también pueden ser introducidos por procesos mineros como la extracción y fundición de los metales preciosos, ya que el As y otros metales propios del terreno están presentes a lo largo de toda la cadena productiva (gases y polvos), razón por la que se recomienda tomar medidas en planes de manejo enfocadas a la prevención de la contaminación de las fuentes subterráneas de la zona, ya que constituyen el principal recurso de abastecimiento para aguas de consumo.
- Controlar y vigilar las descargas de aguas residuales del campamento minero con el fin de evitar el ingreso de organismos patógenos a los recursos subterráneos.
- Realizar monitoreos y controles constantes del sistema de captación del agua subterránea, con el fin evitar una contaminación externa en tanques y tuberías secundarias que puedan alterar la calidad natural del agua captada.
- El presente trabajo no contempla el tratamiento de los lodos biológicos descartados durante la limpieza de los filtros lentos de arena, se sugiere la caracterización de dicho residuo para manejarlo como peligroso, especial o común y proceder a su disposición final.
- Se debe complementar la propuesta con el diseño detallado de cada operación unitaria, con el asesoramiento de especialistas en obras civiles.

- La implementación de la propuesta debe ir acompañada de campañas de capacitación continuas a los operadores con el fin de garantizar un funcionamiento óptimo de la planta de potabilización.
- Es recomendable la instalación de un mínimo de dos filtros en el sistema de tratamiento, ya que si uno requiere limpieza el otro debe permanecer operativo para garantizar un abastecimiento continuo de agua.
- Se deben realizar ensayos de laboratorio y pruebas de jarras o tratabilidad para identificar el pH, coagulante y las dosis adecuadas de productos químicos, así como los parámetros necesarios de operación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aly, A., Al-Omran, A., y Alharby, M. (2015). *The water quality index and hydrochemical characterization of groundwater resources in Hafar Albatin, Saudi Arabia*. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(6), 4177-4190.
- Arbito, J. (2014). *Caracterización del agua subterránea para uso en actividades productivas y humanas en el cantón Pasaje 2014 (Tesis de pregrado)*. Universidad Técnica de Machala, Machala, Ecuador.
- Auge, M. (2006). *Agua subterránea, deterioro de calidad y reserva*. Recuperado de <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/miguel/Deterioro.pdf>
- Ávila, J. y Cabrera, A. (2003). *Fuentes principales de nitrógeno de nitratos en aguas subterráneas*. *Ingeniería - Revista académica*. 7(2). 47-54.
- Baird, R., y Bridgewater, L. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater 23 rd. edition*. Washington, D.C.: American Public Health Association.
- Benefield, L. y Morgan, J. (2002). *Precipitación Química*, en Letterman, R., "Calidad y Tratamiento del Agua, Mc-Graw Hill, Madrid, España, pp 645-652.
- Blacio, D., y Palacios, J. (2011). *Filtros Biológicos para la potabilización del agua, posibilidades de uso de FLA (Filtros Lentos de Arena) con agua superficial de nuestra región. (Tesis de pregrado)*. Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- Burbano, L., y Sánchez, L. (2007). *Remoción de hierro y manganeso por oxidación-filtración para agua potable. Avances en investigación y desarrollo en agua y saneamiento para el cumplimiento de las metas del milenio*, 28(8).
- Burbano, N., Becerra, S., y Pasquel, E. (2014). *Introducción a la Hidrogeología del Ecuador*. Quito, Ecuador.
- Cabanelas, D., y Aznar, D. (2008). *Muestreo y Monitorización [Material del aula]. Toma de muestras*, Universidad Carlos III de Madrid, España, Madrid. Recuperado de <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-quimica/ingenieria-ambiental/material-clase/MC-F-212.pdf>.
- Calderón, A. (2016, 17 de julio). *Laboratorio de Química Ambiental Ideam [Web log post]*. Recuperado de http://www.drcalderonlabs.com/Metodos /Analisis _DeAguas/Toma _De_M uestras.htm

- Candela, L. (Julio, 2016). *Monitoreo y muestreo aguas subterráneas*. En L. Raskovsky (Presidencia). *Mejora del conocimiento de aguas subterráneas para contribuir a su protección, gestión integrada y gobernanza*. Simposio llevado a cabo en el Proyecto ARCAL RLA/7/018, Quito, Ecuador.
- Caraballo, M. P., & Xavier, J. M. (2012). *Manual de agua Subterránea*. Montevideo: Denad Internacional SA.
- CCME - Canadian Council of Ministers of the Environment. (2001). *CCME Water Quality Index 1.0 User's Manual*. Canada. Recuperado de <http://www.ccme.ca/sourcetotap/wqi.html>.
- CEPIS. (2002). *Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua Manual de capacitación para operadores*. Lima, Perú.
- Corbitt, R. (2003). *Manual de Referencia de la Ingeniería Ambiental*, 2da edición, McGRAW-HILL, Madrid, España, pp 6.183, 6.213-6.224, 9.33-9.42.
- DIGESA – Dirección General de Salud Ambiental. (2010). *Gesta agua*. Recuperado de [http://www.digesa.minsa.gob.pe/DEPA/informes_tecnicos/GRUPO %20 DE %20USO%201.pdf](http://www.digesa.minsa.gob.pe/DEPA/informes_tecnicos/GRUPO%20DE%20USO%201.pdf)
- Ellis, D., Frey, H., Markey, R., Redwine, J., Navratil, J., Robbins, R., ... y Wickramanayake, G. (2002). *Arsenic treatment technologies for soil, waste, and water*. Washington DC: EPA.
- EPA – Environmental Protection Agency (2002). *Drinking Water from Household Wells*. Recuperado de https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-10/documents/2003_06_03_private_wells_pdfs_household_wells.pdf
- EPA - Environmental Protection Agency. (2000). *Technologies and Costs for Removal of Arsenic from Drinking Water*. United States: International consultants.
- EPA - Environmental Protection Agency. (2002). *Arsenic Treatment Technology Design Manual for Small Systems*. United States: The Cadmus Group.
- EPA – Environmental Protection Agency. (2001). *Parameters of water quality. Interpretation and standards*. Ireland: EPA
- EPA – Environmental Protection Agency. (2002). *Manual Guidelines for Water Reuse*. Ireland: EPA
- Fonfría, R., Sans, R., y Ribas, J. (1989). *Ingeniería ambiental: contaminación y tratamientos*. Barcelona, España: Marcombo.

- Gallo, L., Rosas, D., Zamar, S., y Bazán M. (2009). *Protocolo de muestreo, transporte y conservación de muestras de agua con fines múltiples (consumo humano, abrevado animal y riego)*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Argentina.
- García, M., y Gonzáles, M. (2019). *Propuesta de selección de equipo para la mejora del tratamiento de agua potable en el CP Pueblo Nuevo del Distrito de Mochumí, Lambayeque*. *Revista Científica UNPRG*, 9(1).
- Guevara, A. (1996). *Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales*. Lima, Perú.
- Hernández, R., González, P., González, A., y Romero, E. (2000). *Procesos de salinización en el acuífero costero de cuenca guane*. *Minería y Geología*, 17(1), 75-79.
- IGME - Instituto Geológico y Minero de España. (1985). *Informe de la calidad y contaminación de las aguas subterráneas en España*. Recuperado de http://aguas.igme.es/igme/publica/libro43/pdf/lib43/3_1.pdf
- INEN - Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2013). *Norma Técnica Ecuatoriana. NTE 2169:2013. Agua, calidad del agua, muestreo, manejo y conservación de muestras*. Quito, Ecuador.
- INEN - Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2013). *Norma Técnica Ecuatoriana. NTE 2176:2013. Agua, calidad del agua, muestreo, técnicas de muestreo*. Quito, Ecuador.
- INEN - Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2014). *Norma Técnica Ecuatoriana. NTE 1108:2014 Agua Potable. Requisitos*. Quito, Ecuador.
- INEN - Instituto Ecuatoriano de Normalización. (1997). *Código de práctica para el diseño de sistemas de abastecimiento de agua potable, disposición de excretas y residuos líquidos en el área rural*. Recuperado de: https://inmobiliariadja.files.wordpress.com/2016/09/normas_disec3b1o_cpe_inen_5_parte_9-2_1997-menos-de-1000-hab.pdf
- Ji, Y. (2015). *Membrane technologies for water treatment and reuse in the gas and petrochemical industries*. In *Advances in Membrane Technologies for Water Treatment*. Woodhead Publishing, 519 – 536.
- Leal, M. (2000). *Tecnologías convencionales de tratamiento de agua y sus limitaciones*. En: *Solar Safe Water*. Morelos, México.

- Londoño, L., Londoño, P., y Muñoz, F. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología en el sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145-153.
- López, J., y Gómez, J. (2007). La intrusión marina y su incidencia en los acuíferos españoles. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 15(3), 266-273.
- Lowry, J., y Lowry, S. (2002). *Oxidation of as (III) by aeration and storage*. United States: EPA.
- Lozada, P., Vélez, C., Escobar, J., Vidal, A., y Patiño, P. (2010). Aplicación de índices de calidad de agua-ICA orientados al uso de la fuente para consumo humano. *Ingeniería e Investigación*, 30(3), 86-95.
- Mandeep, S., Samanpreet, K., y Sooch, S. (2003). Groundwater Pollution - An Overview. *Journal of the IPHE*, 2(1). 29-31.
- McDougal, H. (2008). *Earth Science*. Boston: Houghton Mifflin. Recuperado de <https://rhs.rocklinusd.org/subsites/Geology/documents/CHAPTER%2016%20GROUNDWATER.pdf>
- Megremi, I., Vasilatos, Ch., Atsarou, A., Theodoratou, Ch., Economou-Eliopoulos, M., y Mitsis, I. (2013). Geochemical evidences for the sources of the Cr(VI) contamination in groundwater in central Euboea and Assopos-Thiva basins, Greece: Natural versus anthropogenic origin. *European Water*, 41(1), 23–34.
- Merizalde, S. (2017). *Propuesta de potabilización del sistema de agua potable de la parroquia Pedernales (Tesis de pregrado)*. Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito, Ecuador.
- Ministerio del Ambiente, MAE. (2015). *Acuerdo Ministerial 028. Sustitúyase el libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente*. Quito – Ecuador.
- Ministerio del Ambiente, MAE. (2015). *Acuerdo Ministerial 097. Reforma del Libro IX del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente*.
- Mohseni, A., Elliott, D., y Zazouli, M. (2013). Biological nitrate removal processes from drinking water supply-a review. *Journal of environmental health science and engineering*. 11(1), 35.

- Nava, G. (2011). *Manual de instrucciones para la toma, preservación y transporte de muestras de agua de consumo humano para análisis de laboratorio*. Bogotá: Instituto Nacional de Salud.
- Nysten, T. (1991). *Groundwater Pollution by Industry*. En L.C. Wrobel y C.A. Brebbia. (Eds.), *Water Pollution: Modelling, Measuring and Prediction* (pp. 427-437). New York: Springer Dordrecht.
- Ojeda, E. (2009). *Agua para el siglo XXI para América del Sur: de la visión a la acción*. Informe Colombia.
- OMS – Organización Mundial de la Salud. (2006). *Guías para la calidad del agua potable*. Recuperado de https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowres.pdf?ua=1
- Payán, S. (2016). *Estudio y diseño de biofiltro a partir de materia orgánica para el tratamiento de agua (Tesis Doctoral)*. Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C. (CIMAV), Chihuahua, México.
- Peña, D. (2016). *Remoción de Cd por *Musa cavendishii*, L. (Tesis de pregrado)*. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México.
- Piedras, A. (2015). *Propuesta del tren de tratamiento para la potabilización del agua del acuífero del valle del mezquital como fuente alternativa de abastecimiento para el valle de México (Tesis de pregrado)*. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México.
- Pitt, R. (2007). *Experimental Design and Field Sampling. Module 3: Water sample collection methods*. Recuperado de: http://unix.eng.ua.edu/~rpitt/Class/ExperimentalDesignFieldSampling/Module_203_M3.
- Rainwater, F., y Thatcher, L. (1960). *Methods for collection and analysis of water samples*. Washington: Government Printing Office.
- Ramírez, A. (2010). *Toxicidad del cianuro: Investigación bibliográfica de sus efectos en animales y en el hombre*. *Anales de la Facultad de Medicina*, 71 (1) 54-61.
- Remache, A. (2013). *Validación de métodos para el análisis de metales en diferentes matrices por espectrofotometría de absorción atómica (Tesis de pregrado)*. Universidad Central del Ecuador (UCE), Quito, Ecuador.
- Reolon, L. (2010). *Programa de formación ibero americano en materia de aguas: Calidad de las aguas*. Buenos Aires, Argentina.

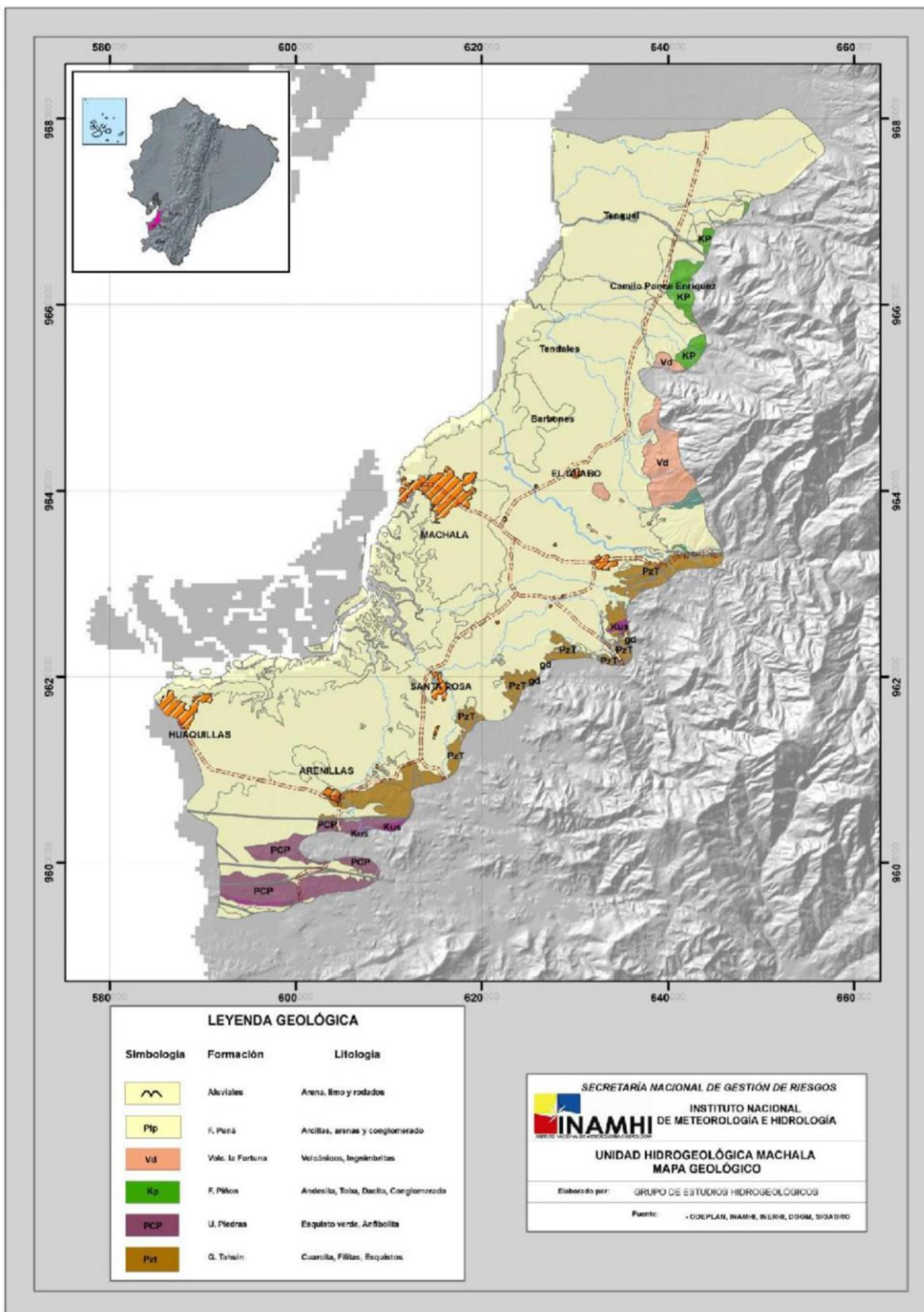
- Richon, P., Klinger, Y., Tapponnier, P., Li, C., Van Der Woerd, J. y Perrier, F. (2010). *Measuring radon flux across active faults: Relevance of excavating and possibility of satellite discharges. Radiat Meas, 45(2), 211–218.*
- Rodríguez, D. (2008). *Potabilización del Agua. Módulo IV: Abastecimientos y Saneamientos Urbanos. Madrid, España: EOI*
- Romero, J. (2006). *Purificación del agua. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.*
- Romero, J. (2013). *Calidad del agua. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.*
- Rubio, D., Calderón, R., Gualtero, A., Acosta, D., y Sandoval, J. (2015). *Tratamientos para la remoción de metales pesados comúnmente presentes en aguas residuales industriales. Una revisión. Ingeniería y Región, 13(1), 73-90.*
- Sahuquillo, A. (1994). *La contaminación de las aguas subterráneas. Situación en España. Ingeniería del agua, 1(3), 31-40.*
- Salcedo, E., Garrido, S., Esteller, M., y Martínez, M. (2015). *Evaluación de la calidad del agua subterránea mediante la utilización del índice CCME-WQI, en el acuífero del Valle de Puebla. Revista Latinoamericana: el Ambiente y las Ciencias, 6(12), 831-837.*
- Sánchez, C. (2015). *Intercambio Iónico (FT-TER-006). España: Universidad de Coruña.*
- Sandoval, F. (2001). *La pequeña minería en el Ecuador. IIED and WBCSD (Ed.), Mining, Minerals and Sustainable Development (MMSD), 75, 30.*
- Santiago, D., Bracho, N., y Torres, D. (2013). *Potabilización del agua empleando tratamientos no convencionales en poblaciones rurales. Centro de Investigación del Agua, Universidad del Zulia-Venezuela.*
- SENAGUA – Secretaria Nacional del Agua. (2014). *Normas para estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes. Recuperado de https://www.agua.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2014/04/norma_urbana_para_estudios_y_disenos.pdf*

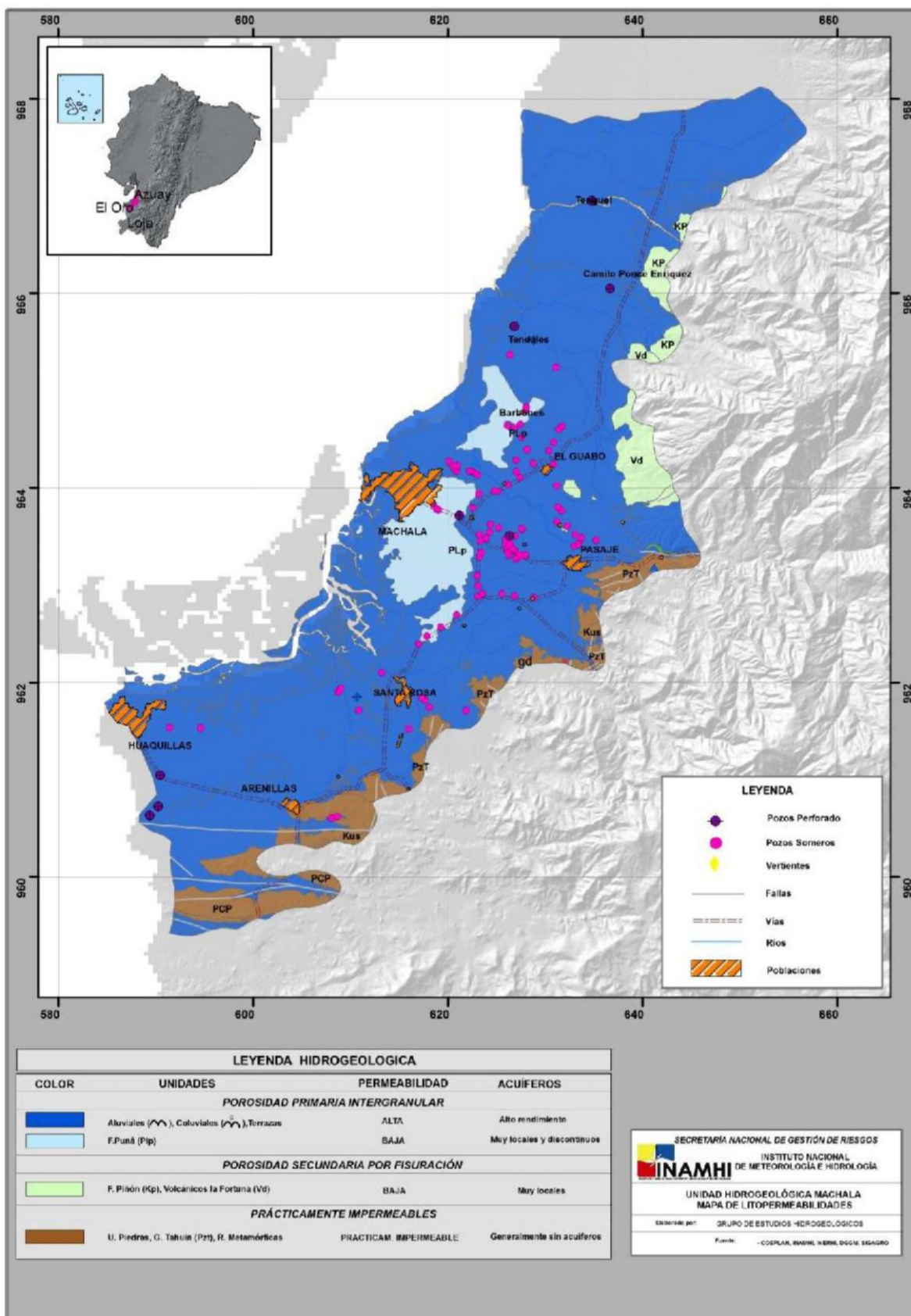
- SGEMC - *Standard Guidelines for the Environmental Monitoring of Chemicals*. (s.f).
Recuperado de [https://www.env.go.jp/en/chemi/pops/Appendix/04GuideLine/guide lines.pdf](https://www.env.go.jp/en/chemi/pops/Appendix/04GuideLine/guide%20lines.pdf)
- Stefanakis, A., Zouzias, D., y Marsellos, A. (2015). *Groundwater Pollution*. En J. N. Jovil (Ed.), *Environmental Science and Engineering* (pp. 82-102). Houston: Studium Press LLC.
- Tchobanoglous, G., y Schroeder, E. (1985). *Water quality: characteristics, modeling, modification*. Estados Unidos.
- The Groundwater Foundation. (2005). *Groundwater Foundation: Protect. Connect. Inspire*. New York: National Ground Water Association. Recuperado de <https://www.groundwater.org/get-informed/basics/groundwater.html>
- Tortosa, G. (2011). *Manual práctico de Quimiometría*.
- Várela, M. (1993) *Calidad y contaminación de las aguas subterráneas*. Jornadas sobre las aguas subterráneas. Real Academia de Ciencias. Madrid.
- Werner, A., Bakker, M., Post, V., Vandenbohede, A., Lu, C., Ataie-Ashtiani, B., Simmons, C., y Barry, D. (2013). *Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges*. *Adv. Water Resour*, 51(1), 3–26.
- WHO – World Health Organization. (1997). *Guidelines for Drinking-water quality 2nd edition: Volumen 3*. Geneva: World Health Organization. Recuperado de https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/2edvol3d.pdf
- Zlatunova, D. (2005). *Chapter 2 - Water quality characteristics [web log post]*. Recuperado de https://echo2.epfl.ch/VICAIRE/mod_2/chapt_2/main.htm

ANEXOS

ANEXO I

MAPA HIDROGEOLÓGICO MACHALA





ANEXO II

PROTOCOLO DE MUESTREO PARA EL AGUA DE CONSUMO HUMANO DEL CAMPAMENTO MINERO “BONANZA”

- **Definición del sitio de muestreo:**

El punto de principal interés y donde se llevará a cabo todas las campañas de muestreo corresponde al punto de salida del tanque de almacenamiento (regulación).



Figura 1. Tanque de reservorio de agua, el efluente del tanque se dirige mediante tubería a 3 comedores dispuestos en la parte alta, media y baja del campamento.

- **Ejecución del muestreo:**

Instrucciones generales para la toma de la muestra de agua

- Para el muestreo, siempre usar guantes.
- Antes de recoger una muestra del sistema de distribución (tanque de almacenamiento), haga fluir el agua por un tiempo suficiente (al menos 1 minuto) para limpiar el sistema, asegurando así que la muestra sea representativa. No se debe tocar la boca de los envases con los grifos de donde se toma la muestra.
- Antes de llenar el envase, enjuáguelo 2 o 3 veces con el agua que va a ser recolectada.
- No permita el ingreso de hojas, ramas u otro tipo de sólidos grandes a la botella.
- Llene el frasco según las instrucciones que se señalan a continuación y cierre herméticamente.
- Para la preservación de muestras, medir los pH indicados usando las tiras que se colocan en los insumos, usar una tira por cada medición.
- Para la medición de temperatura, pH y conductividad: Tomar una medida con el equipo multiparámetro tres veces en el día durante la jornada laboral (mañana, mediodía, tarde).

MEDICIÓN	HORA DEL DÍA	TEMPERATURA (°C)	pH	CONDUCTIVIDAD (µs)
1				
2				
3				

Pretratamiento:

- Todas las muestras se deben preservar a oscuras a 4°C, poniéndolas luego de su recolección en las hieleras junto con una o dos fundas de hielo o sustitutos.
- Instrucciones específicas para la toma de la muestra de agua

N°	ROTULACIÓN DEL ENVASE	ESPECIFICACIONES DEL RECIPIENTE	PARÁMETROS DE ANÁLISIS	INSTRUCCIONES
1	Muestra 1	Envase de galón de tesalia (tapa celeste) Capacidad: 6l	Cianuro Total	<ol style="list-style-type: none"> 1. Realizar un muestreo compuesto durante 6 horas de la jornada laboral: Tomar un aproximado de 2 litros de agua cada 2 horas. 2. En la muestra final se debe fijar la muestra, para ello añadir NaOH hasta alcanzar un pH >12 (medir con tira de pH). 3. Cerrar el galón herméticamente; para ello, añadir una cubierta plástica entre la boca y la tapa de la botella y cerrar bien.
2	Muestra 2	Envase pequeño esterilizado Capacidad: 100 ml	Coliformes fecales	<ol style="list-style-type: none"> 1. Realizar un muestreo simple, debido al volumen del envase. 2. Llenar el envase dejando un pequeño espacio para la mezcla (2 a 3 ml) y cerrar bien el envase.
3	Muestra 3	Envase pequeño de (tapa roja) Capacidad: 100 ml	Cromo hexavalente	<ol style="list-style-type: none"> 1. Realizar un muestreo simple, debido al volumen del envase. 2. Una vez tomada la muestra, añadir NaOH hasta alcanzar un pH entre 9.3 y 9.7 (medir con tira de pH). 3. Cerrar bien el envase.
4	Muestra 4	Envase pequeño de (tapa roja) Capacidad: 100 ml	Hierro soluble	<ol style="list-style-type: none"> 1. Realizar un muestreo simple, debido al volumen del envase. 2. Filtrar el agua al colocar en el envase, para ello usar el papel filtro que se envía en los insumos. 3. Cerrar bien el envase.

5	Muestra 5	Envase de galón de tesalia (tapa celeste) Capacidad: 6l	Cobre Color real Color aparente DBO ₅ DQO Fluoruros Hierro total Manganeso Nitratos Nitritos pH Sulfatos Turbiedad	<ol style="list-style-type: none"> 1. Realizar un muestreo compuesto durante 6 horas de la jornada laboral: Tomar un aproximado de 2 litros de agua cada 2 horas. 2. Cerrar el galón herméticamente; para ello, añadir una cubierta plástica entre la boca y la tapa de la botella y cerrar bien.
6	Muestra 6	Envases de galón de tesalia (tapa celeste) Capacidad: 6l	Alcalinidad Dureza Sólidos disueltos totales Cloruros	<ol style="list-style-type: none"> 1. Realizar un muestreo compuesto durante 6 horas de la jornada laboral: Tomar un aproximado de 2 litros de agua cada 2 horas. 2. Cerrar el galón herméticamente.
7	Muestra 7	Envases pequeños Capacidad: 200 ml	Aceites y grasas TPHs	<ol style="list-style-type: none"> 1. Realizar un muestreo compuesto durante 6 horas de la jornada laboral: Tomar un aproximado de 70 ml de agua cada 2 horas. 2. Cerrar correctamente el envase, asegurándose que no haya fugas entre la tapa y la boca de la botella.
8	Muestra 9	Envase de Güitig Capacidad : 1 lt	Metales pesados: Arsénico Bario Cadmio Mercurio Plomo Selenio	<ol style="list-style-type: none"> 1. Realizar un muestreo compuesto durante 6 horas de la jornada laboral: Tomar un aproximado de 300 ml de agua cada 2 horas. 2. Cerrar el galón herméticamente.

Elaboración: Flores, J.

Observaciones:

- Cada recipiente tiene pegado en su cubierta la respectiva rotulación e instrucciones.
- En resumen, se realizarán muestreo compuesto para la recolección de muestras que serán analizadas en los Laboratorios de Quito y muestreo simple para los análisis in situ.

ANEXO III
MANEJO DE DATOS

PP: Promedio parcial

Rep: Repeticiones de ensayos en LDIA.

*: Parámetro analizado en el CICAM

** : Parámetro analizado en el DEMEX

***: Parámetro analizado en el Laboratorio OSP - UCE

■ PT: Promedio total de la época

PARÁMETROS FÍSICOS

COLOR REAL

ENSAYOS Unidades Pt – Co	ÉPOCA SECA		ÉPOCA LLUVIOSA	
	MUESTREO 1 (30/11/2019)	MUESTREO 2 (8/12/2019)	MUESTREO 3 (30/01/2020)	MUESTREO 4 (06/02/2020)
Rep 1	3,00	< 5*	6,00*	8,00
Rep 2	4,00			9,00
Rep 3	4,00			4,00
PP	3,67	< 5	6,00	7,00
PT	< 5		6,50	

COLOR APARENTE

ENSAYOS Unidades Pt – Co	ÉPOCA SECA		ÉPOCA LLUVIOSA	
	MUESTREO 1 (30/11/2019)	MUESTREO 2 (8/12/2019)	MUESTREO 3 (30/01/2020)	MUESTREO 4 (06/02/2020)
Rep 1	7,00	10,00	11	14,00
Rep 2	6,00	9,00	12	13,00
Rep 3	7,00	11,00	11	12,00
PP	6,67	10,00	11,33	15,00
PT	8,33		13,17	

CONDUCTIVIDAD (In situ)

ENSAYOS µs	ÉPOCA SECA		ÉPOCA LLUVIOSA	
	MUESTREO 1 (30/11/2019)	MUESTREO 2 (8/12/2019)	MUESTREO 3 (30/01/2020)	MUESTREO 4 (06/02/2020)
Rep 1	163,90	165,60	176,6	177,90
Rep 2	164,20	165,90	176,7	176,50
Rep 3	163,70	165,90	176,6	176,40
PP	163,93	165,80	176,63	176,93
PT	164,87		176,78	

SDT – SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES

ENSAYOS (mg/l)	ÉPOCA SECA		ÉPOCA LLUVIOSA	
	MUESTREO 1 (30/11/2019)	MUESTREO 2 (8/12/2019)	MUESTREO 3 (30/01/2020)	MUESTREO 4 (06/02/2020)
Rep 1	263,00	265,00	264	279,00
Rep 2	258,00	267,00	270	269,00
Rep 3	265,00	268,00	276	275,00
PP	262,00	266,67	270,00	274,33
PT	264,33		272,17	

Ejemplo de cálculo para el muestreo 3:

Volumen de muestra utilizado (V) = 50 ml = 0,05 l

CÓDIGO DEL CRISOL	Po' (g)	P1' (Estufa) (g)	SDT (mg/l) $\frac{P_1' - P_0'}{V} * 1000$
T5	37,7091	37,7223	264
T5.1	38,8974	38,9109	270
T5.2	39,7296	39,7434	276
PROMEDIO			270

TEMPERATURA (In situ)

ENSAYOS °C	ÉPOCA SECA		ÉPOCA LLUVIOSA	
	MUESTREO 1 (30/11/2019)	MUESTREO 2 (8/12/2019)	MUESTREO 3 (30/01/2020)	MUESTREO 4 (06/02/2020)
Rep 1	25,60	25,90	25,9	26,90
Rep 2	25,20	25,40	26,1	26,80
Rep 3	25,20	25,30	25,9	26,70
PP	25,33	25,53	25,97	26,80
PT	25,43		26,38	

TURBIEDAD

ENSAYOS NTU	ÉPOCA SECA		ÉPOCA LLUVIOSA	
	MUESTREO 1 (30/11/2019)	MUESTREO 2 (8/12/2019)	MUESTREO 3 (30/01/2020)	MUESTREO 4 (06/02/2020)
Rep 1	0,18	0,20*	2,53*	9,34
Rep 2	0,20			6,12
Rep 3	0,22			6,72
PP	0,20	0,20	2,53	7,39
PT	0,20		4,96	

PARÁMETROS QUÍMICOS

METALES PESADOS

METAL mg/l	ÉPOCA SECA			ÉPOCA LLUVIOSA		
	MUESTREO 1 (30/11/2019)	MUESTREO 2 (8/12/2019)	PT	MUESTREO 3 (30/01/2020)	MUESTREO 4 (06/02/2020)	PT
Arsénico (As)	0,11**	0,13**	0,12	0,16**	0,17**	0,165
Bario (Ba)	0,10**	0,10**	0,10	0,10**	0,10**	0,1
Cadmio (Cd)	0,01**	0,01**	0,01	0,01**	0,01**	0,01
Cobre (Cu)	< 0,10*	< 0,10*	< 0,10*	< 0,10*	< 0,10*	< 0,10
Cromo hexav. (Cr ⁶⁺)	< 0,050*	< 0,050*	< 0,050	< 0,050*	< 0,050*	< 0,050
Hierro soluble (Fe ⁺⁺)	< 0,10*	< 0,10*	< 0,10	< 0,10*	0,11*	< 0,10
Manganeso (Mn)	< 0,050*	< 0,050*	< 0,050	0,076*	0,079*	0,0775
Mercurio (Hg)	< 0,0001**	< 0,0001**	< 0,0001	< 0,0001**	< 0,0001**	< 0,0001
Plomo (Pb)	0,01**	0,01**	0,01	0,01**	0,01**	0,01

ENSAYOS Hierro total (mg/l)	ÉPOCA SECA		ÉPOCA LLUVIOSA	
	MUESTREO 1 (30/11/2019)	MUESTREO 2 (8/12/2019)	MUESTREO 3 (30/01/2020)	MUESTREO 4 (06/02/2020)
Rep 1	< 0,10*	< 0,10*	0,08	0,09
Rep 2			0,06	0,08
Rep 3			0,07	0,07
PP	< 0,10	< 0,10	0,07	0,08
PT	< 0,10		0,075	

ALCALINIDAD TOTAL

ENSAYOS mg CaCO ₃ /l	ÉPOCA SECA		ÉPOCA LLUVIOSA	
	MUESTREO 1 (30/11/2019)	MUESTREO 2 (8/12/2019)	MUESTREO 3 (30/01/2020)	MUESTREO 4 (06/02/2020)
Rep 1	76,00	72,00	86,00	84,00
Rep 2	74,00	68,00	82,00	82,00
Rep 3	80,00	84,00	84,00	78,00
PP	76,67	74,67	84,00	81,33
PT	75,67		82,67	

Ejemplo de cálculo para el muestreo 3:

Volumen del titulante gastado (V_2) = Especificados en la tabla

Concentración del titulante (C_2) = 0,02 N

Volumen de la muestra utilizado (V_M) = 50 ml

Factor de conversión (f) = 50000

$$V_M * C_M = V_2 * C_2 * f$$

$$C_M = \frac{V_2 \text{ ml} * 0,02 \text{ N} * 50000}{50 \text{ ml}} \text{ [mg CaCO}_3 \text{ / l]}$$

REPETICIÓN	V_2 (ml)	ALCALINIDAD mg CaCO ₃ /l
1	4,3	86
3	4,1	82
4	4,2	84
Promedio		84

CIANURO TOTAL (CN⁻)

UNIDADES	ÉPOCA SECA			ÉPOCA LLUVIOSA		
	MUESTREO 1 (30/11/2019)	MUESTREO 2 (8/12/2019)	PT	MUESTREO 3 (30/01/2020)	MUESTREO 4 (06/02/2020)	PT
mg/l	< 0,010*	< 0,010*	< 0,010	< 0,010*	< 0,010*	< 0,010

CLORUROS

ENSAYOS mg/l	ÉPOCA SECA		ÉPOCA LLUVIOSA	
	MUESTREO 1 (30/11/2019)	MUESTREO 2 (8/12/2019)	MUESTREO 3 (30/01/2020)	MUESTREO 4 (06/02/2020)
Rep 1	11,456	12,27	13,9111	15,548
Rep 2	11,456	13,09	18,8209	17,184
Rep 3	12,275	11,46	12,2745	18,003
PP	11,729	12,27	15,002	16,912
PT	12,00		15,957	

DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO₅)

UNIDADES	ÉPOCA SECA			ÉPOCA LLUVIOSA		
	MUESTREO 1 (30/11/2019)	MUESTREO 2 (8/12/2019)	PT	MUESTREO 3 (30/01/2020)	MUESTREO 4 (06/02/2020)	PT
mg/l	< 2*	< 2*	< 2	< 2*	< 2*	< 2

DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

ENSAYOS mg/l	ÉPOCA SECA		ÉPOCA LLUVIOSA	
	MUESTREO 1 (30/11/2019)	MUESTREO 2 (8/12/2019)	MUESTREO 3 (30/01/2020)	MUESTREO 4 (06/02/2020)
Rep 1	53,00	53,00*	< 8.00***	23,00
Rep 2	55,00			25,00
Rep 3	52,00			24,00
PP	53,33	53,00	7,00	24,00
PT	53,17		15,50	

DUREZA

ENSAYOS mg CaCO ₃ /l	ÉPOCA SECA		ÉPOCA LLUVIOSA	
	MUESTREO 1 (30/11/2019)	MUESTREO 2 (8/12/2019)	MUESTREO 3 (30/01/2020)	MUESTREO 4 (06/02/2020)
Rep 1	154,13	146,13	164,14268	162,14
Rep 2	148,13	142,12	172,14964	170,15
Rep 3	148,13	148,13	168,14616	172,15
PP	150,13	145,46	168,15	168,15
PT	147,80		168,15	

Ejemplo de cálculo para el muestreo 3:

M_{EDTA} = Molaridad del EDTA utilizado como titulante = 0,01 M

PM_{CaCO_3} = Peso molecular del carbonato de calcio = 100,087 g/mol

V_{H_2O} = Volumen de la muestra de agua a titular = 50 ml

V_{EDTA} = Volumen de EDTA consumido en la titulación = Especificados en la tabla

$$D_{TOT} = \frac{V_{EDTA} * M_{EDTA} * PM_{CaCO_3} * 1000 \text{ mg/g}}{V_{H_2O}} \text{ [mg CaCO}_3 \text{ / l]}$$

REPETICIÓN	V_{EDTA} (ml)	DUREZA mg CaCO ₃ /l
1	8,2	164,14
3	8,6	172,15
4	8,4	168,15
Promedio		168,15

FLUORUROS

UNIDADES	ÉPOCA SECA			ÉPOCA LLUVIOSA		
	MUESTREO 1 (30/11/2019)	MUESTREO 2 (8/12/2019)	PT	MUESTREO 3 (30/01/2020)	MUESTREO 4 (06/02/2020)	PT
mg/l	< 0,10*	< 0,10*	< 0,10	< 0,10*	< 0,10*	< 0,10

NITRATOS (NO₃⁻)

ENSAYOS mg/l	ÉPOCA SECA		ÉPOCA LLUVIOSA	
	MUESTREO 1 (30/11/2019)	MUESTREO 2 (8/12/2019)	MUESTREO 3 (30/01/2020)	MUESTREO 4 (06/02/2020)
Rep 1	5,38	5,42*	1,8	2,20
Rep 2	5,40		2,2	1,80
Rep 3	5,39		2,1	1,90
PP	5,39	5,42	2,03	1,97
PT	5,41		2,00	

NITRITOS (NO₂⁻)

ENSAYOS mg/l	ÉPOCA SECA		ÉPOCA LLUVIOSA	
	MUESTREO 1 (30/11/2019)	MUESTREO 2 (8/12/2019)	MUESTREO 3 (30/01/2020)	MUESTREO 4 (06/02/2020)
Rep 1	0,006	< 0,06*	0,007	0,008
Rep 2	0,005		0,007	0,009
Rep 3	0,004		0,009	0,007
PP	0,005	< 0,06	0,008	0,008
PT	< 0,06		0,008	

pH (In situ)

ENSAYOS -	ÉPOCA SECA		ÉPOCA LLUVIOSA	
	MUESTREO 1 (30/11/2019)	MUESTREO 2 (8/12/2019)	MUESTREO 3 (30/01/2020)	MUESTREO 4 (06/02/2020)
Rep 1	7,68	7,71*	7,69	7,73
Rep 2	7,73		7,76	7,68
Rep 3	7,69		7,71	7,69
PP	7,70	7,71	7,72	7,70
PT	7,71		7,71	

SELENIO (Se)

UNIDADES	ÉPOCA SECA			ÉPOCA LLUVIOSA		
	MUESTREO 1 (30/11/2019)	MUESTREO 2 (8/12/2019)	PT	MUESTREO 3 (30/01/2020)	MUESTREO 4 (06/02/2020)	PT
mg/l	0,012**	0,0121**	0,0121	0,0129*	0,0128*	0,0129

SULFATOS (SO₄⁻²)

ENSAYOS mg/l	ÉPOCA SECA		ÉPOCA LLUVIOSA	
	MUESTREO 1 (30/11/2019)	MUESTREO 2 (8/12/2019)	MUESTREO 3 (30/01/2020)	MUESTREO 4 (06/02/2020)
Rep 1	54,00	55,00*	71,00*	70,00
Rep 2	55,00			72,00
Rep 3	55,00			73,00
PP	54,67	55,00	71,00	71,67
PT	54,83		71,33	

PARÁMETROS BIOLÓGICOS**COLIFORMES FECALES**

UNIDADES	ÉPOCA SECA			ÉPOCA LLUVIOSA		
	MUESTREO 1 (30/11/2019)	MUESTREO 2 (8/12/2019)	PT	MUESTREO 3 (30/01/2020)	MUESTREO 4 (06/02/2020)	PT
NMP	< 1,1*	< 1,1*	< 1,10	4,6***	4	4,30

Ejemplo de cálculo para el muestreo 4:

Prueba intuitiva

DILUCIONES	10 ⁰	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵
Coliformes fecales después de 24 horas	+	+	-	-	-	-
	+	+	+	-	-	-
	+	+	+	-	-	-

Prueba confirmativa

DILUCIONES	10 ⁰	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵
Coliformes fecales después de 48 horas	+	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-

CÓDIGO: 1 0 0

NMP - VALOR DE TABLA: 4

Tabla. Resumen de resultados y desviaciones estándar

PARÁMETROS	ÉPOCA SECA				ÉPOCA LLUVIOSA			
	30/11/2019	08/12/2019	PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	30/01/2020	06/02/2020	PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
C. real (Pt-Co)	3,670	4,990	5,000	0,933	6,000	7,000	6,500	0,707
C. aparente (Pt-Co)	6,670	10,000	8,335	2,355	11,330	15,000	13,165	2,595
Conductividad	163,930	165,800	164,865	1,322	176,630	176,930	176,780	0,212
SDT (mg/l)	262,000	266,670	264,335	3,302	270,000	274,330	272,165	3,062
T (°C)	25,330	25,530	25,430	0,141	25,970	26,800	26,385	0,587
Turbiedad (NTU)	0,200	0,200	0,200	0,000	2,530	7,390	4,960	3,437
As (mg/l)	0,110	0,130	0,120	0,014	0,160	0,170	0,160	0,007
Alcalinidad	76,670	74,670	75,670	1,414	84,000	81,330	82,665	1,888
Ba (mg/l)	0,100	0,100	0,100	0,000	0,100	0,100	0,100	0,000
Cd (mg/l)	0,010	0,010	0,010	0,000	0,010	0,010	0,010	0,000
CN ⁻ (mg/l)	0,010	0,010	0,010	0,000	0,010	0,010	0,010	0,000
Cl ⁻ (mg/l)	11,730	12,270	11,999	0,382	15,000	16,910	15,957	1,351
Cu (mg/l)	0,100	0,100	0,100	0,000	0,100	0,100	0,100	0,000
Cr ⁺⁶ (mg/l)	0,050	0,050	0,050	0,000	0,050	0,050	0,050	0,000
DBO ₅ (mg/l)	2,000	2,000	2,000	0,000	2,000	2,000	2,000	0,000
DQO (mg/l)	53,330	53,000	53,165	0,233	7,000	24,000	15,500	12,021
Dureza (mg/l)	150,130	145,460	147,795	3,302	168,150	168,150	168,148	0,000
F ⁻ (mg/l)	0,100	0,100	0,100	0,000	0,100	0,100	0,100	0,000
Fe total (mg/l)	0,100	0,100	0,100	0,000	0,070	0,080	0,075	0,007
Hierro soluble	0,100	0,100	0,100	0,000	0,100	0,110	0,100	0,007
Mn (mg/l)	0,050	0,050	0,050	0,000	0,080	0,080	0,078	0,000
Hg (mg/l)	0,0001	0,0001	0,0001	0,000	0,0001	0,0001	0,0001	0,000
NO ₃ ⁻ (mg/l)	5,390	5,420	5,405	0,021	2,030	1,970	2,000	0,042
NO ₂ ⁻ (mg/l)	0,005	0,060	0,060	0,039	0,010	0,010	0,008	0,000
pH	7,700	7,710	7,705	0,007	7,720	7,700	7,710	0,014
Pb (mg/l)	0,010	0,010	0,010	0,000	0,010	0,010	0,010	0,000
Se (mg/l)	0,0120	0,0121	0,0121	0,000	0,0129	0,0128	0,0129	0,000
SO ₄ ⁻² (mg/l)	54,670	55,000	54,835	0,233	71,000	71,670	71,335	0,474
Coliformes fecales	1,100	1,100	1,100	0,000	4,300	4,000	4,300	0,212

Elaboración: Flores, J.

ANEXO IV
INFORMES DE RESULTADOS

CICAM



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y CONTROL AMBIENTAL

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Ladrón de Guevara E 11-253
Tel.: (+593-2) 2976300/ 3938780 Ext.: 2151 • Línea directa: (+593-2) 3938864 • Apartado 17-01-2759 • E-mail: cicam@epn.edu.ec
Quito - Ecuador



INFORME DE RESULTADOS

Quito, 10 de diciembre de 2019

DATOS DE CLIENTE

Solicitado por: Joselyn Flores
Atención: -
Dirección: Nayon
Identificación de la muestra: M-AC
Fecha de recolección: 2019-11-30
Responsable del muestreo: Cliente

No. IR119-570
Ref. ST19-213

Teléfono: 0963214600
Lugar de muestreo: Ponce Enriquez
Origen de la muestra: Tanque de regulación
Tipo de muestra: Agua natural

Tipo de envase: Plástico	Plástico	Plást. estéril	Plást. estéril
Llegó refrigerada: Sí	Sí	Sí	Sí
Se utilizó preservante: H ⁺ (ácido)	No	H ⁺ (ácido)	No

LABORATORIO

Número de ingreso al laboratorio: MI-19-570
Fecha de ingreso al Laboratorio: 2019-12-02

PARÁMETRO	UNIDAD	RESULTADO	***LÍMITE	FECHA DEL ANÁLISIS	PROCEDIMIENTO
⁽¹⁾ Cianuro total	mg/L	<0.010	0,1	2019-12-04	PE-23/SM Ed. 23, 2017.4500 CN-E Espectrofotometría VIS
⁽²⁾ Cobre	mg/L	<0,10	2	2019-12-04	PE-32/HH Ed 7, 2012, 8506 Espectrofotometría VIS
⁽³⁾ Coliformes fecales	NMP/100mL	<1,1	1000	2019-12-04	PE-46/ SM Ed 23, 2017, 9221 B/ Fermentación en Tubos múltiples
⁽⁴⁾ Cromo hexavalente	mg/L	<0,050	0,05	2019-12-04	PE-51/ SM Ed 23, 2017, 3500 - Cr B/ Espectrofotometría VIS
⁽⁵⁾ Demanda bioquímica de oxígeno DBO ₅	mg/L	<2	<2	2019-12-04	PE-06/ SM Ed 23, 2017, 5210 B/ Volumetría
⁽⁶⁾ Fluoruros	mg/L	<0,10	1,5	2019-12-04	PE-50/HH Ed 7, 2012, 8029 Espectrofotometría VIS
⁽⁷⁾ Hierro soluble (Hierro 2)	mg/L	<0,10	-	2019-12-04	SM Ed. 23, 2017, 3500 - Fe B/ Espectrofotometría VIS
⁽⁸⁾ Hierro total	mg/L	<0,10	1	2019-12-04	PE-20/ SM Ed 23, 2017, 3500 - Fe B/ Espectrofotometría VIS
⁽⁹⁾ Manganeso	mg/L	<0,050	0,1	2019-12-04	PE-29/HH Ed 7, 2012, 8029 Espectrofotometría VIS

SM: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Ed. Edición. PE: Procedimiento de Ensayo interno N/A: No aplica.

ACREDITACIONES

⁽¹⁾ Acreditación CICAM SAE N° OAE LE 2C 06-012. Alcance específico de la acreditación: www.sae

⁽²⁾ Parámetro no acreditado

Mayor información respecto a los métodos, incertidumbres de medición y alcance de la acreditación de los parámetros se encuentra disponible en caso de ser solicitado.

***Límites máximos permisibles de acuerdo a Norma TULSMA, Anexo 1 Agua, Tabla 1 Criterios de calidad admisibles para aguas de consumo humano y uso doméstico

NOTA: La incertidumbre de la medición de este ensayo se encuentra disponible para el cliente, cuando lo requiera.


Revisado por: Jairo Jimpakt
RESPONSABLE TÉCNICO




Aprobado por: MSc. Carola Fierro
RESPONSABLE DE LABORATORIO



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y CONTROL AMBIENTAL



Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Ladrón de Guevara E 11-253
Tel.: (+593-2) 2976300/ 3938780 Ext.: 2151 • Línea directa: (+593-2) 3938864 • Apartado 17-01-2759 • E-mail: cicam@epn.edu.ec
Quito - Ecuador

INFORME DE RESULTADOS

Quito, 17 de diciembre de 2019

DATOS DE CLIENTE

Solicitado por: Joselyn Flores
Atención: -
Dirección: Nayon
Identificación de la muestra: M-AC
Fecha de recolección: 2019-12-08
Responsable del muestreo: Cliente

No. IR119-584
Ref. ST19-213

Teléfono: 0963214600
Lugar de muestreo: Ponce Enriquez
Origen de la muestra: Tanque de regulación
Tipo de muestra: Agua natural

Tipo de envase: Plástico Plástico Plást. estéril Plást. estéril
Llegó refrigerada: Sí Sí Sí
Se utilizó preservante: 1-1-1- (ácido) No H+ (ácido) No

LABORATORIO

Número de ingreso al laboratorio: MI-19- 584
Fecha de ingreso al Laboratorio: 2019-12-09

PARÁMETRO	UNIDAD	RESULTADO	***LÍMITE	FECHA DEL ANÁLISIS	PROCEDIMIENTO
⁽⁶⁾ Cianuro total	mg/L	<0,010	0,1	2019-12-11	PE-23/SM Ed. 23, 2017 4500 CN-E /Espectrofotometría VIS
⁽⁶⁾ Cobre	mg/L	<0,10	2	2019-12-11	PE-32/ HH, Ed 7, 2012, 8506/Espectrofotometría VIS
⁽⁶⁾ Coliformes fecales	NMP/100mL	<1,1	1000	2019-12-11	PE-46/ SM Ed. 23, 2017, 9221 B/ Fermentación en Tubos múltiples
⁽⁶⁾ Color real	u Pt-Co	<5	75	2019-12-13	PE-48/ SM Ed. 23, 2017, 2120 C/ Espectrofotometría VIS
⁽⁶⁾ Cromo hexavalente	mg/L	<0,050	0,05	2019-12-11	PE-51/ SM Ed. 23, 2017, 3500 - Cr B/ Espectrofotometría VIS
⁽⁶⁾ Demanda bioquímica de oxígeno DBO ₅	mg/L	<2	<2	2019-12-11	PE-06/ SM Ed. 23, 2017, 5210 B/ Volumetría
⁽⁶⁾ Demanda química de oxígeno, DQO	mg/L	53	<4	2019-12-09	PE-01/ SM Ed. 23, 2017, 5220 D/ Espectrofotometría VIS
⁽⁶⁾ Fluoruros	mg/L	<0,10	1,5	2019-12-13	PE-50/ HH, Ed 7, 2012, 8029/Espectrofotometría VIS
⁽⁶⁾ Hierro soluble (Hierro 2)	mg/L	<0,10	-	2019-12-11	SM Ed. 23, 2017, 3500 - Fe B/ Espectrofotometría VIS
⁽⁶⁾ Hierro total	mg/L	<0,10	1	2019-12-11	PE-20/ SM Ed. 23, 2017, 3500 - Fe B/ Espectrofotometría VIS
⁽⁶⁾ Manganeso	mg/L	<0,050	0,1	2019-12-11	PE-29/ HH, Ed 7, 2012, 8029/Espectrofotometría VIS
⁽⁶⁾ Nitratos (NO ₃)	mg/L	5,42	50	2019-12-10	PE-37/ SM Ed. 23, 2017, 4500-NO3-B, Espectrofotometría UV
⁽⁶⁾ Nitritos (NO ₂)	mg/L	<0,06	0,2	2019-12-10	PE-21/ SM Ed. 23, 2017, 4500 - NO2-B/ Espectrofotometría VIS
⁽⁶⁾ pH	NA	7,71	6,5 - 9	2019-12-13	PE-02/ SM Ed. 23, 2017, 4500 - H+ B/ Electrométrico
⁽⁶⁾ Sulfatos (SO ₄)	mg/L	55	500	2019-12-13	PE-47/ SM Ed. 23, 2017, 4500 - SO4-2 E/ Espectrofotometría VIS
⁽⁶⁾ Turbiedad	NTU	0,20	100	2019-12-13	PE-12/ SM Ed. 23, 2130 B/ Nefelometría

SM: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Ed: Edición. PE: Procedimiento de Ensayo interno. N/A: No aplica.

ACREDITACIONES:

⁽⁶⁾ Acreditación CICAM SAE N° OAE LE 2C 06-012. Alcance específico de la acreditación: www.sae

⁽⁶⁾ Parámetro no acreditado

Mayor información respecto a los métodos, incertidumbres de medición y alcance de la acreditación de los parámetros se encuentra disponible en caso de ser solicitado.

*** Límites máximos permisibles de acuerdo a Norma TULSMA, Anexo 1 Agua, Tabla 1 Criterios de calidad admisibles para aguas de consumo humano y uso doméstico

NOTA: La incertidumbre de la medición de este ensayo se encuentra disponible para el cliente, cuando lo requiera.


Revisado por: Jairo Jimpikit
RESPONSABLE TÉCNICO




Aprobado por: MSc. Carola Fierro
RESPONSABLE DE LABORATORIO



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y CONTROL AMBIENTAL**

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Ladrón de Guevara E 11-253
Tel.: (+593-2) 2976300 / 3938780 Ext.: 2151 • Línea directa: (+593-2) 3938864 • Apartado 17-01-2759 • E-mail: cicam@epn.edu.ec
Quito—Ecuador



INFORME DE RESULTADOS

Fecha: 06 de febrero de 2020

No.1R120-46

DATOS DEL CLIENTE:

Nombre del Cliente/ Empresa: Joselyn Flores
Nombre del Representante: -
Cédula / RUC: 1720794294
Dirección: Nayon
Teléfono convencional: 2884299
Teléfono celular: 0963214600
Correo electrónico: joselynaraflor@gmail.com

DATOS DE LA MUESTRA:

Nombre del Proyecto: -
Fecha de muestreo: 2020-01-29
Rotulación de la Muestra: 0
Tipo de muestreo: Puntual
Tipo de muestra: Agua natural
Lugar de muestreo: Mina Ponce Enriquez
Origen de la muestra: Tanque de regulación
Responsable de muestreo: Cliente

DATOS DEL LABORATORIO:

Fecha de recepción: 2020-01-30
No. Oferta de Servicio: OE19-405
No. Solicitud de trabajo: ST20-14
Tipo de servicio: Servicio de ensayo aplicado a la investigación
Código de la muestra: MI-20-046
Lugar de análisis: CICAM - Quito - Ladrón de Guevara E11-253
Fecha de análisis: 03/02/2020

Tipo de envase: Plástico
Nº de envases: 1
Preservante: H+ (ácido)
Temperatura: 21,7°C
Vidrio
Vidrio ámbar
Plást. estéril
No
No
H+ (ácido)

PARAMETRO	MÉTODO DE REFERENCIA/ MÉTODO INTERNO	UNIDAD	RESULTADO
* Cianuro total	PE-23/SM Ed. 23, 2017 4500 CN-E/ Espectrofotometría VTS	mg/ L	<0,010
^(*) Cobre	PE-32/ HH. Ed 7, 2012, 8506/ Espectrofotometría VTS	mg/L	<0,10
^(*) Color real	PE-48/ SM Ed. 23, 2017, 2120 C/ Espectrofotometría VTS	u Pt-Co	6
* Cromo hexavalente	PE-51/ SM Ed. 23, 2017, 3500 - Cr B/ Espectrofotometría VTS	mg/L	<0,050
^(*) Demanda bioquímica de oxígeno DBO ₅	PE-06/ SME Ed. 23, 2017, 5210 B/ Volumetría	mg/L	<2
* Fluoruros	PE-50/ HH. Ed 7, 2012, 8029/ Espectrofotometría VTS	mg/L	<0,10
* Hierro soluble (Hierro 2)	SME Ed. 23, 2017, 3500 - Fe B/ Espectrofotometría VTS	mg/L	<0,10
* Hierro total	PE-20/ SM Ed. 23, 2017, 3500 - Fe B/ Espectrofotometría VTS	mg/L	<0,10
* Manganeso	PE-29/ HH. Ed 7, 2012, 8029/ Espectrofotometría VTS	mg/L	0,076
* Sulfatos (SO ₄)	PE-47/ SM Ed. 23, 2017, 4500 - SO ₄ -2 E/ Espectrofotometría VTS	mg/L	71
^(*) Turbiedad	PE-12/ SME Ed. 23, 2130 B/ Nefelometría	NTU	2,53

Acreditaciones:

- ^(*) Acreditación N° OAE LE 2C 06-012
^(*) Ensayos fuera del alcance de acreditación
^(*) Laboratorio subcontratado: NOMBRE DEL SUBCONTRATADO, según NUMERO DE ACREDITACIÓN DE SUBCONTRATADO
^(**) Laboratorio subcontratado: NOMBRE DEL CENTRO O LABORATORIO de la Escuela Politécnica Nacional, cuya competencia para la ejecución de este ensayo ha sido evaluada mediante el procedimiento interno NRO. DE PROCEDIMIENTO del Sistema de Gestión de Calidad del CICAM.

Observaciones:

Oficio Nro. EPN-DICA-2019-0412-0

Nota:

Este informe sólo afecta a la muestra sometida a ensayo bajo las condiciones recibidas
La información completa de la medición de este ensayo se encuentra disponible para el cliente, cuando lo requiera
El laboratorio no se responsabiliza por la información proporcionada por el cliente que puedan afectar la validez de los resultados
En caso de que esta información sea solicitada por ley o disposiciones contractuales se notificará al cliente en forma previa
Prohibida la reproducción parcial de este informe

Revisado por: Jairo Jimpikit
RESPONSABLE TÉCNICO



Aprobado por: MSc. Carola Fierro
RESPONSABLE DE LABORATORIO



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y CONTROL AMBIENTAL**

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" • Calle Ladrón de Guevara E 11-253
Tel.: (+593-2) 2976300 / 3938780 Ext.: 2151 • Línea directa: (+593-2) 3938864 • Apartado 17-01-2759 • E-mail: cicam@epn.edu.ec
Quito — Ecuador



INFORME DE RESULTADOS

Fecha: 14 de febrero de 2020

No.1R120-83

DATOS DEL CLIENTE:

Nombre del Cliente/ Empresa: Joselyn Flores
Nombre del Representante: -
Cédula / RUC: 1720794294
Dirección: Nayon
Teléfono convencional: 2884299
Teléfono celular: 0963214600
Correo electrónico: joselynaraflor@gmail.com

DATOS DE LA MUESTRA:

Nombre del Proyecto: -
Fecha de muestreo: 2020-02-06
Rotulación de la Muestra: 0
Tipo de muestreo: Puntual
Tipo de muestra: Agua natural
Lugar de muestreo: Mina Ponce Enriquez
Origen de la muestra: Tanque de regulación
Responsable de muestreo: Cliente

DATOS DEL LABORATORIO:

Fecha de recepción: 2020-02-07
No. Oferta de Servicio: OE19-452
No. Solicitud de trabajo: ST20-42
Tipo de servicio: Servicio de ensayo aplicado a la investigación
Código de la muestra: MI-20- 083
Lugar de análisis: CICAM - Quito - Ladrón de Guevara E11-253
Fecha de análisis: 10/02/2020

Tipo de envase:	Nº de envases:	Preservante:	Temperatura:
Plástico	1	H+ (ácido)	21,7°C
Vidrio		No	
Vidrio ámbar		No	
Plást. estéril		H+ (ácido)	

PARÁMETRO	MÉTODO DE REFERENCIA/ MÉTODO INTERNO	UNIDAD	RESULTADO
* Cianuro total	PE-23/SM Ed 23, 2017 4500 CN-E/ Espectrofotometría VTS	mg/L	<0,010
^(*) Cobre	PE-32/ HH, Ed 7, 2012, 8506/ Espectrofotometría VTS	mg/L	<0,10
* Cromo hexavalente	PE-51/ SM Ed 23, 2017, 3500 - Cr B/ Espectrofotometría VTS	mg/L	<0,050
^(*) Demanda bioquímica de oxígeno DBO ₅	PE-06/ SM Ed 23, 2017, 5210 B/ Volumetría	mg/L	<2
* Fluoruros	PE-50/ HH, Ed 7, 2012, 8029/ Espectrofotometría VTS	mg/L	<0,10
* Hierro soluble (Hierro 2)	SME Ed. 23, 2017, 3500 - Fe B/ Espectrofotometría VTS	mg/L	0,11
* Manganeso	PE-29/HH, Ed 7, 2012, 8029/ Espectrofotometría VTS	mg/L	0,079

Acreditaciones:

^(*) Acreditación N° OAE LE 2C 06-012

^(*) Ensayos fuera del alcance de acreditación

^(*) Laboratorio subcontratado: NOMBRE DEL SUBCONTRATADO, según NUMERO DE ACREDITACIÓN DE SUBCONTRATADO

^(**) Laboratorio subcontratado: NOMBRE DEL CENTRO O LABORATORIO de la Escuela Politécnica Nacional, cuya competencia para la ejecución de este ensayo ha sido evaluada mediante el procedimiento interno NRO. DE PROCEDIMIENTO del Sistema de Gestión de Calidad del CICAM.

Observaciones:

Oficio Nro. EPN-DICA-2019-0412-0

Nota:

Este informe sólo afecta a la muestra sometida a ensayo bajo las condiciones recibidas
La información completa de la medición de este ensayo se encuentra disponible para el cliente, cuando lo requiera
El laboratorio no se responsabiliza por la información proporcionada por el cliente que puedan afectar la validez de los resultados
En caso de que esta información sea solicitada por ley o disposiciones contractuales se notificará al cliente en forma previa
Prohibida la reproducción parcial de este informe

Revisado por: Jairo Jimpikit
RESPONSABLE TÉCNICO



Aprobado por: MSc. Carola Fierro
RESPONSABLE DE LABORATORIO

DEMEX



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA



Resultado de análisis por Espectrometría de Absorción Atómica

Solicitante: Josselyn Flores
Referencia: RM - 9935
Fecha: 02-12-19
Muestra: Una muestra de agua denominada "Metales Pesados PE"

La cuantificación de los metales se lo realizó empleando el espectrómetro de Absorción Atómica marca Perkin Elmer modelo Analyst 300. A continuación, los resultados:

Muestra	Determinación	Resultados
"Metales Pesados PE"	Cadmio	0,01 mg/L
	Plomo	0,01 mg/L
	Bario	0,1 mg/L
	Arsénico	110 ug/L
	Mercurio	<0,1 ug/L
	Selenio	12,0 ug/l

Límite de detección:
Cadmio= 0,01 mg/L
Plomo= 0,01 mg/L
Bario= 0,1 mg/L
Arsénico= 0,1 ug/L
Mercurio=0,1 ug/L
Selenio= 0,1 ug/L


Ing. Ernesto de la Torre Ch. P.D.
Jefe de Departamento




MSc. Evelyn Criollo T.
Jefe de Laboratorio



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA**



Resultado de análisis por Espectrometría de Absorción Atómica

Solicitante: Josselyn Flores
Referencia: RM - 9963
Fecha: 09-12-19
Muestra: Una muestra de agua denominada "Metales Pesados PE 2"

La cuantificación de los metales se lo realizó empleando el espectrómetro de Absorción Atómica marca Perkin Elmer modelo Aanalyst 300. A continuación, los resultados:

Muestra	Determinación	Resultados
"Metales Pesados PE 2"	Cadmio	0,01 mg/L
	Plomo	0,01 mg/L
	Bario	0,1 mg/L
	Arsénico	130 ug/L
	Mercurio	<0,1 ug/L
	Selenio	12,1 ug/l

Límite de detección:
 Cadmio= 0,01 mg/L
 Plomo= 0,01 mg/L
 Bario= 0,1 mg/L
 Arsénico= 0,1 ug/L
 Mercurio=0,1 ug/L
 Selenio= 0,1 ug/L


 Ing. Ernesto de la Torre Ch. P.D.
 Jefe de Departamento




 MSc. Evelyn Criollo T.
 Jefe de Laboratorio



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA**



Resultado de análisis por Espectrometría de Absorción Atómica

Solicitante: **Joselyn Flores**
Referencia **RM - 10011**
Fecha: **31-01-20**
Muestra: **Una muestra de agua denominada "Metales Pesados"**

La cuantificación de los metales se lo realizó empleando el espectrómetro de Absorción Atómica marca Perkin Elmer modelo Analyst 300. A continuación, los resultados:

Muestra	Determinación	Resultados
"Metales Pesados"	Cadmio	0,01 mg/L
	Plomo	0,01 mg/L
	Bario	0,1 mg/L
	Arsénico	160 ug/L
	Mercurio	<0,1 ug/L
	Selenio	12,9 ug/l

Límite de detección: Cadmio= 0,01 mg/L
 Plomo= 0,01 mg/L
 Bario= 0,1 mg/L
 Arsénico= 0,1 ug/L
 Mercurio=0,1 ug/L
 Selenio= 0,1 ug/L


 Ing. Ernesto de la Torre Ch. P.D.
Jefe de Departamento




 MSc. Evelyn Criollo T.
Jefe de Laboratorio



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA**



Resultado de análisis por Espectrometría de Absorción Atómica

Solicitante: **Joselyn Flores**
Referencia **RM - 10011**
Fecha: **31-01-20**
Muestra: **Una muestra de agua denominada "Metales Pesados"**

La cuantificación de los metales se lo realizó empleando el espectrómetro de Absorción Atómica marca Perkin Elmer modelo Aanalyst 300. A continuación, los resultados:

Muestra	Determinación	Resultados
"Metales Pesados"	Cadmio	0,01 mg/L
	Plomo	0,01 mg/L
	Bario	0,1 mg/L
	Arsénico	160 ug/L
	Mercurio	<0,1 ug/L
	Selenio	12,9 ug/l

Límite de detección: Cadmio= 0,01 mg/L
 Plomo= 0,01 mg/L
 Bario= 0,1 mg/L
 Arsénico= 0,1 ug/L
 Mercurio=0,1 ug/L
 Selenio= 0,1 ug/L


 Ing. Ernesto de la Torre Ch. P.D.
Jefe de Departamento




 MSc. Evelyn Criollo T.
Jefe de Laboratorio

OSP



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
OFERTA DE SERVICIOS Y PRODUCTOS

LABORATORIO DE QUÍMICA AMBIENTAL
INFORME DE RESULTADOS

INF. LAB. AMB 50535
ORDEN DE TRABAJO No. 63105

SOLICITADO POR:	FLORES JOSELYN		
DIRECCIÓN DEL CLIENTE:	NAYON-QUITO Y 19 DE DICIEMBRE		
MUESTRA DE:	AGUA		
DESCRIPCIÓN:	AGUA SUBTERRANEA		
FECHA DE RECEPCIÓN:	31/01/2020	HORA DE RECEPCIÓN:	15H02
FECHA DE ANÁLISIS:	DEL 31/01/2020 AL 12/02/2020		
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS A LA SECRETARIA:	14/2/2020		
CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA			
CARACTERÍSTICA:	TRANSPARENTE	ESTADO:	LIQUIDO
		CONTENIDO:	150 mL
OBSERVACIONES:	<ul style="list-style-type: none"> * Los resultados se refieren a la muestra tomada por el cliente y entregadas al personal técnico del OSP. * La fecha de recepción corresponde a la fecha en la que se emite la orden de trabajo. 		

RESULTADOS

PARAMETROS	UNIDADES	RESULTADOS	METODOS	INCERTIDUMBRE %
DQO	mgO ₂ /L	<8	MAM-23A / MERCK 112,28,29,132 MODIFICADO	-



Servicio de
Acreditación
Ecuatoriana

Acreditación N° OAE LE 1C 04-002, LABORATORIO DE ENSAYOS

Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE*



11/1

B.F. ALICIA CEPA
RESPONSABLE DEL ÁREA DE AMBIENTAL

R-GO-01-26



Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gatto Sobral- Teléfonos: 2502-262 / 2502-456, ext. 15,18,21,31,33
Teléfono: 3216740 - E-mail: fqosp@uce.edu.ec



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
OFERTA DE SERVICIOS Y PRODUCTOS

LABORATORIO DE MICROBIOLOGIA
INFORME DE RESULTADOS

INF. LAB. MI 39276
ORDEN DE TRABAJO No. 63106

SOLICITADO POR:	FLORES JOSELYN
DIRECCIÓN DEL CLIENTE:	NAYÓN QUITO Y 19 DE DICIEMBRE
MUESTRA DE:	AGUA
DESCRIPCIÓN:	AGUA SUBTERRÁNEA
LOTE:	----
FECHA DE ELABORACIÓN:	----
FECHA DE VENCIMIENTO:	----
FECHA DE RECEPCIÓN:	31/01/2020
HORA DE RECEPCIÓN:	15H02
FECHA DE ANÁLISIS:	03/02/2020
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS A LA SECRETARÍA:	10/02/2020
CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA	
COLOR:	CARACTERÍSTICO
OLOR:	CARACTERÍSTICO
ESTADO:	LÍQUIDO
CONTENIDO:	100ml
OBSERVACIONES:	LOS RESULTADOS QUE CONSTAN EN EL PRESENTE INFORME SE REFIEREN A LA MUESTRA ENTREGADA POR EL CLIENTE AL OSP.
MUESTREADO POR:	EL CLIENTE

INFORME

PARÁMETROS	UNIDAD	RESULTADO	METODO
INDICE DE COLIFORMES FECALES	NMP/100 ml	4.6	MMI-12/SM 9221-E MODIFICADO

DATOS ADICIONALES:
NMP/100ml: Número más probable de coliformes por 100 mililitro



Acreditación N° OAE LE 1C 04-002, LABORATORIO DE ENSAYOS

Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE*



B.F. MAGALY CHASI – Mgtr.
RESPONSABLE AREA MICROBIOLOGIA



R-GC-01-25

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gatto Sobral - Teléfonos: 2502-262 / 2502-456, ext. 15, 18, 21, 31, 33
Telefax: 3216-740 - Web: www.facquimuce.edu.ec - E-mail: laboratoriososp@hotmail.com

ANEXO V

**EJEMPLO DE VALOR “P” PARA “T DE STUDENT” CON AYUDA DE
MICROSOFT EXCEL 2016**

SULFATOS

Prueba t para medias de dos muestras emparejadas

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Media	54,835	71,335
Varianza	0,05445	0,22445
Observaciones	2	2
Coeficiente de correlación de Pearson	1	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	1	
Estadístico t	97,05882353	
P(T<=t) una cola	0,00327944	
Valor crítico de t (una cola)	6,313751515	
P(T<=t) dos colas	0,006558881	
Valor crítico de t (dos colas)	12,70620474	

$p > 0,05$, no significativo, (NS)

p entre 0,01 y 0,05, significativo, (*)

● p entre 0,001 y 0,01, muy significativo, (**)

$p < 0,001$, extremadamente significativo, (***)

ANEXO VI

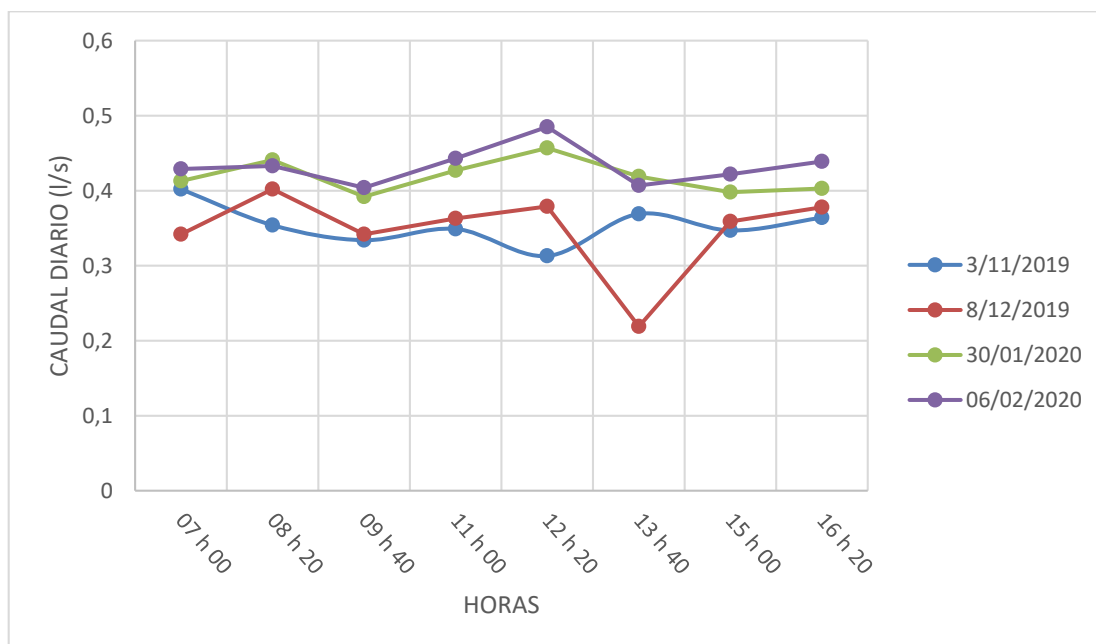
DESGLOSE DE CAUDALES PARA ÉPOCA SECA Y LLOVIOSA

Medición de caudales para cada campaña de muestreo

No	HORA DEL DÍA	CAUDAL (l/s)			
		3/11/2019	8/12/2019	30/01/2020	6/02/2020
1	07 h 00	0,402	0,342	0,413	0,429
2	08 h 20	0,354	0,402	0,441	0,433
3	09 h 40	0,334	0,342	0,392	0,404
4	11 h 00	0,349	0,363	0,427	0,443
5	12 h 20	0,313	0,379	0,457	0,485
6	13 h 40	0,369	0,219	0,419	0,407
7	15 h 00	0,347	0,359	0,398	0,422
8	16 h 20	0,364	0,378	0,403	0,439
PROMEDIOS		0,354	0,348	0,419	0,432
DESVIACIÓN ESTÁNDAR		0,027		0,021	

Elaboración: Flores, J.

Caudales para cada campaña de muestreo



Elaboración: Flores, J.

ANEXO VII

CÁLCULO DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA (CCME – WQI)

FECHA	Color real Pt-Co	SDT mg/l	T °C	Turbiedad NTU	As mg/l	Ba mg/l	Cd mg/l	CN mg/l	Cl mg/l	Cu mg/l	Cr +6 mg/l	DBO ⁵ mg/l	DOO mg/l	Dureza mg/l	F mg/l	Fe total mg/l	Mn mg/l	Hg mg/l	NO ₂ mg/l	NO ₃ mg/l	pH	Pb mg/l	Se mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l	Coliformes fecales NMP
30/11/2019	3,67	262,00	25,33	0,20	0,11	0,10	0,01	*0,010	11,73	*0,10	*0,05	*2,00	53,33	150,13	*0,10	0,10	0,05	*0,0001	5,39	0,01	7,70	0,01	0,0120	54,67	*1,10
8/12/2019	4,99	266,67	25,53	0,20	0,13	0,10	0,01	*0,010	12,27	*0,10	*0,05	*2,00	53,00	145,48	*0,10	0,10	0,05	*0,0001	5,42	0,06	7,71	0,01	0,0121	55,00	*1,10
30/01/2020	6,00	270,00	25,97	2,53	0,16	0,10	0,01	*0,010	15,00	*0,10	*0,05	*2,00	7,00	168,15	*0,10	0,07	0,08	*0,0001	2,03	0,01	7,72	0,01	0,0129	71,00	4,60
06/02/2020	7,00	274,33	26,80	7,39	0,17	0,10	0,01	*0,010	16,91	*0,10	*0,05	*2,00	24,00	168,15	*0,10	0,08	0,08	*0,0001	1,97	0,01	7,70	0,01	0,0128	71,67	4,00
INEN 1108	-	-	-	5,00	0,01	0,70	0,003	0,070	-	2,00	0,05	-	-	-	1,50	-	-	0,0060	50,00	3,00	-	0,01	0,0400	-	*1,10

- ICA SEGÚN LA NORMA INEN 1108

Número de parámetros que incumplen los LMP: 3 (As, Cd y Coliformes fecales). Número total de variables: 14

$$F_1 = \left(\frac{3}{14}\right) * 100 = 21,43$$

Número de ensayos que no cumplen con los LMP: 10, y el número total de ensayos es 56. En este caso:

$$F_2 = \left(\frac{10}{56}\right) * 100 = 17,86$$

Las desviaciones anómalas, su suma normalizada o NSE y F_3 :

As

$$\text{Desviación anómala}_1 = \left(\frac{0,11}{0,01}\right) - 1 = 10$$

$$\text{Desviación anómala}_2 = \left(\frac{0,13}{0,01}\right) - 1 = 12$$

$$\text{Desviación anómala}_3 = \left(\frac{0,16}{0,01}\right) - 1 = 15$$

$$\text{Desviación anómala}_4 = \left(\frac{0,24}{0,01}\right) - 1 = 23$$

Cd

$$\text{Desviación anómala}_5 = \left(\frac{0,01}{0,003}\right) - 1 = 2,33$$

$$\text{Desviación anómala}_6 = \left(\frac{0,01}{0,003}\right) - 1 = 2,33$$

$$\text{Desviación anómala}_7 = \left(\frac{0,01}{0,003}\right) - 1 = 2,33$$

$$\text{Desviación anómala}_8 = \left(\frac{0,01}{0,003}\right) - 1 = 2,3$$

Coliformes fecales

$$\text{Desviación anómala}_9 = \left(\frac{4,60}{1,10}\right) - 1 = 3,18$$

$$\text{Desviación anómala}_{10} = \left(\frac{4,00}{1,10}\right) - 1 = 2,63$$

Luego

$$NSE = \frac{10 + 12 + 15 + 23 + 2,33 + 2,33 + 2,33 + 2,33 + 3,18 + 2,63}{56} = 1,34$$

Entonces

$$F_3 = \left(\frac{1,34}{0,01(1,34) + 0,01} \right) = 57,26$$

Finalmente, el índice CCME – WQI se calculó de la siguiente manera:

$$CCME\ WQI_{INEN\ 1108} = 100 - \frac{\sqrt{21,43^2 + 17,86^2 + 57,26^2}}{1,732} = \mathbf{51,60}$$