



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y
METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA DE LAS AGUAS
SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS DEL CENTRO POBLADO
DE LLACUABAMBA EN EL DISTRITO DE PARCOY, LA
LIBERTAD, PERÚ

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. ALVARO MAMANI QUISPE

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO GEÓLOGO


PUNO – PERÚ


2024




ALVARO MAMANI QUISPE

CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA DE LAS AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS DEL CENTRO POBLADO D...

 My Files

 My Files

 Universidad Nacional del Altiplano

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::8254:410936241

Fecha de entrega

1 dic 2024, 10:13 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

1 dic 2024, 10:18 a.m. GMT-5

Nombre de archivo

Tesis-2024_AM_RevA_Completo_compressed.pdf

Tamaño de archivo

4.9 MB

187 Páginas

40,460 Palabras

196,932 Caracteres





10% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 11 palabras)

Fuentes principales

- 7% Fuentes de Internet
- 4% Publicaciones
- 5% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

- Texto oculto**
53 caracteres sospechosos en N.º de páginas
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



M.Sc. Valentin E. Fernandez Valdivia
Ingeniero Geólogo Reg. CIP. 12585





EDICATORIA

Al Padre Innominado por brindarme fortaleza, confianza, valor y salud para llevar a cabo mis metas y objetivos.

A mis padres Víctor y Loyola, quienes con mucho amor y paciencia me apoyaron en mis estudios.

A mis hermanos Elmer y Víctor por brindarme su apoyo permanente, por alentarme a seguir por cada meta trazada.

A mis compañeros y amigos de toda la vida, con quienes he desarrollado fuertes lazos de amistad y hermandad.

Alvaro Mamani Quispe



AGRADECIMIENTOS

Mis más sinceros agradecimientos a mis asesores el M.Sc. Valentín Fernández Valdivia y el Dr. Rolando Apaza Campos, quienes con su conocimiento y apoyo me guiaron y recomendaron en el desarrollo de este proyecto logrando así el objetivo planteado.

Al Ing. Jhon Zevallos Aspiros e Ing. Ronald Zavaleta Yarin por el ímpetu por brindar toda su disponibilidad y apoyo en los análisis químicos, salidas de campo y hacer realidad esta investigación.

A los miembros del jurado Dr. Emiliano Guevara Guerra, Ing. Ruth Quispe Sandoval e Ing. Dany Alave Chata; por sus sugerencias y aportes que me brindaron para la culminación del presente estudio de investigación.

A mi familia, amigos y toda persona que hizo posible esta realización, les agradezco de corazón, por aportar con su tiempo, paciencia, constancia y apoyo incondicional que me brindaron.

Alvaro Mamani Quispe



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS	
RESUMEN	17
ABSTRACT.....	18
CAPITULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1. GENERALIDADES.....	19
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	20
1.3.1. Problema general	20
1.3.2. Problemas específicos.....	20
1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	21
1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	21
1.5.1. Objetivo general.....	21
1.5.2. Objetivos específicos	22
CAPITULO II	
REVISIÓN DE LITERATURA	
2.1. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS	23
2.1.1. Antecedentes Internacionales	23



2.1.2. Antecedentes Nacionales	25
2.1.3. Antecedentes Locales	27
2.2. MARCO TEÓRICO	29
2.2.1. Hidroquímica	29
2.2.2. Composición del agua como sustancias disueltas.....	30
2.2.3. Características químicas del agua	33
2.2.4. Características físicas del agua	40
2.2.5. Características fisicoquímicas del agua	41
2.2.6. Procesos hidrogeoquímicos	45
2.2.7. Diagramas hidroquímicos	51
2.2.8. Nomenclatura de codificación de fuentes subterráneas	63
2.2.9. Nomenclatura de codificación de fuentes subterráneas	65
2.2.10. Estándares de calidad ambiental (ECAs)	67
2.2.11. Calidad del agua según el MINSA	75
2.2.12. Estándares de calidad ambiental para suelo	77
CAPITULO III	
MATERIALES Y MÉTODOS	
3.1. MATERIALES Y EQUIPOS	78
3.1.1. Mapeo hidrogeológico	78
3.1.2. Mapeo geológico.....	78
3.1.3. Muestreo de agua	78
3.1.4. Análisis en laboratorio	79
3.2. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.....	79
3.2.1. Consideraciones conceptuales	79
3.2.2. Población de Estudio y Tamaño de la Muestra.....	80



3.2.3. Selección de muestra	81
3.2.4. Etapa pre-campo	81
3.2.5. Etapa de campo	82
3.2.6. Etapa de laboratorio	82
3.2.7. Etapa de gabinete	82

CAPITULO IV

CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1. UBICACIÓN	84
4.2. ACCESO	85
4.3. POBLACIÓN	85
4.4. CLIMA Y FAUNA.....	85
4.1.1 Clima.....	85
4.1.2 Fauna.....	86
4.5. GEOMORFOLOGÍA	86
4.5.1. Geomorfología local	87
4.6. GEOLOGÍA.....	89
4.6.1. Geología Regional	89
4.6.2. Geología local	91
4.6.3. Geología estructural	99
4.6.4. Geología Económica.....	101
4.7. EVALUACIÓN DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS - MONITOREO	101
4.7.1. Parámetros fisicoquímicos de ríos y quebradas	102
4.7.2. Parámetros fisicoquímicos de bocaminas (Canales).....	103
4.7.1. Parámetros fisicoquímicos de lagunas	104



4.7.2. Parámetros fisicoquímicos de bofedales.....	104
4.7.3. Parámetros fisicoquímicos de piezómetros.....	111
4.7.4. Parámetros fisicoquímicos de manantiales	115
4.8. MUESTREO DE FUENTES DE AGUA.....	115
4.9. CONTROL DE CALIDAD	118
4.9.1. Correlación de Conductividad Eléctrica y Sólidos Totales Disueltos	118
4.9.2. Control de calidad (Qc) balance iónico (IBE)	119
4.9.3. Control de calidad (Qc) – Concentración de metales totales y metales disueltos.....	122

CAPITULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. RESULTADOS DE CALIDAD DEL AGUA	124
5.1.1. Estándares de calidad ambiental (ECA categoría I – A1, A2 y A3).....	124
5.1.2. Estándares de calidad ambiental (ECA categoría III – D1 y D2).....	127
5.1.3. Calidad de agua para consumo humano (LMP).....	130
5.1.4. Análisis de las excedencias de los ECAs por parámetro o analito	132
5.2. FACIES HIDROQUÍMICAS.....	136
5.2.1. Diagramas de Stiff:	136
5.2.2. Diagramas de Piper	140
5.2.3. Diagramas de Durov	142
5.3. ANÁLISIS AGUA - ROCA	144
5.3.1. Diagramas de Mifflin.....	144
5.3.2. Diagramas de Gibbs.....	147
5.3.3. Diagrama de Giggenbach.....	150
5.3.4. Correlaciones iónicas	152



5.4. DISCUSIONES.....	158
VI. CONCLUSIONES	161
VII. RECOMENDACIONES	163
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	164
ANEXOS.....	166

AREA:

TEMA

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 12 DE DICIEMBRE DEL 2024



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Principales aniones y cationes presentes en el agua	31
Tabla 2: Interpretación del coeficiente de correlación de Spearman.....	61
Tabla 3: Nomenclatura utilizada para la codificación y sectorización	64
Tabla 4: Distribución de las unidades hidrográficas del Perú.	65
Tabla 5: Estándares de Calidad Ambiental para la Categoría 1	69
Tabla 6: Estándares de Calidad Ambiental para la Categoría 3	72
Tabla 7: Límites máximos permisibles de parámetros de calidad organoléptica	75
Tabla 8: Límites máximos permisibles de parámetros químicos inorgánicos y orgánicos	76
Tabla 9: Estándares de calidad ambiental para suelo.....	77
Tabla 10: Vías de Acceso y Distancias.....	85
Tabla 11: Población en el área de investigación.....	85
Tabla 12: Parámetros fisicoquímicos de ríos y quebradas.....	106
Tabla 13: Parámetros fisicoquímicos de bocaminas (Canales)	108
Tabla 14: Parámetros fisicoquímicos de lagunas.....	109
Tabla 15: Parámetros fisicoquímicos de bofedales	110
Tabla 16: Resumen de parámetros fisicoquímicos en piezómetros.....	112
Tabla 17: Resumen de parámetros fisicoquímicos en manantiales	113
Tabla 18: Estaciones de muestreo.....	116
Tabla 19: Balance iónico (IBE) para la primera campaña.....	120
Tabla 20: Balance iónico (IBE) para la segunda campaña	121
Tabla 21: Estándar de Calidad Ambiental - Categoría I para ambas temporadas	126



Tabla 22: Estándar de Calidad Ambiental – Categoría III para ambas temporadas... 129
Tabla 23: Comparación con calidad de agua para consumo humano del MINSA..... 131
Tabla 24: Facies hidroquímicas para ambas temporadas. 138
Tabla 25: Matriz de correlación iónica para la primera campaña 155
Tabla 26: Matriz de correlación iónica para la segunda campaña..... 155
Tabla 27: Resumen de los resultados para el Arsénico en el agua 157



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Diagrama Stiff.....	52
Figura 2 Diagrama Piper.....	53
Figura 3 Diagrama Durov	54
Figura 4 Diagrama Giggenbach.....	55
Figura 5 Diagrama de Mifflin.....	56
Figura 6 Diagramas Gibbs para cationes	57
Figura 7 Diagramas Gibbs para aniones	58
Figura 8 Mapa de isoconcentración	63
Figura 9 Esquema de codificación de fuentes de agua subterránea.....	64
Figura 10 Conceptualización del método Pfafstetter.....	66
Figura 11 Ubicación espacial según la interpretación del código	67
Figura 12 Ubicación del área de estudio.....	84
Figura 13 Esquistos gris verdoso, sector Qda. Molinetes.....	93
Figura 14 Geología de las Qdas. Mush Mush y Ventanas.....	95
Figura 15 Geología de las Qdas. Pomachay y Huinchos.....	95
Figura 16 Depósitos fluvio-glaciares Qda. La Laguna Blanca	96
Figura 17 Depósitos coluviales Qda. Molinetes	97
Figura 18 Roca Intrusiva – Sector Cerro Gigantes	99
Figura 19 Comparación del pH vs caudal en bocaminas.....	103
Figura 20 Correlación del TDS y CE para la primera campaña	118
Figura 21 Correlación del TDS y CE para la segunda campaña	118
Figura 22 Comparación de los metales totales y los metales disueltos.	122



Figura 23 Comparación de los metales totales y los metales disueltos.	123
Figura 24 Diagrama Piper para la época de avenida	140
Figura 25 Diagrama Piper para la época de estiaje.....	141
Figura 26 Diagrama Durov para la época de avenida.....	143
Figura 27 Diagrama Durov para la época de estiaje.....	143
Figura 28 Comparación de iones mayoritarios por época para la estación R49899-08.	145
Figura 29 Diagramas Mifflin para la época de avenida.....	146
Figura 30 Diagramas Mifflin para la época de estiaje.	147
Figura 31 Diagrama de Gibbs para aniones – Primera campaña.....	149
Figura 32 Diagrama de Gibbs para cationes – Primera campaña.....	149
Figura 33 Diagrama de Gibbs para aniones – Segunda campaña.....	149
Figura 34 Diagrama de Gibbs para cationes – Segunda campaña.....	150
Figura 35 Diagrama Giggenbach para la época de avenida.	151
Figura 36 Diagrama Giggenbach para la época de estiaje.....	151
Figura 37: Concentración de As en sedimentos comparado con el D.S. N° 002-2013- MINAM.....	152
Figura 38: Análisis espacial del arsénico en agua y sedimento.....	158



ACRÓNIMOS

ECA:	Estándares de Calidad Ambiental
OMS:	Organización Mundial de la Salud
MINAM:	Ministerio del Ambiente del Perú
ANA:	Autoridad Nacional del Agua
SENAMHI:	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú
MINAGRI:	Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego del Perú
UTM:	Universal Transverse Mercator
GPS:	Global Positioning System
ICP:	Plasma de acoplamiento inductivo
OES:	Espectrofotómetro de emisión óptico
EBI:	Error Balance Iónico
TDS:	Sólidos Totales Disueltos
IRHS:	Inventario de Recursos Hídricos Subterráneos
PP:	Pozo
CE:	Conductividad eléctrica
LMP:	Límites Máximos Permisibles
OD:	Oxígeno Disuelto
OH:	Hidróxido
IS:	Índice de saturación
pH:	Potencial de Hidrógeno
Cu:	Cobre
Zn:	Zinc
Se:	Selenio
Mn:	Manganeso
Fe:	Hierro
Ca:	Calcio
Mg:	Magnesio
Hg:	Mercurio
Pb:	Plomo
Cd:	Cadmio
Li:	Litio



Ba:	Bario
As:	Arsénico
Km:	Kilómetro
Hrs:	Horas
C°:	Grados centígrados
M:	Metro
Mg:	Miligramos
L:	Litro
Meq:	Miliequivalente
Ms:	Milisiemens
Ppm:	Partes por millón
μS:	MicroSiemens
%:	Porcentaje
Q-co:	Depósitos coluviales
Q-al:	Depósitos aluviales
Q-fg:	Depósitos fluvioglaciares
KsP-ch:	Fm. Chota
Kis-cr:	Fm. Crisnejas
Kp-gd:	Rocas intrusivas (Granodiorita)
Jr-pu:	Grp. Pucará
Ps-m:	Grp. Mitu
Csp – i:	Fm. Lavasen
Pali-di/gd:	Intrusivo Pataz (Dioritas y granodioritas)
Pe – cm:	Complejo Marañon



RESUMEN

El presente trabajo de investigación fue ejecutado en el ámbito del centro poblado de Llacuabamba del distrito de Parcoy – La Libertad, donde se realizó dos (02) campañas de trabajos de campo (estiaje y avenida), cabe precisar que el área de estudio presenta un área total de 55.2km². La geología local contempla a la Fm. Lavasen (Andesita y basalto gris oscuro), intrusivo de Pataz (dioritas y granodioritas), Complejo Marañón (filitas y esquistos) y depósitos cuaternarios. El objetivo principal fue caracterizar la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, para lo cual se empleó una metodología desde un enfoque cualitativo y cuantitativo (mixto) de tipo exploratorio secuencial, de modalidad derivativa. Los principales analitos que sobrepasan los ECAs son el arsénico y el flúor, representados por las estaciones IRHS 13.08.08-GA-05 que en la primera y segunda campaña presenta valores de 4.11 y 0.67 mg/L de arsénico respectivamente, la estación IRHS 13.08.08-PZ-06 presenta valores 0.13 y 0.65 mg/L de arsénico en la primera y segunda campaña respectivamente, la estación IRHS 13.08.08-GA-05 en la primera y segunda campaña presenta valores de 1.74 y 1.64 mg/L de flúor respectivamente, para la estación IRHS 13.08.08-PZ-03 presenta valores de 2.27 y 2.68 mg/L de flúor en la primera y segunda campaña respectivamente y la estación R498993-08 contienen un valor de 1.19 mg/L de flúor en la segunda campaña. Por otro lado, las estaciones IRHS 13.08.08-MA-04 y R498993-05 no tienen excedencias en ninguno de sus parámetros. Cabe precisar que el arsénico y flúor serían de origen natural (interacción agua – roca).

Palabras Clave: Calidad de aguas, Llacuabamba, hidroquímica, Límites Máximos Permisibles.



ABSTRACT

The present research work was carried out in the area of the Llacubamba population center in the Parcoy - La Libertad district, where two (02) field work campaigns were carried out (dry season and flood), it should be noted that the study area has a total area of 55.2 km². The local geology includes the Lavasen Formation (Andesite and dark gray basalt), Pataz intrusive (diorites and granodiorites), Marañón Complex (phyllites and schists) and Quaternary deposits. The main objective was to characterize the quality of surface and groundwater, for which a methodology was used from a qualitative and quantitative (mixed) approach of sequential exploratory type, of derivative modality. The main analytes that exceed the ECAs are arsenic and fluoride, represented by stations IRHS 13.08.08-GA-05 that in the first and second campaign present values of 4.11 and 0.67 mg / L of arsenic respectively, station IRHS 13.08.08-PZ-06 presents values of 0.13 and 0.65 mg / L of arsenic in the first and second campaign respectively, station IRHS 13.08.08-GA-05 in the first and second campaign present values of 1.74 and 1.64 mg / L of fluoride respectively, for station IRHS 13.08.08-PZ-03 presents values of 2.27 and 2.68 mg / L of fluoride in the first and second campaign respectively and station R498993-08 contains a value of 1.19 mg/L of fluoride in the second campaign. On the other hand, stations IRHS 13.08.08-MA-04 and R498993-05 do not have exceedances in any of their parameters. It should be noted that arsenic and fluoride would be of natural origin (water-rock interaction).

Keywords: Water quality, Llacubamba, hydrochemistry, Maximum Permissible Limits.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES

La evaluación de la calidad del agua para el consumo humano, el uso de riego de vegetales y bebida de animales es de suma importancia para el centro poblado de Llacuabamba. La caracterización nos ha permitido determinar la influencia de la actividad minera formal e informal sobre la calidad de las aguas como problema antrópico, como alteración de la calidad ambiental de forma natural, como también determinar la calidad del agua con referencia los Estándares de Calidad Ambiental y Límites Máximos Permisibles.

El presente trabajo de investigación servirá como base para tomar medidas de prevención para preservar y conservar la calidad de las aguas de las microcuencas de Parcoy, Llacuabamba y Huinchos de tal manera no llegar a tener conflictos sociales por problemas de contaminación.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El centro poblado de Llacuabamba se encuentra en una zona de intensa actividad minera formal e informal, lo cual lo expone a la alteración de la calidad de aguas, debido a que estas que afloran de las labores subterráneas y pasivos mineros discurriendo a quebradas y posteriormente son evacuados al cauce principal del río Llacuabamba. Los vertimientos en cauces naturales vienen alterando la calidad de las aguas superficiales y subterráneas; corriendo el riesgo de que las aguas del centro poblado puedan ser afectadas por aguas subterráneas de mala calidad que vienen siendo interceptadas por la actividad minera en las labores subterráneas.



Según el Ministerio del Ambiente del Perú (2022), la región de La Libertad presenta altos niveles de contaminación del agua debido a la actividad minera, lo que puede tener un impacto negativo en la calidad del agua de la zona y, por ende, en la salud de la población y en el medio ambiente. Además, la región de La Libertad es vulnerable a la escasez de agua debido a la disminución de las precipitaciones y al aumento de la temperatura, según el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI, 2022).

1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.3.1. Problema general

Primero, frente a los problemas de contaminación de las aguas en la zona del centro poblado de Llacuabamba a consecuencia de los trabajos de minería informal se planteó la siguiente interrogante: ¿Cuál es la calidad de las aguas superficiales y subterráneas en el ámbito del centro poblado de Llacuabamba del distrito de Parcoy – La Libertad?

1.3.2. Problemas específicos

El tipo de facie hidroquímica (calidad hidroquímica) generalmente depende del ion principal, este es aportado por el medio que circula el fluido, por ello se plantea la siguiente pregunta: ¿Cuál es la calidad hidroquímica o facie hidroquímica de las aguas superficiales y subterráneas de la zona del centro poblado de Llacuabamba?

Finalmente, la zona de estudio es muy conocida por el desarrollo de la minería aurífera en vetas y mantos de cuarzo los cuales están asociados con minerales sulfurosos y algunas de ellas afloran en el lugar de estudio, aparte, en



el lugar existe intrusiones que corresponden al batolito de Pataz (Dioritas y granodioritas), por esa razón se plantea la siguiente cuestión: ¿Qué relación existe entre la calidad de las aguas de abastecimiento del centro poblado con las características geológicas y mineralógicas de las formaciones geológicas que afloran en la zona?

1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La evaluación de la calidad del agua para el consumo humano, el uso de riego de vegetales y consumición de animales es de suma importancia para el centro poblado de Llacuabamba. La caracterización permitirá determinar la influencia de la actividad minera formal e informal sobre la calidad de las aguas como problema antrópico, como también problemas de contaminación natural, asimismo, se zonificarán áreas de diferente composición de aguas subterráneas, cuya información permitirá establecer medidas preventivas en bien de la conservación de los recursos hídricos locales.

El presente proyecto servirá como base para tomar medidas de prevención para preservar y conservar la calidad de las aguas de las microcuencas de Parcoy, Llacuabamba y Huinchos de tal manera no llegar a tener conflictos sociales por problemas de contaminación.

De igual modo, el presente trabajo de investigación generará información relevante para la comunidad científica, para formular futuros proyectos de investigación y aplicar nuevas tecnologías y/o estrategias en la solución de la problemática y su comportamiento en el tiempo.

1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1. Objetivo general



- Caracterizar la calidad de las aguas superficiales y subterráneas en el ámbito del centro poblado de Llacuabamba del distrito de Parcoy – La Libertad.

1.5.2. Objetivos específicos

- Determinar la calidad hidroquímica o facie hidroquímica de las aguas superficiales y subterráneas de la zona del centro poblado de Llacuabamba.
- Caracterizar la calidad de las aguas superficiales y subterráneas con relación a las características litológicas de las formaciones geológicas que afloran en la zona.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Oviedo, Moina, Naranjo, Barcos (2017) en su trabajo Contaminación por metales pesados en el sur del Ecuador asociada a la actividad minera. La obtención de metales preciosos requiere el uso de sustancias químicas y grandes volúmenes de agua en los pozos de extracción. Estos pozos contienen elementos que se encuentran en el suelo o en la mina, los cuales se combinan con los químicos y generan residuos altamente tóxicos. Los principales problemas de acidificación en la provincia de El Oro se presentan en los ríos y aguas subterráneas debido a diversas fuentes como drenajes de cunetas, corredores subterráneos, relaves, escorias, disolución oxidativa y lixiviación de sulfuros metálicos, especialmente pirita. Los ríos más afectados son el río Pindo y Puyango. Un estudio realizado por el Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE) reveló que en verano aumenta la probabilidad de que metales pesados ingresen al organismo humano y a los peces a través de los sólidos suspendidos en el agua en comparación con el invierno.

Peña y Araya (2021) en su investigación Aguas de contacto, efectos en la minería y el medioambiente. Mencionan que las “aguas de contacto mineras” En Chile, extensas áreas del territorio nacional están siendo contaminadas, y los efectos de esta contaminación son ahora permanentes, ya que no es posible modificar o recuperar las aguas afectadas. Es crucial que la humanidad reaccione



de manera rápida, ya sea implementando medidas preventivas para mitigar los efectos o llevando a cabo acciones de recuperación para evitar daños permanentes. Las aguas contaminadas por la actividad minera generan impactos negativos que no son inmediatos, sino que se acumulan con el tiempo, convirtiéndose en un problema cada vez más grave. Además, se observa una laguna legal, ya que las "aguas de contacto mineras" necesitan cumplir con los requisitos legales y reglamentarios de prevención, así como contar con un tratamiento de descontaminación especial, que actualmente no está regulado por el legislador en leyes generales o específicas. Ante esta situación, el Estado debe buscar soluciones que aborden tanto la prevención como la descontaminación de estas aguas una vez que se hayan producido los problemas.

Guzmán (2016) en su proyecto “Impactos ambientales causados por megaproyectos de minería a cielo abierto en el estado de Zacatecas, México”, “tuvo como objetivo analizar los impactos ambientales que producen los megaproyectos mineros en el estado de Zacatecas, México, en el marco del modelo de desarrollo neoliberal sobre la mercantilización del agua, los minerales, la competencia por el uso de la tierra y el agua con la producción agrícola. El tema resulta pertinente porque forma parte del análisis de la disputa territorial que confronta a empresas trasnacionales y las comunidades por el derecho y usufructo de recursos naturales que afecta a economías subdesarrolladas en México y América Latina. Asimismo, concluye en lo siguiente: La megaminería en Zacatecas ha generado diversos impactos ambientales negativos. En principio ha significado una disputa territorial y competencia con la producción agrícola respecto al acceso a la tierra en términos de superficie y al agua en términos de volumen. Así como la contaminación del suelo con los millones de toneladas de



desechos sólidos y la de fuentes de agua subterránea y superficial originados por los métodos de barrenación, molienda y lixiviación en la extracción y beneficio de la explotación minera. La instrumentación de megaproyectos extractivos en la minería en la entidad hoy se vuelven motivo central de los problemas que afectan a las comunidades rurales basadas en la producción agropecuaria, al ver destruidos sus medios de subsistencia y sus dinámicas territoriales de convivencia colectiva cotidiana. También traerá como consecuencia la destrucción de la calidad de vida de las nuevas generaciones de zacatecanos”.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Llontop (2010) En su estudio, la calidad del agua en el área de la cuenca del río Rímac-San Mateo se vio afectada por la minería. Ubicado en el curso superior del río Rímac, el distrito de San Mateo alberga operaciones mineras intensivas de diversos metales, incluidos plomo, cobre, zinc, plata, oro y antimonio. El resultado es una gran cantidad de residuos que deben ser evacuados, algunos directamente a los ríos, otros a través de vertederos y otros a través de canales. El valor promedio anual de estas emisiones supera la norma nacional de calidad ambiental del agua (Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM) Categoría IV: Protección del ambiente acuático de ríos costeros y de montaña. Por ejemplo, el límite permitido para el plomo es 0,001 mg/L, el cadmio - 0,004 mg/L y el arsénico - 0,05 mg/L. De esta manera, se puede concluir que la calidad del agua del Río Rímac se ve afectada por la minería, ya que la concentración de metales pesados excede los criterios de calidad ambiental (ECA) establecidos por la Secretaría del Medio Ambiente, D.S. No. 002-2008-MINAM, con vigencia a partir del 1 de enero de 2009.



Villanueva (2016). En su trabajo Evaluación geoquímica de las aguas subterráneas en el valle del río Piura, subcuenca Chulacanas. Universidad Nacional de Ingeniería. Afirma que en la sección A-A', que atraviesa las localidades de La Peña, Sancor, Casana y Paccha, se observa una mayor presencia de Pb (Plomo) y Cu (Cobre) en comparación con las otras secciones. Esto podría deberse a la presencia potencial de una mineralización tipo sulfuro masivo Pb-Cu-Zn en la Formación la Bocana. Por otro lado, en la sección C-C', que pasa por Yapatera y Chulucanas, se detecta una disminución en los niveles de los metales Pb, Zn, Fe y Mn en los tramos donde el agua subterránea atraviesa las rocas detríticas de la Formación Yapatera. Esta reducción se atribuye probablemente a la formación de óxidos e hidróxidos de hierro y a la posterior absorción de los metales Pb y Zn. Los metales Fe y Mn, por su parte, se encuentran en el área de estudio principalmente como óxidos e hidróxidos debido a su alta afinidad. En el tramo que abarca desde Casana hasta Paccha, se observa un aumento en la concentración de Mn, lo que provoca una saturación en el punto final de la sección. En este punto, se registra la mayor concentración de Mn en la zona de estudio, incluso superando el límite máximo permitido.

Osores, Rojas y Lara (2012) en su trabajo “Minería informal e ilegal y contaminación con mercurio en Madre de Dios: Un problema de salud pública”, “mencionan que a minería aluvial del oro que se ejecuta tanto informal como ilegalmente en el corredor minero y zonas de exclusión total para la minería en Madre de Dios, viene generando impactos directos e indirectos sobre la salud no sólo de los mineros que trabajan en condiciones de riesgo elevado a la exposición al polvo, la radiación solar excesiva, la humedad, el ruido, traumatismo mecánico vibratorio, exposición directa al mercurio especialmente en estado gaseoso



presente en los lugares de compra de oro y otros productos químicos tóxicos, accidentes laborales frecuentes, sino también sobre la población general debido a las ingentes cantidades de mercurio vertido a las fuentes de agua que son utilizadas por los poblados de toda la cuenca del río Madre de Dios, además de la destrucción indiscriminada del frágil suelo amazónico, la deforestación de sus bosques, la migración desordenada asociada al incremento de enfermedades infectocontagiosas, violencia social, trata de personas, prostitución e inseguridad alimentaria. De este modo concluyen en lo siguiente: La minería informal e ilegal constituye una actividad sumamente perniciosa para la salud humana en Madre de Dios y en el Perú en general, afectando a las poblaciones en donde se realiza la actividad extractiva, así como, a las que se encuentran en lugares distantes a la mismas. La minería informal e ilegal no repara en lo más mínimo en el cuidado del ser humano, la aplicación de normativas de seguridad ocupacional, el pago de impuestos para sostener una adecuada infraestructura sanitaria, ni en la aplicación de tecnologías óptimas de extracción, mitigación y biorremediación”.

2.1.3. Antecedentes Locales

AUDITEC S.A.C. (2011). En su trabajo Informe de diagnóstico y elaboración del plan de mitigación y mejoramiento de la calidad del agua sobre cuenca Parcoy y laguna Pias (informe primera campaña - época lluvia). Menciona que en la mayoría de los puntos de muestreo que se realizó, se observan niveles elevados de metales, lo cual se debe a dos factores principales. En primer lugar, la minería informal juega un papel importante, ya que se lleva a cabo sin ningún tipo de control ni regulación legal, lo que conlleva una inadecuada gestión de sus desechos líquidos y sólidos (como desmontes y materiales de lavado). Estos residuos son arrojados directamente al río, ubicados en los bordes de la ladera del



río o simplemente cubiertos con tierra. Durante la temporada de lluvias, este material se erosiona y termina ingresando al cuerpo de agua receptor. El segundo factor importante que influye en la presencia de metales es la geología particular de la zona analizada. Dado que la cuenca del río Parcoy es una región abundante en minerales, es lógico que haya altas concentraciones de estos elementos en el área.

Mogrovejo, Yparraguirre y Rojas en su estudio titulado "Evidencia geoquímica y geocronológica del Batolito de Pataz entre los paralelos 8°10'S - 8°17'S", mencionan que recolectaron seis muestras de rocas intrusivas para análisis en sección delgada (FA Ingenieros S.A.C., 2016). Estas rocas varían de sienita a granito, siendo este último el más común. Los granitos están principalmente formados por cristales de plagioclasas, que han sido en gran parte reemplazados por sericita y, en menor medida, por minerales arcillosos. También se encuentran feldespatos potásicos y cuarzo. Los minerales ferromagnesianos presentan un reemplazo significativo por cloritas y óxidos de hierro. Además, se detecta epidota como mineral accesorio, y las mineralizaciones metálicas están distribuidas en toda la muestra, sustituidas por óxidos de hierro a través de microfracturas. En cuanto a la granodiorita, está compuesta principalmente por cristales de plagioclasas, que también han sido fuertemente reemplazados por sericita y, en menor medida, por minerales arcillosos, junto con feldespatos potásicos y cuarzo. Los minerales ferromagnesianos muestran un reemplazo intenso por cloritas y, en menor proporción, por carbonatos. Se observan agregados cristalinos de cuarzo II que han sustituido a los feldespatos potásicos y llenan los espacios entre los minerales presentes, acompañados de cloritas, carbonatos y escasa epidota.



Díaz (2020), en su trabajo “Factores que determinan el origen de la contaminación de suelos por arsénico en la comunidad de Llacuabamba, Pataz, mediante procedimientos secuenciales y alternos”, “evalúa el origen del arsénico en los suelos del centro poblado de la comunidad campesina de Llacuabamba, que tiene una trayectoria histórica minera, donde se ha desarrollado la actividad minera desde tiempo memoriales, dejando una serie de pasivos ambientales, que han afectado la calidad del suelo. Par ello se tomaron 20 muestras del suelo para conocer la calidad de los suelos del área de estudio a una profundidad de 30 centímetros. De este modo concluyen en lo siguiente: Los factores más importantes que regulan la disponibilidad del arsénico en el suelo están relacionados a las características propias del suelo, siendo el más importante el potencial de hidrogeno, seguido de la textura con el contenido de arcilla, que favorece el estado de oxidación del metaloide y que su movilidad es regulada por el pH, el intercambio catiónico de la reducción redox, que han ocasionado que el arsénico esté presente en el suelo, sin embargo en la zona rural la materia orgánica, la textura, los coloides y la humedad, han tenido un papel importante en la reducción, precipitación y disminución de la cantidad de arsénico en el suelo, por ello en estos suelos el contenido del elemento contaminante es bajo”.

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Hidroquímica

La hidroquímica es la rama de la ciencia que estudia la composición y las propiedades químicas de las aguas naturales, incluyendo ríos, lagos, aguas subterráneas y océanos. Este campo abarca el análisis de la solubilidad de diferentes minerales, la interacción química entre el agua y su lecho rocoso, así



como la influencia de procesos biológicos y antropogénicos (causados por humanos) en la composición química del agua. (Eriksson, 2012).

La hidroquímica juega un papel crucial en la comprensión de procesos tales como el ciclo hidrológico, la dinámica de contaminantes en cuerpos de agua, la distribución y movilidad de elementos traza y nutrientes, y la formación y calidad de fuentes de agua potable. Asimismo, es fundamental para la gestión de recursos hídricos, el diseño de tratamientos de aguas residuales, la minería, la exploración geotérmica, y la evaluación de impacto ambiental de proyectos y actividades humanas. Entre los conceptos clave que se estudian en hidroquímica se encuentran el pH, la conductividad eléctrica, la alcalinidad, la dureza del agua, y la concentración de iones específicos como cloruros, sulfatos, nitratos, y metales pesados. Estos parámetros son indicativos de la calidad del agua y son esenciales para determinar su idoneidad para diversos usos, incluyendo consumo humano, agricultura, y procesos industriales. (Eriksson, 2012).

2.2.2. Composición del agua como sustancias disueltas

“Las sustancias disueltas en el agua generalmente se presentan en forma iónica, ya sea eléctricamente positiva (cationes) o negativa (aniones), en la mayoría de los casos con una (monovalentes) o dos (divalentes) cargas eléctricas (Mariño & Garcia, 2018, p.7). Menos abundantes son los iones complejos (p.e: CaF^+ o $\text{Al}(\text{OH}_2)_6^{3+}$) y las sustancias disueltas en forma molecular neutra, como los gases (CO_2 y O_2) y la sílice (en forma de H_4SiO_4^0). Otra parte de las sustancias sólidas en agua se encuentran como coloides o partículas en suspensión, por ejemplo, los óxidos de Hierro, Aluminio y Manganeseo y la materia orgánica”. (Mariño & Garcia, 2018, p.7).

En las aguas subterráneas naturales, la mayor parte de las sustancias disueltas se encuentra en forma iónica. Algunos de estos iones son casi siempre constantes y su conjunto representa la mayor parte de los iones disueltos; a estos se les conoce como iones fundamentales, que servirán de base para muchos aspectos químicos e hidrogeoquímicos. la Tabla 1 muestra estos iones fundamentales.

Tabla 1

Principales aniones y cationes presentes en el agua

Aniones	Cationes
Cloruro (Cl^-)	Sodio (Na^+)
Sulfato (SO_4^-)	Calcio (Ca^+)
Bicarbonato (CO_4H^-)	Magnesio (Mg^+)
nitrato (NO_3^-)	Potasio (K^+)
Carbonato (CO_3^-)	Hierro Ferroso (Fe^{++})

Nota: Modificado de (Custodio & Llamas, 1991).

Es común que los aniones nitrato (NO_3^-) y carbonato (CO_3^{2-}), así como el catión potasio (K^+), se incluyan en el grupo de iones fundamentales, a pesar de que su proporción generalmente sea baja. A veces, también se considera el ion ferroso (Fe^{2+}). En cuanto a los gases, el anhídrido carbónico (CO_2) y el oxígeno disuelto (O_2) son considerados fundamentales, aunque raramente se analizan en aguas subterráneas.

“La concentración total de cada elemento resulta de la sumatoria de sus distintas especies estables, según las condiciones fisicoquímicas de la solución. En el caso de los iones libres, dicha especiación puede deberse a su disociación total o parcial (CO_3^{2-} y HCO_3^-), o a la coexistencia de iones con diferente estado



de oxidación (Arsénico y compuesto del Nitrógeno) (Mariño & Garcia, 2018, p.8). Además, debe contabilizarse su participación en la formación de iones complejos y pares iónicos”. (Mariño & Garcia, 2018, p.8).

“La concentración de las sustancias disueltas comúnmente se expresan con relaciones de tipo peso/volumen o peso/peso, cuyas unidades más usuales son miligramos por litro (mg/l), que indica el peso de los solutos disueltos en un volumen de 1 litro de solución, o partes por millón (ppm) que se refiere al peso de los solutos (en mg) disueltos en 1 kg de solución (Mariño & Garcia, 2018, p.8). Para aguas de salinidad moderada, ambas unidades son equivalentes, ya que, si la densidad del agua es igual o próxima a 1 g/cm^3 , el peso de 1 litro de solución es aproximadamente de 1 kg” (Mariño & Garcia, 2018, p.8).

Las sustancias no están presentes en iguales cantidades ni con la misma frecuencia, lo que permite clasificarlas en constituyentes principales, secundarios, menores y de traza.

- **Los constituyentes principales** “suelen estar siempre presentes en las aguas subterráneas, con concentraciones que varían entre 1 y 1,000 ppm. En el grupo de los cationes se encuentran el sodio, calcio y magnesio, mientras que en el de los aniones están los cloruros, sulfatos y bicarbonatos. Además, la sílice también se incluye en este grupo, aunque no se presenta en forma iónica” (Alfaro, Santos, & Castaño, 2006, p.169).
- **Los constituyentes secundarios** “aparecen con menor frecuencia y en concentraciones que oscilan entre 0.01 y 10 ppm. En el grupo de los cationes se encuentran el hierro, estroncio y potasio; mientras que en el de



los aniones están los carbonatos, nitratos y fluoruros” (Alfaro, Santos, & Castaño, 2006, p.169).

- *Los constituyentes menores* “aparecen ocasionalmente en las aguas subterráneas, con concentraciones que generalmente oscilan entre 0.0001 y 0.1 ppm. Algunos de estos elementos son: antimonio, aluminio, arsénico, bario, bromo, cadmio, cromo, cobalto, cobre, germanio, yodo, plomo, litio, manganeso, molibdeno, níquel y zinc” (Alfaro, Santos, & Castaño, 2006, p.169).
- *Los constituyentes traza* “raramente se encuentran en las aguas subterráneas, con concentraciones inferiores a 0.001 ppm. Algunos de estos elementos son: berilio, bismuto, cerio, cesio, estaño, galio, oro, indio, lantano, niobio, platino, radio, rutenio, escandio, plata, talio, torio, tungsteno, iterbio y zirconio” (Alfaro, Santos, & Castaño, 2006, p.169).

2.2.3. Características químicas del agua

Químicamente las aguas superficiales y subterráneas presentan los siguientes iones en forma de cationes y aniones:

2.2.3.1. Cloruro (Cl⁻)

“Si se exceptúan las evaporitas y rocas de origen marino, las rocas por lo común presentan escasa proporción de cloruro. (Mariño & García, 2018, p.29). El agua de lluvia puede ser una fuente importante, especialmente en zonas próximas a la costa y cuando se concentra por ET (Mariño & García, 2018, p.29). Es un ion conservativo, lo que le da un carácter de trazador casi ideal. Su concentración en aguas subterráneas es muy variable pero dada la elevada solubilidad de sus sales, puede alcanzar



concentraciones muy altas (Mariño & García, 2018, p.29). En salmueras naturales, próximas a la saturación de NaCl, puede llegar a casi 200.000 mg/l (Mariño & García, 2018, p.29). El agua de mar contiene alrededor de 20.000 mg/l. Su presencia en concentraciones elevadas (más de 300 mg/l) es notable en el sabor del agua. Los contenidos elevados son perjudiciales para muchas plantas” (Mariño & Garcia, 2018, p.29).

2.2.3.2. Sulfato (SO_4^{-2})

“La disolución de sales sulfatadas (yeso y anhidrita fundamentalmente) representa el aporte más importante. También procede del lavado de terrenos formados en ambiente marino, de la oxidación de sulfuros y de la descomposición de sustancias orgánicas. Está sujeto a procesos de reducción, especialmente en presencia de bacterias y materia orgánica. En aguas dulces, la concentración normal de sulfato puede variar entre 2 y 150 mg/l. En aguas salinas puede llegar a 5.000 mg/l y en salmueras puede alcanzar hasta 200.000 mg/l. Otorga al agua un sabor amargo, puede producir efectos laxantes (asociado a Mg) y perjudica la resistencia de hormigón y cemento” (Mariño & García, 2018, p.30).

2.2.3.3. Bicarbonato (HCO_3^-) y Carbonato (CO_3^{-2})

“La disolución de CO_2 (atmosférico y edáfico) y de calizas y dolomías son las fuentes principales. Están sujetos a procesos de disolución–precipitación de sales poco solubles con las que el agua alcanza rápidamente una condición de saturación. En aguas con pH inferior a 8,3 la especie carbonatada dominante es el ion bicarbonato, cuya concentración suele variar entre 50 y 400 mg/l, aunque puede alcanzar



valores de hasta 800 mg/l. Son responsables de la alcalinidad del agua y limitantes del uso para riego. Sodio (Na^+): Es liberado por la meteorización de silicatos y la disolución de rocas sedimentarias de origen marino y depósitos evaporíticos (NaCl). Otra fuente importante la constituye los aportes de agua de mar (intrusión marina). Las sales son altamente solubles, pero puede ser adsorbido en arcillas de elevada capacidad de cambio catiónico, que lo intercambian con calcio provocando una disminución de la dureza de las aguas. La presencia de sodio en aguas naturales es muy variable pudiendo alcanzar hasta 100.000 mg/l en zonas evaporíticas; sin embargo, raramente sobrepasa 150 mg/l, en aguas dulces. Determina el peligro de sodificación del agua” (Mariño & García, 2018, p.30).

2.2.3.4. Calcio (Ca^{+2})

“Participa en la composición de varios minerales petrogenéticos, por lo que está presente en rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias. En estas últimas aparece como carbonatos (calcita, aragonita y dolomita) o sulfatos (yeso y anhidrita). Los controles de su concentración son el equilibrio carbonático y el intercambio iónico. La concentración varía entre 10 y 250 mg/l, en aguas dulces mientras que en aguas de terrenos yesíferos pueden llegar a 600 mg/l y en salmueras hasta 50.000 mg/l. Junto con el magnesio es responsable de la dureza del agua y produce incrustaciones” (Mariño & García, 2018, p.31).



2.2.3.5. Magnesio (Mg^{+2})

“Procede de la disolución de rocas carbonatadas (dolomías), evaporitas marinas y de la alteración de silicatos ferromagnesianos. Los procesos de intercambio iónico influyen en su concentración, siendo retenido con preferencia al calcio. En aguas naturales no suele sobrepasar los 40 mg/l. En terrenos calcáreos pueden superar los 100 mg/l y en terrenos evaporíticos pueden alcanzarse valores de 1.000 mg/l. Junto con el calcio es responsable de la dureza del agua y tiene efectos laxantes similares al sulfato” (Mariño & Garcia, 2018, p.31).

2.2.3.6. Potasio (K^{+2})

“Proviene de la meteorización de los feldespatos potásicos y de la solubilización de depósitos de evaporitas. Tiende a ser fijado casi irreversiblemente en procesos de formación de arcillas y de adsorción en la superficie de minerales con alta capacidad de intercambio iónico. En aguas subterráneas no suele sobrepasar los 10 mg/l, a excepción de algunas salmueras. Es un nutriente vital para las plantas” (Mariño & Garcia, 2018, p.31).

2.2.3.7. Nitratos (NO^{-3}) y Nitritos (NO^{-2})

“Los compuestos del nitrógeno pueden estar presentes en las aguas subterráneas por la oxidación bacteriana de materia orgánica y la disolución de rocas, lo que ocurre raramente, ya que sólo se presenta como elemento minoritario. El Nitrógeno puede aparecer en forma de NH_3 , NH_4 + que, por oxidación, pueden transformarse en NO^{-2} y, finalmente en



NO^{-3} que es la forma más usual y estable. Los procesos de oxidación-reducción están influenciados por fenómenos biológicos (bacterias nitrobacter y nitrosomonas). El ión amonio y el amoniaco libre aparecen sólo como trazas en las aguas subterráneas naturales, aumentando su concentración cuando el medio es fuertemente reductor. La presencia de amonio en cantidad significativa en el agua se considera como indicador de probable contaminación reciente. El ión nitrito puede estar presente en las aguas bien como consecuencia de la oxidación del NH_3 o como resultado de la reducción de los nitratos. Su presencia en el agua puede ser una evidencia de contaminación reciente, dada su inestabilidad. En condiciones naturales, la concentración de nitratos en aguas subterráneas no debería exceder de 10 mg/l, pero en aguas contaminadas puede alcanzar valores cercanos o superiores a 200 mg/l. Valores mayores pueden indicar contaminación por actividades urbanas, industriales y ganaderas y por prácticas de fertilización intensiva” (Mariño & Garcia, 2018, p.11).

2.2.3.8. Sílice (H_4SiO_4 , SiO_2)

“Procede mayoritariamente de la meteorización por hidrólisis de feldspatos y silicatos en general. El cuarzo o la sílice amorfa, de baja solubilidad, no son fuentes significativas de la sílice en el agua. Aunque la sílice disuelta suele representarse como SiO_2 , en la mayoría de las aguas naturales, aparece como H_4SiO_4 que no comienza a que dissociarse hasta valores de pH superiores a 9” (Mariño & Garcia, 2018, p.11).



2.2.3.9. Fluoruro (F^-)

“Su fuente probable es la hidrólisis de vidrio volcánico y de ciertos minerales de las rocas ígneas básicas. Su solubilidad está controlada por el calcio, por lo que es más abundante en aguas blandas. Su concentración es frecuentemente menor a 1 mg/l, aunque suele alcanzar valores mayores en determinados ambientes hidrogeológicos, como la llanura chacopampeana. Juega un papel importante en la preservación de la dentadura, tanto por exceso como por déficit. Valores elevados pueden dar lugar a problemas óseos” (Mariño & Garcia, 2018, p.32).

2.2.3.10. Arsénico (As)

“El origen natural más importante deriva de los minerales sulfurosos (Oropimente, Rejalgar, Arsenopirita y Enargita). También se le atribuye un origen similar al fluoruro, a partir de materiales volcánicos, y por desorción desde oxihidróxidos de hierro. Se presenta en estado trivalente y pentavalente, según el Eh del agua. Condiciones oxidantes junto con pH y alcalinidad elevados favorecen su movilización. Su concentración es frecuentemente menor a 0,01 mg/l, aunque suele alcanzar valores mayores en determinados ambientes hidrogeológicos, presentes en varias provincias argentinas, varios países de Sudamérica y Bangladesh. Es un tóxico de acción aguda y crónica (carcinógeno)” (Mariño & Garcia, 2018, p.33).

2.2.3.11. Boro (B)

“Es un elemento esencial en pequeñas cantidades para el crecimiento de las plantas; mientras que en concentraciones altas tiene una



elevada toxicidad para ciertos cultivos. Procede de la alteración de rocas ígneas, gases volcánicos, terrenos evaporíticos, detergentes y aguas residuales” (Mariño & Garcia, 2018, p.33).

2.2.3.12.Fósforo (P)

“En las aguas naturales se encuentra en como ortofosfato (PO_4^{3-}). Al igual que el nitrato, es un nutriente esencial para las plantas, pero se encuentra en concentraciones mucho menores que éste en las aguas. Tiene una acusada tendencia a formar iones complejos y compuestos de baja solubilidad con un extenso número de metales y también a ser adsorbido por minerales de la arcilla. Las principales fuentes de fosfato se asocian a la alteración de rocas ígneas o sedimentarias marinas, a los fertilizantes fosfatados, a las aguas residuales de origen urbano (detergentes) y ganadero” (Mariño & Garcia, 2018, p.33).

2.2.3.13.Hierro (Fe)

“El hierro en el agua suele encontrarse como Fe^{+2} , aunque también puede presentarse en formas como Fe^{+3} , $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ y $\text{Fe}(\text{OH})^+$, dependiendo del pH, el contenido de oxígeno y la presencia de otros iones como carbonatos, bicarbonatos y sulfatos. Su concentración en el agua está influenciada por procesos de equilibrio químico, como la oxidación-reducción y la precipitación-disolución de hidróxidos, carbonatos y sulfuros. Además, se ve afectada por la formación de complejos, especialmente con materia orgánica, y por la actividad metabólica de animales y plantas. Las concentraciones de hierro pueden variar entre 1 y



10 mg/l, aunque lo habitual es que se encuentren por debajo de 0,1 mg/l”
(Mariño & Garcia, 2018).

2.2.4. Características físicas del agua

2.2.4.1. Color

“La capacidad de absorber ciertas radiaciones del espectro visible se mide en relación con un estándar arbitrario de $\text{Cl}_3\text{Co} + \text{Cl}_6\text{PtK}_2$. Este valor es semicuantitativo y se expresa en ppm de Pt-Co o simplemente en ppm de Pt. Generalmente, esta capacidad está relacionada con la presencia de materiales orgánicos derivados de formaciones carbonosas o suelos vegetales. El agua pura, en grandes cantidades, presenta una tonalidad azulada. Si contiene hierro (Fe), puede adquirir un color rojizo, mientras que la presencia de manganeso (Mn) la vuelve negra. La presencia de H_2S le da un tono azulado, y los ácidos húmicos tiñen el agua de amarillo”.
(Alfaro, Santos, & Castaño, 2006).

2.2.4.2. Materia en suspensión

“El contenido de materiales sedimentables o retenidos por un filtro se mide en ppm o cc/litro, según el método utilizado, lo que hace difícil su conversión, ya que ambos valores dependen de diversas circunstancias. Las aguas subterráneas generalmente no contienen materia en suspensión, salvo en casos de circulaciones kársticas o captaciones mal desarrolladas, donde pueden arrastrarse partículas. En aguas subterráneas, este contenido suele ser inferior a 1 ppm. Para medirlo, se puede recoger el sedimento en un decantador aforado o pesar el residuo que queda en el filtro tras secarlo.



El primer método se puede realizar fácilmente en el campo” (Custodio & Llamas, 1991).

2.2.4.3. Turbidez

La dificultad de un agua para transmitir la luz indica su contenido de sustancias coloidales y partículas en suspensión muy finas, que son difíciles de sedimentar y filtrar. Al pasar la luz a través del agua, esta se dispersa debido al efecto Tyndall (Custodio & Llamas, 1991).

2.2.4.4. Sabor

“El sabor del agua es una evaluación organoléptica subjetiva que resulta importante para el agua potable. Las aguas que contienen más de 300 ppm de Cl^- tienen un sabor salado, mientras que aquellas con más de 400 o 450 ppm de SO_4^{2-} presentan un sabor salado y amargo. Además, el agua con alta concentración de CO_2 libre tiene un sabor picante, entre otros ejemplos”. (Custodio & Llamas, 1991).

2.2.5. Características fisicoquímicas del agua

2.2.5.1. Concentración de hidrogeniones, pH

“Indica la concentración del ion Hidrógeno en solución, pero en relación de proporcionalidad inversa, ya que se expresa como el logaritmo decimal negativo de dicha concentración. En las aguas naturales se mantiene entre 6,5 y 8,5, aunque en situaciones naturales excepcionales puede alcanzar valores extremos de 3 (drenaje ácido) y 11 (acuíferos cársticos). Es una variable reguladora del equilibrio del sistema carbonatado, y consecuentemente de la alcalinidad del agua, y junto con el



potencial de óxido-reducción (Eh) define la estabilidad de las especies iónicas. Es fácilmente alterable por lo que su determinación debe hacerse en el momento de la toma de la muestra. La medida más confiable es la que se obtiene con equipos potenciométricos (voltímetros) que detectan la corriente que se establece, a través de un vidrio polarizable, entre dos soluciones con distinta concentración de hidrógeno, que son el agua cuyo pH se quiere conocer y la contenida en el electrodo de referencia” (Mariño & Garcia, 2018, p.9).

“El pH aumenta en un 8 % por cada grado Celsius cuando la temperatura sube, por lo que debe expresarse en referencia a una temperatura específica, como 18°C o 25°C, para ser más preciso” (Custodio & Llamas, 1991).

2.2.5.2. Temperaturas

“Es muy poco variable, ya que depende del gradiente geotérmico, y en consecuencia para muestras obtenidas a profundidades de hasta 100 metros deberían esperarse valores de hasta 3°C por encima de la temperatura media anual del aire. Es un parámetro importante, especialmente cuando la concentración de un gas (p.e: CO₂) influye en la solubilidad de determinadas sustancias (p.e. CaCO₃). Debe medirse durante la toma de la muestra y su estabilización es un indicador de la representatividad de la muestra. La medición puede realizarse con termómetros de mercurio o dispositivos potenciométricos basados en termistores (materiales cuyas propiedades eléctricas varían con la temperatura)” (Mariño & Garcia, 2018, p.9).



2.2.5.3. Conductividad eléctrica

“Capacidad del agua para conducir la electricidad, como consecuencia de su contenido iónico (Mariño & Garcia, 2018, p.9). Se mide mediante equipos potenciométricos que registran en pasaje de corriente eléctrica a través del agua entre dos electrodos cuya sección y separación son convencionales. La variación de temperatura modifica notablemente la lectura, por lo que la mayoría de los conductímetros realizan una compensación automática a la temperatura de referencia (25 °C). La conductividad eléctrica es directamente proporcional a las variables anteriores y puede igualarse al residuo seco aplicando un coeficiente que debe determinarse empíricamente para cada lugar” (Mariño & Garcia, 2018, p.9).

2.2.5.4. Total de sólidos disueltos (mg/l)

“Se obtiene por sumatoria del peso de todas las sustancias disueltas en el agua, sean o no volátiles. En todos los casos es una aproximación al valor verdadero, tanto más fidedigna cuanto más completo sea el análisis de laboratorio, es cuando mayor número de determinaciones se hayan realizado. En sentido amplio, se suele hacer referencia a esta variable con el término salinidad” (Mariño & Garcia, 2018, p.9).

2.2.5.5. Alcalinidad

“Indica la capacidad de una solución para neutralizar ácidos. El agua se comporta como un sistema buffer o tampón, gracias a la presencia de los iones carbonato y bicarbonato, aunque también contribuyen otros ácidos débiles y orgánicos. El Título Alcalimétrico (TA) mide el consumo



de un ácido débil (generalmente ácido nítrico o sulfúrico) necesario para bajar el pH inicial del agua hasta un valor de 8,3, mientras que el Título Alcalimétrico Completo (TAC) hace lo propio hasta lograr un pH de 4,5. Entonces, cuando el pH del agua es menor a 8,3, TA es igual a cero y TAC, multiplicada por 1,22, equivale a la concentración de bicarbonato. Los valores usuales de TAC varían entre 100 y 500 mg/l de CaCO_3 , mientras que los de TA pueden llegar a 10 mg/l de CaCO_3 ” (Mariño & Garcia, 2018, p.9).

2.2.5.6. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO en mg/l)

“Es la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para oxidar (estabilizar) la materia orgánica biodegradable en condiciones aeróbicas. Se mide durante un periodo de incubación de cinco días, durante el cual la muestra se mantiene a temperatura constante (20°C), luego de la siembra de microorganismos y el agregado de una solución de nutrientes para los mismos (Mariño & Garcia, 2018, p.10). Este parámetro, al igual que el anterior, se determina usualmente en aguas superficiales y efluentes de distinto origen y se lo considera un indicador de contaminación” (Mariño & Garcia, 2018, p.10).

2.2.5.7. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO en mg/l)

“Mide la capacidad del agua para consumir Oxígeno por la presencia de compuestos químicos oxidables (materia orgánica, Fe^{+2} , Mn^{+2} , NH_4^- , etc.) y se valora mediante un agente oxidante fuerte, por lo general dicromato de potasio, en un medio ácido y alta temperatura” (Mariño & Garcia, 2018, p.10).



2.2.5.8. Dureza (mg/l)

“Es proporcional a la concentración de los cationes calcio y magnesio, a los que se suma el efecto secundario de algunos iones metálicos (Fe, Mn, Cu, etc.). Se mide por valoración complexométrica con ácido etilendiaminotetraacético (EDTA). Se suele diferenciar entre dureza permanente y temporaria, representando esta última la proporción de Ca y Mg que puede combinarse con las especies carbonatadas y precipitar, disminuyendo la dureza total. Las aguas consideradas duras, aquellas que registran valores de dureza total superiores a 300 mg/l, tienden a producir incrustaciones por aumento de temperatura o disminución de presión” (Mariño & Garcia, 2018, p.10).

2.2.6. Procesos hidrogeoquímicos

“La hidrogeoquímica estudia el flujo de agua como vehículo de transporte de las características físicoquímicas, químicas e isotópicas (Custodio, 1991), constituyéndose en una disciplina fundamental para el conocimiento de los ambientes hidrogeológicos, ya que puede informar sobre los procesos naturales y/o las actividades antrópicas que influyen cualitativamente sobre un sistema hídrico. Dicho alcance le otorga un rol relevante en la comprensión de los problemas de calidad y contaminación del agua y también en la definición de algunas características hidrogeológicas (recarga, tiempos de residencia, sistemas de flujo, etc.)” (Mariño & García, 2018, p.4).

“La interpretación hidrogeoquímica requiere estudiar la composición del agua (hidroquímica) e identificar y explicar su distribución espacial y variación temporal. Para ello, se apoya en una amplia gama de herramientas que incluyen



representaciones gráficas en diagramas y mapas, cálculo y valoración de relaciones iónicas, análisis de datos termodinámicos, planteo de modelos de balance de masas y, eventualmente, desarrollo de experiencias simples en laboratorio (Mariño & Garcia, 2018, p.4). El producto final de la interpretación hidrogeoquímica es un modelo conceptual que componga una representación simplificada del sistema, donde las variaciones espaciales de la composición del agua se explican a través de un conjunto de procesos modificadores que actúan sobre una solución inicial (p.e: agua de lluvia)” (Mariño & Garcia, 2018, p.4).

2.2.6.1. Disolución

“El grado de disolución en el caso de la interacción mineral-agua depende de los siguientes parámetros: solubilidad, concentración del mineral en el agua, presión y temperatura que posea el medio circundante. Dentro de los minerales más solubles, se encuentran la calcita, dolomita, yeso, halita y silvita, que sirven como fuente de aporte de iones mayoritarios; mientras que los silicatos y rocas insolubles dan lugar a los iones minoritarios o elementos traza. Los gases más comunes en este proceso son nitrógeno, argón, oxígeno, helio, dióxido de carbono, amonio, metano y sulfuro de hidrógeno” (Villanueva, 2023).

2.2.6.2. Disolución de gases

“El agua es bien conocida como disolvente natural e incluso puede disolver los gases de la atmósfera como el oxígeno. La solubilidad que tendrán estos gases en agua dependerá de varios factores, entre ellos, la presión y la temperatura. Por medio de la ley de Henry, se puede modelar la disolución de los gases, por ejemplo, el CO_2 ”:



$$p\text{CO}_2 = D(\text{H}_2\text{CO}_3)$$

Donde:

$p\text{CO}_2$: es la presión parcial del dióxido de carbono.

D : es el coeficiente de difusión a una temperatura dada.

H_2CO_3 : es la representación de la molécula de gas disuelta.

2.2.6.3. Disolución de líquidos

“Es poco común que el agua entre en contacto natural con otros líquidos. Un caso notable es el del agua en contacto con petróleo, donde la solubilidad es extremadamente baja y el petróleo flota sobre el agua. Entre ambas fases, se produce una distribución de sales proporcional a las distintas solubilidades. Con agitación, es posible la formación de emulsiones más o menos estables, dependiendo de la presencia de agentes tensoactivos naturales. En un sentido más amplio de la disolución de líquidos, se puede considerar el caso de dos aguas diferentes que entran en contacto. Bajo condiciones de flujo laminar, pueden tardar mucho en mezclarse completamente, lo que permite que una corriente de agua dulce se mantenga en el mar a lo largo de grandes distancias, o que el agua de un afluente viaje dentro del río principal por un largo tramo sin perder su individualidad. De manera similar, una alteración química en un acuífero puede tardar mucho en desaparecer. En estos casos, la difusión molecular y la dispersión juegan un papel fundamental. Además, cuando se mezclan



aguas, puede ocurrir la precipitación de sustancias disueltas si hay incompatibilidades entre ellas” (Custodio & Llamas, 1991).

2.2.6.4. Disolución de sólidos

“El agua tiene la capacidad de disolver muchas sustancias sólidas naturales. Algunos minerales son muy poco solubles y solo se encuentran en pequeñas cantidades disueltas, mientras que otros, como el cloruro de sodio, tienen una alta solubilidad y pueden alcanzar concentraciones de varios cientos de gramos por litro. Las sustancias disueltas en la naturaleza suelen estar en forma iónica, aunque el proceso de disolución puede ser complejo. Estos procesos están controlados por la ley de acción de masas, y la saturación ocurre cuando se alcanza el producto de solubilidad. La solubilidad en agua pura depende principalmente de la temperatura y, en menor medida, de la presión. En general, la solubilidad tiende a aumentar con la temperatura, aunque existen excepciones. Por ejemplo, la solubilidad del cloruro de sodio (NaCl) varía muy poco con la temperatura, mientras que la del sulfato de sodio (Na₂SO₄) disminuye a medida que la temperatura aumenta. La solubilidad de un sólido en agua que contiene otras sustancias disueltas se ve afectada principalmente por el ion común y, en menor medida, por el efecto de la fuerza iónica” (Custodio & Llamas, 1991).

2.2.6.5. Intercambio iónico

“El intercambio catiónico es responsable de la química inorgánica del suelo, la cual está asociada a los coloides presentes en los suelos. Estos incluyen las arcillas como a la materia orgánica. Los coloides son



partículas muy pequeñas con grandes áreas superficiales por unidad de volumen o peso. Debido a que las partículas poseen una carga neta negativa, atraen a los iones de carga positiva, como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} . Por lo tanto, se puede inferir que la capacidad de intercambio catiónico es igual a la carga total negativa en las partículas del suelo. Además, una estimación de la capacidad de intercambio catiónico de los suelos es mediante la cantidad de materia orgánica en estos, así como por la cantidad y el tipo de arcillas que presenten. Los minerales con mayor potencial de intercambio iónico son la caolinita, montmorillonita, clorita, illita, vermiculita y zeolita”.

2.2.6.6. Índice de saturación

“Este parámetro indica qué tan alejado se encuentra el sistema del equilibrio con respecto a la formación de cierto mineral; por lo tanto, indicará si el mineral en cuestión continuará disuelto, precipita o si la concentración permanece constante”.

$$IS = \text{Log} \frac{a_C^c a_D^d}{K_{ps}} = \text{Log} \frac{IAP}{K_{ps}} = \text{Log} \Omega$$

Donde:

K_{ps}	Producto de solubilidad
Ω	Estado de saturación
$a_C^c a_D^d$	Son las actividades de los iones del mineral estudiado, obtenidas a partir del análisis químico del agua



IAP Es el producto de las actividades de las especies presentes.

Por lo cual dependiendo del valor de IS indicará el estado de la solución:

$IS = 0$ se encuentra en equilibrio el mineral

$IS > 0$ se indica una sobresaturación

$IS < 0$ se define una condición de instauración.

“Como los diferentes tipos de agua normalmente no están en equilibrio, se determina su estado de saturación con respecto a los índices de saturación de los minerales. Este estado de saturación es fundamental para poder identificar en qué sentido ocurre la reacción al interactuar agua roca en un acuífero”.

2.2.6.7. Solubilidad y la constante de equilibrio

“Cuando el agua interactúa con minerales, inicia el proceso de disolución, el cual prosigue hasta que se alcanza un equilibrio en la concentración en el agua o los minerales se consumen por completo. La solubilidad de un mineral se refiere a la cantidad de masa que puede disolverse en un volumen determinado de solución bajo ciertas condiciones. Las solubilidades de los minerales en el agua subterránea y su transporte a lo largo del flujo pueden cambiar de manera significativa. Por lo tanto, dependiendo de los minerales con los que el agua haya estado en contacto durante su recorrido, puede contener solo un poco más de



sólidos disueltos que el agua de lluvia, o ser muchas veces más salada que el agua de mar” (Freeze & Cherry, 1979).

2.2.6.8. El efecto de la fuerza iónica

“La comparación entre las solubilidades de minerales en agua pura y en agua con alta concentración de sales revela que la salinidad incrementa las solubilidades. Este fenómeno se conoce como el efecto de la fuerza iónica, ya que el aumento en la solubilidad se debe a una disminución en los coeficientes de actividad provocada por la mayor fuerza iónica en la solución” (Freeze & Cherry, 1979).

2.2.7. Diagramas hidroquímicos

“Para la interpretación de los resultados se utilizarán una serie de gráficos hidroquímicos, que nos permitirá diferenciar el tipo de agua según los iones predominantes, asimismo, se utilizarán diagramas que contienen cocientes iónicos para determinar el tiempo de permanencia del agua en el subsuelo o la interacción agua – roca”. A continuación, se detallan teóricamente los diagramas que se utilizarán en el presente trabajo:

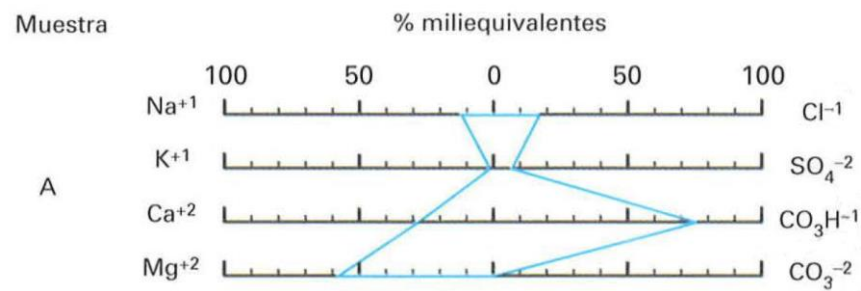
2.2.7.1. Diagramas de Stiff

“Estos diagramas están formados por una serie de líneas paralelas equidistantes, las cuales son intersectadas por una línea perpendicular. Esta línea perpendicular marca el origen de las mediciones sobre las semirrectas en las que se dividen las líneas paralelas. En la parte derecha de la línea vertical se representan los aniones (uno en cada semirrecta y en meq/L),

mientras que en la parte izquierda se muestran los cationes en las semirrectas correspondientes”. (Alfaro, Santos, & Castaño, 2006).

Figura 1

Diagrama Stiff



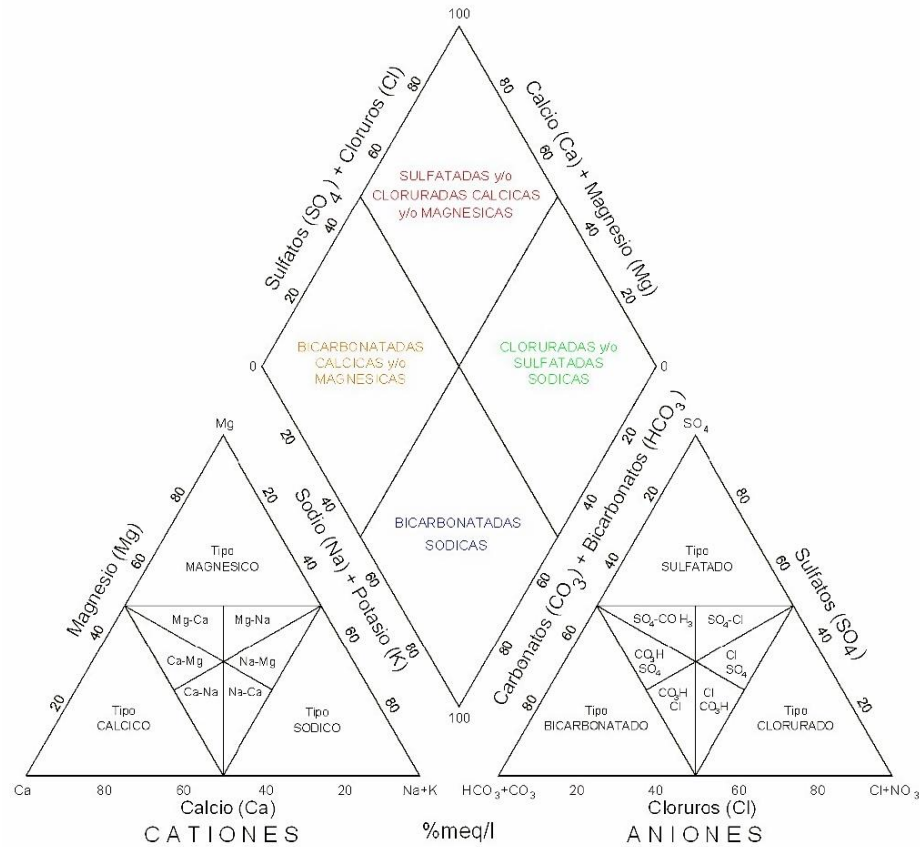
Fuente: (Alfaro, Santos, & Castaño, 2006)

“En los diagramas de Stiff, generalmente suelen representarse Cl^{-1} , SO_4^{-2} , CO_3H^{-1} , NO_3^{-1} , en la zona de los aniones, y Na^{+1} , K^{+1} , Ca^{+1} y Mg^{+1} en la de los cationes. En cada semirrecta se traza un segmento cuya longitud es proporcional a la concentración de cada ion en meq/L. Al unir los extremos de estos segmentos, se forma un polígono cuya área es proporcional al nivel de mineralización del agua. La forma de este polígono, determinada por las longitudes de los segmentos correspondientes a las concentraciones de los iones disueltos, permite identificar el tipo de agua desde un punto de vista químico (por ejemplo, clorurada, sulfatada, sódica, potásica, entre otros)” (Alfaro, Santos, & Castaño, 2006).

2.2.7.2. Diagramas de Piper

Figura 2

Diagrama Piper



Nota: Campos de las tipologías de agua en base a Cationes y Aniones mayoritarios, fuente Hill Langelier.

“El diagrama ternario de Piper-Hill-Langelier se compone de dos campos triangulares a la izquierda (catiónico) y derecha (aniónico) de un rombo central que integra ambas composiciones.

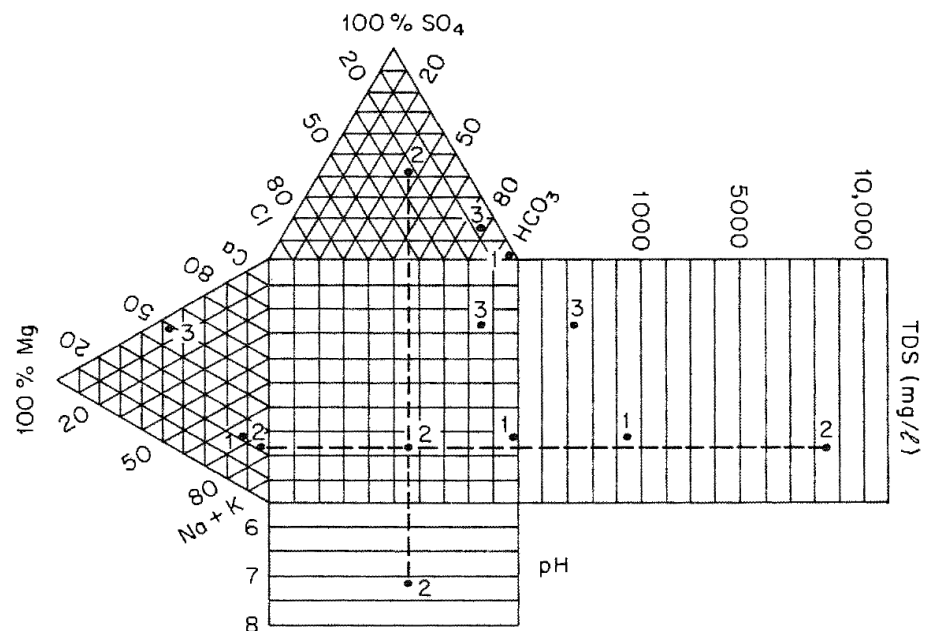
Cada lado de los triángulos lleva una escala en porcentaje de meq/l (r%) de un ion determinado y los valores se ingresan paralelamente al lado opuesto al vértice que representa el 100 %. Las proporciones relativas de cationes y aniones (generalmente los mayoritarios) fijan la posición de una

muestra en el campo triangular correspondiente y la intersección de la proyección de ambos puntos (trazada paralelamente al lado exterior de los triángulos), determina su ubicación en el rombo central” (Mariño & García, 2018, p.21).

2.2.7.3. Diagramas de Durov

Figura 3

Diagrama Durov



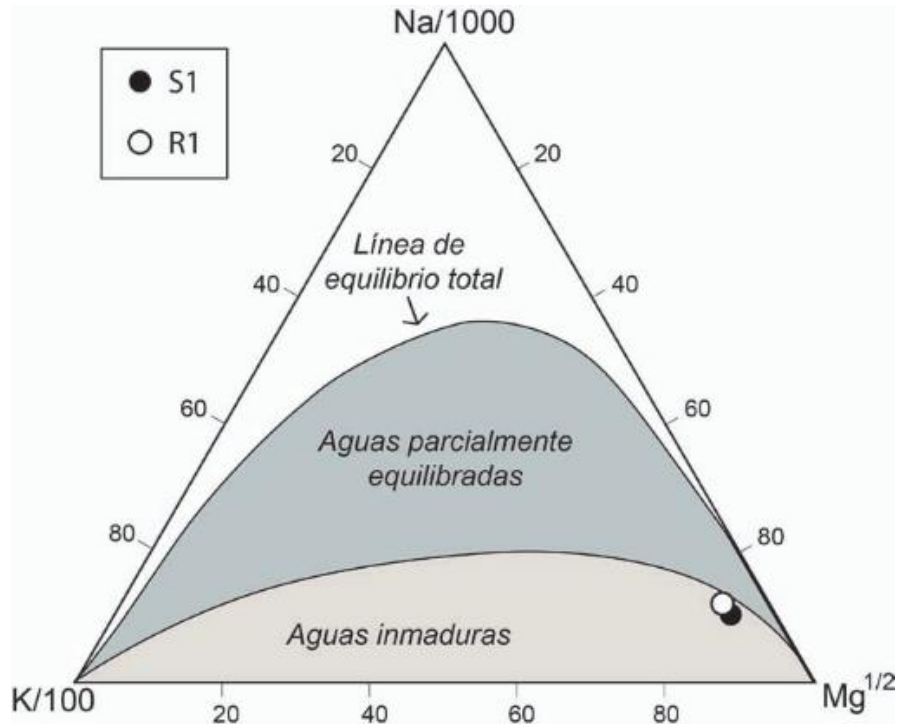
Nota: Fuente: (Freeze & Cherry, 1979)

“En estos gráficos se pueden representar múltiples análisis sin generar confusión, lo que constituye una de sus principales ventajas. Las aguas geoquímicamente similares se agrupan en áreas claramente definidas. Este diagrama incluye valores de pH y conductividad eléctrica, además de los diagramas ternarios de cationes y aniones; estos datos tienen como objetivo resaltar la acumulación de sales y su relación con el pH”.

2.2.7.4. Diagrama de Giggenbach

Figura 4

Diagrama Giggenbach



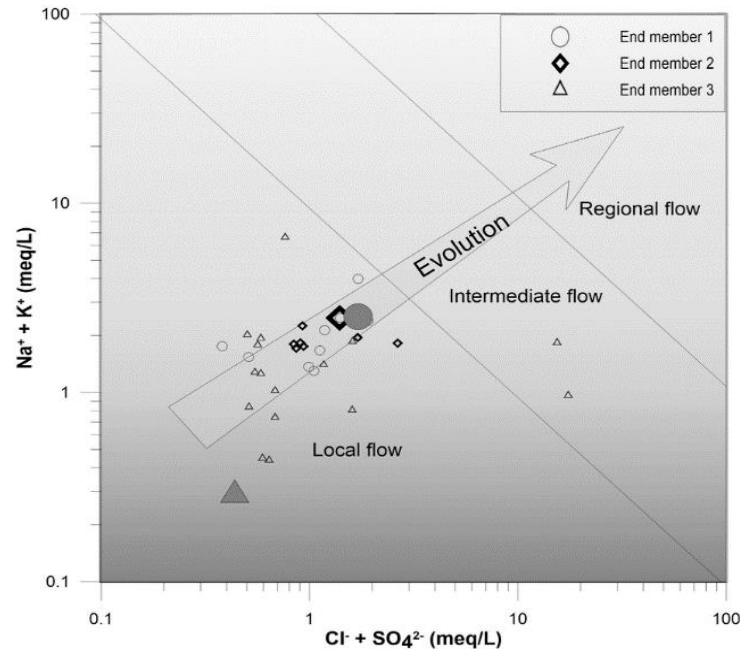
Fuente: (Blasco, Auqué, & Gimeno, 2017)

Se usan estos diagramas para ver la temperatura del reservorio y el estado de equilibrio de los fluidos, esto ayuda a reconocer aguas que han alcanzado el equilibrio en la litología, dentro de la Figura 4 se puede observar tres zonas de aguas, las cuales son equilibradas, equilibradas parcialmente y aguas inmaduras, estos equilibrios pueden ser conocidos a través de la relación Na-K-Mg, así como identificar las posibles mezclas entre las aguas superficiales y roca circundante.

2.2.7.5. Diagramas de Mifflin

Figura 5

Diagrama de Mifflin



Fuente: (Sulca, Peña, & Delgado, 2010)

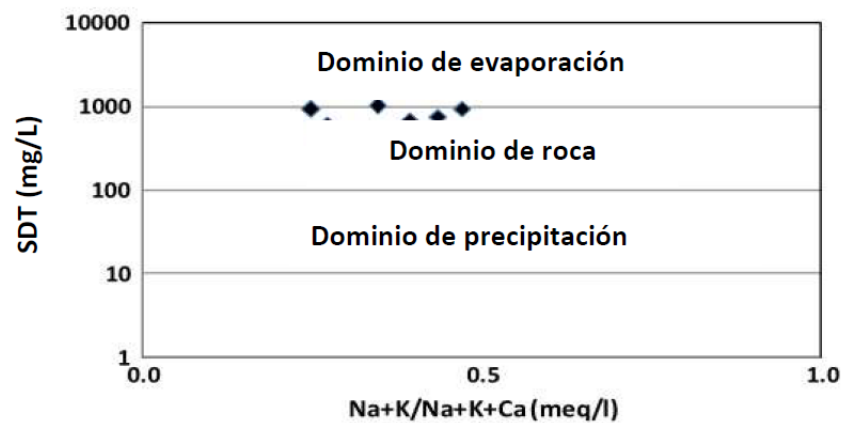
“Es una secuencia basada en Chebotarev que indica que cuanto más tiempo el agua permanezca en el suelo o en la litología, mayor será su exposición a la mineralización. Además, proporciona información sobre la evolución del agua subterránea en función de la creciente concentración de iones Na^+ , K^+ , Cl^- y SO_4 a lo largo del flujo. Esta secuencia se divide en tres secciones: flujo local (generalmente asociados a aguas jóvenes, por ejemplo, de infiltración de lluvia que podrían ser del tipo bicarbonatadas), intermedio (que presentan mediano recorrido y podrían ser bicarbonatadas e incluso sulfatadas) y regional (asociada a zonas de descarga y generalmente son del tipo sulfatadas). Los gráficos se construyen de manera independiente, representando cationes frente a aniones (en meq/L)”.

2.2.7.6. Diagramas de Gibbs

“El análisis del estudio del agua refleja las correlaciones iónicas combinadas entre distintos aniones y cationes, según criterios de análisis establecidos para el medio y ámbito de evaluación. Esto permite identificar tres procesos que ocurren según la dinámica del agua y su química: precipitación meteórica (lluvia y rápida infiltración), intemperismo (interacción entre agua y roca) y evaporación-cristalización, considerando la temperatura como un factor relevante. La composición de la lluvia a nivel mundial está influenciada por el contenido de NaCl proveniente del mar y por bajas concentraciones de sólidos disueltos, lo que las ubica en la parte inferior derecha del diagrama.

Figura 6

Diagramas Gibbs para cationes



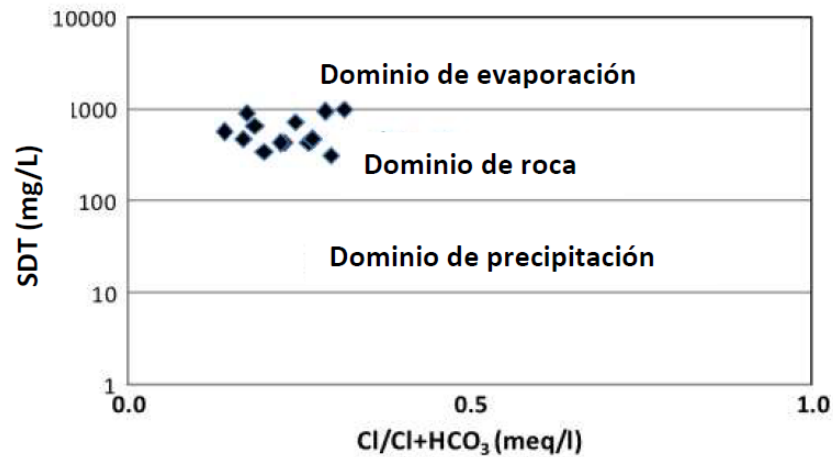
Fuente: (Toscano, 2019)

El aumento de sales debido a la interacción entre el agua y las rocas, ocasionada por el proceso de intemperismo, incrementa la proporción de sólidos disueltos y afecta las concentraciones de calcio y bicarbonato en relación con el sodio y los cloruros. Además, la evapotranspiración, que ocurre en áreas de cultivo o en zonas áridas que reciben escurrimientos

subsuperficiales de aguas de retorno agrícola, incrementa los niveles de Na^+ y de sólidos disueltos (TDS). El diagrama de Gibbs a continuación ilustra este fenómeno”.

Figura 7

Diagramas Gibbs para aniones



Fuente: (Toscano, 2019)

2.2.7.7. Relaciones iónicas

2.2.7.7.1. Relación $r \text{ Mg} / r \text{ Ca}$

“En las aguas continentales varía normalmente entre 0,3 y 1,5. Los valores próximos a 1 indican la posible influencia de terrenos dolomíticos o con rocas serpentinitas. Valores superiores a 1 suelen estar generalmente relacionados con terrenos ricos en silicatos magnésicos como gabros y basaltos. Sin embargo, hay que tener especial cuidado con esta relación ya que cuando se produce precipitación de CO_3Ca en el agua, la relación aumenta sin que ello señale nada acerca de las rocas atravesadas. El agua del mar suele tener una relación de aproximadamente 5, razón por la cual las aguas que han circulado por rocas marinas o que han sufrido mezcla con agua del mar, tienen valores elevados. Al mismo tiempo, un

incremento en los valores de cloruros y de la relación $r\text{ Ca}/r\text{ Mg}$ puede ser indicativo de contaminación marina” (Mariño & Garcia, 2018, p.26).

2.2.7.7.2. Relación $r\text{ K}/r\text{ Na}$

“En aguas dulces, la relación entre potasio (K^+) y sodio (Na^+) puede variar entre 0,001 y 1, siendo más común encontrar valores entre 0,004 y 0,3. Para las aguas marinas, esta relación suele estar entre 0,02 y 0,025. Debido a la fijación de K^+ en el terreno, la proporción de potasio en el agua es menor que en la roca de origen, especialmente cuando el agua está más concentrada en sales. Cuando el contenido total de alcalinos ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) es inferior a 3 ppm, la relación $r\text{ K}/r\text{ Na}$ varía entre 0,5 y 1; para 50 ppm, la relación es aproximadamente 0,1, y para 100 ppm, es cercana a 0,01” (Mariño & Garcia, 2018, p.27).

2.2.7.7.3. Relación $r\text{ Na}/r\text{ Ca}$ y $r\text{ Na}/r(\text{Ca} + \text{Mg})$

“En general solo tienen interés para comparar estas relaciones en el agua con la de la roca del acuífero, o bien para seguir los posibles procesos de cambios de base. En este último caso es preciso tener en cuenta que la precipitación o disolución de sales de Ca altera las relaciones sin que por ello se produzca cambio alguno de las bases” (Mariño & Garcia, 2018, p.27).

2.2.7.7.4. Relación $r\text{ Cl}/r\text{ CO}_3\text{H}$

“Teniendo en cuenta que el contenido de CO_3H es un valor relativamente constante en las aguas subterráneas, esta es una relación de interés para seguir el proceso de concentración de sales en el sentido del



flujo subterráneo; aunque esa concentración hace crecer ligeramente el denominador, un aumento de la relación indica un avance en el proceso de concentración. Si existen procesos de reducción de sulfatos o aportes externos de CO_2 puede aumentar el contenido de CO_3H y en ese caso no conviene utilizar esta relación. La precipitación de CO_3Ca también puede influir. Esta relación es especialmente útil en la caracterización de intrusión marina ya que en aguas continentales tiene un valor entre 0,1 y 5 y en el agua del mar varía entre 20 y 50. Si el incremento de cloruros se debe a exceso de regadío, la relación crece mucho menos para igual incremento de cloruros que cuando se produce intrusión marina” (Mariño & Garcia, 2018, p.27).

2.2.7.7.5. Relación $r \text{SO}_4 / r \text{Cl}$

“En aguas salinas el contenido de SO_4^- tiende a ser constante y entonces tiene un interés similar al anterior. No es útil cuando se produce reducción de sulfatos. En aguas poco o moderadamente salinas la relación puede ser similar a la de la roca acuífera y su valor se mantiene aproximadamente constante al irse concentrando el agua. Cuando satura el sulfato, la relación de ja de ser útil en este sentido, aunque ello solo sucede cuando la salinidad es ya muy elevada” (Mariño & Garcia, 2018, p.27).

2.2.7.7.6. Relación $r \text{Br} / r \text{Cl}$ y $r \text{I} / r \text{Cl}$

“La relación Br/Cl se emplea con poca frecuencia, pero es de interés en el estudio del origen de aguas salobres y saladas puesto que en el agua del mar vale alrededor de $1,7 \cdot 10^{-3}$, pudiendo tener valores muy diferentes en las aguas continentales. Las aguas asociadas a rocas



orgánicas marinas y de disolución de depósitos suelen tener una relación notablemente elevada. La segunda relación es bastante característica del origen de las aguas salobres y salmueras. En el agua del mar la relación varía entre 2.10^{-6} y 6.10^{-6} ; mientras que en las aguas subterráneas es mayor: las rocas fosilíferas contienen aguas con las relaciones más elevadas mientras que las relacionadas con rocas evaporíticas dan los valores menores” (Mariño & Garcia, 2018, p.28).

2.2.7.7.7. *Correlación de Spearman*

“Correlación es un análisis bivariado que mide la fuerza de asociación entre dos variables y la dirección de la relación. En términos de la fuerza de la relación, el valor del coeficiente de correlación (r_s) varía entre +1 y -1. A medida que el valor del coeficiente de correlación vaya hacia 0, la relación entre las dos variables será más débil” (Campos & Martínez, 2015).

En la Tabla 2 se visualiza la interpretación de correlación de Spearman.

Tabla 2

Interpretación del coeficiente de correlación de Spearman.

Valor de rho	Significado
-1	Correlación negativa grande y perfecta
-0.9 a -0.99	Correlación negativa muy alta
-0.7 a -0.89	Correlación negativa alta
-0.4 a -0.69	Correlación negativa moderada
-0.2 a -0.39	Correlación negativa baja
-0.01 a -0.19	Correlación negativa muy baja
0	Correlación nula
0.01 a 0.19	Correlación positiva muy baja
0.2 a 0.39	Correlación positiva baja
0.4 a 0.69	Correlación positiva moderada
0.7 a 0.89	Correlación positiva alta



Valor de rho	Significado
0.9 a 0.99	Correlación positiva muy alta
1	Correlación positiva grande y perfecta

Fuente: (Campos & Martínez, 2015).

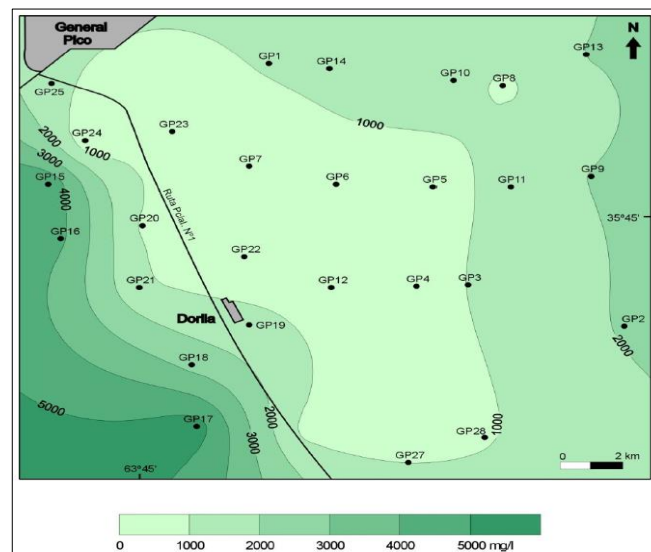
2.2.7.8. Mapas hidroquímicos

“Los mapas hidroquímicos son representaciones bidimensionales que muestran el dominio espacial de rangos de valores de algunas características fisicoquímica del agua, delimitado por curvas de isoconcentración (o isovalor)” (Mariño & Garcia, 2018, p.25).

“Estas curvas se obtienen por un método de interpolación, manual o automática, a partir de datos puntuales, asumiendo que la variable tiene una cierta estructura de correlación, es decir que su distribución espacial se ajusta a una función más o menos compleja. Como en todo mapa debe seleccionarse una escala acorde a la superficie a representar y al grado de detalle requerido, mientras que la equidistancia (en este caso la diferencia de valor entre curvas consecutivas) se elige según los valores extremos del conjunto de datos. Para facilitar la apreciación visual del mapa suele aplicarse un relleno de color a los diferentes intervalos de valores o bien al dominio donde la variable está por encima de un umbral de interés (p.e: el valor guía de calidad para cierto uso)” (Mariño & García, 2018, p.25).

Figura 8

Mapa de isoconcentración



Fuente: (Mariño & Garcia, 2018).

2.2.8. Nomenclatura de codificación de fuentes subterráneas

Las fuentes observadas e inventariadas fueron denominadas tomando en cuenta la:

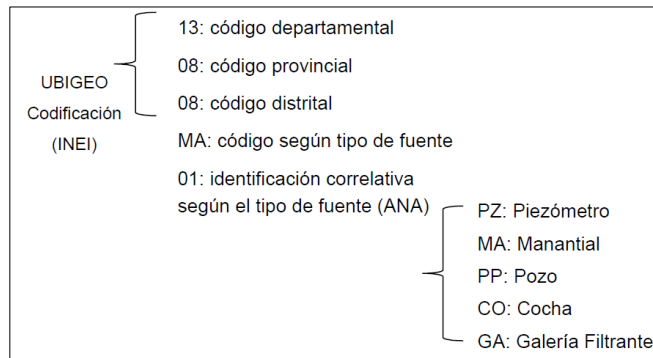
- Guía de inventarios de agua subterránea aprobada mediante la Resolución Jefatural N° 086-2020-ANA.
- Guía para realizar inventarios de fuentes naturales de agua superficial aprobada con Resolución Jefatural N° 319-2015-ANA.
- Inventario de infraestructura hidráulica pública y privada de acuerdo con lo indicado en la Resolución Jefatural. N° 030-2013-ANA.

“El registro de fuentes de agua subterránea se realizó utilizando el código de Inventario de Recursos Hídricos Subterráneos (IRHS), que se basa en la demarcación política establecida por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). Este código incluye el tipo de fuente, tal como se describe en el documento, y un número de identificación correlativo para cada fuente dentro

del distrito, asignado siguiendo la directiva de la Autoridad Nacional del Agua (ANA).

Figura 9

Esquema de codificación de fuentes de agua subterránea



Fuente: (ANA, 2020).

Por ejemplo, el código IRHS 13.08.08-MA-01 hace referencia a una estación de medición en un manantial ubicado en la quebrada Molinetes, en el punto 01”.

Tabla 3

Nomenclatura utilizada para la codificación y sectorización

Código	Sector	Código	Sector
RI	Relavera Integral	MM	Mush Mush
SV	San Vicente	VZ	Vizcacha

Fuente: (ANA, 2020).

- **Sector:** Los sectores se designaron de acuerdo con las subcuencas, microcuencas y lugares de ubicación de cada fuente asignando de la siguiente manera:
- **Tipo:** El tipo de fuente de agua se representa mediante una o dos letras.
- **Número:** En general, se asigna un número consecutivo. Por ejemplo, la

estación identificada con el código MM-CA-01 corresponde a una estación ubicada en un canal de la zona de Mush Mush, siendo "01" su numeración consecutiva.

2.2.9. Nomenclatura de codificación de fuentes subterráneas

Este ítem fue desarrollado conforme al Principio de Sostenibilidad y de acuerdo con lo estipulado en los artículos 15° - ítem 8 del Título II del Sistema Nacional de Recursos Hídricos, así como en los artículos 73° y 75° del Título V sobre la Protección del Agua, y los artículos 98° y 102° del Título VII sobre la Planificación de la Gestión del Agua, todos ellos comprendidos en la Ley de Recursos Hídricos, Ley N° 29338. Estas incluyen cuencas, intercuencas y unidades internas, distribuidas conforme se especifica en la Tabla 4.

Cabe indicar que para el presente trabajo de investigación se codificó todas las estaciones de monitoreo con dichas normas establecidas por la entidad competente.

Tabla 4

Distribución de las unidades hidrográficas del Perú.

REGIONES HIDROGRÁFICAS	NIVE L 1	NIVE L 2	NIVE L 3	NIVE L 4	NIVE L 5	NIVE L 6	NIVE L 7	NIVE L 8
PACÍFICO	1	1	9	75	571	185	156	36
AMAZONAS	1	2	6	30	214	18	0	0
TITICACA	1	1	6	43	92	0	0	0
TOTAL	3	4	21	148	877	203	156	36

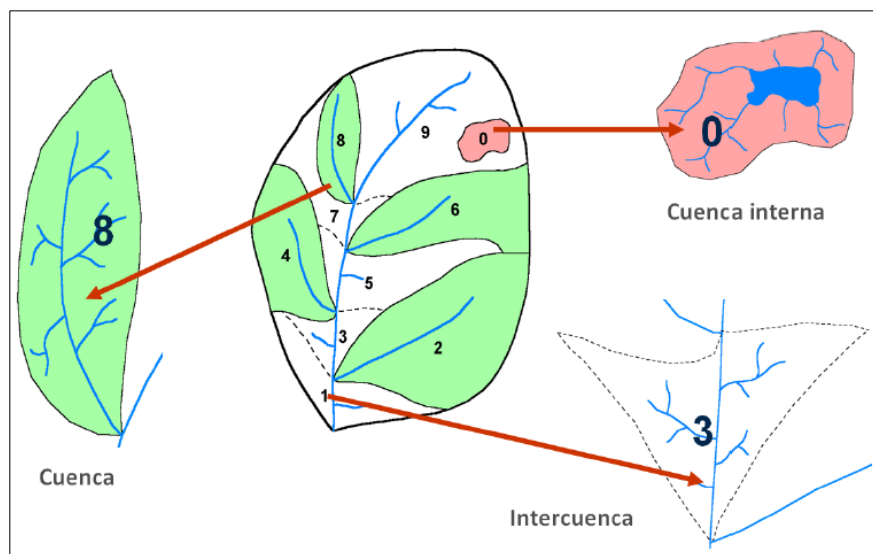
Fuente: (ANA, 2011).

El método de codificación se aplica a cursos de agua cuyas unidades hidrográficas han sido previamente identificadas utilizando el método de Pfafstetter.

Para la codificación de estos cursos, la delimitación de las unidades hidrográficas puede ajustarse según el criterio del especialista. Este determinará si la delimitación será referencial o definitiva, y si el proceso se llevará a cabo de manera manual o automática, dependiendo de la escala y la precisión de la fuente de información empleada.

Figura 10

Conceptualización del método Pfafstetter



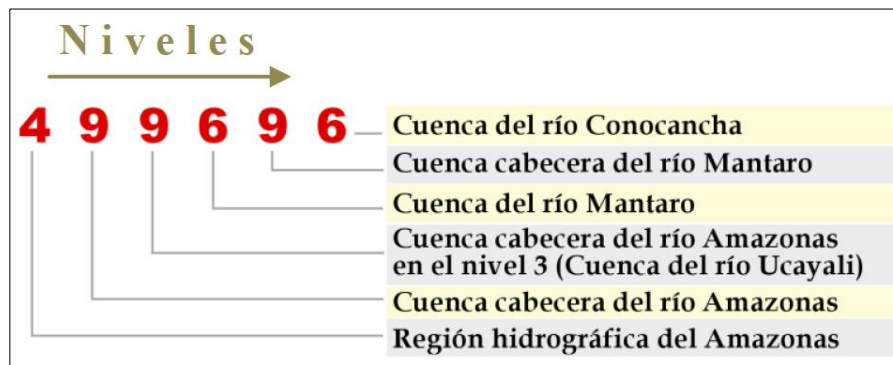
Fuente: (ANA, 2011).

El código, por su propia naturaleza, ofrece información sin necesidad de consultar una carta o mapa, proporcionando así una ubicación espacial en cualquier punto del país.

El nivel 1 se refiere al ámbito continental, compuesto por regiones hidrográficas, y los niveles sucesivos constituyen subdivisiones de estas, organizadas jerárquicamente en niveles 2, 3, 4, 5, etc., hasta alcanzar el nivel final, según corresponda.

Figura 11

Ubicación espacial según la interpretación del código



Fuente: (ANA, 2011).

Por lo tanto; para el presente estudio, se vio por conveniente codificar a las fuentes de agua superficiales, con la letra inicial del tipo de fuente de agua seguido del código Pfafstetter y finalmente con la numeración sucesiva.

2.2.10. Estándares de calidad ambiental (ECAs)

La aplicación del Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para agua se clasifica en cuatro categorías distintas: Categoría 1: Poblacional y recreacional, Categoría 2: Actividades marino costeros, Categoría 3: Riego de vegetales y Bebida de animales y Categoría 4: Conservación del Ambiente Acuático. Las categorías del Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para agua incluyen, a su vez, un total de 16 subcategorías. Dentro de estas, la subcategoría poblacional abarca las aguas superficiales utilizadas para la generación de agua potable, así como aquellas destinadas a actividades recreativas.

En esta oportunidad nos centraremos en la categoría 1 A1 (Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección), A2 (Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional) y A3 (Aguas que pueden ser



potabilizadas con tratamiento avanzado), y en la categoría 3 D1 (Riego de
vegetales) y D2 (Bebida de animales).

Tabla 5

Estándares de Calidad Ambiental para la Categoría 1

Parámetros	Unidad de medida	A3		
		A1	A2	A3
		Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección	Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional	Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado
FÍSICOS - QUÍMICOS				
Aceites y Grasas	mg/L	0,5	1,7	1,7
Cianuro Total	mg/L	0,07	**	**
Cianuro Libre	mg/L	**	0,2	0,2
Cloruros	mg/L	250	250	250
Color (b)	Color verdadero Escala Pt/Co	15	100 (a)	**
Conductividad	(μ S/cm)	1 500	1 600	**
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/L	3	5	10
Dureza	mg/L	500	**	**
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	10	20	30
Fenoles	mg/L	0,003	**	**

Parámetros	Unidad de medida	Aguas que pueden ser potabilizadas con		
		A1 desinfección	A2 tratamiento convencional	A3 tratamiento avanzado
Fluoruros	mg/L	1,5	**	**
Fósforo Total	mg/L	0,1	0,15	0,15
Nitratos (NO ₃) (c) -	Mg/L	50	50	50
Nitritos (NO ₂) (d) -	mg/L	3	3	**
Amoniaco- N	mg/L	1,5	1,5	**
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L	≥ 6	≥ 5	≥ 4
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6,5 – 8,5	5,5 – 9,0	5,5 – 9,0
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	1 000	1 000	1 500
Sulfatos	mg/L	250	500	**
Temperatura	°C	Δ 3	Δ 3	**
Turbiedad	UNT	5	100	**
INORGÁNICOS				
Aluminio	mg/L	0,9	5	5
Antimonio	mg/L	0,02	0,02	**
Arsénico	mg/L	0,01	0,01	0,15

Parámetros	Unidad de medida	Aguas que pueden ser potabilizadas con		
		A1 desinfección	A2 tratamiento convencional	A3 tratamiento avanzado
Bario	mg/L	0,7	1	**
Berilio	mg/L	0,012	0,04	0,1
Boro	mg/L	2,4	2,4	2,4
Cadmio	mg/L	0,003	0,005	0,01
Cobre	mg/L	2	2	2
Cromo Total	mg/L	0,05	0,05	0,05
Hierro	mg/L	0,3	1	5
Manganeso	mg/L	0,4	0,4	0,5
Mercurio	mg/L	0,001	0,002	0,002
Molibdeno	mg/L	0,07	**	**
Níquel	mg/L	0,07	**	**
Plomo	mg/L	0,01	0,05	0,05
Selenio	mg/L	0,04	0,04	0,05
Uranio	mg/L	0,02	0,02	0,02
Zinc	mg/L	3	5	5

Fuente: (MINAM, 2017).

Tabla 6

Estándares de Calidad Ambiental para la Categoría 3

Parámetros	Unidad de medida	D1: Riego de vegetales	D2: Bebida de anim
FÍSICOS- QUÍMICOS			
Aceites y Grasas	mg/L	518	**
Bicarbonatos	mg/L	0,1	0,1
Cianuro Wad	mg/L	500	**
Cloruros	mg/L	100 (a)	100 (a)
Color (b)	Color verdadero Escala Pt/ Co	2 500	5 000
Conductividad	(µS/cm)	15	15
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/L	40	40
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	0,2	0,5
Fluoruros	mg/L	100	100
Nitratos (NO --N) +3	mg/L	10	10
Nitritos (NO --N) 2	mg/L	≥ 4	≥ 5
Nitritos (NO2 -N) -	mg/L	≥ 4	≥ 5

Parámetros	Unidad de medida	DI: Riego de vegetales	D2: Bebida de anim
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L	6,5 – 8,5	6,5 – 8,4
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	1 000	1 000
Sulfatos	mg/L	Δ 3	Δ 3
Temperatura	°C	Δ 3	Δ 3
INORGÁNICOS			
Aluminio	mg/L	0,1	0,2
Arsénico	mg/L	0,7	**
Bario	mg/L	0,1	0,1
Berilio	mg/L	1	5
Boro	mg/L	0,01	0,05
Cadmio	mg/L	0,2	0,5
Cobre	mg/L	0,05	1
Cobalto	mg/L	0,1	1
Cromo Total	mg/L	5	**
Hierro	mg/L	2,5	2,5
Litio	mg/L	**	250



Parámetros	Unidad de medida	DI:	
		Riego de vegetales	D2: Bebida de anim
Magnesio	mg/L	0,2	0,2
Manganeso	mg/L	0,001	0,01
Mercurio	mg/L	0,2	1
Níquel	mg/L	0,05	0,05
Plomo	mg/L	0,02	0,05
Selenio	mg/L	2	24
Zinc	mg/L		

Fuente: (MINAM, 2017)

2.2.11. Calidad del agua según el MINSA

De acuerdo con el D.S., en los sistemas de abastecimiento de agua para consumo humano donde se haya comprobado la presencia de cualquiera de los parámetros que superen los Límites Máximos Permisibles establecidos en los Anexos II y III de este Reglamento, se llevarán a cabo acciones de control adicionales por parte del proveedor.

Tabla 7

Límites máximos permisibles de parámetros de calidad organoléptica

	Parámetros	Unidad de medida	Límite máximo permisible
1	Olor	---	Aceptable
2	Sabor	---	Aceptable
3	Color	UCV escala Pt/Co	15
4	Turbiedad	UNT	5
5	pH	Valor de pH	6,5 a 8,5
6	Conductividad (25°C)	mmho/cm	1 500
7	Sólidos totales disueltos	mgL ⁻¹	1 000
8	Cloruros	mg Cl ⁻ L ⁻¹	250
9	Sulfatos	mg SO ₄ L ⁻¹	250
10	Dureza total	mg CaCO ₃ L ⁻¹	500
11	Amoníaco	mg N L ⁻¹	1.5
12	Hierro	mg Fe L ⁻¹	0.3
13	Manganeso	mg Mn L ⁻¹	0.4
14	Aluminio	mg Al L ⁻¹	0.2
15	Cobre	mg Cu L ⁻¹	2
16	Zinc	mg Zn L ⁻¹	3
17	Sodio	mg Na L ⁻¹	200

UCV = Unidad de color verdadero

UNT = Unidad nefelométrica de turbiedad"

UNT = Unidad nefelométrica de turbiedad T=12.27

Según el artículo 61, titulado "Parámetros de calidad organoléptica", se dispone que el 90% de las muestras recolectadas en la red de distribución durante cada monitoreo, conforme al Plan de Control, en relación con los parámetros químicos que afectan la calidad estética y organoléptica del agua destinada al

consumo humano, no deben exceder las concentraciones o valores especificados en el Anexo II de este Reglamento. En cuanto al 10% restante, el proveedor deberá investigar las causas del incumplimiento y adoptar las medidas necesarias para asegurar el cumplimiento de los valores establecidos en el Reglamento.

Tabla 8

Límites máximos permisibles de parámetros químicos inorgánicos y orgánicos

Parámetros Inorgánicos	Unidad de medida	Límite máximo permisible
1 Antimonio	mg Sb L ⁻¹	0.020
2 Arsénico (nota 1)	mg As L ⁻¹	0.010
3 Bario	mg Ba L ⁻¹	0.700
4 Boro	mg B L ⁻¹	1500.000
5 Cadmio	mg Cd L ⁻¹	0.003
6 Cianuro	mg CN ⁻ L ⁻¹	0.070
7 Cloro (nota 2)	mg L ⁻¹	5.000
8 Clorito	mg L ⁻¹	0.700
9 Clorato	mg L ⁻¹	0.700
10 Cromo total	mg Cr L ⁻¹	0.050
11 Flúor	Mg F ⁻ L ⁻¹	1000.000
12 Mercurio	mg Hg L ⁻¹	0.001
13 Niquel	mg Ni L ⁻¹	0.020
14 Nitratos	mg NO ₃ L ⁻¹	50.000
15 Nitritos	mg NO ₂ L ⁻¹	3.00 Exposición corta 0.20 Exposición larga
16 Plomo	mg Pb L ⁻¹	0.010
17 Selenio	mg Se L ⁻¹	0.010
18 Molibdeno	mg Mo L ⁻¹	0.070
19 Uranio	mg U L ⁻¹	0.015

Nota 1: En caso de los sistemas existentes se establecerá en los Planes de Adecuación Sanitaria el plazo para lograr el límite máximo permisible para el arsénico de 0,010 mgL⁻¹.

Nota 2: Para una desinfección eficaz en las redes de distribución la concentración residual libre de cloro no debe ser menor de 0,5 mgL⁻¹.

Cabe mencionar que para este trabajo de investigación se realizó la comparación para verificar que estaciones de muestreo son los que no pueden ser para consumo humano, para ello solo se cotejó los analitos en común (muestreado y existentes según MINSA).

Asimismo, según el Artículo 62° “Parámetros inorgánicos y orgánicos” toda agua destinada para el consumo humano, no deberá exceder los límites máximos permisibles para los parámetros inorgánicos y orgánicos señalados en la Anexo III del presente Reglamento.

2.2.12. Estándares de calidad ambiental para suelo

Según el D.S. N° 002-2013-MINAM se tiene establecido los estándares de calidad ambiental para suelo, la siguiente tabla muestra los ECAs para las sustancias inorgánicas:

Tabla 9

Estándares de calidad ambiental para suelo

Parámetros	Usos del Suelo		
	Suelo Agrícola	Suelo Residencial/ Parques	Suelo Comercial/ Industrial/ Extractivos
Inorgánicos			
Cianuro libre (mg/kg MS)	0,9	0,9	8
Arsénico total (mg/kg MS)	50	50	140
Bario total (mg/kg MS)	750	500	2 000
Cádmio total (mg/kg MS)	1,4	10	22
Cromo VI (mg/kg MS)	0,4	0,4	1,4
Mercurio total (mg/kg MS)	6,6	6,6	24
Plomo total (mg/kg MS)	70	140	1 200

Fuente: (MINAM, 2013).



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES Y EQUIPOS

Se utilizaron los siguientes equipos y materiales en función de las actividades realizadas.

3.1.1. Mapeo hidrogeológico

Se creó una representación topográfica detallada del área de estudio con el propósito de llevar a cabo el mapeo geológico e hidrogeológico, donde se realizó el inventario de fuentes de agua en ambas campañas. Para establecer su ubicación, se emplearon dispositivos de posicionamiento satelital GPS, así como el instrumento multiparámetro HANNA para mediciones de parámetros fisicoquímicos in situ. Además, se utilizaron sondas de nivel de agua. Se complementó el trabajo con materiales adicionales como: libretas de campo, flexómetros, jarras, baldes, pizarras, drizas y otros recursos.

3.1.2. Mapeo geológico

Para esta actividad se necesitó planos impresos como: planos satelitales, planos topográficos, secciones y planos geológicos (sacados del INGEMMET) y los Instrumentos de Gestión Ambiental (sacados de la página del Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental) de la minera MARSÁ, con ello se realizó un mejor cartografiado a escala local a semiregional, los materiales adicionales fueron: picota, brújula, tablero, lápices de colores, lupa, ácido, etc.

3.1.3. Muestreo de agua



Para este proyecto se muestrearon un total de siete (07) estaciones de control, para lo cual se utilizaron materiales como: bailers, driza, jarras de plástico, baldes de plástico, guantes de nitrilo, y los materiales proporcionados por laboratorio: frascos de muestreo, cooler e ice pack. Asimismo, previo muestreo se registraron los parámetros fisicoquímicos con el multiparámetro HANNA. Finalmente, se enviaron las muestras al laboratorio de ALS en Lima.

3.1.4. Análisis en laboratorio

La selección del grupo de parámetros y los métodos utilizados para el análisis en laboratorio se detallan a continuación:

- Análisis Fisicoquímicos en lugares representativos: potencial de hidrogenión (pH), conductividad eléctrica (CE), sólidos totales disueltos (STD), sólidos totales suspendidos (STS).
- Aniones: carbonatos, bicarbonatos, sulfato, cloruro, fluoruro, nitratos y nitritos.
- Metales disueltos y totales (por ICP): Aluminio (Al), antimonio (Sb), arsénico (As), bario (Ba), berilio (Be), bismuto (Bi), boro (Bo), cadmio (Cd), calcio (Ca), cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu), estaño (Sn), estroncio (Sr), fierro (Fe), litio (Li), magnesio (Mg), manganeso (Mn), molibdeno (Mo), níquel (Ni), plata (Ag), potasio (K), plomo (Pb), selenio (Se), silicio (Si), sodio (Na), talio (Tl), uranio (U), vanadio (V), zinc (Zn) y mercurio (Hg).

3.2. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

3.2.1. Consideraciones conceptuales



El método empleado adopta un enfoque cualitativo y cuantitativo (mixto) de tipo exploratorio secuencial, con modalidad derivativa (Sampieri, 2018). Este enfoque se basa en evaluar la calidad del recurso hídrico en el área de investigación, de acuerdo con los Estándares de Calidad Ambiental para agua (D.S. N° 004-2017-MINAM), en la categoría 1, A-2, que corresponde a "Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional". Asimismo, se cumple con el Decreto Supremo N° 031-2010-SA, que establece los Límites Máximos Permisibles de calidad del agua para consumo humano. El proceso sigue el Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales (R.J. N° 010-2016-ANA) y la Guía de Inventario de Fuentes de Agua Subterránea (abril 2020) (R.J. N° 007-2015-ANA, D.S. N° 018-2017-MINAGRI).

3.2.2. Población de Estudio y Tamaño de la Muestra

3.2.2.1. Población:

El universo poblacional está compuesto por la extensión del territorio del centro poblado de Llacuabamba que tiene una extensión de 55.2km², donde se determinó la calidad de aguas, influencia de la minería informal e interacción del agua – roca.

3.2.2.2. Muestra:

Se tomaron siete (07) muestras de agua, previo muestreo se registraron los parámetros fisicoquímicos con el multiparámetro HANNA. Posteriormente se enviaron las muestras al laboratorio de ALS en Lima, donde se les hizo una Análisis Físico – Químicos, potencial de hidrogenión (pH), conductividad eléctrica (CE), sólidos totales disueltos (STD), sólidos totales suspendidos (STS). Aniones: carbonatos, bicarbonatos,



sulfato, cloruro, fluoruro, nitratos y nitritos. Metales disueltos y totales (por ICP):

3.2.3. Selección de muestra

La selección de las muestras es de tipo no probabilístico o dirigida, tomando en cuenta los siguientes criterios:

1. Distribución espacial de las zonas afectadas y vulnerables: Se analizan las áreas que presentan un mayor grado de afectación y vulnerabilidad, considerando factores como la densidad poblacional, las actividades económicas predominantes (como la ganadería y la agricultura) y otras características geográficas que puedan influir en la calidad del recurso hídrico.
2. Zonas de monitoreo críticas: Se seleccionaron zonas donde los parámetros fisicoquímicos presentan ciertas anomalías.

Para abordar estos incisos, a continuación, se detallan las etapas de investigación:

3.2.4. Etapa pre-campo

- Recolección de información: Se recopila información científica, incluyendo tesis, artículos, libros y datos preexistentes del área de investigación y sus alrededores, utilizando instrumentos de gestión ambiental (IGAs).
- Definición del área de estudio: Se delimita el área de estudio y se elaboran mapas previos al trabajo de campo.
- Determinación de la codificación: Se establece la codificación necesaria para el inventariado y se programa las salidas de campo.



3.2.5. Etapa de campo

- Recojo de datos geológicos y geomorfológicos: Se lleva a cabo la recopilación de información sobre las características geológicas y geomorfológicas del área.
- Inventariado de fuentes de agua: Se realiza un inventario de las fuentes de agua superficial y subterránea, considerando las temporadas de avenida y estiaje.
- Muestreo de aguas: Se lleva a cabo el muestreo de aguas provenientes de fuentes subterráneas y superficiales.

3.2.6. Etapa de laboratorio

- Preservación de las muestras: Se asegura la conservación adecuada de las muestras para el análisis posterior.
- Análisis ICP-MS: Se realiza un análisis mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) para determinar metales totales y metales disueltos.
- Análisis químico: Se lleva a cabo un análisis químico para identificar aniones, carbonatos y bicarbonatos.

3.2.7. Etapa de gabinete

- Procesamiento de datos obtenidos en campo: Se elaboran mapas y se organizan los datos recolectados durante el trabajo de campo.
- Interpretación de resultados de laboratorio: Se analizan e interpretan los resultados obtenidos de los análisis de laboratorio.



- Redacción del trabajo de investigación: Se procede a redactar el documento final de la investigación (tesis), integrando los hallazgos y conclusiones.

CAPÍTULO IV

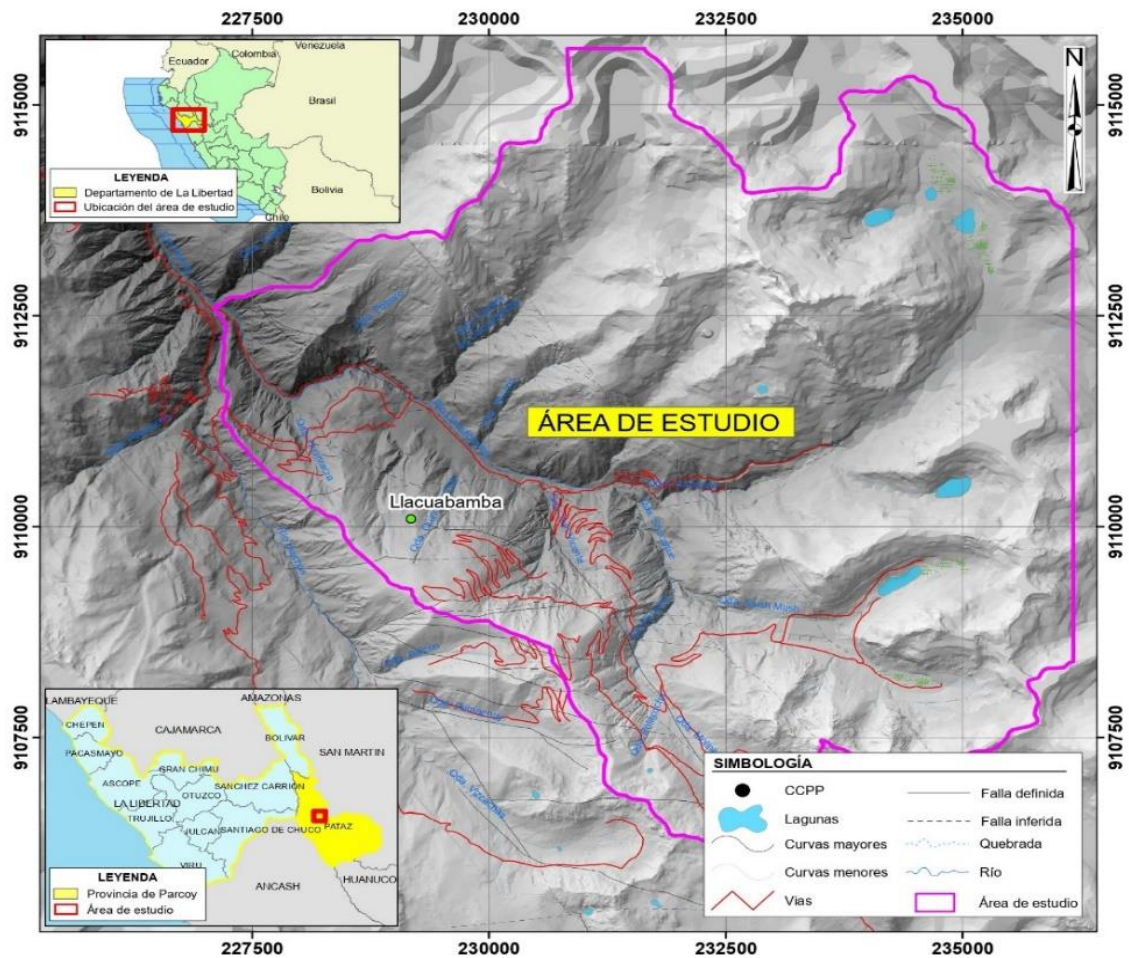
CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1. UBICACIÓN

El área de estudio se encuentra ubicada políticamente en el distrito de Parcoy, provincia de Pataz, departamento de La Libertad, Figura 12:

Figura 12

Ubicación del área de estudio



Fuente: Elaboración propia.

El área de estudio se encuentra exactamente en el centro poblado de Llacuabamba, a una altitud que varía entre los 3800 y 4 200 msnm la cual está limitada entre las siguientes coordenadas UTM WGS-84 Zona 18S, Este: 226663.1 - 235601.5 y Norte:

9105623.6 - 9113434.7. En la Figura 12 se muestra visualmente la ubicación del área de estudio.

4.2. ACCESO

El acceso al centro poblado de Llacuabamba por vía aérea se accede desde la ciudad de Lima hasta la pista de aterrizaje de Chagual o Pías, para luego seguir por la carretera afirmada hacia el centro poblado e Llacuabamba. A su vez se puede acceder al centro poblado de Llacuabamba vía terrestre, ver Tabla 10:

Tabla 10

Vías de Acceso y Distancias

Desde	Hasta	Distancia (Km)	Tipo de vía
Lima	Trujillo	580	Vía asfaltada
Trujillo	Chagual	340	Vía afirmada
Chagual	Llacuabamba	80	Vía afirmada

Fuente: Elaboración propia.

4.3. POBLACIÓN

En el área de estudio, la población está distribuida conforme a la siguiente tabla:

Tabla 11

Población en el área de investigación

Centro poblado Llacuabamba					
Población censada			Viviendas particulares		
Hombre	Mujer	Total	Ocupadas	Desocupadas	Total
1 855	1 608	3 463	702	2	704

Fuente: Estudio Social MARSa 2021, TERCER ITS.

4.4. CLIMA Y FAUNA

4.1.1 Clima



El clima del centro poblado de Llacuabamba se distingue por un promedio de precipitaciones de 13.89 mm por día y una temperatura anual media de 7.76 °C. Estas características son principalmente atribuibles a su ubicación geográfica, con una altitud promedio de 3800 metros sobre el nivel del mar (MARSA, 2017).

De acuerdo con la clasificación del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) utilizando el método de Thornthwaite, la U.E.A. Retamas, que se encuentra cerca de la zona de estudio, presenta un clima lluvioso con un invierno seco semifrío y húmedo, siendo catalogada como una zona “lluviosa, húmeda y fría”, debido a las severas y persistentes heladas. Estas condiciones limitan y dificultan las actividades agrícolas en la región. Las condiciones meteorológicas locales de la U.E.A. Retamas son monitoreadas en las estaciones de San Andrés y Las Chilcas, que proporcionan datos sobre temperaturas (máxima, mínima y media), precipitaciones, y la velocidad y dirección del viento (MARSA, 2017).

4.1.2 Fauna

Según el primer informe técnico sustentatorio (Primer ITS) de la UEA Retamas se detalló que la evaluación biológica de la fauna silvestre, el cual corresponde al Monitoreo Biológico efectuado en el I y II semestre del 2015 (Época estiaje y pluvial). Es preciso mencionar que se lograron registrar un total de cuarenta y uno (40) especies de aves, dos (02) especies de mamíferos y 01 especie de reptil para la época estiaje. Mientras que para la época pluvial se lograron registrar un total de cuarenta y uno (41) especies de aves, dos (02) especies de mamíferos y 01 especie de reptil. (MARSA, 2016).

4.5. GEOMORFOLOGÍA



4.5.1. Geomorfología local

La zona se ubica en la cordillera Oriental de los Andes, en el límite con la región subandina peruana, y presenta características distintivas de erosión glacial y fluvial, así como una topografía altamente variada y accidentada. En esta área, la cordillera Oriental alcanza altitudes superiores a los 4,500 metros sobre el nivel del mar. Se trata de un macizo que se extiende entre los ríos Marañón y Huallaga, compuesto por cadenas montañosas paralelas separadas por estrechos valles longitudinales.

Las geoformas locales que caracterizan la cordillera Oriental incluyen valles en forma de V, valles en forma de U, lagunas de origen glacial, picos, valles colgados y circos glaciares. También se pueden observar depósitos de morrenas y fluvioglaciares, así como depósitos coluviales y aluviales en las partes más bajas de la cuenca. Dentro de estas formaciones, se identifican varias subunidades geomorfológicas, denominadas como:

4.5.1.1. Cerros y Cadena de cerros

Estas subunidades geomorfológicas forman las partes resaltantes de la Cordillera Oriental en el área de estudio; se caracterizan por las elevaciones más prominentes cuyas altitudes alcanzan en el Cerro Gigante más de 4 300 msnm hacia el Este se halla el cerro Alaska, son discontinuos, variables orientaciones, de crestas con formas variables y regularmente pronunciadas, parcialmente denudadas, aún conservan huellas de la ablación de los glaciares.



4.5.1.2. Valles Glaciares

Estos valles se han formado durante la glaciación en el Pleistoceno, se encuentran en las cabeceras de las quebradas, en formas alargadas, con secciones transversales en forma de “U” que luego cambian a las secciones típicas de las quebradas aguas abajo; ambas laderas son de pendientes moderados y los fondos por depósitos fluvio-glaciares; los más resaltantes se hallan en Pomachay, en las cabeceras de las quebradas Molinetes y Mush Mush, en cuyas cabeceras todavía se observan huellas de circos glaciares y pequeñas cubetas algunas con lagunas.

4.5.1.3. Quebradas

Estas subunidades geomorfológicas se hallan distribuidas en ambos márgenes del valle del río Llacuabamba, en su mayoría después de los valles glaciares, tiene secciones transversales predominantemente en forma de “V” algunas asimétricas con laderas de pendientes desde moderados hasta escarpados; los fondos han sido erosionados y modelados por los flujos de las aguas, con cierta continuidad durante los periodos de lluvias y constituyen vías de tránsito de flujos de barro y piedras conocidos como Huaycos; en algunos lugares parte de estas laderas presentan otras pequeñas quebradas con cárcavas. La mayoría de las quebradas presentan cauces angostos y algo ondulados, con pendientes muy pronunciados que drenan las aguas en la mayoría de los casos en forma temporal.

4.5.1.4. Lomadas

Estas geoformas se encuentran en forma muy puntual y/o localizado; corresponden a relieves reglares con la parte superior de



contornos regulares y pendientes moderados que hacia las laderas aumentan progresivamente de pendiente en la mayoría están tapizados por los depósitos cuaternarios.

4.5.1.5. Laderas

Esta subunidad se encuentra en forma casi continua en el área de la mina, gran parte de las labores de la mina se halla en laderas, que se caracterizan por presentar relieves variables desde contornos algo ondulados hasta planos, pendientes pronunciados a escarpados en algunos lugares producto de problemas de la geodinámica externa. Algunas laderas presentan huellas de derrumbes y cárcavas; en su gran extensión estas geoformas se hallan tapizadas por los depósitos cuaternarios.

4.6. GEOLOGÍA

4.6.1. Geología Regional

La secuencia estratigráfica en el área de estudio abarca rocas que van desde el Precámbrico hasta el Cuaternario reciente. En la región de Pataz-Parcoy, la cordillera Oriental se caracteriza por un basamento metamórfico conocido como el 'Complejo del Marañón' (Wilson y Reyes, 1964; Dalmayrac, 1988; Schreiber, 1989; Haeberlin, 2002).

Las rocas más antiguas de esta área incluyen un miembro metapelítico que ha sufrido una intensa deformación. Este miembro se compone de paraesquistos y paragneises, los cuales presentan un metamorfismo regional que abarca desde facies de esquistos verdes hasta facies de anfibolita, y han experimentado cuatro fases de deformación (Schreiber, 1989; Haeberlin, 2002). La serie metamórfica se



organiza en bloques levantados y alargados orientados en dirección NO-SE, limitados al oeste y al este por fallas longitudinales que han sido reactivadas durante diferentes periodos tectónicos (Palacios, 1995).

Wilson y Reyes (1964) describieron el Complejo del Marañón como compuesto por mica-esquistos, meta-andesitas y filitas. Posteriormente, Schreiber (1989) analizó las meta-andesitas como rocas metavolcánicas que también pertenecen al Complejo Marañón. Además, se identificó una segunda unidad pre-siluriana, conocida localmente como la Formación Vijus (Haerberlin, 2002), que incluye basaltos, lutitas, conglomerados e ignimbritas, correspondiendo a las meta-andesitas y metavolcánicos.

4.6.1.1. El Batolito de Pataz

El batolito de Patáz es un extenso cuerpo intrusivo que se extiende por más de 90 km, y es el principal anfitrión de las vetas de oro que se están explotando en la región. Este batolito forma parte de un cinturón intrusivo calco-alcalino de gran tamaño que se desarrolla a lo largo de la cordillera Oriental (Laubacher y Mégard, 1985), y se formó al intruirse en el basamento del Complejo Marañón. En los márgenes del plutón, se observan pequeñas apófisis dioríticas a tonalíticas, que representan las intrusiones más antiguas del área.

El componente principal del batolito es una granodiorita de grano medio, que se transforma hacia el núcleo, donde presenta un contacto bien definido con un monzogranito de grano grueso. En las zonas superiores del batolito, los cuerpos de granodiorita y monzogranito son atravesados



por diques de mica-aplita y algunos pequeños stocks de granito rosado (Haeberlin, 2004).

4.6.2. Geología local

En las partes altas de la zona de estudio, que incluye la Laguna Blanca (Quebrada Blanca), así como las quebradas Mush Mush y Molinetes, se encuentran afloramientos de cuarcitas en bancos masivos, correspondientes a la Formación Contaya. Sin embargo, a mayor profundidad, las labores mineras subterráneas aledañas a la zona de estudio han descubierto filitas y esquistos pertenecientes al Complejo del Marañón, lo que sugiere que la extensión y el espesor de las cuarcitas de la Formación Contaya no están bien definidos. Además, el contacto con las rocas metamórficas del Complejo del Marañón es incierto.

El batolito de Pataz aflora con un contacto poco definido en la superficie y está delimitado por la falla Loros en profundidad, que lo separa de las rocas metamórficas del Complejo del Marañón. En la superficie, se relaciona con las cuarcitas de la Formación Contaya en la parte alta de la quebrada Molinetes. Se puede inferir que la traza de la falla sigue la dirección de la quebrada.

En el sector sureste de la zona de estudio, en la quebrada Pomachay, también se observan afloramientos del batolito de Pataz, que cortan las rocas volcánicas mencionadas anteriormente. Al norte, en la quebrada Balcones, las rocas volcánicas desaparecen y solo quedan expuestas las rocas intrusivas.

En los cerros Balcones, Vizcachas y Cabana Alta, se encuentran afloramientos del batolito de Pataz, sin la cobertura volcánica que se observa en la parte este de la zona de estudio (superyaciendo a la Formación Contaya). Esto sugiere que el magmatismo ocurrió posteriormente a la Formación Tres Lagunas.



El batolito está atravesado por numerosas vetas de cuarzo lechoso que contienen mineralización de oro, los mismo que están acompañados con diferentes minerales sulfurosos.

El área de estudio en su mayoría está cubierta por depósitos cuaternarios (sobre todo en las partes bajas de las quebradas), en su totalidad derivados de la erosión fluvio-glacial y depósitos coluviales gruesos. El río Llacuabamba ha creado una gran terraza aluvial y ha depositado material aluvial en sus márgenes.

4.6.2.1. Complejo del Marañón (Pe – cm)

Localmente, se identifica una secuencia metamórfica que presenta un grado de metamorfismo medio a alto. Estas rocas están fuertemente fracturadas y afloran en la superficie en la zona de estudio, especialmente en el sector este, donde es probable que estén en contacto fallado con el batolito de Pataz, subyaciendo localmente a la Formación Lavasen.

Además, en el área de estudio se observa una secuencia de metasedimentos en bancos masivos, cuya extensión y potencia no se conocen bien, por lo que no han sido diferenciados en la cartografía local. Estos sedimentos se encuentran sobre las filitas y esquistos del Complejo del Marañón y están compuestos por cuarcitas granoblásticas de color gris claro, que probablemente correspondan a la Formación Contaya. Estas cuarcitas son bastante competentes y compactas, con un grado de fracturación muy leve.

Figura 13

Esquistos gris verdoso, sector Qda. Molinetes.



Nota: Fotografía tomada en el corte de carretera hacia la UEA Marsa, con dirección al E.

4.6.2.2. Formación Lavasen (Csp – i)

En el área de investigación se ha detectado una secuencia de lavas afaníticas con estructura almohadillada, cuya composición varía de andesítica a basáltica. Estas rocas son de color gris oscuro y presentan fenocristales de hornblenda, piroxeno y escaso olivino. Su grado de fracturamiento oscila entre leve y moderado, y se encuentran por encima de las rocas metamórficas del Complejo Marañón. No se ha determinado su parte superior, ya que la superficie actual corresponde a una zona de erosión.

Estas rocas volcánicas, que podrían pertenecer a la Formación Tres Lagunas, dominan las cumbres y picos más elevados de las montañas en las partes altas del área de estudio. Presentan una geomorfología áspera y



distintiva, con pendientes casi verticales, lo que las diferencia de las unidades circundantes.

4.6.2.3. Grupo Pucara (Jr-pu)

Originada por un proceso de sedimentación marina, esta secuencia está compuesta por calizas grises y carbonosas, que incluyen nódulos de chert, así como calizas intercaladas con lutitas, dolomitas, margas y areniscas calcáreas. Esta formación aflora en el suroeste del área de estudio.

4.6.2.4. Grupo Mitu (Ps-m)

El Grupo Mitu, que se encuentra por debajo del Grupo Pucará, está formado por un conglomerado masivo que incluye elementos subredondeados de caliza.

Estas rocas son posiblemente provenientes de la Formación Copacabana, e incluyen arenisca parda, andesita rosada y roca metamórfica, todo ello en una matriz de arenisca. Este grupo presenta un espesor aproximado de 180 m.

Figura 14

Geología de las Qdas. Mush Mush y Ventanas



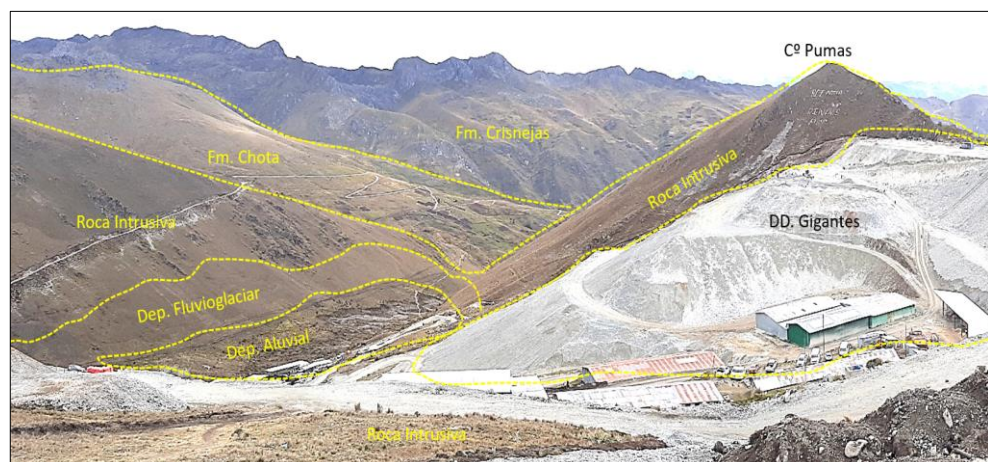
Nota: Fotografía tomada desde la quebrada Vaso con dirección al NE.

4.6.2.5. Formación Chota (KsP-ch)

La Fm. Chota se compone de areniscas rojizas y conglomerados que incluyen guijarros de caliza, así como capas de areniscas friables de grano grueso y tonalidad rosada.

Figura 15

Geología de las Qdas. Pomachay y Huinchos



Nota: Fotografía tomada desde la quebrada Pomachay con dirección al N, se observa campamentos de mineras artesanales y la desmontera de la UEA Marsa.

4.6.2.6. Formación Crisnejas (Kis-cr)

La Formación Crisnejas, que se encuentra sobre el Grupo Pucará, está delimitada por una falla regional que se orienta de NO a SE, a lo largo de la cual fluye el río Huinchus. Esta formación está compuesta por calizas grisáceas, areniscas y lutitas calcáreas.

4.6.2.7. Depósitos Cuaternarios

En la quebrada de la Laguna Blanca, se observan pequeños bloques erráticos de origen coluvial. Por otro lado, en la quebrada Mush Mush, hay pequeños eskeres formados principalmente por gravas (guijarros y gránulos gruesos), que están cubiertos por un suelo orgánico con vegetación, creando una topografía suave y ondulada, sobre la cual descansan algunos bloques erráticos de composición volcánica andesítica (ver Figura 16).

Figura 16

Depósitos fluvioglaciares Qda. La Laguna Blanca



Nota: Fotografía tomada desde la quebrada Mush Mush con dirección al W, se aprecia valle glaciar en forma de U.

En la quebrada de la Laguna Blanca, se observa un perfil de depósitos fluvioglaciares (Q-fg) que muestra cierta selección, con una transición de guijarros angulosos a gránulos gruesos en una matriz de arena a limo, cubiertos por un suelo orgánico de aproximadamente 40 cm de espesor. A este perfil se le atribuye una permeabilidad media.

Los manantiales que abastecen el embalse de Laguna Blanca han creado un bofedal con depósitos de gravas angulosas en una matriz de arenas gruesas. Los depósitos coluviales (Q-co) presentan poca selección, consistiendo en bloques subredondeados a angulosos, en una matriz de guijarros y gránulos gruesos angulosos, formando depósitos de pie de monte. Cabe mencionar que es la parte alta de la zona de estudio.

Figura 17

Depósitos coluviales Qda. Molinetes



Nota: Fotografía tomada desde la quebrada Molinetes con dirección al SW.

Por otro lado, los depósitos aluviales están limitados al cauce de los ríos, especialmente al río Llacubamba. Estos consisten en cantos



rodados subredondeados del tamaño de gujarros y guijas, en una matriz de gránulos y arenas muy gruesas subredondeadas. Estos materiales presentan una permeabilidad media a alta, formando acuíferos libres. En la margen izquierda del río Llacuabamba, aguas abajo, se ha formado una gran terraza aluvial (Q-al).

4.6.2.8. Rocas Intrusivas (Pali-di/gd)

El batolito de Pataz es un extenso cuerpo intrusivo compuesto principalmente de granodiorita a tonalita, de color gris parduzco y con poca fracturación. Está formado por cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa, y su intemperización lo torna de un color gris oscuro. Este cuerpo está atravesado por múltiples vetas de cuarzo lechoso. Su composición varía desde granodioritas, con una mezcla intermedia de minerales, hasta monzonitas, que contienen menos cuarzo, y ocasionalmente se encuentran afloramientos de granito, caracterizados por una mayor cantidad de feldespato potásico, y tonalitas, que carecen de este mineral.

El batolito se encuentra ampliamente expuesto en el sector occidental del área de estudio, particularmente en los cerros Vizcachas, Balcones, Cabana Alta y Gigante, así como en la margen izquierda de las quebradas Molinetes y Shucaque. En la parte suroccidental del área, también se pueden observar afloramientos de rocas intrusivas de granodiorita, que son de color grisáceo y presentan un grano medio a grueso. Debido a su grado de fracturación, se considera que tiene una permeabilidad media.

Figura 18

Roca Intrusiva – Sector Cerro Gigantes



Nota: Fotografía tomada desde la quebrada Molinetes con dirección al W.

4.6.2.9. Geología estructural

Como resultado de la orogénesis, se han generado esfuerzos compresionales y tensionales que han dado lugar a una serie de plegamientos largos y estrechos, orientados en dirección NO-SE-NO, con pendientes que oscilan aproximadamente entre 35° y 85° . Asociados a estos pliegues, se pueden observar diversas fallas regionales, principalmente con rumbo NO-SE, que afectan la geología de la zona, así como algunas fallas con orientaciones SO-NE, N-S y E-O. Muchas de estas fallas regionales coinciden con lechos de ríos y quebradas, alineándose con la hidrografía superficial de la región. A continuación, se presentan los diferentes sistemas de fallas más relevantes:

4.6.2.10. Fallamiento NO-SE (Sistema Longitudinal)

Son fallas post-mineralización, con rumbo sub-paralelo o paralelo a las vetas, que provocan ensanchamientos (cabalgamiento), acuñamientos



y discontinuidades locales en las estructuras mineralizadas. Muchas de estas fallas son de carácter normal-sinistral e inversa-dextrales, con desplazamientos que varían desde centímetros hasta varios metros (en algunos casos). En las labores realizadas sobre las vetas, como Gigante Uno, Esperanza, Yanaracra Sur, Cachaco, Mano de Dios y Yanaracra Uno, también se pueden observar este tipo de fallas.

4.6.2.11. Fallamiento NE-SO a N-S (Sistema Diagonal)

Tienen un azimut (rumbo) promedio que va del Norte al noreste y una alta inclinación (buzamiento) hacia el Oeste. Estas fallas suelen aparecer agrupadas en bloques (fallamientos gravitacionales normales) o como estructuras aisladas. Generalmente, las vetas se ven afectadas por este tipo de fallamiento, ya sea normal, inverso, sinistral o dextral. Ejemplos de estas fallas incluyen Oeste Uno, Cabana Cuatro, Cinco, La Española y Sistema Chilcas, las cuales presentan un desplazamiento normal-sinistral. Cuando las fallas tienen un ángulo bajo, se manifiestan como sobreescurrecimientos locales.

4.6.2.12. Fallamiento E-O (Sistema Transversal)

Estas fallas tienen un azimut (rumbo) promedio este-oeste y un alto buzamiento hacia el norte o el sur. Pueden desplazarse hasta 100 metros en la vertical y 300 metros en la componente horizontal (sinistral), siendo el bloque norte el que desciende o se hunde. Dentro de este sistema, destacan estructuras como Falla Uno, E-1, la falla veta Pumas Uno, Yanaracra Norte Uno, AB, Cinco, Cabana, San Vicente, entre otras. La Falla Uno es especialmente notable por su extensión y persistencia; las



observaciones de campo sugieren que su movimiento inicial fue inverso o sinistral. Muchas de estas fallas son pre-mineralización y están asociadas al sistema de vetas NW-SE, aunque han sido reactivadas tras la mineralización.

4.6.3. Geología Económica

La mineralización está relacionada con el Batolito de Patáz, y los yacimientos son de tipo filoneano. El mineral se extrae de vetas de cuarzo y sulfuros, donde el oro se encuentra rellenando fracturas en piritas o en los contactos entre galena-pirita y esfalerita-pirita. También se halla arsenopirita asociada a la pirita y la esfalerita. El conjunto mineralógico de las vetas presenta una típica asociación mesotermal (250 a 350 °C) de cuarzo-pirita-oro.

La mineralización es resultado del relleno hidrotermal de fisuras en las rocas metamórficas, ubicándose generalmente cerca del contacto con el batolito granodiorítico y, en menor medida, dentro del cuerpo intrusivo. Las estructuras mineralizadas de interés económico son vetas situadas en fracturas y fallas dentro de las rocas intrusivas.

La mineralogía de las vetas incluye cuarzo inicial, pirita y arsenopirita como minerales principales, y galena, esfalerita y calcopirita como secundarios. Los sulfuros que forman parte de esta fase principal de mineralización suelen rellenar las cavidades de cuarzo. En las vetas de sulfuros, el oro se encuentra en solución íntimamente ligado a la pirita y, en menor medida, a la arsenopirita, que se presenta como nódulos en los óxidos.

4.7. EVALUACIÓN DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS - MONITOREO



La evaluación de las características fisicoquímicas de las aguas superficiales y subterráneas se realizó en base a los datos obtenidos en campo, durante esta actividad se registraron parámetros de campo principalmente conductividad eléctrica (CE), total de sólidos disueltos (TDS), potencial de hidrógeno (pH) y temperatura (T°) obtenido en los puntos de observación durante las dos campañas, con el uso de un multiparámetro HANNA debidamente calibrado.

En las



Tabla *12*, Tabla *13*, Tabla *14*,



Tabla 15,

Tabla **16** y Tabla **17**, se muestran los parámetros fisicoquímicos de campo para las aguas subterráneas y superficiales registradas en: piezómetros, manantiales, bofedales, ríos, quebradas y lagunas. La descripción se realizó tomando en cuenta las quebradas Qda. Mush Mush, Polacocha, San Vicente, Shucaque, Ventanas, Quinuapamapa, Paccha, Castilla de Llacuabamba, Potrero y Molinetes, y la calidad de agua la que se describe a continuación:

4.7.1. Parámetros fisicoquímicos de ríos y quebradas

Se aforaron cursos superficiales; ríos y quebradas habiendo identificado treinta y dos (32) estaciones en marzo 2021, en las quebradas Mush Mush, Molinetes, Porvenir, Ventanas, Shucaque, Huinchos y Llacuabamba, con temperaturas que varían entre 7.73 a 16.01 °C y pH entre 5.81 a 8.02 agua ligeramente ácidas a ligeramente alcalina, sin embargo, en la zona de actividad minera (quebrada Balcones y quebrada San Vicente) es el que registra el pH más bajo de 5.81 a 6.98 y su CE de 60 a 877 $\mu\text{S}/\text{cm}$, siendo en su mayoría provenientes de bocaminas artesanales. Para el monitoreo de julio 2021 se estableció treinta y cinco (35) estaciones con temperaturas que fluctúan entre 6.0 a 16.3 °C y pH entre 6.0 a 8.22, siendo sus aguas neutras a alcalinas, la conductividad eléctrica varía entre 111 a 1422 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Con respecto a las quebradas permanentes, su caudal varía entre 0.2 y 4,206 l/s en marzo del 2021 y en la temporada de julio del 2021 su caudal varía entre 0.1 a 785.7 l/s, siendo predominante valores altos en las quebradas de orden 1. La característica perenne de las quebradas se podría relacionar a una conexión directa con el acuífero existente y que, de no haber dicha conexión estos cauces

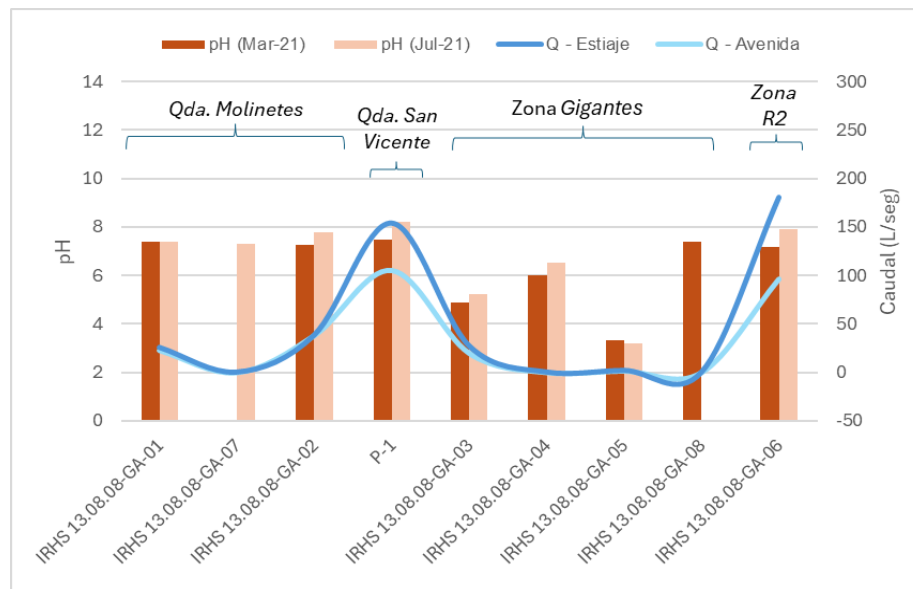
sólo estarían alimentados por agua de lluvia explicándose de esta manera su temporalidad.

4.7.2. Parámetros fisicoquímicos de bocaminas (Canales)

Se inventariaron y monitorearon bocaminas (canales que derivan las aguas provenientes desde el interior de la bocamina), habiendo identificado seis (06) estaciones en marzo 2021,

Figura 19

Comparación del pH vs caudal en bocaminas



Nota: Elaboración propia.

En las quebradas Vaso, zona gigantes y R2, con temperaturas que fluctúan entre 7.38 a 24.12 °C en la época de avenidas y entre 7 a 23.7°C en la época de estiaje; referente al pH varía entre 3.32 a 7.49 para la época de avenida y 3.19 a 8.2 en la época de estiaje, donde se puede ver que el punto más crítico es la estación de monitoreo IRHS 13.08.08-GA-05 que se trata de la bocamina Huacrachuco que presenta un pH ácido de 3.32 (época de avenida) y 3.19 (época de estiaje) con un caudal de 1.67 (época de avenida) y 0.2 l/s (época de estiaje),



asimismo, la estación IRHS 13.08.08-GA-03 presenta un pH de 4.88 para la época de avenida y 5.24 para la época de estiaje.

En la Tabla 13 se visualiza todos los datos fisicoquímicos recolectas en campo de las bocaminas, cabe indicar que en algunos puntos no se pudieron tomar datos porque estaban secos o se tenían inconvenientes con la comunidad.

4.7.1. Parámetros fisicoquímicos de lagunas

Tanto en marzo y julio del 2021 se evaluaron tres (03) lagunas, en las zonas de Tres lagunas, Qda. Laguna y Qda. Vaso. Para la campaña marzo 2021 las lagunas tienen temperaturas que varían entre 8.75 a 12.75°C, pH entre 7.22 a 7.57, siendo aguas neutras a ligeramente básicas y su conductividad eléctrica varía entre 90 a 105 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En la segunda campaña agosto 2021 no presentó mayor variación en sus parámetros fisicoquímicos; en temperatura entre 8.7 a 11.1 °C, pH entre 7.6 a 8.92 siendo sus aguas neutras a básicas y su conductividad eléctrica varía entre 218 a 332 $\mu\text{S}/\text{cm}$, la mayoría de las fuentes se ubican en la parte alta de los cauces naturales de agua, aportando su flujo a quebradas u otros cuerpos receptores.

4.7.2. Parámetros fisicoquímicos de bofedales

Tanto en marzo y julio del 2021 se evaluaron tres (03) bofedales, en la zona de la Qda. Laguna Blanca. Para la campaña marzo 2021 las lagunas tienen temperaturas que varían entre 8.82 a 11.23°C, pH entre 6.60 a 6.83, siendo aguas neutras y la conductividad eléctrica varía entre 38 a 95 $\mu\text{S}/\text{cm}$.



En la segunda campaña agosto 2021, el bofedal Bo498993-01 tiene una temperatura de 11, pH 7.66 y conductividad eléctrica de 378 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mencionar que, los otros dos bofedales se encontraron secos.

Tabla 12

Parámetros fisicoquímicos de ríos y quebradas

Código	Coord. (WGS 84)		Monitoreo Mar-2021				Monitoreo Jul-2021				Ubicación	
	Este	Norte	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	T (°C)	pH		CE (µS/cm)
Q498993-01	9108099	235209	8.26	7.31	125	7.2	7.21	330	7.2	7.21	330	Qda. Mush Mush
Q498993-02	9107046	232297	8.43	7.42	92	9.5	7.45	200	9.5	7.45	200	Qda. Vaso
Q498993-03	9108436	231164	9.3	5.81	60	140	6	10	140	6	10	Qda. Molinetes
Q498993-04	9109576	230869	10.79	6.98	877	10.9	7.94	1422	10.9	7.94	1422	Qda. SanVicente
Q498993-05	9109484	234579	8.42	7.9	97	8.1	7.63	254	8.1	7.63	254	Qda. Laguna Blanca
Q498993-06	9110911	228049	16.01	7.37	122	13.8	8	280	13.8	8	280	Qda. Cabana Baja
Q498993-07	9108169	234890	9.06	7.18	112	6.6	7.28	298	6.6	7.28	298	Qda. Mush Mush
Q498993-08	9109397	235099	8.25	7.13	77	11.6	7.52	274	11.6	7.52	274	Qda. Laguna Blanca
Q498993-09	9111924	228527	13.75	7.14	283	13.6	7.84	500	13.6	7.84	500	Qda. Potrero
Q498993-10	9111519	229386	12.33	7.59	117	11.5	7.77	266	11.5	7.77	266	Llacuabamba
Q498993-11	9110505	231193	11.17	7.47	100	8	7.6	224	8	7.6	224	Qda. Paccha
Q498993-12	9108225	231630	9.12	7.1	165	-	-	-	-	-	-	Qda. Molinetes
Q498993-13	9109174	232142	10.99	7.89	223	9.2	8.22	792	9.2	8.22	792	Qda. Mush Mush
Q498993-14	9110765	232786	10.83	8.02	108	6.5	7.26	252	6.5	7.26	252	Qda. Ventanas

Código	Coord. (WGS 84)		Monitoreo Mar-2021				Monitoreo Jul-2021				Ubicación	
	Este	Norte	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	T (°C)	pH		CE (µS/cm)
Q498993-15	9110794	233127	9.96	7.59	95	6.3	7.33	218	6.3	7.33	218	Qda. Ventanas
Q498993-16	9107857	234679	13.45	7.31	109	8.2	7.2	266	8.2	7.2	266	Qda. Mush Mush
Q498993-17	9107878	234556	11.37	7.71	118	6	7.44	312	6	7.44	312	Qda. Mush Mush
Q498993-18	9109131	235212	9.49	6.33	34	-	-	-	-	-	-	Qda. Laguna Blanca
Q498993-19	9108134	234125	9.81	7.49	119	6.7	7.43	288	6.7	7.43	288	Qda. Mush Mush
Q498993-20	9109441	235332	8.06	6.95	87	10.1	7.68	258	10.1	7.68	258	Qda. Laguna Blanca
Q498993-21	9109623	235291	8.79	7.16	104	-	-	-	-	-	-	Qda. Laguna Blanca
Q498993-22	9109177	234117	10.15	7.6	106	10	7.38	222	10	7.38	222	Qda. Laguna Blanca
Q498993-23	9107157	232925	7.73	7.27	85	8.4	7.68	238	8.4	7.68	238	Qda. Molinetes
Q498993-24	9107138	232382	7.76	7.44	87	6.3	7.29	266	6.3	7.29	266	Qda. Molinetes
Q498993-25	9112730	227174	-	-	-	15.5	7.9	322	15.5	7.9	322	Retamas
R498993-01	9107808	231850	10.15	7.23	101	7.3	-	111	7.3	-	111	Río Porvenir
R498993-02	9111510	227955	13.9	7.34	208	13.4	7.69	634	13.4	7.69	634	Llacuabamba
R498993-03	9110503	231357	13.04	7.72	97	10.7	7.71	256	10.7	7.71	256	Río Ventanas
R498993-04	9110453	231309	11.36	7.52	245	11.3	7.68	644	11.3	7.68	644	Río Porvenir
R498993-05	9108338	234037	10.53	7.54	115	8.4	6.94	262	8.4	6.94	262	Qda. Mush Mush

Código	Coord. (WGS 84)		Monitoreo Mar-2021				Monitoreo Jul-2021				Ubicación	
	Este	Norte	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	T (°C)	pH		CE (µS/cm)
R498993-06	9110461	230992	12.08	7.32	155	12.7	7.53	444				Las Chilcas
R498993-07	9108488	231525	8.29	7.58	142	10.8	7.81	358				Río Porvenir
R498993-08	9111548	227776	13.83	6.74	225	16.3	7.97	786				Río Llacuabamba
R498993-09	9112128	234952	-	-	-	8.3	7.46	236				Qda. Tres Lagunas
R498993-10	9112981	226770	-	-	-	15.4	8.2	800				Retamas

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13

Parámetros fisicoquímicos de bocaminas (Canales)

Código	Coordenadas		Monitoreo Mar-2021				Monitoreo Jul-2021			
	Este	Norte	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	Caudal (l/s)	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	Caudal (l/s)
IRHS 13.08.08-GA-01	232159	9106848	8.33	7.41	92	22.84	9.2	7.37	99	2.8
IRHS 13.08.08-GA-02	231725	9107080	9.09	7.26	108	38.06	8.4	7.77	163	0.4
IRHS 13.08.08-GA-03	231318	9108359	10.81	4.88	1842	20.01	10.4	5.24	1030	7.29
IRHS 13.08.08-GA-04	231172	9108427	7.38	6.02	154	0.1	7	6.53	140	0.05
IRHS 13.08.08-GA-05	231089	9108207	9.69	3.32	3135	1.67	7.2	3.19	2324	0.2

Código	Coordenadas				Monitoreo Mar-2021				Monitoreo Jul-2021					
	Este	Norte	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	Caudal (l/s)	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	Caudal (l/s)	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	Caudal (l/s)
IRHS 13.08.08-GA-06	227884	9111471	24.12	7.17	483	96.26	23.7	7.93	567	84.5				
IRHS 13.08.08-GA-07	231413	9107744	-	-	-	-	11	7.3	309	0.1				
IRHS 13.08.08-GA-08	230393	9109131	10.09	7.4	1426	<0.05	-	-	-	-				
P-1	230572	9110569	13.76	7.49	1055	105.12	15.6	8.2	705	49				

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14:

Parámetros fisicoquímicos de lagunas

Código	Coordenadas				Monitoreo Mar-2021				Monitoreo Jul-2021				Ubicación
	Este	Norte	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	T (°C)	pH	CE (µS/cm)		
LG498993-01	9113515	235095	12.75	7.57	102	10.3	7.6	228	102	7.6	228	228	Tres Lagunas
LG498993-02	9109379	234287	10.51	7.22	105	11.1	7.67	218	105	7.67	218	218	Qda. Laguna
LG498993-03	9107128	231702	8.75	7.34	90	8.7	8.92	332	90	8.92	332	332	Qda. Vaso

Tabla 15*Parámetros fisicoquímicos de bofedales*

Código	Coordenadas			Monitoreo Mar-2021			Monitoreo Jul-2021		
	Este	Norte	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	
Bo498993-01	9109487	234607	11.23	6.83	38	11	7.66	378	
Bo498993-02	9109486	234756	9.61	6.6	95	-	-	-	
Bo498993-03	9109473	234984	8.82	6.76	89	-	-	-	

Nota: Elaboración propia.



4.7.3. Parámetros fisicoquímicos de piezómetros

En el área de estudio se han monitoreado todos los piezómetros existentes disponibles, los piezómetros someros se encuentran aparentemente instalados en suelo (depósitos fluvioglaciares, fluvio aluviales, aluviales y lacustres) en tanto los piezómetros profundos se instalaron en roca (filitas, dioritas, microdioritas, meta andesita y andesitas); para la campaña de marzo 2021 se han registrado siete (07) piezómetros y se tomaron sus respectivos parámetros fisicoquímicos entre ellos: temperatura entre 7.8° a 13.6°C, pH entre 6.9 a 8.7 siendo aguas neutras a ligeramente alcalinas y su conductividad eléctrica que varía entre 151 a 611 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para aguas sin mayor lixiviación de minerales. En la segunda campaña agosto 2021 se monitoreo 17 piezómetros, no se registró mayor variación en sus parámetros fisicoquímicos; la temperatura varía entre 7.5 a 14.1 °C, pH entre 7.0 a 8.4, la conductividad eléctrica varía entre 102 a 730.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en zonas sin influencia de mineralización.

Tabla 16

Resumen de parámetros fisicoquímicos en piezómetros

Código	Coordenadas				Monitoreo Mar-2021				Monitoreo Jul-2021					
	Este	Norte	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	N.A. (m.)	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	N.A. (m.)	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	N.A. (m.)
IRHS 13.08.08-PZ-01A	234187	9108250	10.01	8.7	151	--	9.8	7.3	141	--	--	--	--	--
IRHS 13.08.08-PZ-01B	234187	9108250	9.07	7.4	152	--	9.07	7.4	146	--	--	0.735	146	0.735
IRHS 13.08.08-PZ-02	229416	9111336	13.6	7.4	270	--	13.5	7.7	250	--	--	--	250	--
IRHS 13.08.08-PZ-03	231305	9110516	13	7.1	378	2.56	12.7	7.3	320	2.56	12.7	7.3	320	2.76
IRHS 13.08.08-PZ-04	233920	9109044	9.2	6.9	156	8.23	8.8	7.6	173	8.23	8.8	7.6	173	9.45
IRHS 13.08.08-PZ-05	232976	9107164	7.8	7.2	183	--	7.5	7.2	157	--	7.5	7.2	157	--
IRHS 13.08.08-PZ-06	231516	9108482	10.1	7.7	611	15.58	10.6	7	636	15.58	10.6	7	636	17.74
IRHS 13.08.08-PZ-07A	227915	9111489	--	--	--	--	14.1	7.5	221	--	14.1	7.5	221	9.57
IRHS 13.08.08-PZ-07B	227915	9111489	--	--	--	--	13.4	7.6	238	--	13.4	7.6	238	7.42
IRHS 13.08.08-PZ-08A	230048	9110661	--	--	--	--	13.5	7.8	343	--	13.5	7.8	343	29.24
IRHS 13.08.08-PZ-08B	230048	9110661	--	--	--	--	11.9	7.3	420	--	11.9	7.3	420	14.62
IRHS 13.08.08-PZ-09A	230605	9110320	--	--	--	--	12.8	8.4	102	--	12.8	8.4	102	12.8
IRHS 13.08.08-PZ-09B	230605	9110320	--	--	--	--	12.8	8.4	105	--	12.8	8.4	105	12.8

Código	Coordenadas		Monitoreo Mar-2021				Monitoreo Jul-2021			
	Este	Norte	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	N.A. (m.)	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	N.A. (m.)
IRHS 13.08.08-PZ-10	231618	9110096	--	--	--	--	12.7	8.3	357	31.78
IRHS 13.08.08-PZ-11	230603	9109449	--	--	--	--	13.1	7.4	730	65.53
IRHS 13.08.08-PZ-12A	231798	9107840	--	--	--	--	10.4	8.1	142	--
IRHS 13.08.08-PZ-12B	231798	9107840	--	--	--	--	10.2	8	133	--

Nota: (--) Estaciones de monitoreo no inventariadas o monitoreadas.

Tabla 17

Resumen de parámetros fisicoquímicos en manantiales

Código	Coordenadas		Monitoreo Mar-2021				Monitoreo Jul-2021			
	Este	Norte	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	Caudal (l/s)	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	Caudal (l/s)
IRHS 13.08.08-MA-01	234790	9107802	9.6	7	88	0.2	8.1	6.6	159	0.2
IRHS 13.08.08-MA-02	233934	9108318	9.7	7.4	144	0.4	--	--	--	--
IRHS 13.08.08-MA-03	235329	9109174	9	6.8	73	0.8	--	--	--	--
IRHS 13.08.08-MA-04	233045	9107147	7.3	7.4	89	6.3	7.8	7.6	109	1.1
IRHS 13.08.08-MA-05	232839	9107101	8.4	7	56	0.2	--	--	--	--



Código	Coordenadas		Monitoreo Mar-2021				Monitoreo Jul-2021			
	Este	Norte	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	Caudal (l/s)	T (°C)	pH	CE (µS/cm)	Caudal (l/s)
IRHS 13.08.08-MA-06	231948	9107977	8.8	6.7	106	1.1	--	--	--	--

Nota: (--) Estaciones de monitoreo no inventariadas o monitoreadas.



4.7.4. Parámetros fisicoquímicos de manantiales

En marzo 2021 se evaluaron seis (06) manantiales, procedente principalmente de rocas metamórficas (filitas) y suelos cuaternarios (fluvioglaciario – coluvial), en las zonas de las quebradas Mush Mush, Blanca y Molinete, en menor proporción en la secuencia de la falla Chilcas y otros en contactos litológicos. Para la campaña marzo 2021 los manantiales tienen temperaturas que varían entre 7.3° a 9.7°C, pH entre 6.7 a 7.4, siendo aguas ligeramente ácidas a neutras y conductividad eléctrica el cual varía entre 56 a 144 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Para la segunda campaña se observó que no presentó mayor variación en sus parámetros fisicoquímicos; la temperatura varía entre 7.8 a 8.1 °C, el pH entre 6.6 a 7.6 siendo sus aguas neutras y su conductividad eléctrica fluctúa entre 109 a 159 $\mu\text{S}/\text{cm}$, la mayoría de las fuentes se ubican en la parte alta de los cauces naturales de agua, aportando su flujo a quebradas u otros cuerpos receptores.

En general los manantiales en rocas filitas registraron baja concentración de sales disueltas, siendo los manantiales ubicados en la zona de Cerro Alto Blanco y Molinetes, siendo aguas blandas.

4.8. MUESTREO DE FUENTES DE AGUA

Se muestrearon siete (07) muestras tanto en la primera (época de avenidas, marzo - abril) y segunda campaña (época de estiaje, julio - agosto), a continuación, se tiene la Tabla 18 donde se visualiza los parámetros fisicoquímicos de la etapa de muestreo para ambas temporadas.

Tabla 18

Estaciones de muestreo

Código	Este	Norte	T (°C)	pH	CE (μ S/cm)	TDS (ppm)	N.A. (m)	Prof. (m)	Caudal (l/s)	Tipo
Muestreo abril del 2021 (época de avenida)										
IRHS 13.08.08-GA-05	231089	9108207	9.52	3.25	3117	1556	-	-	1.67	Canal
IRHS 13.08.08-MA-04	233045	9107147	7.3	7.38	89	45	-	-	6.3	Manantial
IRHS 13.08.08-PZ-06	231516	9108482	10.42	6.62	608	304	15.58	57.75	-	Piezómetro
IRHS 13.08.08-PZ-01A	234187	9108250	9.22	8.38	149	75	Surgente	25.7	-	Piezómetro
IRHS 13.08.08-PZ-03	231305	9110517	12.98	6.03	366	183	2.56	42.5	-	Piezómetro
R498993-05	234037	9108338	10.2	7.3	109	54	-	-	248.23	Riachuelo
R498993-08	227776	9111548	14.22	7.1	214	107	-	-	4206.45	Río
Muestreo agosto del 2021 (época de estiaje)										
IRHS 13.08.08-GA-05	231089	9108207	6.4	3.61	2084	1041	-	-	0.2	Canal
IRHS 13.08.08-MA-04	233045	9107147	9.3	6.18	118	59	-	-	1.1	Manantial
IRHS 13.08.08-PZ-06	231516	9108482	10.5	7.54	549	275	17.74	57.75	-	Piezómetro
IRHS 13.08.08-PZ-01A	234187	9108250	9.7	9.3	140	71	Surgente	25.7	-	Piezómetro
IRHS 13.08.08-PZ-03	231305	9110517	12.7	8.61	324	162	2.76	42.5	-	Piezómetro



Código	Este	Norte	T (°C)	pH	CE (μ S/cm)	TDS (ppm)	N.A. (m)	Prof. (m)	Caudal (l/s)	Tipo
R498993-05	234037	9108338	10.5	7.4	112	52	-	-	6.7	Riachuelo
R498993-08	227776	9111548	16.6	7.99	434	216	-	-	721.91	Río

Nota: Elaboración propia.

4.9. CONTROL DE CALIDAD

4.9.1. Correlación de Conductividad Eléctrica y Sólidos Totales Disueltos

En las Figura 20 y Figura 21 se muestra la correlación lineal que tienen los sólidos totales disueltos y la conductividad eléctrica:

Figura 20

Correlación del TDS y CE para la primera campaña

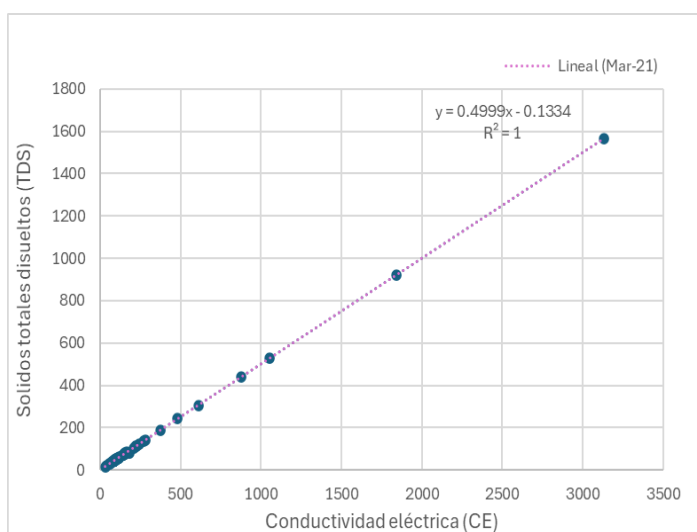
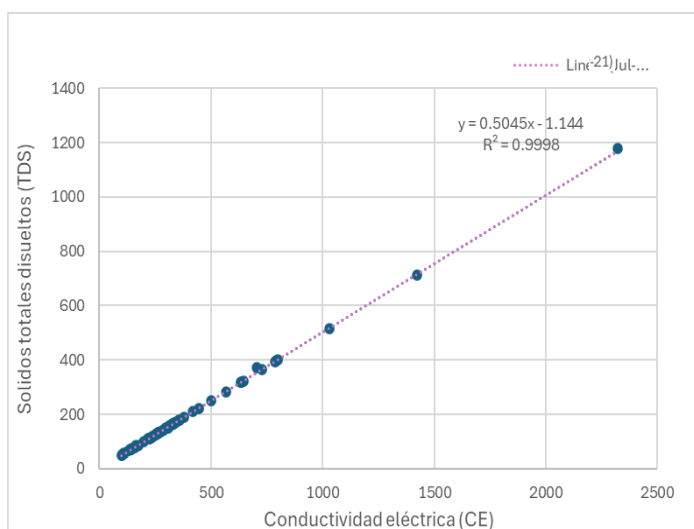


Figura 21

Correlación del TDS y CE para la segunda campaña





La correlación TDS y CE en las estaciones muestreadas indican que, a mayor concentración de sales disueltas, mayor será la cantidad de iones que transporten carga iónica, y por ende mayor CE, las que están estrechamente ligados; con ella se puede realizar un control de calidad de los resultados de laboratorio, mediante una recta de tendencia tipo lineal, cabe mencionar que para la primera y segunda campaña se tiene una recta lineal uniforme donde se tiene $R^2 = 1$ y $R^2 = 0.99$ respectivamente.

4.9.2. Control de calidad (Qc) balance iónico (IBE)

Para evaluar la confiabilidad y control de calidad de los análisis químicos, se calculó el error del balance iónico (error de equilibrio de carga iónica) de cada muestra de agua mediante las mayores especies inorgánicas (iones), que constituyen en general la calidad del agua superficial y subterránea:

- Cationes principales: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{1+} y K^{1+} .
- Metales adicionales: Al^{3+} , $\text{Mn}^{2+/4+}$, $\text{Fe}^{2+/3+}$, $\text{Cu}^{1+/2+/3+4+}$, Cd^{2+} y Zn^{2+} (relevantes en aguas ácidas y zonas mineralizadas).
- Aniones principales: Cl^{1-} , SO_4^{2-} y HCO_3^{1-} y CO_3^{2-} .

Los resultados muestran signos positivos cuando predominan los cationes y negativos cuando predominan los aniones. En las



Tabla **19** y



Tabla **20** se muestran los porcentajes de los errores de balance iónico (IBE) para los análisis químicos de las estaciones de muestreo para ambas campañas. Se consideran aceptables los resultados con un error de balance iónico (IBE) entre $\pm 15\%$ para el análisis de aguas dulces (Custodio & Llamas, 1991). Los resultados de laboratorio muestran un error de balance iónico que varían entre -4.99 y 12.66% para la primera campaña y -7.60 a 9.38% para la segunda campaña.

Tabla 19

Balance iónico (IBE) para la primera campaña

ID Punto	CE (uS/cm)	Σ Aniones (meq/L)	Σ Cationes (meq/L)	Σ Cationes - Σ Aniones (meq/L)	Error (%)	Admisibilidad
IRHS 13.08.08-GA-05	3117	44.64	38.69	5.95	7.14	Admisible
IRHS 13.08.08-MA-04	89	0.86	0.88	-0.03	-1.46	Admisible
IRHS 13.08.08-PZ-06	608	6.55	6.07	0.48	3.78	Admisible
IRHS 13.08.08-PZ-01A	149	1.94	1.51	0.44	12.66	Admisible
IRHS 13.08.08-PZ-03	366	3.52	3.89	-0.37	-4.99	Admisible
R498993-05	109	1.07	1.08	-0.01	-0.49	Admisible
R498993-08	214	2.01	2.00	0.01	0.25	Admisible

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20

Balance iónico (IBE) para la segunda campaña

ID Punto	CE (uS/cm)	Σ Aniones (meq/L)	Σ Cationes (meq/L)	Σ Cationes - Σ Aniones (meq/L)	Error (%)	Admisibilidad
IRHS 13.08.08-GA-05	2084	36.23	30.01	6.21	9.38	Admisible
IRHS 13.08.08-MA-04	118	1.12	1.29	-0.17	-7.04	Admisible
IRHS 13.08.08-PZ-06	549	6.81	6.38	0.42	3.20	Admisible
IRHS 13.08.08-PZ-01A	140	1.37	1.52	-0.16	-5.42	Admisible
IRHS 13.08.08-PZ-03	324	3.23	3.66	-0.44	-6.32	Admisible
R498993-05	112	1.23	1.43	-0.20	-7.60	Admisible
R498993-08	434	4.74	4.74	0.01	0.06	Admisible

Fuente: Elaboración propia.

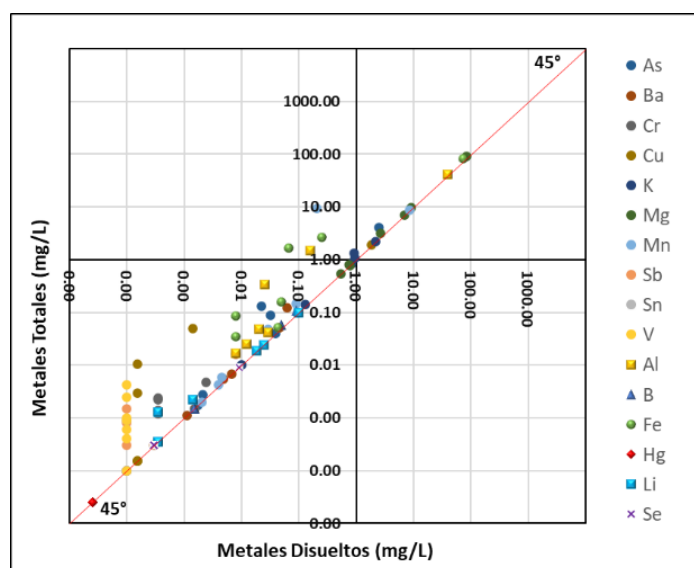
Cabe indicar que, con los porcentajes de rangos de error mencionadas anteriormente, todas las muestras cumplen con el control de calidad y son aptas para su tratamiento hidroquímico.

4.9.3. Control de calidad (Qc) – Concentración de metales totales y metales disueltos

En las Figura 22 y Figura 23 se muestran las concentraciones de los metales disueltos (mg/L) versus los metales totales (mg/L) para ambas campañas. Se ve que los cationes disueltos y totales (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Ca^{+1} y K^{+1}) se ajustan a la línea diagonal de 45° , mientras que los metales y metaloides restantes (Al^{+3} , $\text{Mn}^{+2/+4}$, $\text{Fe}^{+2/+3}$ y Zn^{+2}) tienden a presentar casi mayores concentraciones con respecto a la fracción de los metales disueltos. Al mismo tiempo, $\text{Ag}^{+2/+3}$, $\text{Pb}^{+2/+3}$ y $\text{Cu}^{+1/+2}$ presentan mayores concentraciones con respecto a la fracción de metales disueltos.

Figura 22

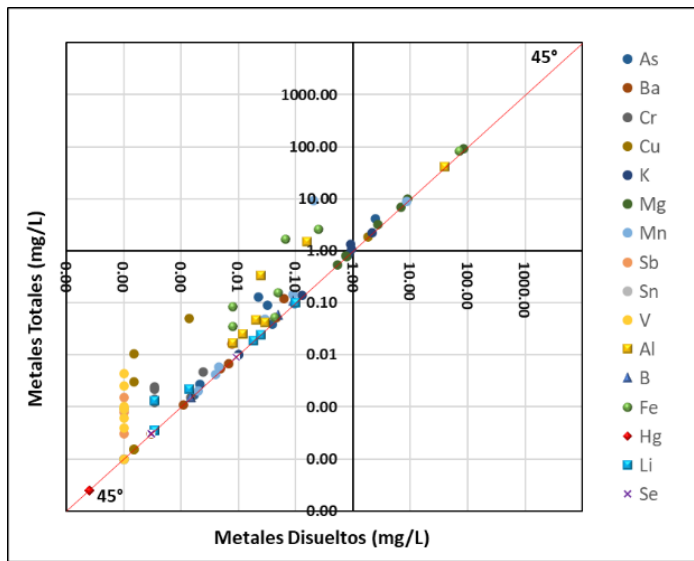
Comparación de los metales totales y los metales disueltos.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 23

Comparación de los metales totales y los metales disueltos.



Fuente: Elaboración propia.



CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1. RESULTADOS DE CALIDAD DEL AGUA

En las Tabla 21 y Tabla 22 se presentan los resultados de los análisis realizados a las muestras recolectadas durante el muestreo de abril y julio del 2021, asimismo, se visualiza la comparación con los ECA-Cat. III: D1 y D2; Cat I: A1, A2 y A3, aplicado para aguas superficiales y de manera referencial para aguas subterráneas.

5.1.1. Estándares de calidad ambiental (ECA categoría I – A1, A2 y A3)

El estándar de calidad ambiental de la categoría I, subcategoría A (Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable) se muestran en la Tabla 21, donde se puede evidenciar que la mayor parte de las excedencias están en la estación de muestreo IRHS 13.08.08-GA-05 (bocamina), dicha estación excede en conductividad eléctrica (Cat I-A1 y Cat I-A2), potencial de hidrógeno pH (Cat I-A1, Cat I-A2 y Cat I-A3), sólidos totales disueltos (Cat I-A1, Cat I-A2 y Cat I-A3), sulfato (Cat I-A1 y Cat I-A2), fluoruros (Cat I-A1), aluminio (Cat I-A1, Cat I-A2 y Cat I-A3), arsénico (Cat I-A1, Cat I-A2 y Cat I-A3), cadmio (Cat I-A1, Cat I-A2 y Cat I-A3), hierro (Cat I-A1, Cat I-A2 y Cat I-A3), manganeso (Cat I-A1, Cat I-A2 y Cat I-A3), plomo (Cat I-A1, Cat I-A2 y Cat I-A3), uranio (Cat I-A1, Cat I-A2 y Cat I-A3) y zinc (Cat I-A1, Cat I-A2 y Cat I-A3).

Por otro lado, se denota que el analito que sobrepasa en la mayoría de las estaciones de muestreo es el arsénico, dicho parámetro sobrepasa el ECA en las estaciones de muestreo siguientes: IRHS 13.08.08-GA-05, IRHS 13.08.08-PZ-06, IRHS 13.08.08-PZ-01A, IRHS 13.08.08-PZ-03 y R498993-08.



Finalmente, la estación de muestreo IRHS 13.08.08-PZ-03 presenta excedencia referente al ECA en el analito del fluoruro.

Tabla 21

Estándar de Calidad Ambiental - Categoría I para ambas temporadas

Parámetro	Cond. Eléctrica	pH	TDS	SO ₄	F	Al	As	Cd	Fe	Mn	Pb	U	Zn
Unidad	uS/cm	Unidad de pH	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Cat I-A1	1500	6,5 – 8,5	1 000	250	1,5	0,9	0,01	0,003	0,3	0,4	0,01	0,02	3
Cat I-A2	1600	5,5 – 9,0	1 000	500	**	5	0,01	0,005	1	0,4	0,05	0,02	5
Cat I-A3	**	5,5 - 9,0	1 500	**	**	5	0,15	0,01	5	0,5	0,05	0,02	5
Muestreo Abril del 2021													
IRHS 13.08.08-GA-05	3135	3.32	1567	2131	1.737	38.91	2.438	0.2322	72.85	8.519	0.07	0.0449	41.05
IRHS 13.08.08-MA-04	89	7.38	45	1.799	0.034	0.008	0.0021	< 0.00010	< 0.016	0.002	< 0.0002	< 0.0002	< 0.008
IRHS 13.08.08-PZ-06	611	7.68	306	221.4	0.135	0.025	0.0222	< 0.00010	0.067	0.2022	0.0021	0.0024	0.012
IRHS 13.08.08-PZ-01A	151	8.71	75	12.46	0.304	0.029	0.0393	< 0.00010	< 0.016	0.004	0.0004	< 0.0002	< 0.008
IRHS 13.08.08-PZ-03	378	7.05	189	32.86	2.271	0.02	0.0959	< 0.00010	0.049	0.0293	0.0003	< 0.0002	0.017
R498993-05	115	7.54	57	3.331	0.037	0.012	0.0017	< 0.00010	0.043	0.0045	< 0.0002	< 0.0002	< 0.008
R498993-08	225	6.74	112	46.38	0.196	0.155	0.0322	0.00052	0.253	0.0888	0.0033	0.0004	0.061
Muestreo Julio del 2021													
IRHS 13.08.08-GA-05	2324	3.19	1177	1725	1.644	21.24	0.1226	0.1094	8.015	7.42	0.0408	0.0293	20.15
IRHS 13.08.08-MA-04	109	7.63	55	1.543	0.042	0.011	0.0014	0.00005	0.008	0.004	0.0001	0.0001	0.004
IRHS 13.08.08-PZ-06	636	7	318	243.4	0.404	0.011	0.054	0.00005	0.059	0.1251	0.0006	0.0028	0.039
IRHS 13.08.08-PZ-01A	141	7.26	70	12.04	0.348	0.012	0.0434	0.00005	0.008	0.0015	0.0001	0.0001	0.004
IRHS 13.08.08-PZ-03	320	7.27	160	30.33	2.679	0.04	0.0915	0.00005	0.043	0.0277	0.0001	0.0001	0.004
R498993-05	262	6.94	131	3.971	0.037	0.012	0.0025	0.00005	0.031	0.0031	0.0001	0.0001	0.004
R498993-08	786	7.97	393	133.4	1.189	0.305	0.1499	0.00005	0.67	0.1384	0.0084	0.0014	0.042

Nota:

Excede el ECA-Categoría I-A1

Excede el ECA-Categoría I-A1 y A2

Excede el ECA-Categoría I-A1, A2 y A3

(**) Parámetro no aplica para esta Subcategoría.

Cat.I-A1: Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección

Cat.I-A2: Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional

Cat.I-A3: Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado

Los parámetros fisicoquímicos como el pH, CE y TDS son de campo.



5.1.2. Estándares de calidad ambiental (ECA categoría III – D1 y D2)

Según la Tabla 22 se visualiza que la estación más crítica es la muestra IRHS 13.08.08-GA-05 el cual sobrepasa los siguientes parámetros: conductividad eléctrica (CE,) tanto en la primera y segunda campaña en el ECA categoría III – D1, sulfatos (SO_4) tanto en la primera y segunda campaña en el ECA categoría III – D1, aluminio (Al) tanto en la temporada de estiaje y avenida para la categoría III D1 y D2, cadmio (Cd) tanto en la temporada de estiaje y avenida en la categoría III D1 y D2, cobre (Cu) tanto en la temporada de estiaje y avenida en la categoría III D1 y D2, hierro (Fe) tanto en la temporada de estiaje y avenida en la categoría III D1, plomo (Pb) tanto en la temporada de estiaje y avenida en la categoría III D1 y D2, zinc (Zn) tanto en la temporada de estiaje y avenida en la categoría III D1 y D2.

Asimismo, según la Tabla 22 también se tienen excedencias en más de una estación de muestreo, los cuales se mencionan a continuación:

a) **Potencial hidrogenión (Ph)**

Según la Tabla 22 la estación de muestreo IRHS 13.08.08-GA-05 presenta excedencia tanto en la primera y segunda campaña en el ECA categoría III – D1 y D2, asimismo, se denota que la estación de muestreo IRHS 13.08.08-PZ-03 excede el ECA categoría III D1 y D2 en ambas temporadas.

b) **Flúor (F)**

Las estaciones de muestreo que exceden el ECA categoría III D1 son: IRHS 13.08.08-GA-05, IRHS 13.08.08-PZ-03 en ambas temporadas,



por otro lado, la estación de muestreo R498993-08 excede el ECA categoría III D1 solo en la temporada de estiaje.

c) Arsénico (As)

Para este analito se tienen excedencias en las siguientes estaciones:
IRHS 13.08.08-GA-05 en ambas temporadas, en la categoría III D1 y D2,
y IRHS 13.08.08-PZ-06 únicamente en la categoría III D1.

d) Cobalto (Co)

Para este analito se tienen excedencias en las siguientes estaciones:
IRHS 13.08.08-GA-05 en ambas temporadas, únicamente en la categoría
III D1, y IRHS 13.08.08-PZ-06 únicamente en la categoría III D1.

e) Manganeso (Mn)

Para este analito se tienen excedencias en las siguientes estaciones:
IRHS 13.08.08-GA-05 en ambas temporadas, en la categoría III D1 y D2,
y IRHS 13.08.08-PZ-06 en la categoría III D1 y D2.

Tabla 22

Estándar de Calidad Ambiental – Categoría III para ambas temporadas

Parámetro	Cond. Eléctrica	pH	SO ₄	F	Al	As	Cd	Co	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn
Unidad	uS/cm	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Cat III-D1	2500	6.5 - 8.5	1000	1	5	0.1	0.01	0.05	0.2	5	0.2	0.05	2
Cat III-D2	5000	6.5 - 8.4	1000	**	5	0.2	0.05	1	0.5	**	0.2	0.05	24
Muestreo Abril del 2021													
IRHS 13.08.08-GA-05	3135	3.32	2131	1.737	40.58	4.113	0.2375	0.236	1.875	81.67	8.726	0.0849	41.85
IRHS 13.08.08-MA-04	89	7.38	1.799	0.034	0.017	0.0027	< 0.00010	< 0.0002	< 0.0003	0.035	0.002	< 0.0002	< 0.0008
IRHS 13.08.08-PZ-06	611	7.68	221.4	0.135	0.338	0.131	0.00142	0.0581	0.0497	1.66	9.319	0.0438	0.071
IRHS 13.08.08-PZ-01A	151	8.71	12.46	0.304	0.042	0.0393	< 0.00010	< 0.0002	< 0.0003	0.084	0.0042	0.0008	< 0.0008
IRHS 13.08.08-PZ-03	378	7.05	32.86	2.271	0.047	0.0979	< 0.00010	0.0003	0.003	0.158	0.0485	0.0019	0.017
R498993-05	115	7.54	3.331	0.037	0.025	0.0017	< 0.00010	< 0.0002	< 0.0003	0.052	0.0059	< 0.0002	< 0.0008
R498993-08	225	6.74	46.38	0.196	1.479	0.0892	0.00098	0.0018	0.0103	2.604	0.1461	0.0161	0.165
Muestreo Julio del 2021													
IRHS 13.08.08-GA-05	2324	3.19	1725	1.644	23.76	0.6651	0.1167	0.2204	0.8035	30.83	8.111	0.0612	21.33
IRHS 13.08.08-MA-04	109	7.63	1.543	0.042	0.172	0.0016	< 0.00010	< 0.0002	0.0021	0.239	0.0137	< 0.0002	< 0.0008
IRHS 13.08.08-PZ-06	636	7	243.4	0.404	0.334	0.6454	0.00083	0.0505	0.007	3.112	16.22	0.0231	0.047
IRHS 13.08.08-PZ-01A	141	7.26	12.04	0.348	0.042	0.0448	< 0.00010	< 0.0002	< 0.0003	0.053	0.0025	0.0006	< 0.0008
IRHS 13.08.08-PZ-03	320	7.27	30.33	2.679	0.067	0.0937	< 0.00010	< 0.0002	0.0012	0.163	0.0277	0.0015	< 0.0008
R498993-05	262	6.94	3.971	0.037	0.015	0.0025	< 0.00010	< 0.0002	< 0.0003	0.031	0.0032	< 0.0002	< 0.0008
R498993-08	786	7.97	133.4	1.189	2.522	0.4743	0.00085	0.0025	0.0102	5.92	0.2422	0.0534	0.142
Nota:	<p> ■ Excede el ECA-Categoría III-D1 ■ Excede el ECA-Categoría III-D2 ■ Excede el ECA-Categoría III-D1 y D2 </p> <p>(**) Parámetro no aplica para esta Subcategoría. Cat.III-D1: Riego de vegetales Cat.III-D2: Bebida de animales </p>												



5.1.3. Calidad de agua para consumo humano (LMP)

De acuerdo con el Reglamento de la Calidad del Agua para aprobado por el DS N° 031-2010-SA, se realizó la comparación con los límites máximos permisibles (LMPs) de parámetros de calidad organoléptica y LMPs de parámetros químicos inorgánicos y orgánicos para ambas temporadas, en la estación R498993-05 está ubicada aguas arriba de la minera Marsa en la quebrada Mush mush y la estación IRHS 13.08.08-MA-04 está aguas arriba de la actividad minera artesanal de la quebrada Molinetes. Por otro lado, se puede visualizar la excedencia en la mayoría de las estaciones del arsénico, seguido del fierro y plomo.

En la Tabla 23 se muestran los resultados, en la cual se puede determinar que las estaciones de muestreo IRHS 13.08.08-MA-04 y R498993-05 no presentan excedencias y serían aptas para el consumo humano, cabe mencionar que dichas estaciones se encuentran en cotas superiores a la actividad minera.

Tabla 23

Comparación con calidad de agua para consumo humano del MINSA.

Parámetro	pH	CE	TDS	SO ₄	Fe	As	Cd	Ni	Pb	U
Unidad	Valor de pH	umho/cm	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
L.M.P. del MINSA	6,5 a 8,5	1 500	1 000	250	0.3	0.01	0.003	0.02	0.01	0.015
Muestreo abril del 2021										
IRHS 13.08.08-GA-05	3.32	3135	1567	2131	81.67	4.113	0.2375	0.0386	0.0849	0.0489
IRHS 13.08.08-MA-04	7.38	89	45	1.799	0.035	0.0027	<0.00010	<0.0002	<0.0002	<0.0002
IRHS 13.08.08-PZ-06	7.68	611	306	221.4	1.66	0.131	0.00142	0.0201	0.0438	0.0032
IRHS 13.08.08-PZ-01A	8.71	151	75	12.46	0.084	0.0393	<0.00010	<0.0002	0.0008	<0.0002
IRHS 13.08.08-PZ-03	7.05	378	189	32.86	0.158	0.0979	<0.00010	0.0006	0.0019	<0.0002
R498993-05	7.54	115	57	3.331	0.052	0.0017	<0.00010	<0.0002	<0.0002	<0.0002
R498993-08	6.74	225	112	46.38	2.604	0.0892	0.00098	0.0013	0.0161	0.0004
Muestreo agosto del 2021										
IRHS 13.08.08-GA-05	3.19	2324	1177	1725	30.83	0.6651	0.1167	0.0271	0.0612	0.0343
IRHS 13.08.08-MA-04	7.63	109	55	1.543	0.239	0.0016	<0.00010	<0.0002	<0.0002	<0.0002
IRHS 13.08.08-PZ-06	7	636	318	243.4	3.112	0.6454	0.00083	0.0166	0.0231	0.005
IRHS 13.08.08-PZ-01A	7.26	141	70	12.04	0.053	0.0448	<0.00010	<0.0002	0.0006	<0.0002
IRHS 13.08.08-PZ-03	7.27	320	160	30.33	0.163	0.0937	<0.00010	<0.0002	0.0015	<0.0002
R498993-05	6.94	262	131	3.971	0.031	0.0025	<0.00010	<0.0002	<0.0002	<0.0002
R498993-08	7.97	786	393	133.4	5.92	0.4743	0.00085	0.0019	0.0534	0.0018

Nota: Sobrepassa el L.M.P. del MINSA, Perú.

5.1.4. Análisis de las excedencias de los ECAs por parámetro o analito

La estación de muestreo IRHS 13.08.08-GA-05 presenta la mayor cantidad de excedencias respecto a los Estándares de Calidad Ambiental Categoría I – D1 y D2, y Categoría III – A1, A2 y A3, los parámetros que sobrepasan en dichas estación son las siguientes: conductividad eléctrica, pH, sólidos totales disueltos, sulfatos, aluminio, arsénico, cadmio, fierro, manganeso, zinc, plomo, uranio, cobalto y cobre, dichos parámetros serian producto de la interacción del agua con estructuras mineralizadas y componentes antrópicos que se utilizan en minería subterránea, cabe mencionar que esta estación de muestreo es la captación de agua proveniente de la bocamina Huacrachuco.

A continuación, se muestran parámetros fisicoquímicos y analitos que por lo menos sobrepasaron el ECA I o III en cualquiera de sus subcategorías en más de una estación de muestreo:

a) **Potencial hidrogenión (PH)**

Este parámetro excede en las estaciones de muestreo siguientes: IRHS 13.08.08-GA-05 (bocamina) que contiene un valor de 3.25 y 3.61 de pH en la época de avenida y época de estiaje respectivamente, el cual estaría relacionado con aguas que están en contacto con estructuras geológicas y minerales sulfurosos o con agentes antrópicos, IRHS 13.08.08-PZ-03 (piezómetro) que tiene un pH de 6.03 y 8.61 en la época de avenida y estiaje respectivamente, que al tratarse de un piezómetro de 42.50 m de profundidad probablemente esté relacionado a estructuras con contenido de minerales sulfurosos, IRHS 13.08.08-MA-04 (Manantial) que contiene un pH de 7.38 y 6.18 en la época de avenida y estiaje



respectivamente, este valor ligeramente ácido estaría relacionado al contacto del agua con estructuras geológicas primarias o secundarias tales como, vetas con contenido de minerales sulfurosos o rocas ácidas (Batolito de Pataz), finalmente, la estación de muestreo IRHS 13.08.08-PZ-01A (piezómetro surgente) que tiene un pH de 8.38 y 9.30 en la época de avenida y estiaje respectivamente, que tiene una profundidad de 25.70m el cual estaría relacionado al intrusivo del batolito de Pataz o a al complejo del Marañón, o como también a estructuras geológicas con contenido de minerales sulfurosos.

b) Fluoruro (F)

Este parámetro excede en las siguientes estaciones de muestreo: IRHS 13.08.08-GA-05 (bocamina) que contiene valores de fluoruros de 1.74 y 1.64 mg/L en la época de avenida y estiaje respectivamente, estaría íntimamente relacionado a factores antrópicos o material geológico con contenido de minerales sulfurosos; por otro lado, la estación de muestreo IRHS 13.08.08-PZ-03 que tiene valores de fluoruros de 2.27 y 2.68 mg/L en la época de avenidas y estiaje respectivamente, basándonos en Kullenberg y Sen (1973) y Handa (1975), la existencia de fluoruro disuelto sólo es posible en condiciones físico-químicas favorables y cuando el tiempo de residencia es suficientemente largo, asimismo, según la Figura 5 se corrobora que este tipo de agua es de carácter de flujo intermedio que nos indica un mediano tiempo de residencia del agua en el acuífero, asimismo, según Lee et al., 1997 y Kim, 2001, las concentraciones de fluoruro se presentan típicamente en los pozos más profundos, así como en los acuíferos de litología granítica y gnéisica, tendencia que ha sido



reconocida en muchos estudios sobre agua subterránea en terrenos graníticos, bajo ese contexto, la excedencia de flúor en esta estación estaría ligada al batolito de Pataz (dioritas y granodioritas) y al complejo de Marañón (filitas y esquisto con bancos de metaandesita). Finalmente, la estación de muestreo R498993-08 que contiene valores de flúor de 0.20 y 1.19 mg/L en la época de avenida y estiaje respectivamente, cabe mencionar que el valor de la época de estiaje excede el ECA categoría III D1, esto podría estar influenciado por actividad antrópica del centro poblado de Llacuabamba, ya que dicha estación de muestreo está ubicada aguas debajo de Llacuabamba.

c) Arsénico (As)

Este parámetro es excedido en las siguientes estaciones de muestreo: IRHS 13.08.08-GA-05, IRHS 13.08.08-PZ-06, IRHS 13.08.08-PZ-01A, IRHS 13.08.08-PZ-03 y R498993-08, según el informe técnico sustentatorio emitido por MARSА (Minería Aurífera Retamas) en el 2016, afirman que, realizaron una campaña de muestreo donde recolectaron 48 muestras, de las cuales 23 excedieron el ECA de suelos establecidos en el D.S. N° 002-2013-MINAM, e indicaron que dichas excedencias estarían vinculadas a causas naturales y antrópicas. En ese contexto, la excedencia de arsénico en las estaciones de muestreo de agua estaría vinculadas a estructuras mineralizadas con contenido de minerales sulfurosos como a la arsenopirita (FeAsS), calcopirita (CuFeS_2) o proustita (Ag_3AsS_3).



d) Manganeso (Mn)

Se tiene excedencia en las estaciones de muestreo siguientes: IRHS 13.08.08-GA-05, presenta un valor de 8.52 y 7.42 mg/L en la época de avenida y estiaje respectivamente, que estaría relacionado con actividad minera (antrópico), IRHS 13.08.08-PZ-06 que tiene una profundidad de 57.75m, y presenta valores de Mn de 9.32 y 16.22 mg/L en la época de avenida y estiaje respectivamente, dichos valores estarían relacionados a actividades antrópicas.

e) Fierro (Fe)

Para este parámetro se tiene excedencias en las siguientes estaciones de muestreo IRHS 13.08.08-GA-05 que muestran valores de Fe de 72.85 y 8.02 mg/L en la época de avenida y estiaje respectivamente, dichas excedencias estarían vinculadas a actividades antrópicas y condiciones litológicas y mineralógicas de la zona de estudio; y la estación de muestreo R498993-08 que presentan valores de Fe de 0.25 y 0.67 mg/L en la época de avenida y estiaje respectivamente, dichas excedencias estarían relacionadas a las actividades antrópicas como las descargas de aguas residuales de la población ya que dicha estación de muestreo se encuentra aguas debajo del centro poblado de Llacuabamba.

f) Cobalto (Co)

Las excedencias que se presentan son en las estaciones de muestreo IRHS 13.08.08-GA-05, que presentan valores de Co de 0.24 y 0.22 mg/L en la época de avenida y estiaje respectivamente, los cuales estarían vinculadas a actividad antrópicas de la zona; y la estación de muestreo



IRHS 13.08.08-PZ-06 que tiene una profundidad de 57.75m y presenta valores de Co de 0.06 para ambas temporadas.

5.2. FACIES HIDROQUÍMICAS

5.2.1. Diagramas de Stiff:

A los resultados de las siete (07) muestras de aguas subterránea se las clasificó de acuerdo con sus facies hidroquímicas. Según el Anexo B (plano hidroquímico – diagramas Stiff), la y los diagramas Piper, se pudo determinar cuatro (04) tipos de facies hidroquímicas para agua, los cuales se detallan a continuación:

La primera facie es del tipo “bicarbonatada cálcica” (Ca--HCO_3), correspondiente a la muestra IRHS 13.08.08-MA-04 (Manantial), ubicada aguas arriba de la quebrada Mush mush, dicha estación presenta valores de bicarbonato y calcio de 49.00 y 15.87 mg/l respectivamente. Asimismo, se tiene a la estación IRHS 13.08.08-PZ-03 (Piezómetro) ubicado en la quebrada Ventanas y presenta valores de bicarbonato y calcio de 168.90 y 32.97 mg/l, finalmente se tiene a la estación R498993-05 que está ubicada agua arriba de la quebrada Mush mush y contiene valores de bicarbonato y calcio de 59.70 y 19.58 mg/l respectivamente.

La segunda facie es del tipo “sulfatada cálcica” (Ca--SO_4), correspondiente a la muestra IRHS 13.08.08-GA-05 (galería), ubicada al margen izquierdo del río Porvenir, dicha estación presenta valores de sulfato y calcio de 2135.00 y 413.70 mg/l respectivamente. Asimismo, se tiene a la estación IRHS 13.08.08-PZ-06 (Piezómetro) ubicado al lado del río Porvenir y presenta valores de sulfato y calcio de 221.4 y 100.10 mg/l respectivamente, finalmente la estación



R498993-08 (Rio) que está ubicada en el Rio Llacuabamba y presenta valores de sulfato y calcio de 46.380 y 29.90 mg/l respectivamente.

La tercera facie es del tipo “Carbonatada Sódica” (Na--CO_3), correspondiente a la estación IRHS 13.08.08-PZ-01A, está ubicado aguas arriba de la quebrada Mush Mush, presenta valores de carbonato y sodio de 29.80 y 27.73 mg/l respectivamente.

La cuarta facie es del tipo “Bicarbonatada Sódica” (Na--HCO_3), correspondiente a la estación IRHS 13.08.08-PZ-01A, que presenta valores de bicarbonato y sodio de 65.40 y 28.30 mg/L.

En la Tabla 24 se muestran las facies hidroquímicas para cada temporada y para cada estación de muestreo, cabe indicar que estas facies fueron catalogadas en base a los aniones y cationes predominantes.

Tabla 24

Facies hidroquímicas para ambas temporadas.

ID Punto	Facie de Agua	Tipo de Agua
Muestreo abril del 2021		
IRHS 13.08.08-GA-05	Sulfatada Cálcica Magnésica con Al, Fe y Zn	Ca-Mg-Al-Fe--SO ₄
IRHS 13.08.08-MA-04	Bicarbonatada Cálcica Magnésica	Ca-Mg-Na-Al--HCO ₃
IRHS 13.08.08-PZ-06	Sulfatada Cálcica Magnésica	Ca-Mg-Na-K--SO ₄
IRHS 13.08.08-PZ-01A	Carbonatada Sódica cálcica	Na-Ca-Mg-K--CO ₃
IRHS 13.08.08-PZ-03	Bicarbonatada Cálcica Sódica	Ca-Na-Mg-K--HCO ₃
R498993-05	Bicarbonatada Cálcica Magnésica	Ca-Mg-Na-Fe--HCO ₃
R498993-08	Sulfatada Cálcica Sódica	Ca-Na-Mg-K--SO ₄
Muestreo abril del 2021		
IRHS 13.08.08-GA-05	Sulfatada Cálcica Magnésica con AL, Zn y Fe	Ca-Mg-Al-Na--SO ₄
IRHS 13.08.08-MA-04	Bicarbonatada Cálcica Magnésica	Ca-Mg-Na-K--HCO ₃
IRHS 13.08.08-PZ-06	Sulfatada Cálcica Magnésica	Ca-Mg-Na-K--SO ₄
IRHS 13.08.08-PZ-01A	Bicarbonatada Sódica Cálcica	Na-Ca-Mg-K--HCO ₃
IRHS 13.08.08-PZ-03	Bicarbonatada Sódica Cálcica	Na-Ca-Mg-K--HCO ₃
R498993-05	Bicarbonatada Cálcica Magnésica	Ca-Mg-Na-Fe--HCO ₃



ID Punto	Facies de Agua	Tipo de Agua
R498993-08	Sulfatada Cálcica Sódica	Ca-Na-Mg-K--SO ₄

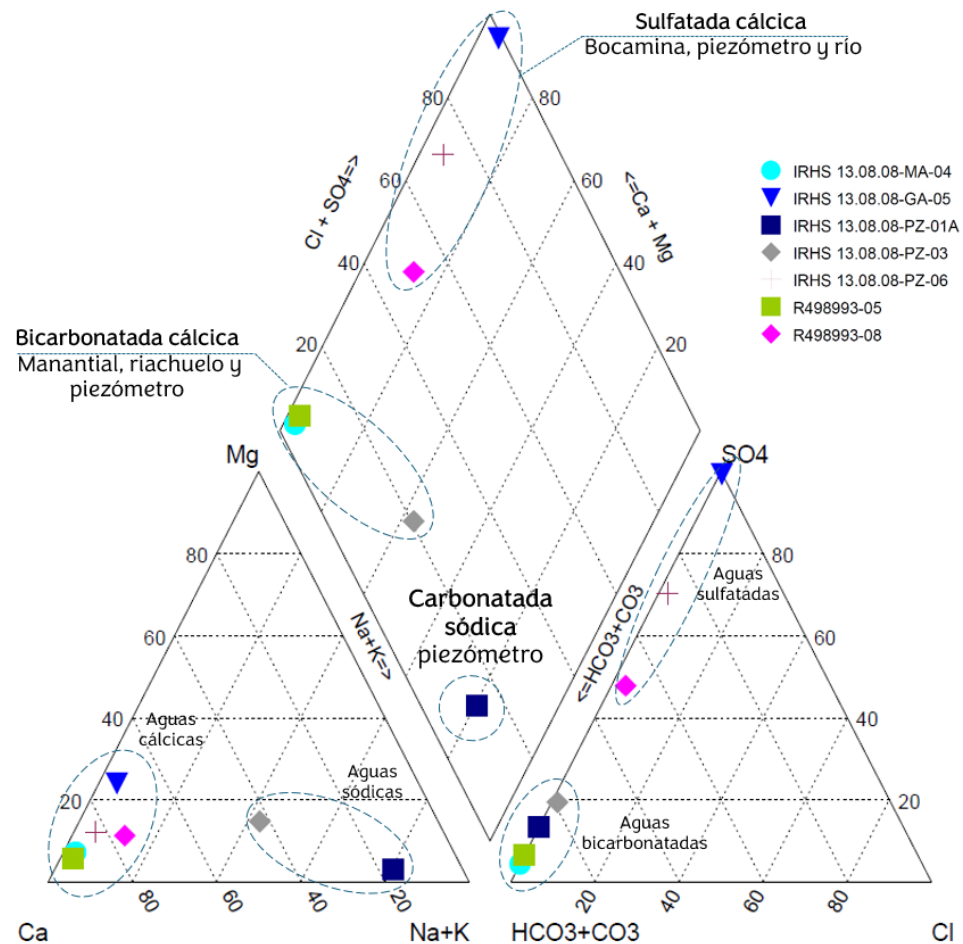
Nota: Estación de muestreo que experimentó cambios en el anión principal.

5.2.2. Diagramas de Piper

Para el presente estudio se realizó diagramas triangulares (Piper) que sirvió para caracterizar la composición de una cada muestra de agua en una proporción de tres componentes (bicarbonatada, sulfatada o clorurada), que nos permitió establecer en términos generales, el ambiente donde se origina el agua.

Figura 24

Diagrama Piper para la época de avenida



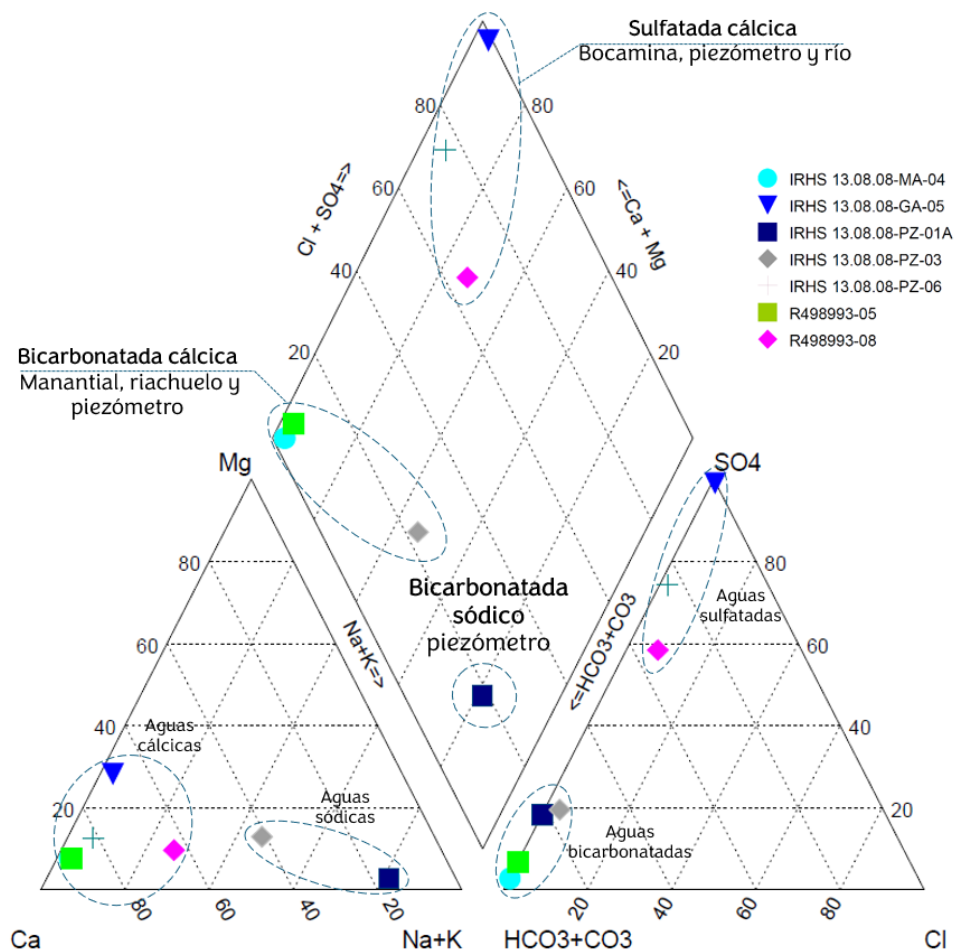
Cabe resaltar que en el presente estudio se tienen aguas del tipo sulfatadas cálcicas correspondientes a bocaminas, piezómetros y ríos; bicarbonatadas

cálcicas correspondientes a manantiales, riachuelos y piezómetros; carbonatadas sódicas correspondiente a piezómetros.

Tanto para el muestreo en la época de avenida y estiaje según las Figura 24 y Figura 25 se nota la predominancia de la facies sulfatada cálcica representada por las estaciones de muestreo: IRHS 13.08.08-GA-05, IRHS 13.08.08-PZ-06 y R498993-08; bicarbonatada cálcica representada por las estaciones de muestreo: IRHS 13.08.08-MA-04, IRHS 13.08.08-PZ-03 y R498993-05.

Figura 25

Diagrama Piper para la época de estiaje





Sin embargo, se visualiza el cambio de facie de la estación de muestreo IRHS 13.08.08-PZ-01A de carbonatada cálcica en la época de avenida a bicarbonatada cálcica en la época de estiaje, dicho cambio estaría relacionado a la litología de la zona de estudio ya que según (Izquierdo, Cumpa, & Manrique, 1998) en el boletín N° 119 del INGEMMET menciona que la formación Lavasen presenta valores de calcita, en ese contexto, al tratarse de un piezómetro surgente este está en constante interacción con el medio geológico que lo rodea, y en la época de avenida (época donde es de facie carbonatada) el piezómetro tiene más caudal de salida y por lo tanto tendría más perturbación a comparación con la época de estiaje (menor caudal).

5.2.3. Diagramas de Durov

Para complementar los diagramas de Piper, se realizaron los diagramas de Durov para aguas superficiales y subterráneas, los cuales muestran valores de pH y conductividad eléctrica adicional a los diagramas ternarios de cationes y aniones, dichos datos tienen la intención de dar realce a la ganancia de sales y su relación con el pH.

De las



Figura 26 y Figura 27 se determinan las asociaciones directas de las sales (iones solubles en agua) y las aguas de tipo sulfatada y bicarbonatada, sin embargo, solo las estaciones de muestreo IRHS 13.08.08-MA-04 y R498993-05 presentan condiciones neutras respecto al pH, la estación IRHS 13.08.08-GA-05 presenta condiciones ácidas como también se visualiza conductividades elevadas para dicha estación de muestreo.

Figura 26

Diagrama Durov para la época de avenida

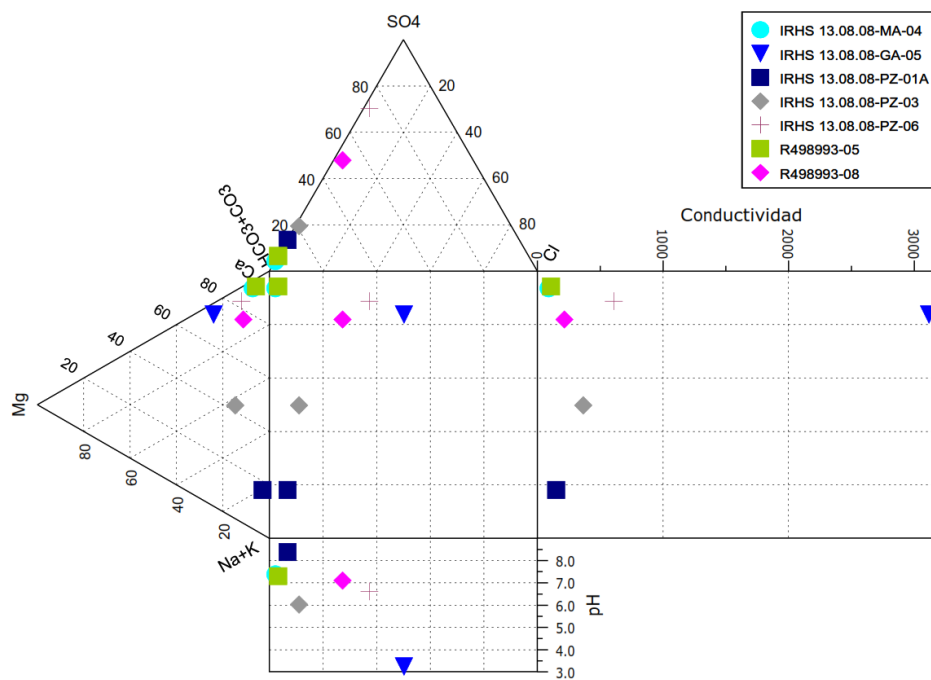
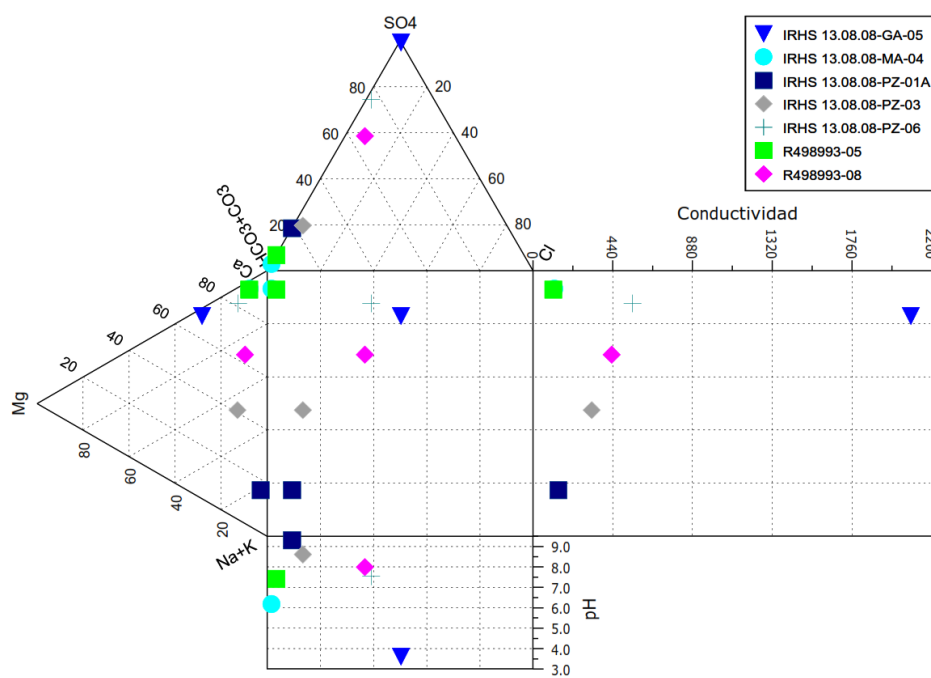


Figura 27

Diagrama Durov para la época de estiaje





Finalmente, para las estaciones IRHS 13.08.08-PZ-06, IRHS 13.08.08-PZ-01A, IRHS 13.08.08-PZ-03 y R498993-08 presentan condiciones ligeramente básicas a básicas, aparte, los diagramas indican que las aguas proporcionan cantidad importante de iones solubles de minerales de calcio y sodio, para las aguas de facie sulfatadas su pH son controladas por las aguas superficiales (aguas de río y quebradas) las cuales no permiten un elevado contenido de sales y por ende un aumento en la C.E.

5.3. ANÁLISIS AGUA - ROCA

5.3.1. Diagramas de Mifflin

Para el presente estudio se generó el diagrama Mifflin que nos permitió determinar el posible origen, recorrido e interacciones con roca que ha tenido las aguas de cada fuente de monitoreo. A continuación, se detalla la clasificación de aguas de acuerdo con a su recorrido y contacto agua - roca:

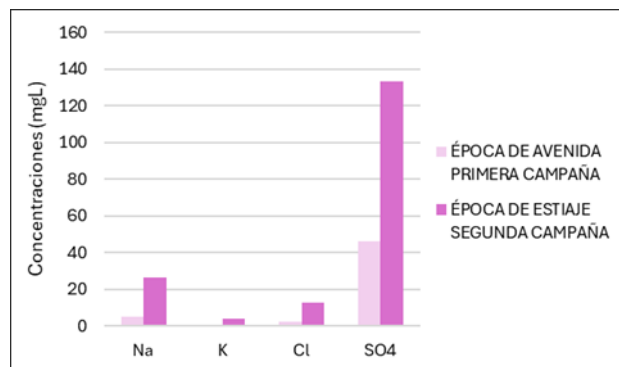
a) Flujos Locales: Las aguas pertenecientes a este grupo son aguas de origen superficial como manantiales, quebradas o ríos (fuentes de agua superficiales), tales son los casos de las estaciones de muestreo: R498993-05 y R498993-08 que corresponden a riachuelo y río respectivamente, sin embargo, se denota el cambio de flujo local a intermedio para la estación R498993-08, esto es debido a que en la segunda campaña (época de estiaje) existe menos cantidad de solvente (variación de caudales), ello se puede evidenciar en la Figura 28 donde se visualiza las concentraciones de los iones principales, en la época de avenida existe más soluto que solvente y en la época de estiaje predomina más solvente que soluto. Asimismo, esto se puede corroborar con el diagrama

Giggenbach que se muestra en las Figura 35 Figura 36 donde se denota que todas las estaciones de muestreo sonden carácter inmaduro.

Por otro lado, en este grupo también se incluye la estación IRHS 13.08.08-MA-04 IRHS que corresponde a un manantial, el cual se trataría de un manantial perenne y 6.3 l/s en la época de avenida y 1.1 l/s en la época de estiaje, este manantial tendría un recorrido local ya que aflora en la parte alta de la quebrada Molinetes, y estaría transcurriendo por el contacto de las granodioritas del intrusivo de Pataz y las filitas y esquistos del complejo del Maraón.

Figura 28

Comparación de iones mayoritarios por época para la estación R49899-08.



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, la estación de muestreo 13.08.08-PZ-01A fue catalogada como flujo local, este piezómetro es surgente y tiene una profundidad de 25.70m, se tratarían de aguas que percolan por el material cuaternario (aguas de infiltración), ello se puede corroborar con las Figura 31,

Figura 32 Finalmente, la estación de muestreo IRHS 13.08.08-GA-05, no se cotejaría con este diagrama ya que es influenciada con actividad antrópica

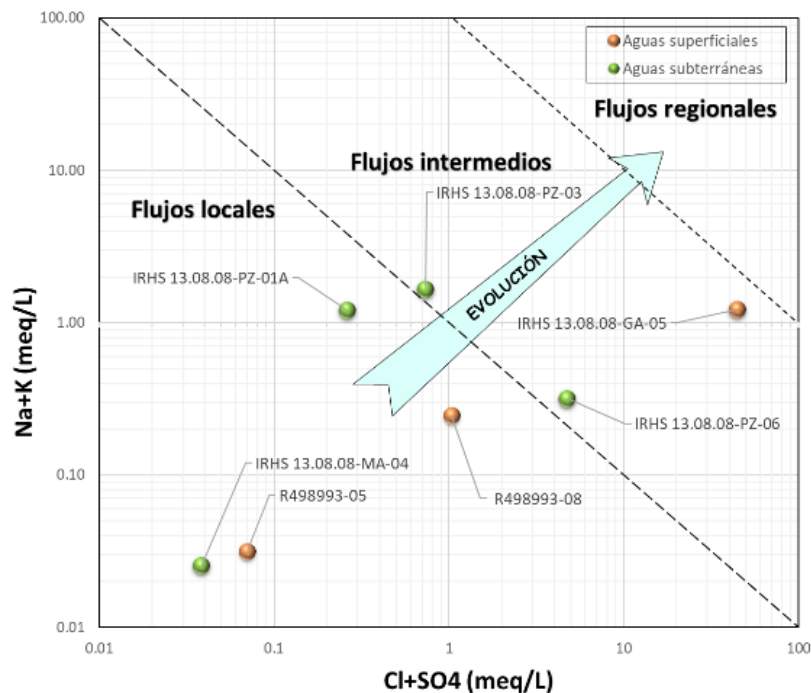
(minería artesanal), ello se corrobora con las excedencias que presenta según el apartado 5.1 referente a los ECA.

Figura 33 Figura 34 en la cual se observa que dicha estación está en el dominio de precipitación.

- b) **Flujos intermedios:** Dentro de este dominio tenemos a la estación de muestreo IRHS 13.08.08-GA-05 que al tratarse de una fuente contaminada por acción antrópica no puede ser cotejada con el gráfico Mifflin. Sin embargo, la estación de muestreo IRHS 13.08.08-PZ-03 (piezómetro) que tiene una profundidad de 42.50m y presenta niveles de 2.56 y 2.76 m en la época de avenida y estiaje respectivamente, este piezómetro capta aguas que alberga el complejo del Marañón (según el plano geológico y la ubicación de la estación de muestreo), y estas aguas al ser de flujo intermedio estarían un mediano tiempo en contacto con el medio que las contiene (filitas, esquistos y metaandesitas), ello se puede corroborar con las Figura 31,
- c) **Figura 32** Finalmente, la estación de muestreo IRHS 13.08.08-GA-05, no se cotejaría con este diagrama ya que es influenciada con actividad antrópica (minería artesanal), ello se corrobora con las excedencias que presenta según el apartado 5.1 referente a los ECA.
- d) **Figura 33** Figura 34 donde dicha estación está catalogada como un flujo que está en interacción con la roca.

Figura 29

Diagramas Mifflin para la época de avenida.



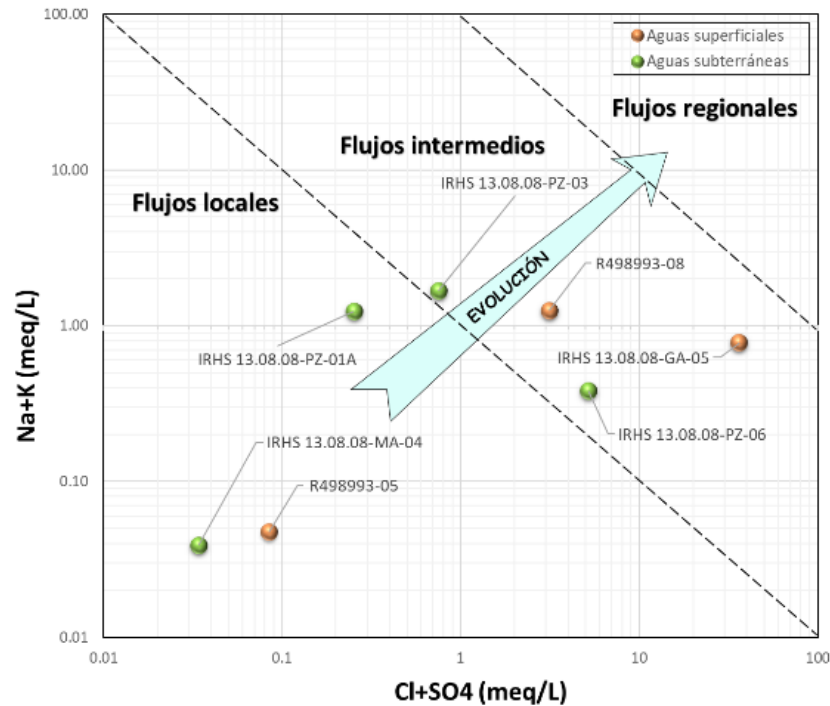
Por otro lado, la estación de muestreo IRHS 13.08.08-PZ-06 que tiene una profundidad de 57.75 y presenta valores de niveles de agua de 15.58 y 17.74 m en la época de avenida y estiaje respectivamente, de acuerdo con la profundidad del piezómetro estas aguas estarían en contacto con el medio que las contiene, ello se puede corroborar con las Figura 31

Figura 32 Finalmente, la estación de muestreo IRHS 13.08.08-GA-05, no se cotejaría con este diagrama ya que es influenciada con actividad antrópica (minería artesanal), ello se corrobora con las excedencias que presenta según el apartado 5.1 referente a los ECA.

Figura 33 Figura 34 donde se visualiza que dicha estación está en el dominio de interacción agua roca, debido a ello es que el agua tiene el tiempo suficiente para ganar cationes y aniones.

Figura 30

Diagramas Mifflin para la época de estiaje.



5.3.2. Diagramas de Gibbs

Los diagramas Gibbs nos permitieron establecer el dominio hidroquímico de cada fuente de agua o la evolución de ellas, clasificándolas en el dominio de evaporación – cristalización, dominio de intemperismo (lavado de roca) y el dominio de precipitación pluvial con ello determinar en términos generales el posible origen de cada fuente de agua. Según las Figura 31

Figura 32 Finalmente, la estación de muestreo IRHS 13.08.08-GA-05, no se cotejaría con este diagrama ya que es influenciada con actividad antrópica (minería artesanal), ello se corrobora con las excedencias que presenta según el apartado 5.1 referente a los ECA.

Figura 33 Figura 34 se visualizan los diagramas de Gibbs para cada época de acuerdo con los aniones y cationes.

- a) En el **dominio de precipitación** generalmente están las aguas con poco recorrido (flujos locales), tal es el caso del piezómetro IRHS 13.08.08-PZ-01A que tiene una profundidad de 25.70m y captaría aguas de precipitación, de igual forma se puede cotejar con la facie de agua al cual representa (facie carbonatada) o con el diagrama de Mifflin donde es catalogada como flujo local. Asimismo, dentro de este dominio pueden estar aguas superficiales, tal es el caso de la estación de muestreo IRHS 13.08.08-MA-04 (manantial) que probablemente estaría vinculado a un acuífero libre que es alimentado por aguas de percolación y se puede corroborar con la facie hidroquímica al cual representa (bicarbonatada cálcica, Ca--HCO_3); finalmente se tiene a la estación de muestreo R498993-05 (riachuelo) que es representada por la facie bicarbonatada cálcica (Ca--HCO_3) ya que se trata de aguas superficiales.
- b) En el **dominio de interacción agua – roca**, generalmente están las aguas con mediano recorrido, tales son los casos de los piezómetros IRHS 13.08.08-PZ-06 y IRHS 13.08.08-PZ-03 que tiene profundidades de 57.75 y 42.50m, estos al tener un flujo intermedio (de acuerdo con el diagrama de Mifflin) tienen el tiempo para ganar cationes y aniones. Asimismo, la estación de muestreo R498993-08 (fuente superficial, río) pertenece a este dominio de interacción agua - roca, sin embargo, de acuerdo con las excedencias respecto a los estándares de Calidad Ambiental (arsénico, fierro y flúor) se presume que esta agua estaría influenciada por actividad antrópica, ya que dicha estación se encuentra aguas abajo del centro poblado de Llacuabamba.

Figura 31

Diagrama de Gibbs para aniones – Primera campaña

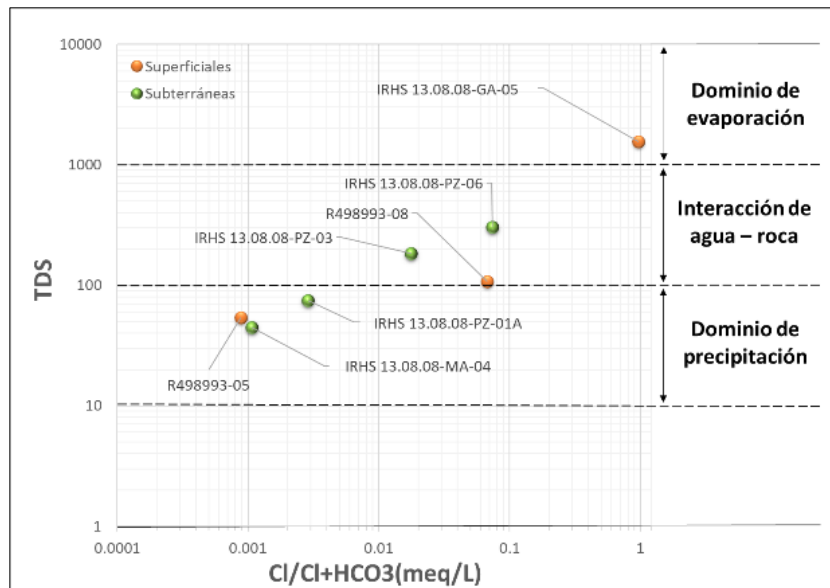
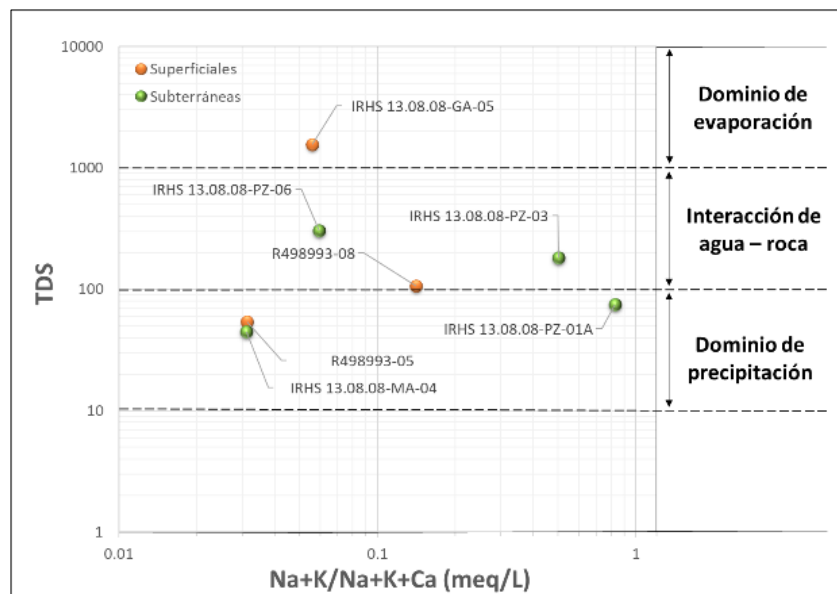


Figura 32

Diagrama de Gibbs para cationes – Primera campaña



- c) Finalmente, la estación de muestreo IRHS 13.08.08-GA-05, no se cotejaría con este diagrama ya que es influenciada con actividad antrópica (minería artesanal), ello se corrobora con las excedencias que presenta según el apartado 5.1 referente a los ECA.

Figura 33

Diagrama de Gibbs para aniones – Segunda campaña

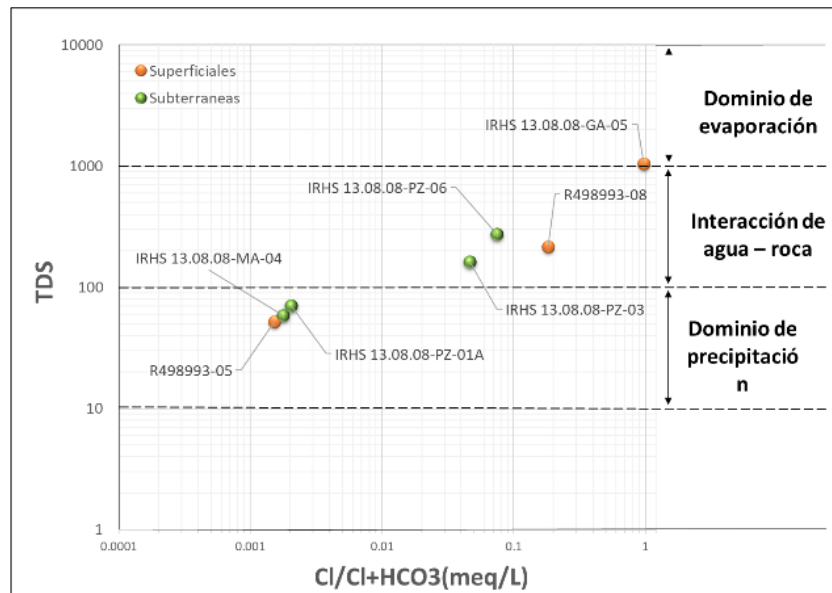
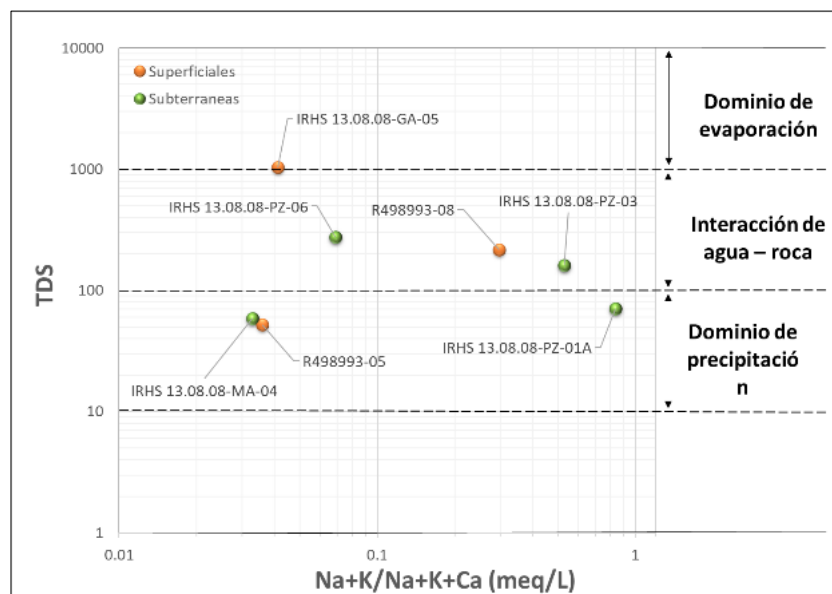


Figura 34

Diagrama de Gibbs para cationes – Segunda campaña



5.3.3. Diagrama de Giggenbach

Se usan estos diagramas para ver la temperatura del reservorio y el estado de equilibrio de los fluidos, esto ayuda a reconocer aguas que han alcanzado el equilibrio en la litología, dentro de las Figura 35 y Figura 36 se puede observar tres zonas de aguas, las cuales son equilibradas, equilibradas parcialmente y aguas inmaduras, estos equilibrios pueden ser conocidos a través de la relación Na-K-

Mg, así como identificar las posibles mezclas entre las aguas superficiales y roca circundante.

De acuerdo con los diagramas ternarios Mg-Na-K que se muestran en las Figura 35 y Figura 36, se visualiza que todas las muestras se ubican en la esquina del Sqr (Mg) lo cual nos indicaría una condición fuera del equilibrio parcial y su carácter inmaduro.

Figura 35

Diagrama Giggenbach para la época de avenida.

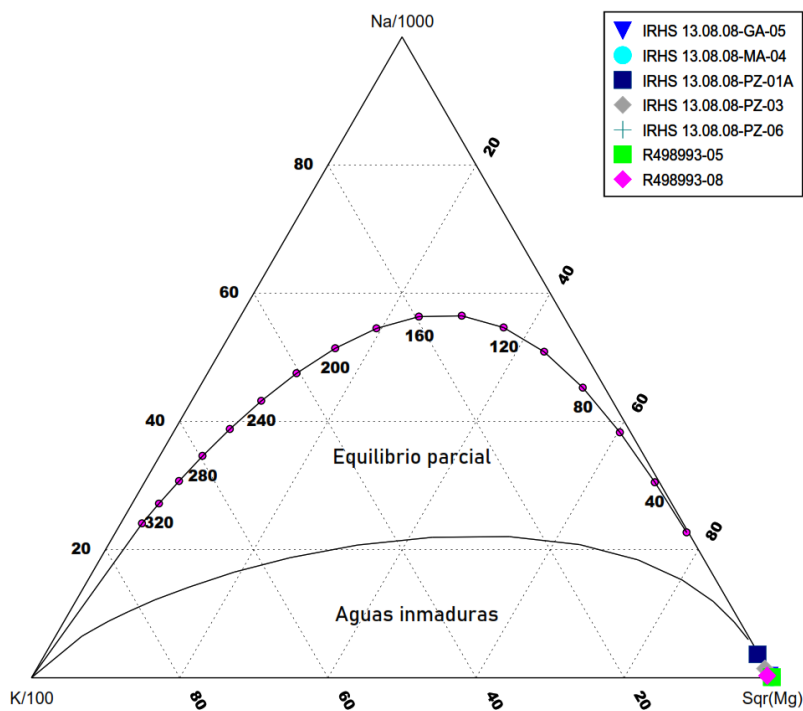
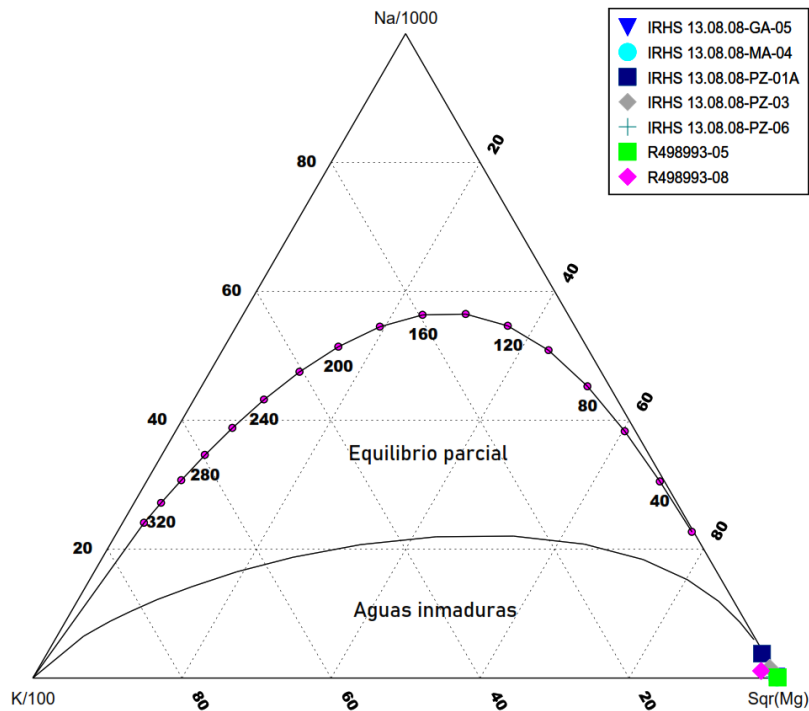


Figura 36

Diagrama Giggenbach para la época de estiaje.



5.3.4. Correlaciones iónicas

El grado de correlación entre los metales traza y elementos mayoritarios son frecuentemente utilizados para analizar el origen de los metales. Se determinó el coeficiente de correlación de Spearman para todas las muestras, los resultados se muestran en las Tabla 25 y Tabla 26. Cabe mencionar que dicha correlación se realizó con el software Aquachem.

De las Tabla 25 y Tabla 26 se deduce que la alta salinidad está determinada por la predominancia de los iones principales de Ca, Mg, Cl y SO_4 que correlacionan positivamente con valores de conductividad eléctrica. Además, se puede destacar una correlación buena del Mg/Ca que hace referencia a la precipitación de $CaCO_3$ lo cual evidencia la basicidad de la mayoría de las estaciones de muestreo.

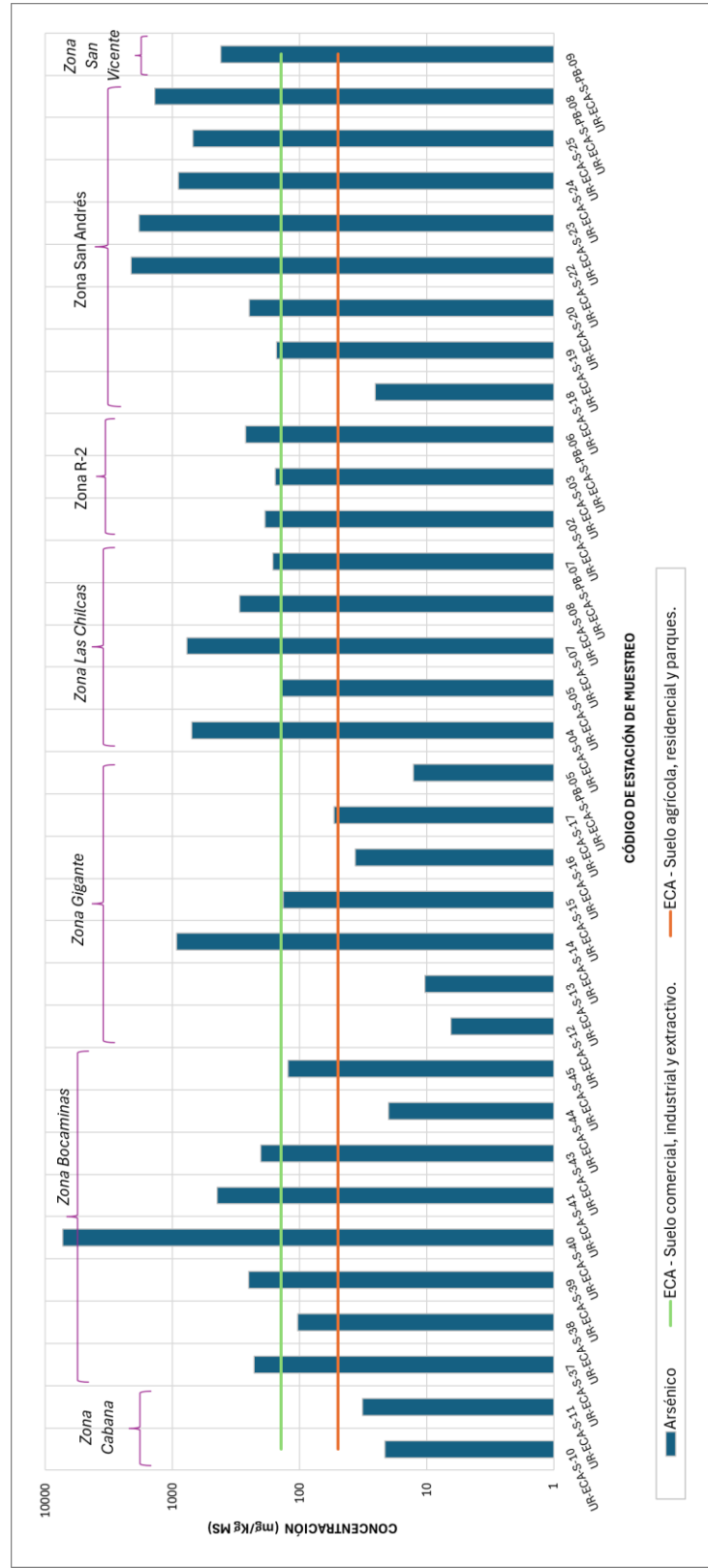
Asimismo, se puede visualizar una muy buena correlación del Fe/Zn y Mn/Cu, y buena correlación entre Fe/Pb y Pb/Zn, lo cual nos indicaría que estos



metales traza tienen un mismo origen (probablemente antropogénico), sin embargo, se nota la mala correlación del arsénico y flúor con los otros metales traza (Fe, Mn, Pb, Zn y Cu), de ello se puede deducir que estos dos elementos tendrían diferente origen (Natural), ello se puede evidenciar también con los datos de arsénico en sedimentos efectuado por Marsa en el 2016, sumado a ello se visualiza una correlación positiva buena (0.93 y 0.82 en la primera y segunda campaña respectivamente) entre el As y F lo cual nos indicaría que tienen el mismo origen.

Figura 37

Concentración de As en sedimentos comparado con el D.S. N° 002-2013-MINAM.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 25

Matriz de correlación iónica para la primera campaña

Elemento	pH	CE	Ca	Mg	Cl	SO4	As	Fe	Mn	Pb	Zn	Cu	F
pH	1.00	-0.86	-0.96	-0.93	-0.76	-0.79	-0.57	-0.83	-0.86	-0.55	-0.79	-0.36	-0.57
Cond		1.00	0.89	0.86	0.96	0.96	0.71	0.83	0.93	0.81	0.82	0.82	0.68
Ca			1.00	0.96	0.85	0.86	0.46	0.88	0.93	0.63	0.82	0.82	0.43
Mg				1.00	0.85	0.82	0.50	0.83	0.86	0.63	0.82	0.82	0.39
Cl					1.00	0.99	0.67	0.88	0.94	0.93	0.87	0.83	0.56
SO4						1.00	0.64	0.90	0.96	0.92	0.86	0.82	0.57
As							1.00	0.49	0.50	0.67	0.71	0.50	0.93
Fe								1.00	0.96	0.83	0.94	0.72	0.44
Mn									1.00	0.83	0.86	0.82	0.46
Pb										1.00	0.83	0.72	0.53
Zn											1.00	0.64	0.64
Cu												1.00	0.36
F													1.00

Nota: ■ Muy buena correlación (> a 0.9).

■ Buena correlación (> a 0.8).


Tabla 26

Matriz de correlación iónica para la segunda campaña

Elemento	pH	CE	Ca	Mg	Cl	SO4	As	Fe	Mn	Pb	Zn	Cu	F
pH	1.00	-0.14	-0.43	-0.39	0.04	-0.11	0.14	-0.30	-0.43	-0.27	-0.27	-0.38	0.18
Cond		1.00	0.86	0.82	0.89	0.96	0.79	0.85	0.86	0.88	0.88	0.94	0.75
Ca			1.00	0.96	0.75	0.89	0.71	0.96	0.93	0.88	0.88	0.94	0.61



Elemento	pH	CE	Ca	Mg	Cl	SO4	As	Fe	Mn	Pb	Zn	Cu	F
Mg				1.00	0.64	0.86	0.64	0.88	0.86	0.75	0.75	0.90	0.68
Cl				1.00	1.00	0.86	0.93	0.85	0.86	0.88	0.88	0.83	0.75
SO4						1.00	0.82	0.90	0.82	0.88	0.88	0.88	0.71
As							1.00	0.87	0.79	0.79	0.79	0.71	0.82
Fe								1.00	0.94	0.92	0.92	0.88	0.67
Mn									1.00	0.91	0.91	0.96	0.68
Pb										1.00	1.00	0.88	0.54
Zn											1.00	0.88	0.54
Cu												1.00	0.69
F													1.00

Nota:  Muy buena correlación (> a 0.9).

 Buena correlación (> a 0.8).



Según los resultados de la calidad del agua, en la Tabla 27 se muestra el resumen sobre las excedencias para el arsénico, donde se observa que solo las estaciones IRHS 13.08.08-MA-04 y R498993-05 no presentan excedencias.

Asimismo, según la

Asimismo, se puede visualizar una muy buena correlación del Fe/Zn y Mn/Cu, y buena correlación entre Fe/Pb y Pb/Zn, lo cual nos indicaría que estos metales traza tienen un mismo origen (probablemente antropogénico), sin embargo, se nota la mala correlación del arsénico y flúor con los otros metales traza (Fe, Mn, Pb, Zn y Cu), de ello se puede deducir que estos dos elementos tendrían diferente origen (Natural), ello se puede evidenciar también con los datos de arsénico en sedimentos efectuado por Marsa en el 2016, sumado a ello se visualiza una correlación positiva buena (0.93 y 0.82 en la primera y segunda campaña respectivamente) entre el As y F lo cual nos indicaría que tienen el mismo origen.

Figura 37 se visualiza las excedencias del arsénico en suelos con respecto al D. S. N° 002-2013-MINAM de las estaciones de muestreo en sedimentos efectuados por MARSA en el 2016, cabe precisar que el primer informe sustentatorio (ITS, 2016) afirman que estos altos valores de arsénico estarían ligados a condiciones geológicas.

Tabla 27

Resumen de los resultados para el Arsénico en el agua

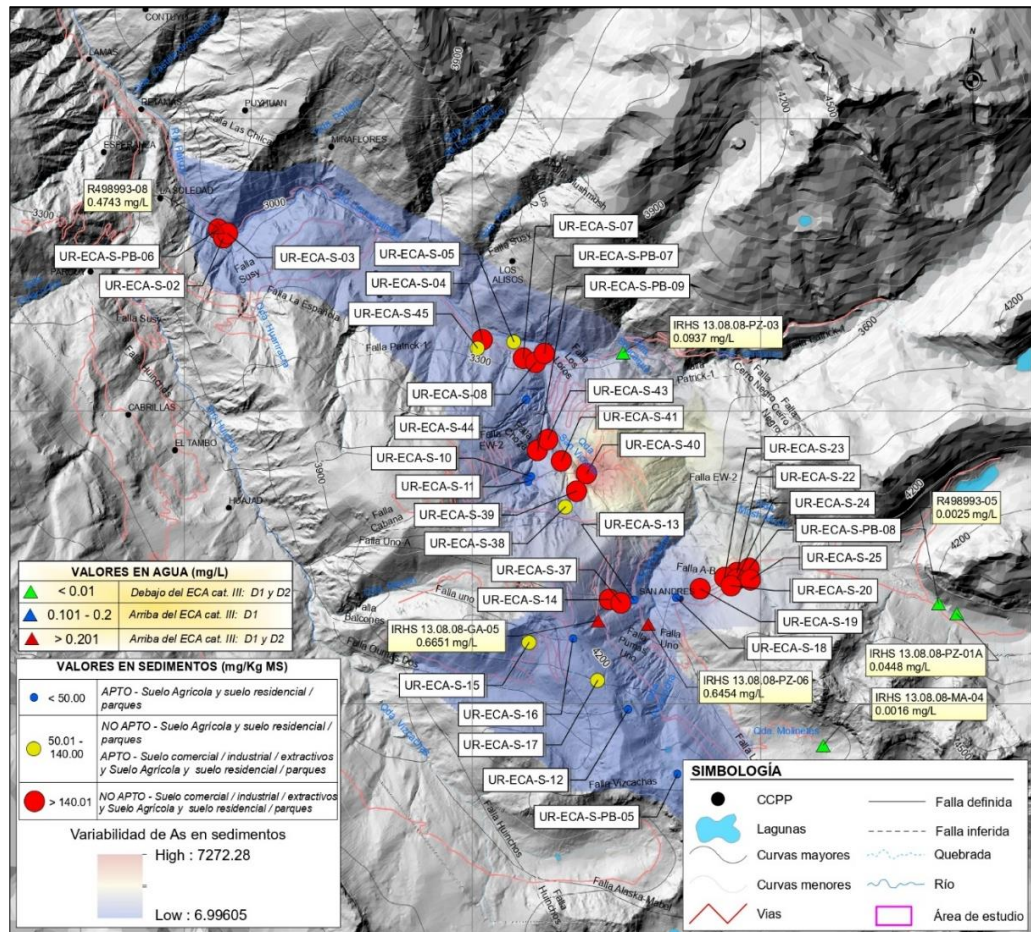
o	L.M.P. del MINSAs	ECA Categoría III	ECA Categoría I
Muestreo abril del 2021			
IRHS 13.08.08-GA-05	4.113	4.113	2.438
IRHS 13.08.08-MA-04	0.003	0.003	0.002
IRHS 13.08.08-PZ-06	0.131	0.131	0.022
IRHS 13.08.08-PZ-01A	0.039	0.039	0.039
IRHS 13.08.08-PZ-03	0.098	0.098	0.096
R498993-05	0.002	0.002	0.002
R498993-08	0.089	0.089	0.032
Muestreo agosto del 2021			
IRHS 13.08.08-GA-05	0.665	0.665	0.123
IRHS 13.08.08-MA-04	0.002	0.002	0.001
IRHS 13.08.08-PZ-06	0.645	0.645	0.054
IRHS 13.08.08-PZ-01A	0.045	0.045	0.043
IRHS 13.08.08-PZ-03	0.094	0.094	0.092
R498993-05	0.003	0.003	0.003
R498993-08	0.474	0.474	0.150

Nota:
■ Excede el ECA-Categoría I-A1 y Categoría III-D1
■ Excede el ECA-Categoría I-A1 y A2
■ Excede el ECA-Categoría III-D2
■ Excede el ECA-Categoría I-A1, A2 y A3; Categoría III-D1 y D2 y L.M.P. del MINSAs

Por lo tanto, se puede deducir que el arsénico en el agua es proveniente de fuentes naturales (condiciones geológicas y mineralógicas) al estar en contacto con el medio geológico y estaría vinculado con el flúor ya que estos dos elementos presentan una correlación positiva buena (0.93 y 0.82 en la primera y segunda campaña respectivamente).

Figura 38

Análisis espacial del arsénico en agua y sedimento.



Nota: Los círculos representan el arsénico en sedimentos, los triángulos representan el arsénico en agua, mientras que, el color rojo en ambos casos representa que están por encima del ECA.

5.4. DISCUSIONES

Con los resultados obtenidos sobre la comparación de los datos de laboratorio (metales totales) con los Estándares de Calidad Ambiental, se puede evidenciar que existen estaciones de muestreo que sobrepasan los ECAs en por lo menos un parámetro, tal es el caso de las estaciones IRHS 13.08.08-GA-05, IRHS 13.08.08-PZ-06, IRHS 13.08.08-PZ-01A, IRHS 13.08.08-PZ-03 y R498993-08, sin embargo, para las estaciones IRHS 13.08.08-MA-04 y R498993-05 no contienen ningún analito que este por encima de los ECAs, esto es debido a que dichas estaciones están ubicadas en la parte alta del



área de estudio donde hay actividad minera nula, por lo tanto, con ello podemos deducir que las aguas de mejor calidad están ubicadas en la naciente de cuenca donde no existe actividad minera y estas son aptas para consumo.

Por otro lado, el tipo de agua sulfatada son típicos en lugares proximales a zonas de actividad antrópica tal es el caso de las estaciones IRHS 13.08.08-GA-05 (canal que deriva aguas que provienen de una bocamina), IRHS 13.08.08-PZ-06 (piezómetro ubicado aguas debajo de la actividad minera informal) y R498993-08 (aguas abajo del centro poblado de Llacuabamba), mientras que el tipo bicarbonatadas están en zonas distales a componentes antrópicos, se tiene a las estaciones IRHS 13.08.08-MA-04 (ubicado en la naciente de cuenca), IRHS 13.08.08-PZ-01A (ubicado en la naciente de cuenca), IRHS 13.08.08-PZ-03 (capta aguas provenientes de la Qda. Ventanas, sin actividad antrópica) y R498993-05 (ubicada en la naciente de cuenca).

Los resultados obtenidos sobre la calidad del agua muestran que los principales analitos que superan los límites en la mayoría de las estaciones son el arsénico y el flúor. Según Kullenberg y Sen (1973) y Handa (1975), la presencia de fluoruro disuelto es posible únicamente bajo condiciones fisicoquímicas favorables y cuando el tiempo de residencia del agua es lo suficientemente prolongado. En este contexto, el exceso de flúor en estas estaciones podría estar relacionado con el batolito de Pataz (compuesto por dioritas y granodioritas) y con el complejo de Marañón (filitas y esquistos con capas de metaandesitas). Por su parte, el arsénico se encontraría de manera natural en el área de estudio, lo cual es corroborado por los resultados de sedimentos realizados por Marsa en 2016, así como por los diagramas de Mifflin, Gibbs, Giggenbach y las correlaciones iónicas.



VI. CONCLUSIONES

- La calidad de aguas del centro poblado de Llacuabamba del distrito de Parcoy – La libertad superan los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) categoría I y III, y los Límites máximos permisibles (LMP) establecidos por el MINSA en por lo menos un parámetro, con excepción de las estaciones de muestreo IRHS 13.08.08-MA-04 y R498993-05 que no tienen excedencias en ninguno de sus parámetros analizados, por lo tanto, serían aguas aptas para el consumo humano, riego de vegetales y bebida de animales.
- La hidroquímica en aguas superficiales y subterráneas en la zona de estudio son del tipo “bicarbonatada cálcica” (Ca--HCO_3), correspondiente a la muestra IRHS 13.08.08-MA-04 (Manantial) y la estación IRHS 13.08.08-PZ-03 (Piezómetro). La segunda facie es del tipo “sulfatada cálcica” (Ca--SO_4), correspondiente a la muestra IRHS 13.08.08-GA-05 (Galería) y a la estación IRHS 13.08.08-PZ-06 (Piezómetro) y finalmente la estación R498993-08 (Río). La tercera facie es del tipo “Carbonatada Sódica” (Na--CO_3), correspondiente a la estación IRHS 13.08.08-PZ-01A. La cuarta facie es del tipo “Bicarbonatada Sódica” (Na--HCO_3), correspondiente a la estación IRHS 13.08.08-PZ-01A.
- La calidad de las aguas subterráneas están relacionadas con las características litológicas que afloran en la zona de estudio, según los diagramas de Giggenbach para todas las estaciones de muestreo se tienen aguas inmaduras, lo cual nos afirma que están en constante interacción con el medio litológico, asimismo, según el diagrama de Mifflin se tienen a las estaciones IRHS 13.08.08-PZ-06, IRHS 13.08.08-PZ-03 y R498993-08 que son aguas que están en interacción agua – roca, por otro lado, según el muestreo de sedimentos efectuado por MARSa se tienen contenidos naturales de arsénico en la zona de estudio. Como también el flúor estaría relacionada



a la litología granítica y gnéissica, tendencia que ha sido reconocida en muchos estudios sobre agua subterránea en terrenos graníticos, por lo cual, la excedencia de flúor en la zona de estudio estaría ligada al batolito de Pataz (dioritas y granodioritas) y al complejo de Marañón (filitas y esquisto con bancos de metaandesita), asimismo, destacar que tanto el arsénico y flúor son de origen natural ya que estos presentan correlaciones positivas buenas.



VII. RECOMENDACIONES

- No se recomienda el consumo humano de las estaciones de muestreo IRHS 13.08.08-GA-05, IRHS 13.08.08-PZ-06, IRHS 13.08.08-PZ-01A, IRHS 13.08.08-PZ-03 y R498993-08 ya que presentan excedencias en por lo menos un parámetro analizado, sin embargo, se puede consumir previa desinfección, tratamiento convencional o tratamiento avanzado.
- Se recomienda realizar un muestreo de cada formación rocosa para determinar el contenido de minerales por litología y realizar una correlación con las muestras de agua.
- Se recomienda hacer un monitoreo quincenal para una mejor caracterización de las aguas del ámbito de estudio.
- Se recomienda realizar un estudio isotópico, de tal manera saber el origen de las aguas subterráneas y cotejar con los diagramas hidroquímicos efectuados en el presente trabajo.
- Según los resultados se tiene excedencias naturales del Arsénico por condiciones naturales, por ello recomienda realizar un estudio sobre especiación de arsénico para determinar si se trata de arsenito (As^{+3}) o Arseniato (As^{+5}).



VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfaro, P. E., Santos, P. M., & Castaño, S. c. (2006). *Fundamentos de la Hidrogeología*. Madrid: Mundi-Prensa.
- ANA. (2011). Codificación y clasificación de cursos de agua superficiales del Perú. *Ministerio de Agricultura*, 76.
- ANA. (2020). Guía para realizar inventario de fuentes de agua subterránea. *Ministerio de Agricultura y Riego* .
- Blasco, M., Auqué, L. F., & Gimeno, M. J. (2017). Estudio geotermométrico de las aguas termales ricas en CO₂ del acuífero de La Ermita del Saladillo (Murcia). *Sociedad Geologica de España*, 4.
- Campos, A., & Martínez, W. (2015). *Correlación entre Actividades de Interacción Social Registradas con Nuevas Tecnologías y el grado de Aislamiento Social en los Adultos Mayores*. 1Cenidet, México.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1991). *Hidrologia subterranea*. Barcelona: Omega.
- Eriksson, E. (2012). *Principles and Applications of Hydrochemistry*. Uppsala University, Sweden: Springer Science & Business Media.
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Englewood Cliffs, New Jersey: Cathy Brenn/Kim McNeily.
- Izquierdo, J. S., Cumpa, D. A., & Manrique, A. L. (1998). *Geologia de los cuadrangulos de Juscusbamba y Polvora*. INGEMMET, Lima.
- Mariño, E. E., & Garcia, R. F. (2018). *Aplicaciones ambientales sobre la hidrogeoquímica*. Buenos Aires: Foncyt.
- MARSA. (2016). *Primer Informe Tecnico Sustentatorio*. Lima.
- MARSA. (2017). *Segundo Informe Tecnico Sustentatorio*. Lima.
- MARSA. (2022). *Tercer Informe Tecnico Sustentatorio* . Lima.
- MINAM. (2013). *D. S. N° 002-2013-MINAM*. Lima: El peruano.



MINAM. (2017). *DECRETO SUPREMO N° 004-2017-MINAM*. Lima.

MINSA. (2010). *Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano - DS N° 031-2010-SA*. . Lima.

Sampieri, R. H. (2018). *Metodología de la investigación* . Colombia: MC. Graw Hill Education .

Sulca, P., Peña, F., & Delgado, F. (27 de Septiembre de 2010). Determinación de flujos regionales y locales de los acuíferos orientales de la ciudad de arequipa en base a datos hidroquímicos e isotopicos. *INGEMMET*, pág. 4.

Toscano, C. A. (Martes de Noviembre de 2019). Estudio de la hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea en la zona urbana de Zamora, Michoacán . *Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo* , pág. 157.

Villanueva, L. A. (2023). *Apuntes de hidrogeoquímica*. México: Nismet.



ANEXOS

ANEXO A: Cadena de custodia

- Cadena de custodia de la primera campaña
- Cadena de custodia de la segunda campaña.

ANEXO B: Planos

- Plano 01; Ubicación del proyecto.
- Plano 02; Plano Hidrológico.
- Plano 03; Plano Geológico.
- Plano 04; Inventario de fuentes superficiales - época de avenidas.
- Plano 05; Inventario de fuentes subterráneas - 1ra campaña.
- Plano 06; Inventario de fuentes superficiales - 2da campaña.
- Plano 07; Inventario de fuentes subterráneas - 2da campaña.
- Plano 08; Plano de muestreo.
- Plano 09; Plano Hidroquímico.
- Plano 10; Muestras de sedimentos.
- Plano 11; Plano geomorfológico.

ANEXO C: Resultados compilados de laboratorio

- Resultados compilados – primera campaña (Época de avenidas).
- Resultados compilados – segunda campaña (Época de estiaje).



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo Alvaro Mamani Quispe
identificado con DNI 71637356 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

Ingeniería Geológica

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación para la obtención de Grado
 Título Profesional denominado:

“Caracterización hidroquímica de las aguas superficiales y subterráneas del centro
poblado de Llacuabamba en el distrito de Parcoy, La Libertad, Perú.”

“ Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 03 de Diciembre del 2024


FIRMA (obligatoria)



Huella



Universidad Nacional
del Altiplano Puno



Vicerrectorado
de Investigación



Repositorio
Institucional

AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo Alvaro Mamani Quispe
identificado con DNI 71637356 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado
Ingeniería Geológica

, informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación para la obtención de Grado

Título Profesional denominado:

"Caracterización hidroquímica de las aguas superficiales y subterráneas del centro
poblado de Uacubamba en el distrito de Paray, La Libertad, Perú."

" Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 03 de Diciembre del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella