

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD TÉCNICA
CARRERA DE QUÍMICA INDUSTRIAL



*“DETERMINACIÓN DE LOS CONTAMINANTES DE
ORIGEN MINERO Y ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO
DEL RÍO SAYAQUIRA MUNICIPIO ICHOCA
PROVINCIA INQUISIVI LA PAZ”*

TRABAJO DIRIGIDO PARA OPTAR AL TÍTULO
DE LICENCIATURA EN QUÍMICA INDUSTRIAL

POSTULANTES: SUSANA BELMONTE QUISPE
EDGAR LEVI TITO CRUZ

TUTORA: Lic. GRACIELA ESPINOZA H.
ASESOR: MSc. OSWALDO RAMOS R.

La Paz – Bolivia
2012

DEDICATORIA

Yo, Susana Belmonte Quispe, dedico este trabajo:

A mi querida mamá Elvira Quispe Ch., por su gran amor, apoyo incondicional, consejos y por enseñarme que se puede alcanzar todas las metas trazadas con perseverancia, tenacidad y por sobre todo con mucho cariño y paciencia; gracias por transmitirme siempre mucha energía positiva. A mi papá, Eulogio Belmonte Q., por su gran amor, paciencia, apoyo incondicional y enseñarme que somos grandes personas. A mi hermano Erick R., por ser un ejemplo para mí, siempre aprendo algo de él. A mi hermanito Marcelo, por toda su ayuda e interés en los emprendimientos que realizo. A mi sobrina Barbara, por traer alegría y amor a nuestro hogar demostrando, con tan corta edad, su apoyo y cariño. A ellos les debo todo lo que he logrado, ya que de no contar con todo su amor y apoyo, nada habría sido posible.

A mi abuela Bertha Choque., porque siempre espera grandes logros de mi persona.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a toda mi familia que me apoyo en todas las locuras que emprendí en mi vida universitaria.

A mis padres Marcos Edgar y Florencia, por su comprensión y apoyo incondicional en los buenos y malos momentos de mi vida.

A mis hermanos: Irene (Roqui) que fue y es un ejemplo de superación, Arnold por hacerme recordar que la vida hay que disfrutarla en cada momento, Cesar por demostrar que el que persevera logra su objetivo, Marcela por demostrar que no importa cuánto caigas uno debe levantarse y continuar .

A mis cuñados Pedro y Juan Carlos por brindarme su apoyo.

A mi queridísima sobrina Yuri Yazu por dar alegría y felicidad a toda mi familia.

A mi segunda mamá Bety (†) que con su ejemplo de vida llena de alegría, cariño y esfuerzo, me enseñó que la vida continúa y que uno debe luchar por lo que quiere.

A mis tíos Hernán, Nahun, Javier, Miriam, Armando, Machi, por sus consejos

A mis abuelos Aurelio Tito, Irene de Tito (†), Roman Cruz y Candelaria de Cruz por traer al mundo a mis padres

Y a la persona que hizo que este trabajo se realice estando siempre a mi lado brindándome cariño apoyo y esforzándose siempre al máximo Susana Belmonte Quispe.

A todos mis compañeros y amigos de las diferentes carreras y facultades por el aliento brindado.

Edgar Levi Tito Cruz.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos:

A la UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES, nuestra casa superior de estudios.

A nuestra tutor Lic. Graciela Espinoza y asesor MSc. Oswaldo Ramos, por todo el apoyo, colaboración y desprendimiento.

Al Lic. Rafael Onofre, Decano de la Facultad Técnica, por brindarnos su apoyo incondicional en todo momento.

Al Lic. Osvaldo Valenzuela Director de la carrera de Química industrial. Lic. Edmundo Ovando, por su colaboración y aliento. Dra. Vино, por su interés y consejos. A los tribunales de este trabajo.

Al Instituto de Investigaciones y Aplicaciones Tecnológicas IIAT; Lic. Arturo Reynaga, por facilitar el préstamo de equipos de campo.

Al Lic. Jorge Quintanilla del Área de Hidroquímica, Carrera Ciencias Químicas Facultad Ciencias Puras y Naturales, por permitirnos trabajar en los laboratorios de dicha área y apoyarnos con equipo de campo. Lic. Efrain Blanco, por su colaboración y paciencia durante las diferentes determinaciones.

A el Sr. Ramiro Orellana, Honorable Alcalde Municipal de Ichoca, por permitir que se ejecute este trabajo y brindarnos su apoyo. Lic. Rosmery, Sra. Pacea Colque; funcionarias del Municipio de Ichoca, por su cooperación durante el trabajo de campo.

Ing. Luis Noriega (SENAMHI), por el apoyo técnico y logístico con el fin de llevar a cabo las diferentes campañas de muestreo. Los Técnicos, David Terrazas y Marcelo Maldonado, por su apoyo y compañerismo durante las campañas de muestreo, soportando las diferentes inclemencias del tiempo.

Al Centro de Promociones de Tecnologías Sostenibles CPTS, por permitirnos realizar análisis en sus equipos. Lic Cristian Romero Prieto, por la colaboración brindada. Lic. Arnold Tito, por su apoyo, interés y colaboración.

Al Ing. Franz J. Condori Mamani Director del Dep. de Medio Ambiente Gobierno Autónomo Departamental de La Paz, por facilitarnos el medio de transporte durante las tres últimas campañas de muestreo. Ing. Churqui, por estar presente en cada viaje.

La población de Sayaqira, por acogernos, brindarnos alojamiento y alimentación en cada una de las campañas de muestreo.

A todos los amigos y compañeros que nos dieron aliento en todo momento.

RESUMEN

El presente trabajo expone los resultados de la determinación de los contaminantes de origen minero del río Sayaquira. El estudio incluyó cuatro muestreos, realizados respectivamente en Noviembre de 2010, febrero de 2011, abril de 2011 y por último en mayo de 2011 recolectando muestras puntuales y compuestas.

Se determinaron parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad eléctrica, Total de sólidos disueltos (TDS), sólidos totales, potencial eléctrico (Eh), temperatura), aniones mayoritarios (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}), cationes (Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2}), metales y metales pesados (Mn, Fe, Cu, Zn, Cd, Pb), además de As, para contrastar los resultados con el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica, extraído de la Ley 1333 del Medio Ambiente.

Entre los principales resultados obtenidos destacan las concentraciones críticas de As, Fe, y Mn a causa del impacto que tienen las actividades mineras. De acuerdo con los resultados se pudo zonificar, el cauce del río Sayaquira, en tres secciones: Zona A, donde no existen actividades mineras y el agua se puede consumir después de sólo una desinfección y ningún tratamiento; Zona B donde las aguas del río reciben las descargas de la mina Sayaquira y presentan concentraciones que están por encima de los límites permisibles y por último la Zona C, en donde si bien existe una disminución, en las concentraciones de parámetros críticos, estos aún se encuentran por encima de los límites permisibles no siendo aptas para consumo humano.

Finalmente se recomienda el tratamiento, de aguas en la Zona B, utilizando el sistema Humedal Anaerobio, Sistemas de Producción Sucesiva de Alcalinidad (SAPS) con adición de Humedales Aerobios.

ÍNDICE GENERAL

	Página.
DEDICATORIA.....	i
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
RESUMEN.....	v
CAPÍTULO I	
1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1. Contexto general de la minería	2
1.2. Etapas de modernización.....	2
1.3. Procesos de la minería y sus efectos en su implementación.....	3
1.4. Tratamiento de aguas.....	5
CAPÍTULO II	
2. OBJETIVOS.....	8
2.1. Objetivo general.....	8
2.2. Objetivos específicos.....	8
CAPÍTULO III	
3. MARCO TEÓRICO.....	10
3.1. Ciclo geológico.....	10
3.1.1. Procesos geológicos internos y externos.....	10
3.1.2. Los procesos: meteorización, transporte y sedimentación.....	11
3.1.2.1. Meteorización.....	11
3.1.2.2. Transporte.....	12
3.1.2.3. Sedimentación.....	12
3.1.3. Acción geológica del agua.....	13
3.2. El agua.....	14
3.2.1. Ciclo Hidrológico.....	16
3.2.2. Cuenca Hidrológica.....	17
3.2.3. Características de la cuenca y sus cauces.....	18
3.2.4. Orden de las corrientes.....	19
3.2.5. Escurrimiento.....	20
3.2.5.1. Fuentes de los diferentes tipos de escurrimiento.....	20
3.3. Disponibilidad de agua en el mundo.....	22
3.4. Disponibilidad de agua en Bolivia.....	23
3.4.1. Disponibilidad de aguas superficiales.....	23
3.4.2. Disponibilidad de aguas subterráneas.....	24
3.5. Balance hídrico de Bolivia.....	24
3.6. Uso del agua en Bolivia.....	25
3.7. Disponibilidad de agua en la región.....	26

3.8. Contaminación hídrica y fuentes de contaminación.....	26
3.8.1. Actividades agropecuarias y forestales.....	28
3.8.2. Actividades domésticas.....	28
3.8.3. Actividades industriales.....	29
3.8.4. Actividades mineras.....	30
3.8.4.1. Minería mediana.....	30
3.8.4.2. Minería pequeña.....	32
3.9. Generación de aguas ácidas, drenajes ácidos de mina (DAM).....	33
3.9.1. Oxidación de piritas.....	34
3.10. Tipos de tratamientos aplicados a drenajes ácidos de mina (DAM).....	39
3.10.1. Humedales aerobios.....	41
3.10.2. Humedales anaerobios o balsas orgánicas.....	44
3.10.3. Drenaje anóxico calizo (ALD).....	47
3.10.4. Sistemas de producción sucesiva de alcalinidad (SAPS).....	50
3.10.5. Barreras reactivas permeables (PRB).....	52
3.11. Selección del tipo de tratamiento en función de las características del agua.....	53
3.12. Marco legal.....	54
3.12.1. Ley N° 1333 del medio ambiente promulgada el 27 de abril de 1992.....	55
3.12.2. Clasificación de cuerpos de agua según la Ley.....	55
3.13. Desarrollo sostenible.....	57
3.14. Enfermedades según la OMS/OPS.....	58

CAPÍTULO IV

4. ÁREA DE ESTUDIO.....	62
4.1. Hidrografía de la región.....	64
4.2. Geomorfología de la región.....	64
4.3. Yacimientos de la región.....	65
4.4. Densidad poblacional.....	66
4.5. Clima.....	66
4.6. Precipitaciones pluviales, periodos.....	67
4.7. Humedad relativa y viento.....	67

CAPÍTULO V

5. METODOLOGÍA DEL MONITOREO DEL RÍO SAYAQUIRA.....	69
5.1. Estudio preliminar.....	69
5.1.1. Recolección de información y consideraciones.....	69
5.1.2. Accesibilidad.....	70
5.2. Puntos de muestreo.....	70
5.3. Metodología de muestreo.....	73
5.3.1. Épocas de muestreo.....	73

5.3.2. Representatividad de las muestras e información del muestreo.....	73
5.3.3. Preservación de las muestras.....	74
5.3.4. Mediciones de parámetros en campo.....	75
5.4. Métodos de análisis.....	75
CAPÍTULO VI	
6. RESULTADOS DEL ESTUDIO E INTERPRETACIÓN	79
6.1. Resultados físico-químicos y gráficas.....	79
6.1.1. pH.....	82
6.1.2. Sólidos totales disueltos.....	83
6.2. Resultados análisis químico y gráficas.....	84
6.2.1. Sodio.....	86
6.2.2. Potasio.....	86
6.2.3. Calcio.....	86
6.2.4. Magnesio.....	86
6.2.5. Manganeso.....	87
6.2.6. Hierro.....	88
6.2.7. Arsénico.....	90
6.2.8. Cobre.....	91
6.2.9. Plomo.....	92
6.2.10. Cadmio.....	92
6.2.11. Zinc.....	93
6.3. Resultados del análisis de aniones mayoritarios, acidez y dureza.....	94
6.3.1. Sulfatos.....	96
6.3.2. Nitratos.....	97
6.3.3. Cloruros.....	98
6.4. Diagramas ternarios.....	99
6.4.1. Cu-As-Zn En la 1° campaña de muestreo.....	99
6.4.2. Cu-As-Zn En la 2° campaña de muestreo.....	99
6.4.3. Cu-As-Zn En la 3° campaña de muestreo.....	100
6.4.4. Cu-As-Zn En la 4° campaña de muestreo.....	100
6.5. Relación Fe – As.....	102
6.5.1. Época seca.....	102
6.5.2. Época húmeda.....	104
CAPÍTULO VII	
7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	108
7.1. Diagnóstico de la calidad del cuerpo de agua.....	108
7.1.1. Calidad de Aguas, Laguna San Roque T 1 y el río Kollpa T 2.....	109
7.1.2. Calidad de las aguas del Río Sayaquira.....	110
7.1.3. Calidad de aguas que circulan en la mina Sayaquira.....	114

7.1.4. Representación de cationes y aniones empleados en la clasificación de cuerpos de agua.....	116
7.2. Flujo de masa de elementos mayoritarios.....	119
CAPÍTULO VIII	
8. CONCLUSIONES.....	122
8.1. Diagnostico de la calidad de los tributarios T 1 y T2.....	122
8.2. Diagnostico de las aguas del Río Sajaquira.....	122
CAPÍTULO IX	
9. RECOMENDACIONES.....	127
BIBLIOGRAFÍA.....	128
ANEXO A.....	131
ANEXO B.....	134
ANEXO C.....	135
ANEXO D.....	138
ANEXO E.....	141
ANEXO F.....	143
ANEXO G.....	146

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: Disponibilidad de agua en el mundo.....	22
Tabla N° 2: Disponibilidad de Aguas Superficiales.....	23
Tabla N° 3: Balance hídrico de algunas cuencas de Bolivia (PHICAB, 1992).....	25
Tabla N° 4: Usos del agua.....	26
Tabla N° 5: Ríos existentes en el municipio.....	27
Tabla N° 6: Cantidad de baños, cámara séptica en la sección.....	28
Tabla N° 7: Empresas Mineras Medianas, 1994.....	31
Tabla N° 8: Grado de Mecanización en las Cooperativas Mineras.....	33
Tabla N° 9: Composición de sulfuros metálicos.....	34
Tabla N° 10: Minerales sulfurosos y sus productos de oxidación.....	39
Tabla N° 11: Clasificación de los cuerpos de agua según su aptitud de uso.....	57
Tabla N° 12: Densidad poblacional.....	66
Tabla N° 13: Temperatura media ambiente (°C) año 2007.....	66
Tabla N° 14: Temperatura máxima media (°C) año 2007.....	67
Tabla N° 15: Temperatura mínima media (°C).....	67
Tabla N° 16: Precipitación total en el año 2007.....	67
Tabla N° 17: Ubicación de puntos de muestreo en el trayecto del río Sayaquirá.....	70
Tabla N° 18: Campañas de muestreo.....	76
Tabla N° 19: Metodología de Análisis.....	77
Tabla N° 20: Resultados de parámetros Físicoquímicos, 1° campaña de muestreo.....	79
Tabla N° 21: Resultados de parámetros Físicoquímicos, 2° campaña de muestreo.....	80
Tabla N° 22: Resultados de parámetros Físicoquímicos, 3° campaña de muestreo.....	80
Tabla N° 23: Resultados de parámetros Físicoquímicos, 4° campaña de muestreo.....	81
Tabla N° 24: Resultados de la medición de caudales por campaña de muestreo.....	81
Tabla N° 25: Clasificación del cuerpo de agua, según su pH.....	82
Tabla N° 26: Resultados del análisis químico, 1° Campaña de Muestreo.....	84
Tabla N° 27: Resultados del análisis químico, 2° Campaña de Muestreo.....	84
Tabla N° 28: Resultados del análisis químico, 3° Campaña de Muestreo.....	85
Tabla N° 29: Resultados del análisis químico, 4° Campaña de Muestreo.....	85

Tabla N° 30: Resultados, 1° Campaña de Muestreo.....	94
Tabla N° 31: Resultados, 2° Campaña de Muestreo.....	95
Tabla N° 32: Resultados, 3° Campaña de Muestreo.....	95
Tabla N° 33: Resultados, 4° Campaña de Muestreo.....	96
Tabla N° 34: Clasificación del cuerpo de agua estudiado.....	98
Tabla N° 35: Parámetros que exceden la Ley 1333.....	114
Tabla N° 36: Disminución de las concentraciones (con ayuda del filtro implementado) de parámetros que no cumplen con la ley 1333.....	115
Tabla N° 37: Promedio época seca.....	119
Tabla N° 38: Promedio época húmeda.....	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ciclo Geológico.....	11
Figura 2: Ciclo Hidrológico.....	16
Figura 3: Tipos de cuencas (Taylor y Schwarz, 1952).....	18
Figura 4: Características de una cuenca (Horton, 1945).....	19
Figura 5: Orden de las corrientes.....	20
Figura 6: Disposición de las celdas en un humedal aerobio y circulación del agua en su interior (Brix, 1993 y USEPA, 2000).....	44
Figura 7: Humedal anaerobio de flujo horizontal (a) y vertical (b) (Brix, 1993 y USEPA, 2000).....	46
Figura 8: Tratamiento combinado compuesto por sistema ALD y humedal (Brodie et al. 1993).....	48
Figura 9: Esquema, disposición de los substratos y dirección del flujo de agua en un SAPS (USEPA, 2000).....	51
Figura 10: Diagrama de flujo para seleccionar el sistema o la combinación de sistemas para el tratamiento pasivo de drenajes ácidos de mina (Modificada de Skousen et al., 1994, 1998; Watzlaf e Hyman, 1995 y Hedin, 1997).....	54
Figura 11: Ubicación del área de estudio, río Sayaquira.....	62
Figura 12: Río Sayaquira y otros. Elaboración propia mediante programa ArcGIS-ArcMap (versión 9.3).....	63
Figura 13: Ubicación de puntos de muestreo PM 1 al PM 7, T 1, T 2 y en inmediaciones de la mina Sayaquira; M 1, M 2 y M 3. Elaboración propia mediante programa ArcGIS - ArcMap (versión 9.3).....	71
Figura 14: Puntos de muestreo en predios de la mina Sayaquira, perteneciente a la empresa Barrosquira, M 1, M 2 y M 3. Ubicación de la bocamina del nivel -180. Elaboración propia mediante programa ArcGIS - ArcMap (versión 9.3).....	72
Figura 15: Resultados pH Vs puntos de muestreo; época seca 1° y 4° campaña de muestreo, época húmeda 2° y 3° campaña de muestreo (elaboración propia).....	82

Figura 16: Comportamiento de las concentraciones de; Na, K, Ca y Mg vs puntos de muestreo, en las cuatro campañas de muestreo (elaboración propia).....	87
Figura 17: Comportamiento de la concentración de Mn vs puntos de muestreo; época seca 1° y 4° campaña de muestreo, época húmeda 2° y 3° campaña de muestreo (elaboración propia).....	88
Figura 18: Comportamiento de la concentración de Fe vs puntos de muestreo; época seca 1° y 4° campaña de muestreo, época húmeda 2° y 3° campaña de muestreo (elaboración propia).....	89
Figura 19: Comportamiento de la concentración de As vs puntos de muestreo; época seca 1° y 4° campaña de muestreo, época húmeda 2° y 3° campaña de muestreo (elaboración propia).....	90
Figura 20: Comportamiento de la concentración de Cu vs puntos de muestreo; época seca 1° y 4° campaña de muestreo, época húmeda 2° y 3° campaña de muestreo (elaboración propia).....	91
Figura 21: Comportamiento de la concentración de Pb vs puntos de muestreo; época seca 1° y 4° campaña de muestreo, época húmeda 2° y 3° campaña de muestreo (elaboración propia).....	92
Figura 22: Comportamiento de la concentración de Cd vs puntos de muestreo, durante la 1° campaña de muestreo.....	93
Figura 23: Comportamiento de la concentración de Zn vs puntos de muestreo; época seca 1° y 4° campaña de muestreo, época húmeda 2° y 3° campaña de muestreo (elaboración propia).....	93
Figura 24: Comportamiento de la concentración de SO_4^- vs puntos de muestreo; época seca 1° y 4° campaña de muestreo, época húmeda 2° y 3° campaña de muestreo (elaboración propia).....	97
Figura 25: Panel a) resultados NO_3^- 1°, 2°, 3° y 4° campaña de muestreo , panel b) resultados Cl^- , 1°, 2°, 3° y 4° campaña de muestreo (elaboración propia).....	98

Figura 26: Diagrama Trilineal cobre-arsénico-zinc, 1° campaña de muestreo. Elaboración propia mediante software Aquagem versión 4.0.....	100
Figura 27: Diagrama Trilineal cobre-arsénico-zinc, 2° campaña de muestreo. Elaboración propia mediante software Aquagem versión 4.0.....	101
Figura 28: Diagrama Trilineal cobre-arsénico-zinc, 3° campaña de muestreo. Elaboración propia mediante software Aquagem versión 4.0.....	101
Figura 29: Diagrama Trilineal cobre-arsénico-zinc, 4° campaña de muestreo. Elaboración propia mediante software Aquagem versión 4.0.....	102
Figura 30: Diagrama Scatter Fe vs. Eh, Fe vs pH, en época seca (elaboración propia)...	104
Figura 31: Diagrama Scatter As vs Eh, As vs pH en época seca (elaboración propia).....	104
Figura 32: Diagrama Scatter: Fe vs Eh, Fe vs pH en época húmeda (elaboración propia).	105
Figura 33: Diagrama Scatter: As vs Eh, As vs pH en época húmeda (elaboración propia)..	105
Figura 34: Diagramas (Box and Whisker): Na, Ca, Mg, K, Mn, Pb, Fe, Cu, As, Zn, Cd, Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ y SO ₄ ⁻² , 1° y 4° campaña (época seca), 2° y 3° campaña (época húmeda). Elaboración propia mediante programa Aquagem versión 4,0.....	106
Figura 35: Exceso en la concentración de Mn respecto al límite clase “D” más el 50% del valor máximo admisible.....	110
Figura 36: Exceso en la concentración de Fe respecto al 50% del valor máximo admisible.....	110
Figura 37: Exceso en la concentración de As respecto al 50% del valor máximo admisible.....	111
Figura 38: Exceso en la concentración de Cu respecto al 50% del valor máximo admisible.....	111
Figura 39: Exceso en la concentración de Cd respecto al 50% del valor máximo admisible.....	111
Figura 40: Ejemplo de la distribución de cationes y aniones mediante el programa Aquagem versión 4,0 (gráfico inicial).....	116
Figura 41: Representación de aniones y cationes en época seca. Elaboración propia mediante programa Aquagem (versión 4,0) y ArcGIS – ArcMap (versión 9.3).....	117
Figura 42: Representación de aniones y cationes en época húmeda. Elaboración propia mediante programa Aquagem (versión 4,0) y ArcGIS – ArcMap (versión 9.3)...	118

Figura 43: Tramo del río Sayaquira dividido en zonas. Elaboración propia mediante programa ArcGIS - ArcMap (versión 9.3)..... 123

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía N° 1: Efluente que sale del nivel (-180) mina Sayaquira empresa Barrosquira con descarga directa en el río Sayaquira.....	4
Foto N° 2: Laguna San Roque.....	109
Foto N° 3: Tratamiento pasivo (filtro artesanal) implementado por la empresa minera.....	114
Foto N° 4: Salida de aguas ácidas de la bocamina (nivel -180).....	116
Foto N° 5: pH-metro multiparámetro de campo.....	143
Foto N° 6: Contador de revoluciones marca SIAP y molinete de eje horizontal marca.....	143
Foto N° 7: Micromolinete y contador de revoluciones Z 30.....	143
Foto N° 8: Técnicos SENAMHI	144
Foto N° 9: Toma de muestra puntual.....	144
Foto N°10: Medición de parámetros in situ.....	145
Foto N° 11: FRX, centro de promoción de tecnologías sostenibles.....	152
Foto N° 12: Desionizador de agua destilada y micropipetas Ependorf.....	152
Foto N° 13: Balanza analítica	153
Foto N° 14: Soluciones patrón.....	153
Foto N° 15: Trabajo en laboratorio (área de Hidroquímica).....	153
Foto N°16: Trabajo en laboratorio (área de Hidroquímica).....	154
Foto N°17: Espectrómetro Perkin Elmer AAnalyst 200, de llama.....	154
Foto N°18: Espectrómetro Perkin Elmer AAnalyst 100, horno de grafito.....	155
Foto N°19: Espectrómetro Perkin Elmer AAnalyst 100, generador de hidruros.	155



1. INTRODUCCION.

1.1. Contexto general de la minería

La minería es uno de los causantes más importantes del deterioro ambiental en el mundo y en el país. Bolivia tuvo una actividad minera relevante desde hace varios siglos, situación de la cual se origina la gran cantidad de pasivos ambientales en diversas zonas de las tierras altas de nuestro País [1].

El informe Freeman (1980) referente al impacto ambiental de la minería en nuestro país, alertó sobre varias situaciones, destacando el caso del Lago Poopó, las plantas fundidoras en torno a la ciudad de Oruro y la contaminación por arsénico, además del efecto que ocasionaba la Mina Matilde en relación al Lago Titicaca. Similar enfoque presenta el Perfil Ambiental de Bolivia (1986), enfatizando en el caso de la planta volatilizadora de Palca (Potosí) y la contaminación atmosférica que se registraba en esa época en torno a dicha planta [2].

1.2. Etapas de modernización

Bolivia atravesó dos etapas de modernización del sector minero, el primero, bajo la modalidad de capitalismo de Estado y una industrialización basada en la explotación minera, y el otro a partir de 1995, con tendencia al libre mercado.

En la primera etapa, la explotación minera tuvo un impacto dañino en el tratamiento de los recursos naturales pero no fue un tema de debate público. Es así que predominaba en la opinión pública una lógica industrialista que hacía invisible la temática de contaminación; además de que la propiedad estatal y los procesos de movilidad social resultantes de la redistribución del excedente minero mitigaban cualquier discusión en contra. En la segunda etapa de modernización, la privatización rompió el mito justificador del uso depredador de los recursos naturales por la necesidad pública y de prioridad nacional, desatando permanentes conflictos entre

[1] LIDEMA M. O. Rivera A., [2] M.O. Rivera.

privados (por ejemplo entre empresas y comunidades) por el control, gestión y apropiación de los recursos naturales.

La contaminación minera afecta una importante superficie del territorio, concentrándose especialmente en las regiones altas de occidente del país y más concretamente en Potosí y Oruro. Sin embargo todos los departamentos tienen actividades mineras (oro aluvial en los Yungas y otros en el Departamento de La Paz, piedras semipreciosas en la Chiquitania, de Santa Cruz, oro en grandes ríos de Pando y Beni, calizas en Tarija, etc.), si bien éstas son a menor escala [3].

1.3. Procesos de la minería y sus efectos en su implementación

La minería puede producir contaminantes en las diversas etapas de sus procesos de producción:

- a) Exploración del subsuelo y deterioro de ecosistemas.
- b) Explotación en mina y liberación de aguas ácidas de roca o mina, lodos de separación y acumulación de pasivos como colas.
- c) Transformación por ingenios e industrias y generación de colas, lodos y residuos altamente alcalinos producto de los procesamientos.
- d) Desechos de industrias y plantas metalúrgicas con emisión de gases, residuos y aguas contaminadas.

Entre los efectos principales ocasionadas por la minería podemos citar:

- La contaminación de aguas y suelos por procesos de explotación.
- Serios efectos sobre la salud de las comunidades, en relación directa con los centros de operación minera y especialmente sobre la salud ambiental de los trabajadores.
- La afectación y destrucción del paisaje y la vegetación, más aún si las operaciones son a cielo abierto o por tajo.

- Los riesgos de extracción de agua del subsuelo y los bofedales, lagunas y vertientes, para producción a gran escala, que amenaza afectar la estabilidad hidrológica de una extensa región circundante a la zona de operaciones.

Entre los efectos indirectos podemos citar:

- La afectación de extensas zonas rurales, cuyos suelos están expuestos a las aguas contaminadas por las actividades mineras por el desborde de ríos o a partir de flujos provenientes de las capas freáticas del subsuelo. Esto implica afectaciones sobre los cultivos, praderas y ganado [3].

En términos generales, debido a las tecnologías utilizadas en la explotación minera, se liberan grandes concentraciones de metales, metales pesados que tienen efectos dañinos hasta letales en la salud humana [4]



Fotografía N° 1: Efluente que sale del nivel (-180) mina Sayaquira, empresa Barrosquira con descarga directa en el río Sayaquira.

También debemos considerar que con las tecnologías de punta, actualmente grandes empresas, por lo general transnacionales con subsidiarias o socias en el país, pueden explotar yacimientos o depósitos de minerales de baja ley, que antes fueron obviados por problemas de costo de producción. Esto, ambientalmente implica la remoción de grandes superficies de terrenos y la generación de altos volúmenes de residuos [3].

En los primeros meses del 2008 se produjo una caída pronunciada de la producción minera interna, atribuible no a causas internacionales de precios, sino a la incertidumbre del sector sobre el tema de propiedad y acceso a las minas y el rol de las comunidades (ayllus) sobre éstas.

En la actualidad y desde hace unos años la actividad minera se encuentra en crecimiento y reactivación debido al incremento de los precios de muchos minerales (zinc, estaño, plomo, cadmio, plata, etc.) y al aumento de la demanda por mercados internacionales, en especial de la China, India y otros países en desarrollo

1.4 Tratamiento de aguas

Como se mencionó anteriormente la explotación minera genera diferentes tipos de contaminación ya sea en suelos y aguas para lo cual las empresas mineras deben velar por el medio ambiente cuando realizan la explotación de los minerales. Los tratamientos de aguas provenientes de actividades mineras, se clasifican en:

Físicos-químicos:

- Eliminación de sólidos en suspensión.
- Neutralización.
- Oxidación.
- Precipitación.
- Floculación.

Biológicos:

- Tratamientos de tipo pasivo.

Existen alternativas variadas respecto a los métodos de tratamiento convencionales, como son la *neutralización con aguas frescas*, la *ósmosis inversa*, *electrodialisis*, *ultrafiltración*, *precipitación de metales* e *intercambio iónico* con resinas sintéticas, y el empleo del ya mencionado *tratamientos de tipo pasivo* de los que se hablará en los próximos capítulos.

En este estudio de acuerdo a los resultados que se obtuvieron de los análisis de las aguas del río Sayaquira, determinaremos el tipo de tratamiento que se debe adoptar o si requiere de un tratamiento especial para la calidad de agua en estudio.





CAPÍTULO II

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Determinar contaminantes de origen minero existentes en el río Sayaquira, Provincia Inquisivi departamento de La Paz, considerando los efluentes de minas aledañas en el periodo de octubre de 2010 a Julio de 2011 (época seca y húmeda).

2.2. Objetivos Específicos

- Realizar el reconocimiento de la región a ser estudiada: cauce del Río Sayaquira y efectuar la fijación geográfica de los puntos de muestreo.
- Realizar entrevistas, a los habitantes de la población Sayaquira y mineros de la empresa Barrosquira, sobre el aprovechamiento de las aguas en estudio.
- Efectuar muestreos y aforos de agua del Río Sayaquira en dos épocas del año (seca y húmeda).
- Realizar el análisis físico-químico y químico en muestras de agua recolectadas del río Sayaquira.
- Establecer el comportamiento de las concentraciones de los contaminantes de cuatro campañas de muestreo en los puntos seleccionados.
- Realizar la evaluación de los resultados obtenidos.
- De acuerdo a los resultados obtenidos y la geografía del lugar sugerir una alternativa de tratamiento para las aguas del río Sayaquira.
- Compartir la información generada con el Municipio y con sectores vinculados al estudio.



3. MARCO TEORICO

3.1. Ciclo geológico

A lo largo de la historia de la tierra, la corteza ha estado sometida a transformaciones continuas, consecuencia de los procesos geológicos, tanto internos como externos, que son los elementos que con su actividad producen cambios en el relieve terrestre [5]. El ciclo geológico integra ambos procesos, que se realizan de forma ininterrumpida y simultánea, en tres fases:

- **Orogénesis** o formación de nuevas cadenas montañosas.
- **Gliptogénesis**, que es la destrucción del relieve, debida a los agentes externos.
- **Litogénesis**, que es la formación de nuevos materiales a partir de los ya existentes (rocas sedimentarias) [5].

3.1.1. Procesos geológicos internos y externos

Tienen su principal origen en el calor interno del planeta, considerándose constructivos, al ser los responsables de la formación del relieve. La manifestación de los agentes internos se realiza en forma de movimientos lentos (orogénicos) o bruscos (sísmos y volcanes), que asimismo darán origen a la formación de nuevos minerales y rocas. Se deben a la actuación de los agentes externos (atmósfera, agua, viento), teniendo su origen en el calentamiento provocado por la radiación solar y en la fuerza de la gravedad.

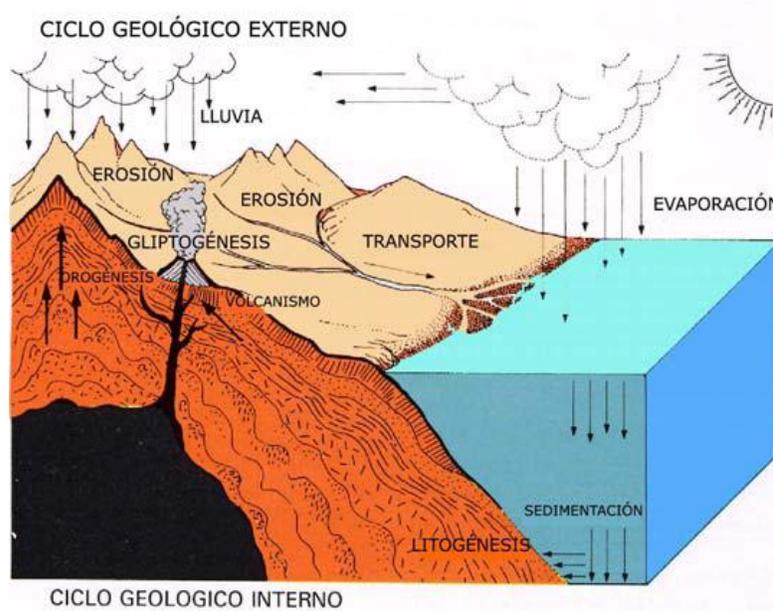


Figura 1: Ciclo Geológico

3.1.2. Los procesos: meteorización, transporte y sedimentación

3.1.2.1. Meteorización

Es el proceso de rotura y descomposición de las rocas por la acción de los agentes externos (atmósfera, agua y seres vivos). La meteorización se produce en el lugar donde se encuentran las rocas, sin sufrir transporte, denominándose **erosión** cuando la destrucción se produce simultáneamente con su transporte.

La meteorización puede ser mecánica, química o biológica, aunque en muchos casos pueden actuar de forma combinada. El clima será un factor determinante en el predominio de la meteorización mecánica o química, mientras que la acción de los seres vivos será de gran importancia en los climas húmedos.

a) Meteorización mecánica: consiste en la desintegración física de las rocas, debida a fenómenos tales como la dilatación y los cambios de temperatura del agua. El calentamiento y enfriamiento de las rocas que se da en climas secos y cálidos (desiertos), provoca el agrietamiento y rotura. En los climas fríos, al congelarse el agua

que penetra en las grietas actúa como una cuña, provocando la fractura y fragmentación de las rocas.

b) Meteorización química: consiste en la alteración de los minerales constituyentes de las rocas, debido a la acción de gases atmosféricos (oxígeno, dióxido de carbono) y el agua, que realiza procesos tales como hidrólisis e hidratación.

c) Meteorización biológica: puede ser mecánica, como es el efecto de las raíces, provocando grietas en las rocas al actuar como una cuña, mientras que otros organismos (bacterias, líquenes, hongos, etcétera) producen sustancias químicas que atacan a las rocas.

3.1.2.2. Transporte

Se produce sobre los materiales meteorizados, fragmentados o disueltos, que pueden ser erosionados y desplazados desde su lugar de origen, por la acción de la gravedad, que los llevará desde zonas altas hacia otras más bajas. Los principales agentes de transporte son el agua de escorrentía (torrentes, ríos), el hielo (glaciares), el viento y el mar.

3.1.2.3. Sedimentación

Es el depósito de los materiales erosionados y transportados (fragmentos de rocas, organismos muertos y sustancias químicas) cuando cesa el efecto de la gravedad y alcanzan lugares más estables. Las zonas de acumulación de los sedimentos se denominan cuencas sedimentarias, pudiendo ser *continentales* (un lago o el valle de un río) y *oceánicas*, en el fondo del mar, que son las más importantes. En el caso de los desiertos la sedimentación se produce al cesar el efecto del viento.

Cuando un elemento químico es liberado de las rocas mediante la meteorización o en nuestro caso por las actividades mineras, que mediante la trituración de las rocas que contienen el elemento principal facilitan la oxidación de

otros elementos que lo acompañan, su migración supergénica (movilidad y dispersión) en un medio de transporte como ser las aguas superficiales, depende en gran parte de factores tales como la solubilidad, pH y Eh de un ambiente, la adsorción y reacciones competidoras.

En el caso del Arsénico, su movilidad se ve afectada por atenuación natural, es decir, por la adsorción de éste elemento en superficies de distintas fases de hierro involucradas que provienen de la oxidación de piritas (schwertmannita, jarosita, goethita y metales hidrolizados) ésta atenuación es una cuestión todavía por aclarar. Es importante discriminar qué la fase sólida retiene más arsénico ya que su comportamiento posterior frente al arrastre y depósito en el fondo anóxico de embalses o sedimentos y su liberación posterior de arsénico pueden ser muy diferentes Anexo B.

3.1.3. Acción geológica del agua

Las aguas subterráneas son acumulaciones de agua bajo la superficie terrestre, procedentes de la filtración de la lluvia, de la fusión del hielo, de ríos, lagos, etcétera. La filtración depende fundamentalmente de la naturaleza de las rocas (permeables o impermeables), aunque también influyen otros factores como la pendiente del terreno, la vegetación existente o la evaporación.

Las aguas de infiltración tienden a descender mientras la permeabilidad de las rocas se lo permita, acumulándose al llegar a una capa impermeable y formando un manto freático, denominado acuífero. El límite superior del acuífero constituye el nivel freático, estando en función del clima de la región. Los acuíferos se denominan *cautivos* cuando el manto freático se encuentra entre dos capas de rocas impermeables.

En regiones con predominio de rocas calizas se produce la disolución de las mismas como consecuencia de la acción combinada del agua y el dióxido de carbono del aire, dando origen a un modelado cárstico. Externamente se aprecia un paisaje con

formas de aspecto esponjoso (lenares), así como fisuras por las que penetra el agua (dolinas y simas). En el interior del macizo cárstico la disolución origina grietas, túneles y galerías, pudiendo culminar en cavernas de gran tamaño, donde precipita el carbonato cálcico, originando estalactitas y estalagmitas.

Los glaciares son acumulaciones de hielo, estando localizados en los casquetes polares y en zonas montañosas (alpinos y de circo). Se originan en lugares donde las precipitaciones son en forma de nieve, la cual no se funde y se acumula, compactándose y endureciéndose hasta transformarse en hielo.

Los glaciares alpinos se localizan en altas montañas (Alpes, Andes, Himalaya) distinguiéndose:

- El circo, que es donde se acumula la nieve.
- La lengua, originada al descender el hielo por efecto de la gravedad, con un efecto erosivo, dando origen a valles en forma de U; asimismo va a transportar una serie de materiales englobados en la masa de hielo (morrenas).
- El frente glaciario, que es el lugar donde se funde la lengua y se depositan los materiales arrastrados.
- Los glaciares de circo, característicos de los Pirineos, solo poseen el circo, debido al poco aporte de nieve y a las condiciones climáticas.

3.2. El Agua

En la antigüedad se consideraba el agua como uno de los cuatro elementos, siendo los restantes el aire, la tierra y el fuego. Hasta una época relativamente reciente no se reconoció que el agua es una sustancia compuesta. En 1781 Cavendish se mostró sorprendido al obtener agua quemando hidrógeno en el aire y Lavoisier pudo demostrar poco después que el agua estaba formada únicamente por hidrógeno y oxígeno [6].

El agua es abundante en la naturaleza en los tres estados. Sólida, formando el hielo o nieve que se encuentra en las regiones polares y en las cumbres de las

montañas elevadas; líquida en los océanos, mares, lagos ríos, fuentes y arroyos cubre casi las tres cuartas partes de la superficie terrestre; en estado de vapor se encuentra en grandes cantidades en la atmósfera que varía según el lugar y en el tiempo pero que normalmente puede alcanzar a unas 50 000 toneladas en el aire que gravita sobre 1 kilómetro cuadrado de la superficie de la tierra, como consecuencia de la evaporación del agua líquida, provocada por el calor solar. Forma parte integrante de los organismos animales y vegetales, en el cuerpo humano constituye el 65%. Todos los alimentos contienen agua en proporción que varía desde un 7.3% en la harina de avena a un 94.7% en la lechuga [7].

A la vez su excepcional importancia desde el punto de vista químico reside en que la casi totalidad de los procesos químicos que ocurren en la naturaleza, no solo en los organismos vivos, animales y vegetales, sino en la superficie no organizada de la tierra, así como los que se llevan a cabo en el laboratorio y en la industria, tienen lugar entre sustancias disueltas en agua, esto es en disolución. Las variables que afectan a cualquier disolución acuosa son: presión, temperatura y concentración. El comportamiento de los iones frente a su disolución acuosa se estudia mediante el valor de su potencial iónico, que es la relación existente entre su carga y su radio iónico. En éste sentido los elementos se pueden dividir en tres grupos:

Iones de potencial débil, que tienen como característica un radio grande y una carga pequeña, permanecen disueltos hasta un pH muy alto. Son Cesio, Rubidio, Potasio, Sodio, Litio, Bario, Estroncio y calcio. Algunos no están hidratados como sodio y potasio y otros sí (calcio, magnesio). Los que se encuentran más presentes en la naturaleza son precisamente estos últimos.

Iones de potencial medio, tienen carga y radio intermedio. Precipitan por hidrólisis como hidróxidos para valores de pH alcalino. Destacan: aluminio, hierro, silicio y zinc.

Los iones de potencial fuerte, caracterizados por carga grande y radio pequeño: boro, carbono, nitrógeno, fosforo, azufre, cromo y molibdeno. Se disuelven en el agua

[7] L.Vovich, 1995 y Simonovic, 1999.

formando aniones complejos con el oxígeno, produciendo soluciones iónicas verdaderas como: SO^{3-} , P_2O^{3-} , CO_2 , etc.

Hidrología

Existen varias definiciones de hidrología, pero la más completa es quizás la siguiente:

“Hidrología es la ciencia natural que estudia al agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluido a los seres vivos” [8].

Las precipitaciones y las nevadas son la causa del flujo en los ríos, con lo cual marcó la pauta para el reconocimiento universal del ciclo hidrológico en su interpretación moderna. Lo anterior justificó la decisión de aceptar a la obra de Pierre Perrault como principio de la hidrología científica y de celebrar su tricentenario en 1974 [9].

3.2.1. Ciclo Hidrológico

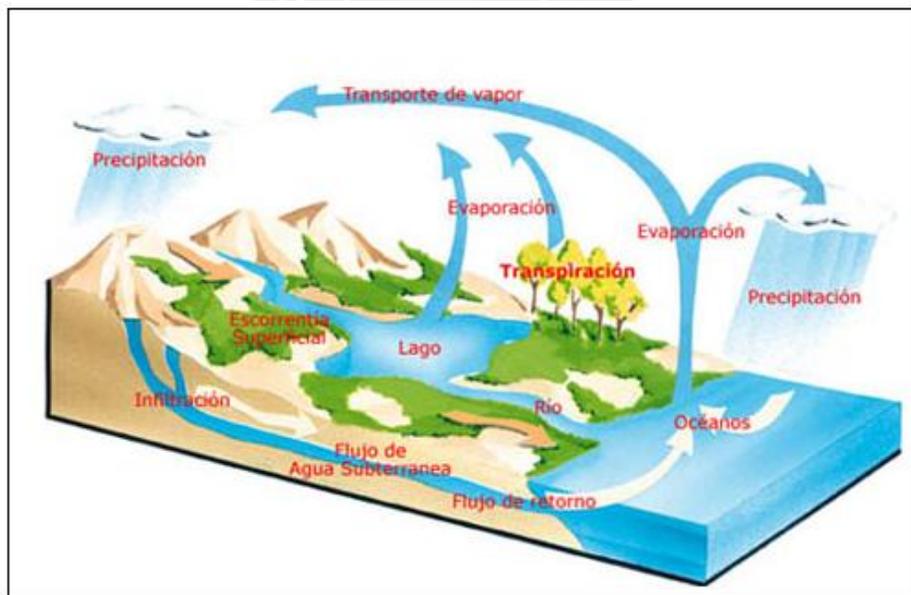


Figura 2: Ciclo Hidrológico

El ciclo hidrológico, como ya se mencionó, se considera el concepto fundamental de la hidrología (Figura 2). Como todo ciclo, el hidrológico no tiene ni principio ni fin, y su descripción puede comenzar en cualquier punto. El agua que se encuentra sobre la superficie terrestre o muy cerca de ella se evapora bajo el efecto de la radiación solar y el viento. El vapor de agua que así se forma, se eleva y se transporta por la atmósfera en forma de nubes hasta que se condensa y cae hacia la tierra en forma de precipitación. Durante su trayecto hacia la superficie de la tierra, el agua precipitada puede volver a evaporarse o ser interceptada por las plantas o las construcciones, luego fluye por superficie hasta las corrientes o se infiltra. El agua interceptada y una parte de la infiltrada y de la que corre por la superficie se evapora nuevamente. De la precipitación que llega a las corrientes, una parte infiltrada y otra llega hasta los océanos y otros grandes cuerpos de agua, como presas y lagos. Del agua infiltrada, una parte es absorbida por las plantas y posteriormente es transpirada, casi en su totalidad, hacia la atmósfera y otra parte fluye bajo la superficie de la tierra hacia las corrientes, el mar u otros cuerpos de agua, o bien hacia zonas profundas del suelo (percolación) para ser almacenada como agua subterránea y después aflorar en manantiales o ríos que es nuestro caso.

Así como el ciclo hidrológico es el concepto fundamental de la hidrología la cuenca hidrológica es su unidad básica de estudio [8].

3.2.2. Cuenca Hidrológica

Es una zona de la superficie terrestre donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida.

La definición anterior se refiere a una cuenca superficial; asociada a cada una de éstas, existe también una cuenca subterránea, cuya forma en planta es semejante a la superficial. De ahí la aclaración de que la definición es válida si la superficie fuera impermeable.

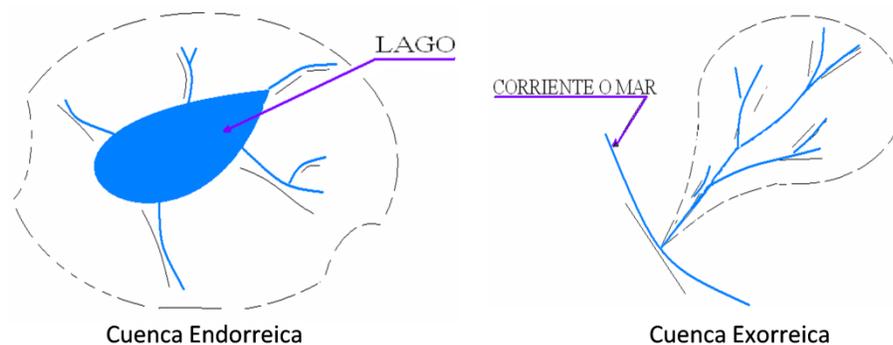


Figura 3: Tipos de cuencas (Taylor y Schwarz, 1952)

Desde el punto de vista de su salida, existen fundamentalmente dos tipos de cuencas (Figura 3):

- Cuenca endorreica. En la cuenca endorreica el punto de salida está dentro de los límites de la cuenca y generalmente es un lago.
- Cuenca exorreica. En la cuenca exorreica el punto de salida se encuentra en los límites de la cuenca y está en otra corriente o en el mar.

3.2.3. Características de la cuenca y sus cauces

El ciclo hidrológico, visto de una cuenca, se puede esquematizar como un estímulo, constituido por la precipitación, al que la cuenca responde mediante el escurrimiento en su salida. Entre el estímulo y la respuesta ocurren varios fenómenos que condicionan la relación entre uno y otra, y que están controlados por las características geomorfológicas de la cuenca y su urbanización. Dichas características se clasifican en dos tipos, según la manera en que controlan los fenómenos mencionados; las que condicionan el volumen de escurrimiento, como el área de la cuenca y el tipo de suelo, y las que condicionan la velocidad de respuesta, como son el orden de corrientes, pendiente de la cuenca y los cauces, etc. A continuación se describen las características de la cuenca y los cauces de mayor importancia por sus efectos en la relación precipitación-escurrimiento.

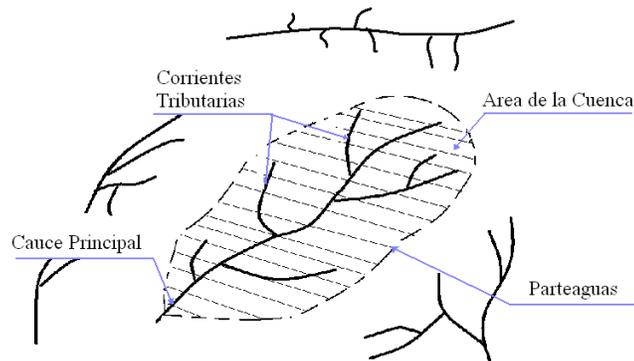


Figura 4: Características de una cuenca (Horton, 1945)

- El parteaguas; es una línea imaginaria formada por los puntos de mayor nivel topográfico y que separa la cuenca de las cuencas vecinas, también se conoce esta línea como límite de cuenca.
- El área de la cuenca; se define como la superficie, en proyección horizontal, delimitada por el parteaguas.
- La corriente principal; es la corriente que pasa por la salida de la misma. Nótese que esta definición se aplica solamente a las cuencas exorreicas. Las demás corrientes de una cuenca de este tipo se denominan corrientes tributarias. Todo punto de cualquier corriente tiene una cuenca de aportación, toda cuenca tiene una y solo una corriente principal. Las cuencas correspondientes a las corrientes tributarias o a los puntos de salida se llaman cuencas tributarias o subcuencas.

3.2.4. Orden de las corrientes

Se determina como se muestra en la figura 5. Una corriente de orden 1 es un tributario sin ramificaciones, una de orden 2 tiene solo tributaciones de primer orden, etc. Dos corrientes de orden 1 forman una corriente de orden 2, dos corrientes de orden 3 forman una corriente de orden 4, etc. Pero por ejemplo, una corriente de orden 2 y una de orden 3 forman otra de orden 3. El orden de una cuenca es el mismo que el de la corriente principal en su salida; así, por ejemplo, la figura 5 es 4. Nótese que el orden de una cuenca depende en mucho de la escala del plano utilizando para su determinación,

en este sentido, las comparaciones entre una cuenca y otra deben hacerse con cuidado, especialmente cuando los planos correspondientes no están a la misma escala o están editados por diferentes organismos[10].

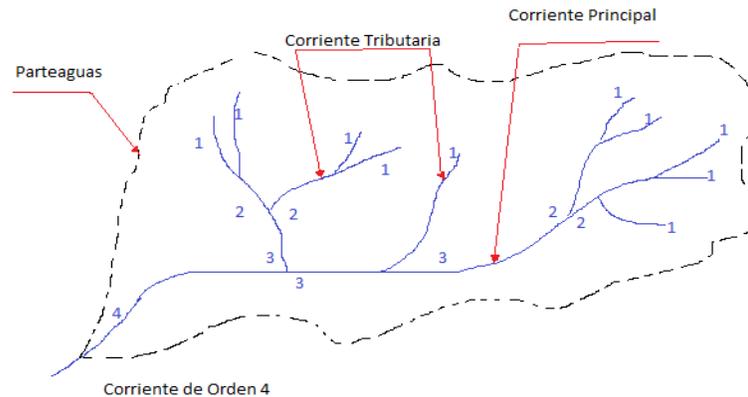


Figura 5: Orden de las corrientes

3.2.5. Escurrimiento

El escurrimiento se define como el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o debajo de la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca.

El agua proveniente de la precipitación que llega hasta la superficie terrestre una vez que una parte ha sido interceptada y evaporada sigue diversos caminos hasta llegar a la salida de la cuenca. Conviene dividir estos caminos en tres clases; escurrimiento superficial, escurrimiento subsuperficial y escurrimiento subterráneo.

3.2.5.1. Fuentes de los diferentes tipos de escurrimiento

Una vez que la precipitación alcanza la superficie del suelo, se infiltra hasta que las capas superiores del mismo se saturan. Posteriormente, se comienzan a llenar las depresiones del terreno y al mismo tiempo, el agua comienza a escurrir sobre su superficie. Este escurrimiento, llamado flujo en la superficie del terreno, se produce mientras el agua no llegue a cauces bien definidos (es decir, que no desaparecen entre

dos tormentas sucesivas). En su trayectoria hacia la corriente más próxima, el agua que fluye sobre el terreno se sigue a un cauce bien definido se convierte en escurrimiento en corrientes.

El flujo sobre el terreno, junto con el escurrimiento en corrientes, forma el Escurrimiento superficial. Una parte del agua de precipitación que se infiltra escurre cerca de la superficie del suelo y más o menos paralelamente a él. A esta parte del escurrimiento se le llama escurrimiento subsuperficial; la otra parte que se infiltra hasta niveles inferiores al freático, se denomina escurrimiento subterráneo.

De los tres tipos de escurrimiento, el superficial es el que llega más rápido hasta la salida de la cuenca. Por ello está relacionado directamente con una tormenta particular y entonces se dice que proviene de la precipitación en exceso o efectiva y que constituye el escurrimiento directo. El escurrimiento subterráneo es el que de manera más lenta llega hasta la salida de la cuenca (puede tardar años en llegar), en general, difícilmente se le puede relacionar con una tormenta particular, a menos que la cuenca sea demasiado pequeña y su suelo muy permeable. Debido a que se produce bajo el nivel freático, es el único que alimenta a las corrientes cuando no hay lluvias y por eso se dice que forma el escurrimiento base.

El escurrimiento subsuperficial puede ser casi tan rápido como el superficial o casi tan lento como el subterráneo, dependiendo de la permeabilidad de los extractos superiores del suelo; por ello es difícil distinguirlo de los otros dos. Cuando es realmente rápido se le trata junto con el escurrimiento superficial, y cuando es relativamente lento se le considera parte del subterráneo.

La clasificación anterior, no deja de ser arbitraria. El agua puede comenzar su viaje hacia la corriente como flujo superficial e infiltrarse en el camino, terminando como escurrimiento subsuperficial o subterráneo o viceversa, aflorando en una ladera. Lo importante en realidad es la rapidez con que una cuenca responde a una tormenta, pues esto es lo que determina la magnitud de las correspondientes avenidas [11].

3.3. Disponibilidad del agua en el mundo

El agua en todas sus formas o estados se denomina hidrósfera y cubre aproximadamente el 71% de la superficie terrestre. Del 100% de agua existente en el planeta aproximadamente el 97% es agua salada y un 3% agua dulce.

Revisada diferentes bibliografías se cree que existe aproximadamente 1.386.000.000 km³ de agua los cuales estarían distribuidos de la siguiente forma [12]:

Tabla N° 1: Disponibilidad de agua en el mundo.

SITUACIÓN DEL AGUA	VOLUMEN EN km ³		PORCENTAJE	
	AGUA DULCE	AGUA SALADA	AGUA DULCE	AGUA TOTAL
Océanos y mares	-	1,338,000,0000	-	96,5
Casquetes y glaciares polares	24,064,000	-	68,7	1,74
Agua subterránea salada	-	12,870,000	-	0,94
Agua subterránea dulce	10,530,000	-	30,1	0,76
Glaciares continentales	300,000	-	0,86	0,022
Lagos de agua dulce	91,000	-	0,26	0,007
Lagos de agua salada	-	85,400	-	0,006
Humedad del suelo	16,500	-	0,05	0,001
Atmósfera	12,900	-	0,04	0,001
Represas	11,470	-	0,03	0,0008
Ríos	2,120	-	0,006	0,0002
Agua biológica	1,120	-	0,003	0,0001
Total agua dulce	35,029110		100	-
Total de agua en el planeta	1,386,000,000		-	100

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Agua#Distribuci.C3.B3n_de_agua_en_la_naturaleza

De esta cantidad de agua dulce en nuestro continente se encuentra aproximadamente un 47%, los cuales se encuentran como aguas superficiales y subterráneas. [13]

[12] Quino, 2006, [13]<http://radio.rpp.com.pe/cuidaelagua/la-disponibilidad-de-agua-en-el-mundo-es-50-menor-que-hace-50-años/>.

3.4. Disponibilidad de agua en Bolivia

A diferencia de otros países Bolivia no cuenta con acceso al mar por tal motivo carece de la reserva de agua más abundante de la tierra. Bolivia cuenta con recursos hídricos renovales los cuales se encuentran como aguas superficiales y subterráneas.

3.4.1. Disponibilidad de Aguas superficiales

Los recursos hídricos superficiales de una determinada región provienen de la precipitación pluvial caída en su cuenca de alimentación y de los manantiales (descarga subterránea).

La disponibilidad de aguas superficiales según la magnitud de las cuencas receptoras se estima que de acuerdo a la distribución irregular de la precipitación fluvial en la Tabla N° 2.

Tabla N° 2: Disponibilidad de Aguas Superficiales.

Cuenca	Comprenden las sub cuencas hidrográficas	Flujo en m ³ /año
Cuenca del Amazonas	Madre de Díos	180,000,000
	Beni	
	Orthon	
	Mamoré	
	Iténez-Guaporé	
	Parapeti-Izozog	
	Abuna	
	Beni	
Cuenca de la Plata	Pilcomayo	22,000,000
	Bermejo	
	Paraguay	
Cuenca Cerrada o del Altiplano	Titicaca	1,650,000
	Desaguadero-Poopó	
	Coipasa-Uyuni	

Fuente: [Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible, Johannesburgo, 2002]

3.4.2. Disponibilidad de Aguas subterráneas

En la bibliografía consultada no se pudo hallar datos de cuantificación de los recursos hídricos subterráneos lo que se pudo encontrar son algunos estudios locales que realizó GEOBOL en 1985 donde desarrolló un mapa hidrogeológico de Bolivia en la cual define cinco provincias hidrogeológicas [14]:

1. Provincia Hidrogeológica de la cuenca endorreica del Altiplano Andino y de la Cordillera Occidental.
2. Provincia Hidrogeológica de la Cordillera Andina, Vertiente Andina.
3. Provincia Hidrogeológica de la Vertiente Amazonas.
4. Provincia Hidrogeológica de la cuenca Pantanal-Chaco Pampeano.
5. Provincia Hidrogeológica del escudo Proterozoico.

En otras regiones del país, los gobiernos locales han orientado su atención a las aguas subterráneas para satisfacer las necesidades básicas de agua, debido a la escasez de aguas superficiales como consecuencia de sequías prolongadas o debido a contaminación minera de estas.

3.5. Balance Hídrico de Bolivia

En el país, se calcularon balances hídricos para varias cuencas menores. El cálculo del balance hídrico que contempla la recarga y descarga en función de los parámetros climáticos e hidráulicos permite conocer el volumen de agua que puede ser utilizado o explotado sosteniblemente. En otros casos, permite conocer el caudal mínimo que se requiere para que lagunas o reservorios de agua para riego o agua potable no se sequen.

En la Tabla N° 3 se presenta el balance hídrico de algunas cuencas de Bolivia, realizado en 1992.

[14] AQUASTAT (FAO-AQUASTAT, 2000).

Tabla N° 3: Balance hídrico de algunas cuencas de Bolivia (PHICAB, 1992).

Cuencas hidrográficas	Estación	Área (km ²)	Precipitación (mm)	Evaporación transpiración (mm)	Escurrimiento (mm)	Infiltración (mm)
Cuenca del Amazonas						
Parapeti	Andes boliviano	7 500	920	600	320	-
Izozog	Llanura	45 000	887	875	7	57
Parapeti + Izozog	Total	52 500	892	836	7	49
Alto Beni	Confluencia río Kaka	31 240	1 385	741	644	-
Kaka	Confluencia río Alto Beni	21 040	1 586	777	809	-
Beni	Confluencia río Madre de Dios	122 380	1 805	1 092	713	-
Madre de Dios	Confluencia río Beni	125 000	2 715	1 107	1 607	-
Mamoré	Confluencia río Iténez	222 070	1 685	1 060	625	-
Iténez	Confluencia río Mamoré	303 280	1 512	1 227	285	-
Cuenca Cerrada o del Altiplano						
Lago Titicaca	Orilla del Lago	48 590	653	470	182	-
Lago Poopó	Orilla del Lago	27 740	370	438	0	-
Salar Coipasa	Orilla	30 170	298	298	0	-
Salar Uyuni	Orilla	46 625	190	190	0	-
Desaguadero	Chuquina	29 475	414	361	52	-
Altiplano total	Cerrada	191 293	421	408	83	9
Cuenca del Plata						
Pilcomayo	Misión La Paz	92 971	506	439	67	-
Bermejo	Juntas de San Antonio	16 048	1 070	714	356	-
TOTAL REGIÓN	1 366 431	1 419	958	436	19	

Fuente: PHICAB.

3.6. Uso del agua en Bolivia

Frecuentemente se hace una distinción entre los usos consuntivos y los usos no consuntivos de agua. En la Tabla N° 4, se muestran los usos más importantes en Bolivia.

Tabla N° 4: Usos del agua.

Usos consuntivos	Usos no consuntivos
Uso doméstico	Uso hidroeléctrico
Agua para riego	Uso recreativo y ecoturismo
Uso industrial	Pesca
Uso minero	Navegación
Uso petrolero	Uso medioambiental

Fuente: [Disponibilidad, Uso y Calidad de los Recursos Hídricos en Bolivia Paul Van Damme 10 de Noviembre de 2002]

Según la bibliografía, el consumo de agua en la industria minera, ubicada mayormente en el área rural, es de aproximadamente 31.5 millones de m³ de agua por año (1 m³/s). Sin embargo, es difícil determinar en forma exacta el consumo de agua por la industria minera ya que depende de muchos factores, como el proceso utilizado, maquinaria, metal extraído, etc.

3.7. Disponibilidad de agua en la región

El municipio de Ichoca cuenta con escasos recursos hídricos, como ríos, riachuelos, vertientes, lagos y lagunas, estas fuentes de agua por lo general son empleadas para consumo doméstico, riego y bebederos de ganado pero estas aguas no cuentan con un tratamiento previo para el consumo, por lo que genera consecuencias en la salud [15]. Los principales ríos del municipio de Ichoca se pueden apreciar en la Tabla N° 5.

3.8. Contaminación hídrica y fuentes de contaminación

Se entiende por contaminación del agua a la acción o al efecto de introducir materiales o inducir condiciones sobre el agua que, de modo directo o indirecto, impliquen una alteración perjudicial de su calidad en relación a sus usos posteriores o sus servicios ambientales. La contaminación de las aguas puede ser ocasionada de forma natural o a causa de actividades antrópicas de distinta naturaleza (física, química, biológica). Siendo las actividades con mayor impacto sobre el medio ambiente:

[15] Plan de Desarrollo Municipal PDM 2009 - 2013 Ichoca Quinta Sección Municipal Provincia Inquisivi.

Tabla N° 5: Ríos existentes en el municipio.

SUB CENTRAL							
ICHOCA	FRANZ TAMAYO	GENERAL CAMACHO	GUALBERTO VILLAROEL	GERMAN BUSCH	LURUTA	SAN ANTONIO DE SIRARANI	MATHA
Lakalaka	Franz Tamayo	Camacho	Jalanta	Jalsuri	Chaca Jawira	Champara	Likuarani
Chay	Corocoro	Putuni	Collpuma	Taqata	Belen	Intaya	Taja
Huntawi	Tablachaca	Pamputa	Chutuna	Lujura	Ichoca	Sayaquira	Juntawi
Ichoca	Colcapata		Iripe	Chiarpa cheta	Janko Jawira	Wilancharu	Neopan
Ryarpa	Sayaquira		Lupaca	Rio Grande	Kharwa	Sirarani	Murmuntani
	Pocor Kosha					Lojena	Rosasani
	Jamtawilla					Khala Cruz	Matha
	Qacosa					Chillihua	
	Jisqa Pallca					Khotañani	
	Pukar Qallca					Putuni	
	Qolqo phuta					Ichoca	
	Jawiruyu					Coca marqa	
	Larkani					Laram Khota	
	Pampoco					Rea Rea	
	Jhisqa Polca						
	Cocaso						
	Jawiruyu						

Fuente: [Plan de Desarrollo Municipal PDM 2009 - 2013 Ichoca Quinta Sección Municipal Provincia Inquisivi]

- Agropecuarias y forestales.
- Domésticas.
- Industriales.
- Mineras.

3.8.1. Actividades agropecuarias y forestales.

La contaminación por actividades agropecuarias y forestales se puede dividir en impactos sobre la calidad ambiental y sobre los recursos naturales.

Los impactos sobre la calidad del medio ambiente que genera la agricultura se refiere al uso incontrolado de agentes químicos que mejoran la producción eliminando plagas pero también causan efectos en la salud de los consumidores, también se puede citar los chaqueos que producen gases de efecto invernadero, degradación forestal y la deforestación. Además, el consumo de fertilizantes, es aún muy bajo en Bolivia [16].

3.8.2. Actividades domésticas

El impacto ambiental de los residuos sólidos se refleja también en la salud dependiendo del tiempo y la clase de exposición que se tiene ante éstos residuos, también es de forma visual percibiendo malos olores. Una clasificación sencilla incluye sólo dos grandes categorías: orgánicos (residuos de alimentos, heces fecales) e inorgánicos (plásticos, vidrios, metales, áridos).

En la región de estudio también se puede apreciar contaminación hídrica a causa de actividades domésticas generando residuos orgánicos, inorgánicos y microbiológicos ya que la comunidad de Sayaquira no cuenta con servicios higiénicos al estar apostada a orillas del río del mismo nombre, utiliza letrinas que arrojan las heces directamente al río, en otros sectores que están alrededor utilizan pozos ciegos. Solo en los centros de educación y salud cuentan con este servicio que en la actualidad se encuentran en pésimas condiciones.

Tabla N° 6: Cantidad de baños, cámara séptica en la sección.

DESAGUE DE BAÑO, WATER O LETRINA		
Años	1992	2001
Alcantarillado	0	2
Cámara séptica	1	16
Otro (pozo ciego)	227	788
No tiene	1238	1002

Fuente: Atlas Municipal 2005, INE 2001

[16] (Escóbar, J. y Muñoz, J. 1997; UMSA, MMM y SNMA1993).

3.8.3. Actividades industriales

Las actividades industriales en sus diferentes rubros aportan de gran manera en la contaminación ambiental y generalmente el desarrollo de la industria se encuentra en los principales centros urbanos (La Paz, Cochabamba, Santa Cruz), un ejemplo es como las industrias que están apostadas alrededor del río Choqueyapu desechan sus residuos de forma directa contaminando no solo las aguas de éste río sino también la atmósfera.

Los residuos industriales, causantes de la polución hídrica, atmosférica y la generación de residuos sólidos, junto a diversas actividades productivas, como la exploración petrolera sísmica, producen diversos impactos ambientales. Por la diversificación en los productos y el empleo de materias primas podemos dividir las actividades industriales en dos sectores muy importantes que son el sector manufacturero y el sector energético.

Los impactos, que provoca el sector energético, están relacionados directamente con la exploración, explotación y transporte de; gas y petróleo no mencionando la generación de energía eléctrica ya que esta se obtiene de forma limpia (con plantas hidroeléctricas).

El impacto ambiental de los residuos de las industrias manufactureras tiene una gran variación, de acuerdo al grupo de actividad industrial, las materias primas y los procesos utilizados. A pesar del gran número de establecimientos informales, no se dispone de información sobre el probable impacto ambiental negativo que estos tengan, vistas las prácticas productivas, el acceso limitado a tecnología y los bajos niveles de ingreso que los caracterizan.

Trabajos anteriores sobre Bolivia han considerado a las industrias metalúrgicas, minerales industriales, curtiembres y calzado, alimenticias, de la construcción, y otras en sus estudios por un doble motivo: estas industrias son las más intensivas en uso de materias primas nocivas al medio ambiente y la salud, y son las industrias sobre las que se tiene mayor información.

3.8.4. Actividades mineras

Los yacimientos explotados tradicionalmente en Bolivia son generalmente depósitos polimetálicos, que contienen relativamente elevadas cantidades de sulfuro de hierro (pirita o pirrotina). La pirita al descomponerse facilita la generación de aguas ácidas, las que lixivian los metales del mineral (plomo, cobre, arsénico, cadmio, plata, etc.). Estas aguas, de bajo pH, y enriquecidas con metales pesados, son llevadas a la superficie por bombeo o flujo natural, constituyendo los efluentes de las operaciones mineras, los que causan una amplia contaminación de suelos y aguas. Generalmente estas aguas son descargadas directamente a los ríos cercanos, sin ser tratadas convenientemente.

Las operaciones mineras en Bolivia se pueden clasificar bajo 2 categorías, la mediana y la pequeña [17]. Tradicionalmente se divide al sector minero en minería grande, mediana, pequeña y artesanal dependiendo de la cantidad de toneladas de roca que trata y/o la cantidad de ventas [18]. Sin embargo, en Bolivia se ha identificado a la minería estatal de COMIBOL como grande, a las demás operaciones privadas importantes como medianas y a las cooperativas, minería chica y minería informal como minería pequeña.

La minería mediana, durante la década de los 90, representó el 57% de la producción total de minerales de todo el país mientras que la minería chica el 43%. Los minerales de mayor explotación son: zinc, oro, plomo, plata, estaño y ulexita.

3.8.4.1. Minería Mediana

La minería mediana está actualmente constituida por 15 empresas mineras: Inti Raymi, COMSUR, COMIBOL y otras 12 empresas afiliadas a la Asociación Nacional de Mineros Medianos (ANMM). De estas 15 empresas, solamente Inti Raymi y COMSUR utilizan tecnología de punta, la que sumada al uso de instrumentos de gestión ambiental modernos (ISO 9000 e ISO 14000), hace que estas dos empresas puedan cumplir con normas ambientales incluso más estrictas a las bolivianas.

[17](MEDMIN 2000a), [18] (Mc Mahon, G. et. al. 1999).

La minería mediana ocasiona deterioros en el medio ambiente a causa de los procesos de extracción y concentración del mineral, a esto se debe añadir las colas, relaves, drenajes ácidos de mina y desmontes mineros que se encuentran en inadecuadas condiciones.

Citando ejemplos; en Oruro y Huanuni, las poblaciones cercanas a las minas son afectadas por los drenajes ácidos de mina generando así externalidades negativas sobre la salud de los habitantes de estas poblaciones que incluyen efectos de morbilidad y mortalidad prematura. Así, la esperanza de vida promedio en Huanuni de sólo 40 años, podría probar el efecto de mortalidad prematura de los contaminantes (aunque también pueden existir otras causas). Otro ejemplo está relacionado al de los ingenios mineros de la ciudad de Potosí, cuyas colas afectan, río abajo, la salud de habitantes y animales y la productividad agrícola. Finalmente, se menciona el colapso de un dique de colas de COMSUR [19], que causó un impacto ambiental 300 km río abajo del dique sobre 50 mil habitantes y varias áreas de cultivo.

Tabla N° 7: Empresas Mineras Medianas, 1994.

Empresas	Zona	Mineral
Auspac	Potosí	Oro
Avicaya Ltda.	Oruro	Estaño
Barrosquira Ltda.	La Paz	Estaño
Bernal Hnos.	Potosí	Antimonio
Cia. Min. La Barca S.A.	La Paz-Potosí	Oro-Plata
Cia. Min. Salinas (Comisal)	Potosí	Antimonio
Cia. Min. del Sur S.A.(Comsur)	Potosí	Zinc-Plata-Plomo
Cia. Min. Concepción S.A. (Comco)	Potosí	Plata
Empresa Min. Unificada S.A.	Oruro	Antimonio
Inti Raymi S.A.	Santa Cruz	Oro-Plata
		Oro-Cobre-Plata

Fuente: Asociación Nacional De Mineros Medianos

[19](Porco, agosto de 1996).

3.8.4.2. La minería pequeña.

Según la federación de cooperativas mineras (FENCOMIN), existen 139 cooperativas dedicadas a la explotación de minerales tradicionales. Estas cooperativas trabajan por lo general en los antiguos centros de explotación de COMIBOL o en yacimientos adyacentes a ellos. El mineral que producen puede ser vendido a COMIBOL, a empresas de la minería mediana o a comercializadoras nacionales. Puede ser también tratado por concentración, antes de su venta, en ingenios primitivos, donde se trata de imitar los métodos utilizados en la gran industria minera, incluyendo la utilización de reactivos químicos.

En las minas donde COMIBOL ha sido reemplazada por cooperativas, que poseen tecnologías de extracción más rudimentarias, en muchos casos se han destruido los sistemas de recirculación de aguas. Esto ha llevado a que se descarguen las aguas utilizadas en el ingenio y la mina directamente a los ríos.

Dentro de la minería pequeña encontramos a dos subgrupos: minería tradicional, que explota minerales tradicionales como zinc, plata, estaño y antimonio, y la minería aurífera que explota oro. Se puede hacer notar el distinto impacto ambiental que genera éste tipo de subgrupo por ser diferentes los procesos de extracción y concentración de mineral.

En términos ambientales, la minería pequeña tradicional boliviana (informal o cooperativa) ha sido definida como una minería sumamente sucia, apenas viable, incluso cuando los costos ambientales no están incluidos en los costos totales [20]. Aun cuando la contaminación que se genera es pequeña el número elevado de cooperativas hace que el impacto sea significativo en algunos casos incluso mayor a la generada por la minería mediana. Hay que señalar también que en promedio, la producción de las cooperativas representa aproximadamente el 30% de la producción total; en el caso de la extracción de estaño la producción de las cooperativas llega a representar hasta un 80% del total.

[20](Mc Mahon, G. et. al. 1999).

El marco en el que se desenvuelve la *minería cooperativizada*, ausencia de fuentes de financiamiento, costos de producción no competitivos, insuficientes niveles de inversión y reinversión, empobrecimiento de las leyes del mineral y tecnología de operación obsoleta, incide directamente de forma negativa en el medio ambiente.

Tabla N° 8: Grado de Mecanización en las Cooperativas Mineras.

GRADO DE MECANIZACIÓN	TRADICIONAL	AURÍFERO	TOTAL	PORCENTAJE
Mecanizado	15	59	74	14.0
Semimecanizado	68	77	145	27.5
Manual	84	23	307	58.5
Total	168	359	526	100.0

Fuente: Fencomin (1994)

Memorias Estadísticas del Sector Minero Cooperativo

UDAPE Problemática Ambiental en Bolivia Jorge Escobari La Paz, abril de 2003.

3.9. Generación de aguas ácidas, Drenajes Ácidos de Mina (DAM)

Muchos autores describen como Drenajes Ácidos de Mina (DAM) a los drenajes con un pH comprendido entre 2 y 4, y altos contenidos de metales disueltos como: hierro, zinc, cobre, cadmio, manganeso, plomo y también se incluye al metaloide arsénico.

El DAM ocurre tanto en aguas de minas subterráneas como en aguas de minería a cielo abierto. En relación a estos drenajes ácidos existen informes sobre la mortandad de peces y crustáceos de ríos, afecciones al ganado, y destrucción de cultivos y riberas; siempre asociado a una coloración ocre-amarillenta de los lechos de ríos y lagos afectados, y un incremento de la turbiedad de las aguas [21].

Nordstrom y Alpers (1999) describen el proceso de oxidación de la pirita como el principal responsable de la formación de aguas ácidas (DAM); dentro del tipo de aguas ácidas estas varían en función del tipo de mineral del que provienen, estos pueden ser minerales oxidados tales como la pirita, pero existen otros minerales formados por metales distintos al hierro que tienen porciones distintas metal/azufre, que también pueden ser oxidados, como la pirrotina (Fe_xS_x) o la calcina

[21](Nordstrom y Alpers, 1999; Morin y Hutt, 2001; Mills, 1995).

(Cu₂S), y la actuación de oxidantes distintos al O₂, lo que da lugar a productos secundarios.

La composición que presentan los sulfuros metálicos potencialmente generadores de aguas ácidas se detalla en la siguiente tabla:

Tabla Nº 9: Composición de sulfuros metálicos.

Pirita	S ₂ Fe	Galena	PbS	Molibdenita	MoS ₂
Marcasita	FeS ₂	Arsenopirita	FeAsS	Milerita	NiS
Pirrotina	Fe _x S _x	Covelita	FeS	Esfalerita	ZnS
Calcocina	Cu ₂ S	Calcopirita	CuFeS ₂		

Fuente: "Alternative options for passive treatment systems of acid coal mine drainage" EPM-IST-IMCL-LIMESA.

Cuando se trata de sulfuros complejos o coexisten sulfuros de hierro y otros metales, en general menos reactivos, la generación de aguas ácidas se inicia con la oxidación de la pirita, donde, el sulfato férrico producido actúa como un energético oxidante que ataca los sulfuros de otros metales, poniendo en disolución distintos cationes metálicos.

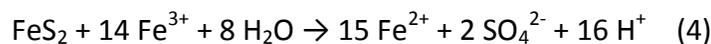
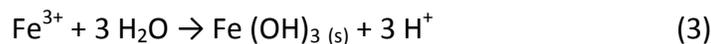
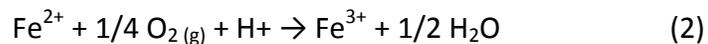
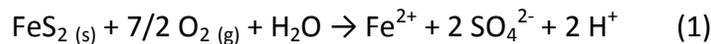
3.9.1. Oxidación de piritas

El proceso de oxidación de piritas es muy complejo ya que en éste intervienen reacciones de óxido-reducción, hidrólisis, formación de complejos iónicos, solución, precipitación, etc., mismos que como resultado generan una especie oxidada de hierro, iones sulfato y un medio ácido muy fuerte. Este proceso de oxidación se ve favorecido, en sectores mineros, por la facilidad con que el aire entra en contacto con los sulfuros a raíz de las labores mineras de extracción y el aumento considerable de la superficie de contacto ocasionado por la trituración del mineral. Se considera la siguiente reacción general:



Las reacciones que intervienen en la oxidación de la pirita pueden ser representadas por las siguientes cuatro ecuaciones [22].

[22](Skousen et al., 1998; Nordstron y Alpers, 1999; Mills, 1999; USEPA, 1996 y 2000; entre otros).



Debido a la complejidad del proceso no se conoce con certeza que reacción predomina en un pH dado, cuales son los reactivos los productos y como varían en el tiempo.

La velocidad de oxidación, de la pirita, a causa del oxígeno disuelto es función de su concentración y prácticamente independiente de la concentración de protones en el intervalo de pH 2-4. La velocidad de oxidación por el ion Fe^{+3} , a pH 1-2, es función de la concentración de protones [23].

Además los parámetros fisicoquímicos del medio de oxidación ejercen un efecto importante en estas reacciones, especialmente el potencial redox de cada uno de los pares redox implicados y el pH al que se producen las mismas. Ambos parámetros son frecuentemente utilizados para caracterizar los entornos geoquímicos, aunque en realidad son consecuencia del balance químico global de todas las sustancias presentes en el sistema y no a la inversa [24]. Asimismo pueden modificar los mecanismos de oxidación, que se concretan en dos tipos fundamentales:

- a) **Mecanismo de naturaleza inorgánica**, debido al oxígeno molecular o al ion férrico.
- b) **Mecanismo con intervención biótica** fundamentalmente bacterias oxidantes del azufre y del hierro.

Según SILVERMAN (1967) los mecanismos de oxidación se pueden concretar en dos tipos fundamentales y pueden suceder simultáneamente siendo el predominio de uno u otra función del pH y el Eh y a continuación por factores limitantes del crecimiento bacteriano (temperatura, concentración de sulfatos, etc.):

a) Mecanismo de naturaleza inorgánica.

En la reacción de oxidación de la piritita (1) se produce Fe^{2+} , SO_4^{2-} e H^+ . Esta reacción provoca un incremento en el total de sólidos disueltos y un aumento de la acidez, que irá asociado a una disminución del pH. Si el ambiente circundante es lo suficientemente oxidante, entonces muchos iones ferrosos se oxidarán a iones férricos (etapa 2). Por lo general, por encima de un pH alrededor de 3,5, el ion férrico formado precipita mediante hidrólisis como hidróxido (3), disminuyendo por tanto el Fe^{3+} en solución, mientras que el pH baja simultáneamente.

Por último, algunos cationes férricos (Fe^{3+}) que se mantienen en solución, pueden seguir oxidando adicionalmente a la piritita y formar Fe^{2+} , SO_4^{2-} y H^+ (4).

Cinéticamente, la oxidación del Fe^{2+} a Fe^{3+} es la reacción más lenta a pH ácido. A pH por encima de 4 la velocidad de la reacción aumenta drásticamente, casi todo el Fe está en forma de Fe^{3+} y precipita como hidróxido (3). A pH por debajo de 4, sin embargo, la mayoría del Fe en solución es Fe^{2+} , aunque la acción bacteriana (*Thiobacillus ferrooxidans*) consigue acelerar el proceso y que progresivamente el Fe^{2+} pase a Fe^{3+} . Parte del Fe^{3+} se emplea en oxidar más piritita (4) y parte precipita como hidroxisulfatos (schwerimannita a pH entre 3 y 3,5; y jarosita a pH inferior a 3). El pH tiene un doble efecto; por una parte la solubilidad de las fases sólidas de hierro dependen frecuentemente de este parámetro, incrementándose unas mil veces por cada unidad de descenso del mismo y, por otra, cuando es superior a 4 la concentración de Fe^{3+} en solución se vuelve excesivamente baja (inferior a 10^{-8} M si se considera el equilibrio con el $\text{Fe}(\text{OH})_3$ amorfo). En cuanto al Eh, si se tiene en cuenta el siguiente mecanismo de oxidación de Fe^{2+} a Fe^{3+} :



Los drenajes de aguas ácidas de mina (DAM) generados a partir de la oxidación de sulfuros metálicos y los metales asociados a ellas contienen considerables cantidades

de pirita arsenical (FeS_2) (con un 0.4% de As reemplazando al S en la estructura) y minerales accesorios como la arsenopirita (FeAsS). Aunque la disolución de estos sulfuros ricos en arsénico libera elevadas concentraciones de este elemento a los drenajes ácidos, la precipitación de minerales secundarios de Fe (III), como schwertmannita ($\text{Fe}_8\text{O}_8(\text{OH})_{4.38}(\text{SO}_4^{2-})_{1.81}$), jarosita ($\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$) y goethita (FeOOH) produce un proceso espontáneo de atenuación natural [25].

b) Oxidación bacteriana

Puede ser el mecanismo de oxidación más importante en todo el rango de pH de las aguas naturales. Las principales poblaciones microbianas son bacterias quimiolitotróficas acidófilas del G. *Thiobacillus*, aunque pueden contribuir también otros grupos (*Metallogenium*, *Sulfolobus*...) [26].

Según Walsh y Mitchell (1972) el miembro terminal de las sucesiones pH-dependientes de las bacterias oxidantes, tanto del S como del Fe, es el *Thiobacillus ferrooxidans*, que parece controlar los procesos de oxidación en medios ácidos y oxidantes. Esta bacteria precisa un medio acuoso (aunque toma oxígeno y anhídrido carbónico del aire), una fuente de amonio, pequeñas cantidades de fosfato, calcio y magnesio, generalmente ya presentes en el agua [27] y altas concentraciones de iones sulfato [28] necesarios para la oxidación del Fe (II).

El *T.Ferrooxidans* puede tomar parte en la oxidación de la pirita de dos modos:

- Según un mecanismo de “contacto indirecto”, como catalizador de la oxidación del hierro ferroso a férrico en medios ácidos [29] (mecanismo inorgánico mediado bacterianamente).
- Según un mecanismo de “contacto directo”, actuando sobre la superficie de la pirita y oxidando enzimáticamente al hierro y al sulfuro [30].

La geoquímica de las aguas ácidas de mina es un fenómeno complejo por haber diversos procesos físicos, químicos y biológicos jugando un papel importante en la producción, liberación, movilidad y atenuación de los contaminantes.

[25] (Bigham et al., 1994; Fukushi et al., 2003; Acero et al., 2006), [26] (Ralph, 1979), [27] (Bruynesteyn y Hackl, 1984), [28] (Lazaroff, 1963; Tuovinen et Al., 1971 y 1975), [29] (Margalith et Al., 1966), [30] (Bryner y Jameson, 1958; Duncan et Al., 1967; Beck y Brown, 1968; Torma, 1971; Duncan y Walden, 1972).

En el trabajo de Nordstrom y Alpers (1999) se presenta una relación exhaustiva de procesos específicos que se han estudiado, y se ha comprobado que contribuyen en su conjunto en la geoquímica de las aguas ácidas de mina.

Estos procesos son los siguientes:

- La oxidación de la pirita.
- La oxidación de otros sulfuros.
- La oxidación e hidrólisis del hierro disuelto y otros metales.
- La capacidad neutralizadora de la ganga mineral y roca encajante.
- La capacidad neutralizadora de las aguas bicarbonatadas.
- La disponibilidad de oxígeno.
- La disponibilidad de agua líquida o en forma de vapor.
- La localización y forma de zonas permeables en relación con las vías de flujo.
- Las variaciones climáticas (diarias, estacionales o episodios de tormentas).
- La formación de eflorescencias y su redisolución.
- El calentamiento por conducción y radiación del calor generado en diversas reacciones exotérmicas (oxidación de la pirita, disolución de sales solubles y la dilución de un ácido concentrado).
- La temperatura.
- La acción de catálisis de las bacterias.
- La adsorción microbiana de metales.
- La precipitación y disolución de minerales durante el transporte.
- Adsorción y desorción de metales durante el transporte.
- Fotoreducción del hierro.
- La formación de complejos orgánicos.
- Los procesos microambientales sobre superficies o entorno a organismos.

Tabla N° 10: Minerales sulfurosos y sus productos de oxidación.

Mineral	Composición	Productos finales en fase acuosa	Minerales secundarios
Pirita	FeS ₂	Fe ⁺³ , SO ₄ ⁻² , H ⁺	Hidróxidos férricos y sulfatos.
Marcasita	FeS ₂	Fe ⁺³ , SO ₄ ⁻² , H ⁺	Hidróxidos férricos y sulfatos.
Blenda	ZnS	Zn ⁺² , S ⁼	Sulfuro de Zinc
Pirrotina	Fe _{1-x} S ₂	Fe ⁺³ , SO ₄ ⁻² , H ⁺	Hidróxidos férricos y sulfatos.
Calcopirita	CuFeS ₂	Cu ⁺² , Fe ⁺³ , SO ₄ ⁻² , H ⁺	Hidróxidos férricos, sulfatos e hidróxidos de cobre.
Arsenopirita.	FeAsS	Fe ⁺³ , AsO ₄ ⁻³ , SO ₄ ⁻² , H ⁺	Hidróxidos férricos, sulfatos, arseniados de calcio y hierro.
Rejaljar.	AsS	AsO ₄ ⁻³ , SO ₄ ⁻² , H ⁺	Arсениados de calcio y hierro.
Galena.	PbS	Pb ⁺² , SO ₄ ⁻² , H ⁺	Hidróxidos de plomo, carbonatos y sulfatos.
Oropimente.	As ₂ S ₃	AsO ₄ ⁻³ , SO ₄ ⁻² , H ⁺	Arсениado de calcio y hierro.
Cinabrio.	HgS	Hg ⁺² , SO ₄ ⁻² , H ⁺	Hidróxido de mercurio.

Fuente: Tratamientos de aguas ácidas de mina por humedales artificiales UTO.

3.10. Tipos de tratamientos aplicados a drenajes ácidos de mina (DAM)

Los tratamientos que se pueden realizar para los DAM se pueden dividir en dos grandes tipos:

- Activos
- Pasivos

Los tratamientos activos se pueden dividir en: ósmosis inversa, electrodiálisis, ultrafiltración, precipitación de metales e intercambio iónico. Estos métodos de tratamiento de aguas ácidas tienen un coste elevado y no son objeto de nuestro estudio. Los métodos de tratamiento pasivo se basan en los mismos procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en los humedales naturales (wetlands), donde se modifican favorablemente ciertas características de las aguas contaminadas, consiguiendo la eliminación de metales y la neutralización del pH.

Entre los métodos pasivos que más se han utilizado destacan los humedales aerobios, los humedales anaerobios o balsas orgánicas, los drenajes anóxicos calizos (ALD, Anoxic Limestone Drains), los sistemas sucesivos de producción de alcalinidad (SAPS, Successive Alkalinity Producing Systems) y las barreras reactivas permeables cuando son aguas subterráneas (PRB, Permeable Reactive Barriers). En la práctica estos métodos se emplean solos o combinados, dependiendo del tipo de drenaje ácido y de los requerimientos de tratamiento.

En Estados Unidos desde hace más de 15 años muchos investigadores y organismos oficiales vienen desarrollando con buenos resultados el empleo de sistemas de tratamiento pasivo para drenajes ácidos de mina. Entre 1984 y 1993 el U.S. Bureau of Mines estudió 13 humedales destinados al tratamiento de drenajes ácidos de minas de carbón, alcanzándose eliminaciones superiores al 85 % de los metales. En 1985 junto con la Tennessee Valley Authority construyeron 14 humedales para tratar drenajes ácidos procedentes de plantas mineras de carbón, consiguiendo incrementar el pH de 3,1 a 6,7 y una reducción para el Fe de 69 a 0,9 mg/l y para Mn de 9,3 a 1,8 mg/l [31]. De igual forma entre 1987 y 1990 la USEPA encargó a la Colorado School of Mines realizar unos estudios teóricos para el diseño de humedales dedicados a la eliminación de metales de aguas ácidas de mina. Una vez concluido este proyecto se publica un manual: *Handbook for Constructed Wetlands Receiving Acid Mine Drainage*[32], en el que se describen numerosos casos de laboratorio y de campo, la filosofía de funcionamientos alcanzados en el tratamiento de aguas ácidas con elevados contenidos metálicos, así como los costes de construcción y operación de estos sistemas.

El nivel alcanzado con este tipo de tratamientos es tal que en la guía *Best Management Practices* elaborada por el Departamento del Agua de la USEPA, en la que se hace un inventario exhaustivo de áreas afectadas por drenajes ácidos de minas de carbón y que requieren su remediación, se recomienda el uso de tecnologías de tratamientos pasivos (humedales, RAPS, ALD y otros) por su reducido coste y gran

[31] (USEPA, 1996), [32] (Wildeman et al., 1993).

eficacia, y llegan a proponer la incorporación de estos sistemas en los planes de restauración y clausura de las minas en operación [33].

3.10.1. Humedales aerobios

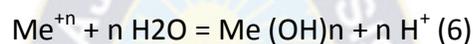
En los humedales aerobios artificiales se pretende reproducir los fenómenos y procesos de los humedales naturales (pantanos, marismas, turberas, etc.), creando un ambiente propicio para el desarrollo de ciertas plantas (Típha, Equisetum, carrizo, juncos, etc.), comunidades de organismos (algas, protozoos y bacterias) y musgos (Sphagnum), los cuales participan en la depuración del agua [34].

Estos humedales ocupan una gran superficie y tienen una somera lámina de agua que inunda el substrato sobre el que se desarrolla la vegetación. El lento fluir del agua en el humedal permite alcanzar el tiempo de retención necesario para que tengan lugar los lentos procesos depuradores del agua.

Los sistemas aeróbicos favorecen el contacto entre el agua contaminada y el aire atmosférico mediante el empleo de plantas acuáticas, al liberar éstas oxígeno por sus raíces y rizomas; para que la vegetación emergente actúe de este modo el espesor de la lámina de agua no debe superar los 30 cm [35]. El substrato oxigenado del humedal propicia la formación de un hábitat para que se desarrollen ciertas colonias de bacterias que actúan como catalizadoras en la reacción de oxidación de los contaminantes presentes en el humedal, transformando en el caso del hierro el Fe^{2+} a Fe^{3+} , el cual finalmente precipita en forma de hidróxido.

Un sistema aerobio suele consistir en una o varias celdas conectadas por las que circula el agua lentamente por gravedad, estableciéndose un flujo horizontal superficial. Para favorecer la oxigenación del agua y mejorar la eficiencia en el tratamiento se diseñan sistemas que incluyan cascadas, lechos serpenteantes y balsas de grandes superficies con poca profundidad.

Entre los numerosos procesos que se dan en un humedal aerobio se tienen la filtración de la materia en suspensión, la adsorción de metales e intercambio iónico en los materiales del sustrato, la bioacumulación de metales en las raíces y partes emergentes de las plantas, además de la precipitación de óxidos e hidróxidos metálicos a través de reacciones de oxidación e hidrólisis [36]. La generación de iones H^+ en la hidrólisis de los metales (6) explica la necesaria alcalinidad neta que han de presentar las aguas a tratar si se quiere evitar un descenso del pH y la consiguiente movilización de los hidróxidos ya formados.



El pH y la alcalinidad neta del agua son muy importantes debido a que ambos influyen en la solubilidad de los hidróxidos y en la cinética de las reacciones de oxidación e hidrólisis de los metales.

La eficacia de la oxidación inorgánica decrece unas cien veces al disminuir el pH en una unidad; sin embargo, la oxidación microbiana contrarresta esta tendencia. A $pH > 6$ la oxidación abiótica del Fe predomina sobre la oxidación bacteriana, invirtiéndose la reacción a un $pH < 5$. La actividad catalizadora de la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* depende del pH siendo máxima a un pH 2-3 [37]; a pH superior a 5 existen otras bacterias capaces de oxidar al Fe^{2+} . Para la oxidación abiótica del Mn se requiere un $pH > 8$ y si esta reacción es catalizada por microorganismos se puede efectuar hasta a un pH de 6 [38].

No obstante, si el pH del afluente es inferior a 3, el humedal como sistema de tratamiento podría dejar de funcionar [39].

En gran medida la eficacia para retener metales está relacionada con la facilidad con la que éstos se oxidan e hidrolizan; esto explica la mayor retención de Fe que de Mn en estos sistemas. La oxidación del Mn tiene lugar más lentamente que la del Fe y además es sensible a la presencia de Fe^{2+} , el cual puede impedir o invertir la oxidación del Mn.

[36] (Eger, 1994), [37] (Kleinmann et al. 1981), [38] (Wildeman et al. 1991), [39] (USDI, 1990).

Es por ello que en estos sistemas el Fe y Mn precipitan secuencialmente, primero el Fe y luego el Mn, por lo que en la práctica si llega a precipitar el Mn lo hace en la parte final del humedal, una vez que todo el Fe esté precipitado [35].

En estos humedales la capa inferior del substrato puede estar bajo condiciones anaerobias, especialmente si su contenido en materia orgánica es alto o si presenta un gran espesor. Sería en esta capa donde tiene lugar la reacción de reducción del sulfato interviniendo las bacterias sulforeductoras. Sin embargo, el acceso de los iones a esta zona se ve dificultado al efectuarse básicamente por difusión, al ser el flujo principal en este tipo de humedales horizontal y superficial. Esta reacción, como se verá más adelante, es la que se intenta potenciar en los humedales anaerobios o balsas orgánicas. La disminución de sulfato en este tipo de humedales puede estar relacionada por su coprecipitación con los oxihidróxidos de Fe, como ponen de manifiesto Hedin y Nairn (1993), determinando una relación SO_4/Fe de 0,11 en los oxihidróxidos precipitados en humedales que tratan aguas de minas de carbón. A su vez esto concuerda con las observaciones efectuadas en drenajes ácidos de mina por Bigham et al. (1990), detectando que lo que en la literatura técnica se viene considerando como “hidróxido amorfo de hierro” es un oxihidróxido rico en sulfato.

Los humedales aerobios se emplean para el tratamiento de aguas que presenten una alcalinidad neta que sea capaz de neutralizar la acidez generada en la hidrólisis de los metales.

En el diseño se tienen en cuenta el espesor de la lámina de agua, el tiempo de retención en el sistema, la composición del substrato y el área superficial o superficie de oxidación del humedal; también se consideran los aportes de agua al sistema (precipitaciones, escorrentías, etc.) y las descargas (infiltración, evapotranspiración, etc.). Además, el tipo de plantas se selecciona en función de las concentraciones y variedad de metales presentes en el efluente.

En algunos casos la mayor limitación de estos humedales es el requerimiento de grandes superficies de terreno, para lograr el mayor tiempo de retención del agua en el

[35] (Skousen et al., 1998).

sistema y permitir la adsorción y el intercambio iónico, así como la oxidación y precipitación de los metales.

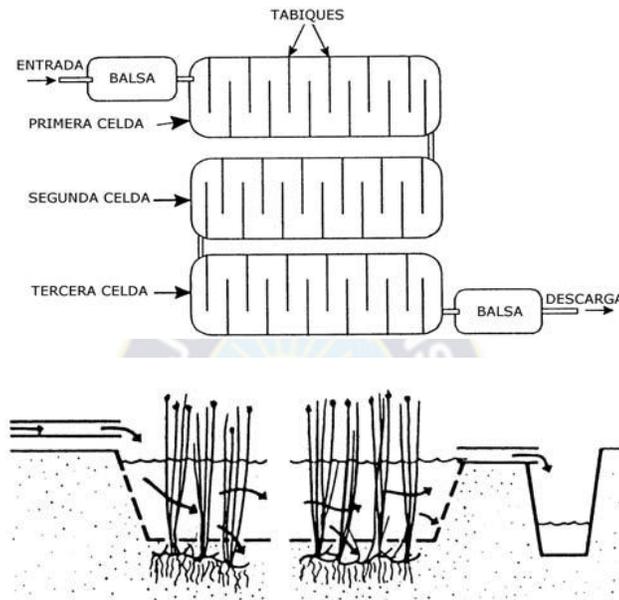
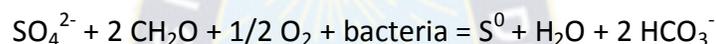
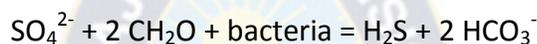


Figura 6: Disposición de las celdas en un humedal aerobio y circulación del agua en su interior (Brix, 1993 y USEPA, 2000).

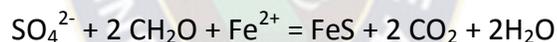
3.10.2. Humedales anaerobios o balsas orgánicas

En los humedales anaerobios, para favorecer las condiciones anóxicas que se requieren para su correcto funcionamiento, la altura de la lámina de agua ha de superar los 30 cm. Esta lámina cubre un substrato permeable de un espesor de 30-60 cm formado mayoritariamente por material orgánico (70-90 % de estiércol, compost, turba, heno, serrín, etc.), que está entremezclado o bien dispuesto sobre una capa de caliza. La finalidad del substrato orgánico es eliminar el oxígeno disuelto, reducir el Fe^{3+} a Fe^{2+} , y generar alcalinidad mediante procesos químicos o con intervención de microorganismos. Sobre el conjunto de este substrato se desarrolla la vegetación emergente característica de los humedales, la cual ayuda a estabilizar el substrato además de aportar materia orgánica adicional.

Estos sistemas operan en permanente inundación, fluyendo parte del agua horizontalmente a través del substrato orgánico. En éste, se desarrollan bacterias anaerobias sulfo-reductoras (Desulfovibrio y Desulfomaculum) capaces de utilizar su reacción con la materia orgánica del substrato (CH₂O) y el sulfato disuelto en el agua intersticial como fuente de energía para su metabolismo. Esta reducción bacteriana del sulfato genera ácido sulfhídrico, o azufre elemental, y alcalinidad mediante las siguientes reacciones (donde CH₂O es la representación genérica de la materia orgánica) [40].



En el proceso de reducción bacteriano del sulfato en ambiente anóxico también se reduce la acidez mineral potencial debido al hierro y otros metales al precipitar como sulfuros:

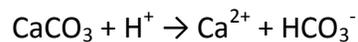


La cinética de la reducción del sulfato se ha comprobado que está fuertemente ligada a la temperatura, disminuyendo en los meses más fríos, lo que provoca un menor rendimiento del sistema en período invernal [41].

La actividad de las bacterias sulfato-reductoras está en relación con el pH del medio, es máxima a pH entre 6 y 9, inhibiéndose a un pH inferior a 5, y pueden llegar a desaparecer si entra en el sistema un caudal muy ácido. No obstante se tiene constancia de su acción sulforeductora en ambientes más ácidos [42], debido a su capacidad de controlar el microambiente que les rodea. Watzlaf (1997b) en ensayos de laboratorio con columnas ha observado una disminución de la alcalinidad debida a la reducción del sulfato cuando el pH en el substrato orgánico es menor de 4, atribuyéndolo tanto a una menor actividad de las bacterias sulfo-reductoras como de las bacterias que degradan la materia orgánica, como paso previo del proceso.

[40] (Skousen et al., 1998; Hedin, 1997; Walton-Day, 1999), [41] (Wieder, 1993; Gammons et al., 2000), [42] (Gyure et al., 1990; Fortin y Beveridge, 1997).

Otra fuente de alcalinidad, también generada en el substrato, es la disolución de la caliza al reaccionar con la acidez del efluente:



En la parte más superficial de la lámina de agua el ambiente es oxidante siendo mayoritarias las formas oxidadas del Fe y Mn, facilitando su precipitación como hidróxidos mientras haya suficiente alcalinidad (OH^- disponible). Esta disponibilidad de grupos hidróxilos, o lo que es lo mismo la necesidad de un pH lo suficientemente alto para la precipitación de éstos y otros hidróxidos metálicos, la proporcionan los procesos que tienen lugar en el substrato orgánico.

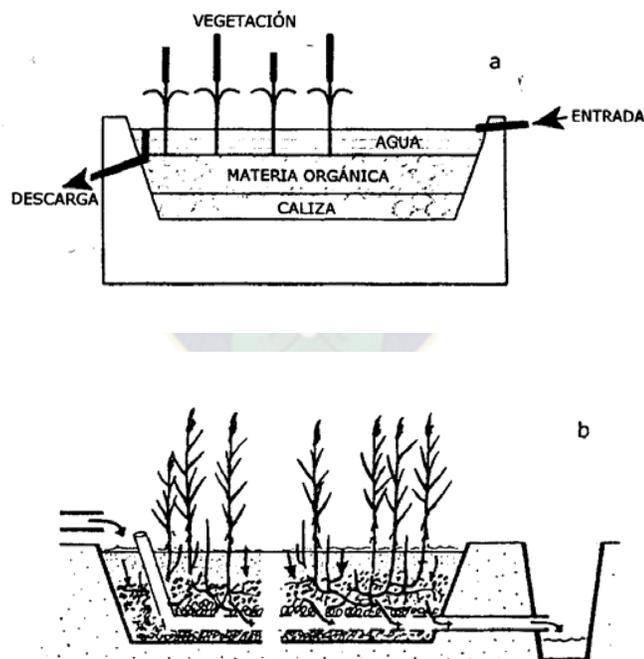


Figura 7: Humedal anaerobio de flujo horizontal (a) y vertical (b)
(Brix, 1993 y USEPA, 2000).

El ambiente reductor que impera en el substrato mantiene el hierro en su estado reducido (Fe^{2+}), impidiendo de este modo la formación de hidróxido férrico, muy insoluble al pH neutro alcanzado, evitando la pérdida del rendimiento de la caliza, como fuente generadora de alcalinidad, al no verse recubierta por este precipitado. El Fe^{2+} y otros cationes metálicos pueden ser inmovilizados como sulfuros en el ambiente reductor del substrato orgánico.

Los humedales anaerobios al generar alcalinidad admiten drenajes de mina con un $\text{pH} < 4$, y el ambiente reductor que impera en el substrato hace admisibles influentes con oxígeno disuelto ($> 5 \text{ mg/l}$), Fe^{3+} y Al^{3+} [43].

Dependiendo de la forma de circulación del agua en el humedal se clasifican como de flujo horizontal o superficial y de flujo vertical o subsuperficial. En estos últimos se asegura una mayor reactividad del influente con el substrato (Figura 7).

3.10.3. Drenaje anóxico calizo (ALD)

Este sistema consiste en una zanja rellena con gravas de caliza u otro material calcáreo sellada a techo por una capa de tierra arcillosa y una geomembrana impermeable. La zanja se instala a cierta profundidad (1 ó 2 m) para mantener unas condiciones anóxicas. El drenaje ácido de mina se hace circular por el interior de la zanja provocando la disolución de la caliza lo que genera alcalinidad ($\text{HCO}_3^- + \text{OH}^-$) y eleva el pH del agua.

Los factores que afectan a la disolución de la caliza en un agua natural son el pH y la presión parcial de dióxido de carbono (pCO_2). Ambos están intercorrelacionados, el aumento de la pCO_2 provoca el descenso del pH. La disolución de la calcita es mayor a pH ácidos y a altas pCO_2 [44]. Hedin y Watzlaf (1994b) determinan mediante cálculo la existencia de altas presiones parciales de CO_2 en el interior de 21 dispositivos ALD, situándose entre 0,022 y 0,268 atmósferas, superior al valor medio de la pCO_2 en la atmósfera (0,0035 atm). El CO_2 proviene de la disolución de la caliza, y el incremento de la pCO_2 se debe al parcial encapsulamiento del sistema. El pH ácido que presenta el

[43] (Hedin y Nairn, 1993; Skousen et al., 1994), [44] (Evangelou, 1998).

drenaje de mina junto a estas elevadas presiones parciales de CO_2 favorece la disolución de la caliza, aportando una alcalinidad al sistema por encima de lo previsible si funcionara en condiciones totalmente abiertas.

Debido a las condiciones anóxicas del sistema se evita la precipitación de óxidos e hidróxidos, y de este modo el recubrimiento de la grava caliza, manteniéndose su eficacia como fuente generadora de alcalinidad. La única finalidad de un ALD es convertir aguas con acidez neta en aguas con un exceso de alcalinidad. Por lo general el agua ácida tratada en un ALD pasa a continuación a una balsa de precipitación u otro sistema aerobio (Figura 8), lo que favorece la oxidación, hidrólisis, y precipitación de los oxihidróxidos metálicos [45]. La alcalinidad adquirida en el ALD debe ser suficiente para contrarrestar la acidificación asociada a la hidrólisis en esta etapa del tratamiento.

Los sistemas ALD son apropiados para tratar drenajes ácidos de mina con escaso oxígeno disuelto ($\text{DO} < 2 \text{ mg/l}$) y contenidos de Fe^{3+} y Al^{3+} inferiores a 1 mg/l [46]. Esas concentraciones límites para el oxígeno y el Fe^{3+} sólo se encuentran en aguas provenientes de minería subterránea antes de que circulen por superficie. La existencia de Fe^{3+} y Al^{3+} por encima de estos límites puede inutilizar el sistema por el recubrimiento de la grava caliza y por la disminución de la porosidad del sistema, a causa de sus precipitados.

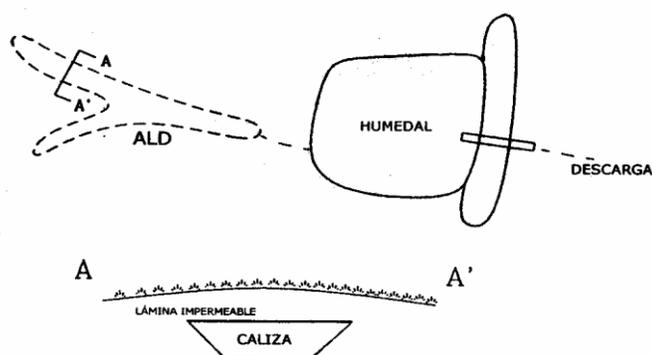


Figura 8: Tratamiento combinado compuesto por sistema ALD y humedal (Brodie et al. 1993).

[45] (Brodie et al., 1993; Watzlaf e Hyman, 1995; Fripp et al., 2000), [46] (Hedin, 1997; Skousen et al., 1994).

Un ALD correctamente diseñado y construido debería ser capaz de aportar un mínimo de 150 mg/l de alcalinidad, siendo frecuentes los aportes entre ese valor mínimo y los 350 mg/l. Este rendimiento se obtiene con tiempos de retención a partir de 10-15 horas [47]. La limitada solubilidad de la caliza condiciona el uso de este tipo de tratamientos a aguas con una acidez neta inferior a 350 mg/l.

Existen numerosas experiencias de campo sobre la aplicación de los sistemas ALD en el tratamiento de drenajes ácidos de mina. Brodie et al. (1993) estudian varios casos de tratamiento con sistemas ALD como etapa previa a un sistema de tratamiento formado por 4 humedales sucesivos; en este sistema combinado (ALD-humedales) tratan un caudal de 130 l/min proveniente de una escombrera de carbón. Con la instalación del ALD consiguen mejorar la calidad del efluente, incrementan el pH de 3,1 a 6,3, la alcalinidad pasa de 0 a 100 mg/l, reducen la acidez de 350 a 40 mg/l, y disminuyen los contenidos de Fe de 6 a 1 mg/l y los de Mn de 1,6 a 0,2 mg/l, poniendo de manifiesto que estos sistemas incrementan la alcalinidad de los drenajes ácidos y evitan que el pH disminuya en los humedales debido a la hidrólisis del Fe. En el segundo año observan que las concentraciones de Fe y Mn a la salida del ALD disminuyen drásticamente, comprobando mediante excavaciones *in situ* que este fenómeno se debe a la oxidación y precipitación de estos elementos dentro del lecho anóxico.

Atribuyen el fenómeno al hecho de haber trabajado el sistema en condiciones de no saturación de agua, como se pone de manifiesto por el incremento, de nuevo, de los valores de Fe y Mn a la salida del ALD cuando construyen un dique en su salida para hacerlo trabajar en permanente inundación. Hedin et al. (1994a) estudian la eficacia de dos ALD en el tratamiento de efluentes de minería de carbón en los Apalaches (E de EEUU). Estas aguas presentan un pH ligeramente ácido (4,6-5,6) con contenidos de Fe^{2+} (216-279 mg/l) y Mn (41-51 mg/l). En el ALD instalado en Howe Bridge, con un tiempo de tratamiento de 23 horas, se logra incrementar la alcalinidad en 128 mg/l de promedio (CaCO_3 equivalente), el Ca en 52 mg/l, y el pH en 1,2 unidades, mientras que

[47] (Watzlaf e Hyman, 1995).

los contenidos de Fe, K, Mg, Mn, Na y SO_4^{2-} , iones no involucrados en el proceso de la disolución de la calcita, se mantienen casi sin variaciones. En el ALD construido en Morrison, para un tiempo medio de retención de 51 horas, la alcalinidad se incrementa en 248 mg/l y el Ca en 111 mg/l. En este caso observan disminuciones de K, Mg, y SO_4^{2-} , que atribuyen a diluciones dentro del ALD con aguas no contaminadas, al ser estos elementos conservativos en el ambiente interno del ALD. Sin embargo, la disminución del Fe alcanza el 30 %, superior al 17 % que muestran los otros iones, señalando que además de la dilución, el hierro está afectado por algún proceso de retención dentro del sistema. A pesar de la precipitación de algún mineral de Fe dentro del sistema, probablemente siderita al ser muy bajo el oxígeno disuelto (< 1 mg/l) como para formar oxihidróxidos, no afectó al rendimiento del ALD.

3.10.4. Sistemas de producción sucesiva de alcalinidad (SAPS)

Este sistema de tratamiento de aguas ácidas de mina fue desarrollado por Kepler y McCleary (1994) para solucionar el problema de la gran superficie que requieren los humedales anaerobios y la precipitación de los hidróxidos de Fe y Al en los sistemas ALD. Un SAPS (o humedal anaerobio de flujo vertical) se puede considerar como un sistema de tratamiento en el que se integra una balsa orgánica y un ALD. En un SAPS se buscan los objetivos de una balsa orgánica (reducción del sulfato y retención metálica) y un ALD (incrementar la alcalinidad).

Un SAPS consiste en un estanque en cuyo interior se depositan dos substratos, uno de material alcalino y otro de compuestos orgánicos, que están sumergidos en el influente a una profundidad entre 1 y 3 m, y que es drenado por la parte inferior mediante un conjunto de tubos (Fig. 9). El substrato inferior es de caliza (0,5 a 1 m de espesor) y sirve para neutralizar el pH del influente. La capa superior es de material orgánico (0,1 a 0,5 m de espesor) y en ella se elimina el oxígeno disuelto del agua, se reduce el sulfato y se transforma el Fe^{3+} en Fe^{2+} , evitándose la precipitación del hidróxido de Fe^{3+} sobre la capa de caliza [48].

[48] (Skousen et al., 1998; USEPA, 2000).

Los SAPS se han diseñado para tratar aguas netamente ácidas con concentraciones de Fe^{3+} y Al superiores a 1 mg/l. Si el agua contiene mucho Al (algunas decenas de mg/l) el precipitado formado en la capa caliza o tuberías de drenaje puede alterar el rendimiento del sistema. Para optimizar la reducción del sulfato y el incremento del pH en el sistema, el agua que entra por la parte superior se embalsa para conseguir condiciones de anoxia en las capas inferiores, y se fuerza a un flujo vertical a través de las capas de materia orgánica y caliza, para finalmente drenarla desde la base y conducirla generalmente a una balsa de precipitados. Para el dimensionamiento de un SAPS se han sugerido dos criterios diferentes: uno está basado en la acidez que es capaz de eliminar por metro cuadrado y día (30-50 g de CaCO_3 por metro cuadrado y día).

En relación al primer criterio, en SAPS con seguimiento durante varios años por Watzlaf e Hyman (1995) se ha alcanzado una reducción de la acidez equivalente

Atendiendo al segundo criterio Kepler y McCleary (1994) señalan que el grosor de la capa de caliza estará en función del tiempo de retención necesario para alcanzar la máxima alcalinidad. Se recomiendan tiempos de retención para los SAPS similares a los de los sistemas ALD. El tiempo de permanencia debe ser como mínimo de unas 12 a 15 horas y el tamaño aproximado de los trozos de caliza de 6 a 15 cm [49].

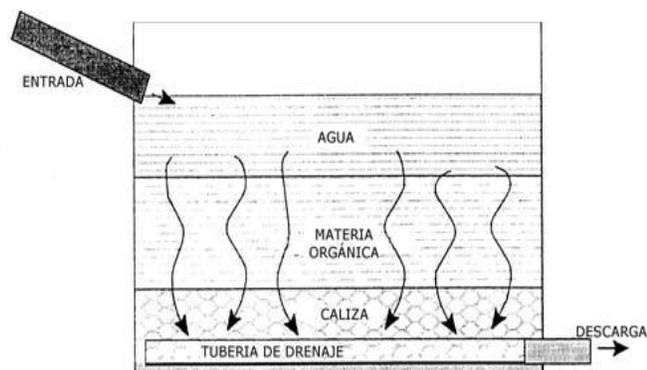


Figura 9: Disposición de los substratos y dirección del flujo de agua en un SAPS (USEPA, 2000)

[49] (Watzlaf e Hyman, 1995; Skousen et al., 1998).

Por lo general, el tratamiento de aguas ácidas en un SAPS va combinado con una balsa de oxidación/ decantación o un humedal aerobio [47].

3.10.5. Barreras reactivas permeables (PRB)

Como cualquier otro tratamiento pasivo su objetivo es reducir la cantidad de solutos disueltos (sulfatos y metales principalmente) e incrementar el pH. Su construcción consiste en hacer una zanja transversal al flujo, la cual se rellena con diversos tipos de materiales reactivos podría considerar que una barrera permeable reactiva (PRB, Permeable Reactive Barrier) es un RAPS en una disposición subterránea y vertical. Así, los procesos depuradores en el interior de la barrera son la reducción bacteriana de los sulfatos, la retención de los metales precipitando como sulfuros, y el incremento del pH principalmente por disolución de la caliza.

Este tipo de tratamiento pasivo de aguas ácidas de mina es sin duda el menos experimentado, no habiendo muchos casos desarrollados a escala de campo. Se exponen a continuación algunos ejemplos.

Como caso de especial interés se tiene la barrera piloto construida (octubre de 2000) para tratar las aguas ácidas del acuífero aluvial del río Agrio, en las inmediaciones de la mina de Aznalcóllar (Sevilla). El agua a tratar puede definirse como sulfatada cálcica con un pH muy bajo (3,8-4,6) y altas concentraciones de Zn (15-65 mg/l). Después de un estudio hidrogeológico del medio y de diversos ensayos en laboratorio para elegir los materiales de relleno, se ha diseñado una barrera de 120 m de longitud y no más de 7 m de profundidad, que está compuesta por 3 módulos de 30 m de longitud por 1,4 m de ancho separados por tramos inertes de baja permeabilidad de 10 m. El relleno de cada módulo es el siguiente: módulo margen derecho (50 % caliza y 50 % compost vegetal), módulo central (46 % caliza, 46 % compost vegetal y lodos, 8 % hierro) y, módulo margen izquierda (66 % caliza, 34 % compost vegetal y lodos)[50] [51].

Los resultados preliminares son aceptables en los módulos central e izquierdo, ya que en los tres primeros meses aguas abajo de la barrera se obtuvieron valores de pH entorno a 6 y concentraciones de Zn inferiores a 5 mg/l, situación que cambió con un período de intensas lluvias en invierno, reduciéndose el pH e incrementándose de nuevo el Zn.

3.11. Selección del tipo de tratamiento en función de las características del agua

A partir principalmente de las propuestas de Skousen et al. (1994 y 1998), Watzlaf e Hyman (1995) y Hedin (1997), se ha elaborado un diagrama de flujo (Figura 10) que permite seleccionar el tipo y/o la secuencia de tratamientos pasivos más adecuados en función de las características químicas del drenaje de mina a tratar.

En la práctica existe cierto solapamiento de los rangos de aplicación de cada tratamiento pasivo y generalmente se requiere el empleo combinado de dos o más métodos para tratar un determinado tipo de aguas.

En general los humedales aerobios pueden tratar aguas con alcalinidad neta, los drenajes anóxicos calizos tratan aguas con bajo contenido en Al, Fe³⁺ y oxígeno disuelto, y los humedales anaerobios (balsas orgánicas) y SAPS pueden tratar aguas con acidez neta y elevadas concentraciones de Al, Fe³⁺ y oxígeno disuelto.

Los drenajes de mina tipificados como netamente alcalinos se tratan directamente en un humedal aerobio al no ser necesario incrementar su alcalinidad.

Las aguas netamente ácidas con oxígeno disuelto alto (>5 mg/l) y contenido en Fe³⁺ y Al superiores a 1 mg/l se tratan directamente en una balsa orgánica o en un SAPS seguido de un humedal aerobio.

Las aguas netamente ácidas con oxígeno disuelto por debajo de 2 mg/l, bajos contenidos de Fe³⁺ y Al (<1 mg/l) y con cantidades de Fe³⁺ inferiores al 10% del hierro total, se tratan en primer lugar en un drenaje anóxico calizo (ALD), seguido a continuación, en función de su acidez, con un humedal aerobio si ésta es baja (<300 mg/l), o con una balsa orgánica si su acidez supera los 300 mg/l.

Cuando el contenido de oxígeno en el agua es bajo (2-5 mg/l), la concentración de Fe^{3+} es un 10-25% sobre el total, la acidez neta para Fe^{3+} y Mn es mayor a 150 mg/l, y un test con caliza predice agua netamente ácida el drenaje puede ser tratado con un SAPS y un humedal aerobio. Si el test con caliza predice agua netamente alcalina se tratarían las aguas como en el párrafo anterior.

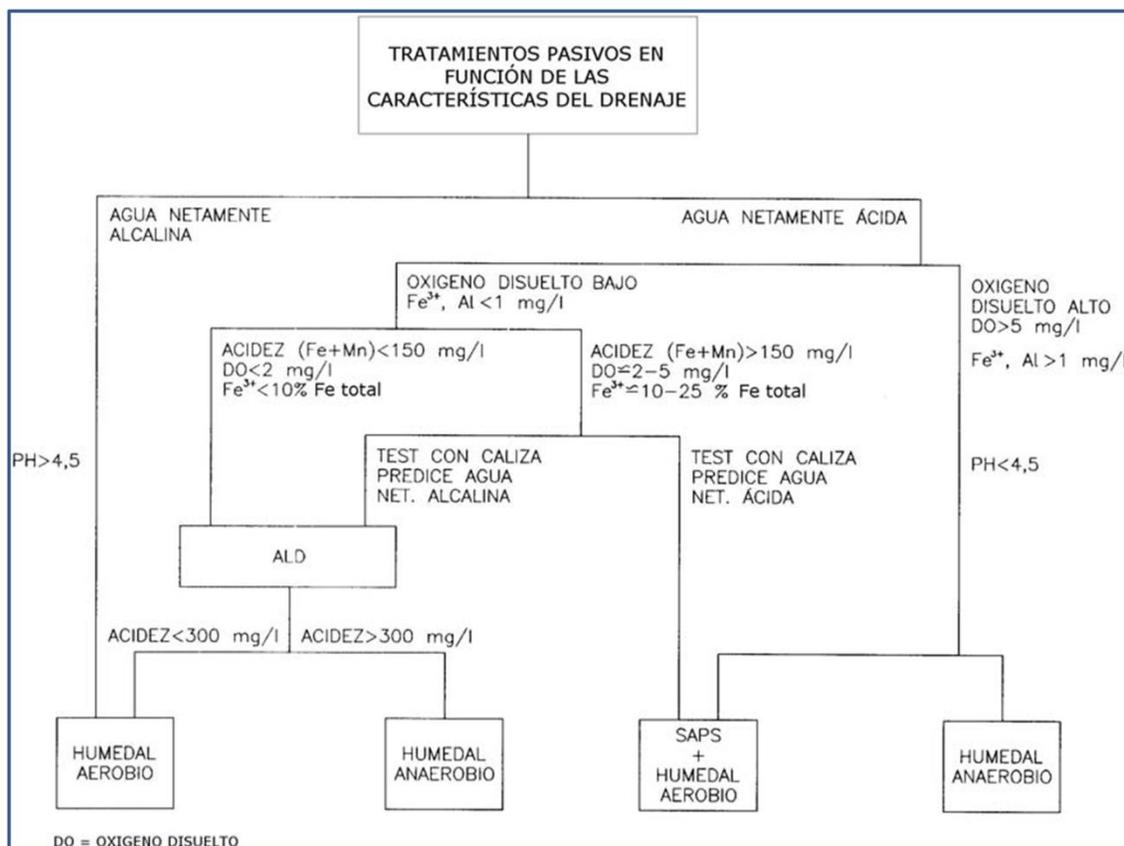


Figura 10: Diagrama de flujo para seleccionar el sistema o la combinación de sistemas para el tratamiento pasivo de drenajes ácidos de mina (Modificada de Skousen et al., 1994, 1998; Watzlaf e Hyman, 1995 y Hedin, 1997).

3.12. Marco legal

Dentro del marco legal de protección de los recursos hídricos de nuestro país podemos citar la Ley 1333 ley del medio ambiente, el reglamento en materia de contaminación hídrica (RMCH) de los cuales citaremos algunos artículos y definiciones que creemos son relevantes para el estudio realizado.

3.12.1. Ley N°. 1333 ley del medio ambiente promulgada el 27 de abril de 1992

ARTICULO 1º.- La presente Ley tiene por objeto la protección y conservación del medio ambiente y los recursos naturales, regulando las acciones del hombre con relación a la naturaleza y promoviendo el desarrollo sostenible con la finalidad de mejorar la calidad de vida de la población.

Reglamento en materia de contaminación hídrica (RMCH)

Título i

Disposiciones generales

CAPITULO I

Del objeto y ámbito de aplicación

ARTICULO 1º La presente disposición legal reglamenta la Ley del Medio Ambiente N° 1333 del 27 de abril de 1992 en lo referente a la prevención y control de la contaminación hídrica, en el marco del desarrollo sostenible.

ARTICULO 2º El presente reglamento se aplicará a toda persona natural o colectiva, pública o privada, cuyas actividades industriales, comerciales, agropecuarias, domésticas, recreativas y otras, puedan causar contaminación de cualquier recurso hídrico.

3.12.2. Clasificación de cuerpos de aguas según la Ley

ARTICULO 4º La clasificación de los cuerpos de agua, según las clases señaladas en el Cuadro N° 1 - Anexo A del presente reglamento, basada en su aptitud de uso y de acuerdo con las políticas ambientales del país en el marco del desarrollo sostenible, será determinada por el MDSMA. Para ello, las instancias ambientales dependientes del prefecto deberán proponer una clasificación, adjuntando la documentación suficiente para comprobar la pertinencia de dicha clasificación. Esta documentación contendrá como mínimo: Análisis de aguas del curso receptor a ser clasificado, que

incluya al menos los parámetros básicos, fotografías que documenten el uso actual del cuerpo receptor, investigación de las condiciones de contaminación natural y actual por aguas residuales crudas o tratadas, condiciones biológicas, estudio de las fuentes contaminantes actuales y la probable evolución en el futuro en cuanto a la cantidad y calidad de las descargas.

Esta clasificación general de cuerpos de agua; en relación con su aptitud de uso, obedece a los siguientes lineamientos:

- **CLASE “A”** Aguas naturales de máxima calidad, que las habilita como agua potable para consumo humano sin ningún tratamiento previo, o con simple desinfección bacteriológica en los casos necesarios verificados por laboratorio.
- **CLASE “B”** Aguas de utilidad general, que para consumo humano requieren tratamiento físico y desinfección bacteriológica.
- **CLASE “C”** Aguas de utilidad general, que para ser habilitadas para consumo humano requieren tratamiento físico-químico completo y desinfección bacteriológica.
- **CLASE “D”** Aguas de calidad mínima, que para consumo humano, en los casos extremos de necesidad pública, requieren un proceso inicial de pre sedimentación, pueden tener una elevada turbiedad por elevado contenido de sólidos en suspensión, y luego tratamiento físico-químico completo y desinfección bacteriológica especial contra huevos y parásitos intestinales.

En caso de que la clasificación de un cuerpo de agua afecte la viabilidad económica de un establecimiento, el Representante Legal de éste podrá apelar dicha clasificación ante la autoridad ambiental competente, previa presentación del respectivo análisis costo-beneficio [52].

[52] LEY No. 1333, Ley y Reglamento del Medio Ambiente, Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH).

Tabla N° 11: Clasificación de los cuerpos de agua según su aptitud de uso.

ORDEN	USOS	CLASE "A"	CLASE "B"	CLASE "C"	CLASE "D"
1	Para abastecimiento de agua potable después de: <ul style="list-style-type: none"> • Solo una desinfección y ningún tratamiento. • Tratamiento solamente físico y desinfección. • Tratamiento físico químico completo: coagulación, floculación, filtración y desinfección. • Almacenamiento prolongado o precipitación, seguidos de tratamiento al igual que c). 	SI NO NO NO	NO SI NO NO	NO NO SI NO	NO NO NO SI
2	Para recreación de contacto primario: Natación, esquí, inmersión.	SI	SI	SI	NO
3	Para protección de los recursos hídricos	SI	SI	SI	NO
4	Para riego de hortalizas consumidas crudas y frutas de cáscara delgada, que sean ingeridas crudas sin remoción de ellas.	SI	NO	NO	NO
5	Para abastecimiento industrial	SI	SI	SI	SI
6	Para la cría natural y/o intensiva (acuicultura) de especies destinadas a la alimentación humana.	SI	SI	SI	NO
7	Para abrevadero de animales.	NO(*)	SI	SI	NO
8	Para la navegación.(***)	NO(**)	SI	SI	NO

(SI) es aplicable, puede tener todos los usos indicados en la clase correspondiente.

(*) No en represas usadas para abastecimiento de agua potable.

(**) No a navegación a motor.

(***) No aplicable a acuíferos.

Fuente: Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica. Cuadro N° 1 - Anexo A

3.13. Desarrollo sostenible

El desarrollo sostenible está contemplado en la ley de medio Ambiente misma que define el principio de desarrollo sostenible como el proceso mediante el cual se satisfacen las necesidades de la actual generación, sin poner en riesgo la satisfacción de necesidades de las generaciones futuras.

Éste principio en su aplicación a cuencas de aguas, implica la atención de todos los requerimientos de demanda y necesidades que existen.

Los cuerpos de agua deben ser evaluados en el contexto global de la cuenca que pertenece considerando la coexistencia de todos los usos y funciones que tienen dentro de la cuenca y áreas contiguas.

El uso de agua en minería generalmente no es consuntivo por lo que es posible minimizar su consumo directo de las fuentes de agua naturales, re circulando y tratando efluentes de operaciones para adecuarlos a la calidad requerida en otros usos y/ o para descargarlos a cuerpos de agua cumpliendo las normas vigentes (límites permisibles y estándares de calidad).

3.14. ENFERMEDADES SEGÚN LA OMS/OPS

Arsénico, Efectos sobre la salud

No existe una prueba fehaciente de que el arsénico, en cualquiera de sus formas, sea esencial para el hombre.

La toxicidad de los compuestos arsenicales dependerá de la forma química y física del compuesto, vía de ingreso en el organismo, dosis y duración de exposición, niveles dietéticos de los elementos interactuantes, edad y sexo del individuo expuesto [53]. El arsénico inorgánico es más tóxico que el orgánico; el inorgánico trivalente es más peligroso que el pentavalente.

El envenenamiento agudo con arsénico compromete el sistema nervioso central, produciendo un estado de coma y, cuando la dosis son de 70-180mg, a la muerte misma [54]. El sistema gastrointestinal, sistema nervioso, conducto respiratorio y la piel pueden ser gravemente afectados [53]. El envenenamiento crónico se manifiesta por una debilidad muscular general, pérdida del apetito y náusea, ocasionando inflamación de las membranas mucosas de los ojos, nariz y laringe; también pueden presentarse lesiones cutáneas. Asimismo, se han observado casos de manifestaciones neurológicas e incluso de tumores malignos que afectan a los órganos vitales [53].

[53] Quality criteria water, Washington DC Environmental Protection Agency, 1976; [54] Parisic, A. F. y Vallee, B. L. Zinc metalloenzymes: characteristics and significance in biology and medicine. American Journal Nutrition 22:1222(1969).

El envenenamiento puede producirse incluso con dosis tan bajas como de 3-6mg/día durante periodos prolongados [55]. Se ha registrado un caso fatal de una persona que durante dos años y medio ingirió agua de pozo que contenía hasta 7,6 mg/L [56]. Incluso una cantidad mínima de 0,6 mg de arsénico por litro podía haber sido la causa del fallecimiento de algunos lactantes en Chile [57-58].

Un grupo de trabajo de la OMS y el Organismo de Protección Ambiental de los E.U.A. llevaron a cabo evaluaciones respecto al riesgo de contraer cáncer de la piel [59]. Aplicando un modelo lineal sin umbral, estimó que la exposición de por vida al arsénico presente en el agua potable a una concentración de 0,2 mg/L propiciaba un 5% de riesgo a contraer cáncer de piel (en este modelo se supone que el metabolismo del arsénico es igual tanto cuando la exposición es baja como cuando es alta). En los casos en que ha habido una alta exposición ocupacional al arsénico, se han observado manifestaciones diversas, como hiperpigmentación, queratosis y cáncer al pulmón [60].

En resumen el efecto que tiene el arsénico en la salud, puede causar envenenamiento o cáncer, daños en la piel, intestino, pulmones, corazón, vasos sanguíneos, sistema inmunológico, sistema urinario, órganos reproductores y sistema nervoso, entre otros. El arsénico también puede dañar cromosomas, que contienen material genético del cuerpo.

Cadmio

Puede ser causante de anemia, enfermedad del hígado y alteraciones de los nervios y el cerebro se han observado en animales que comieron o bebieron cadmio.

Sin embargo no hay información precisa para determinar la cantidad del mineral que una persona debería ingerir para que se observen éstos efectos en seres humanos.

[55] Symposium on trace Elements. Medical clinics of North America, 60:4(1976); [56] Food and Nutrition Board. Recommended dietary allowances, 8ª revision Washington, DC, National Academy of Sciences, 1974; [57] Prasad, A.S et al. Syndrome of iron, anemia, hepatosplenomegaly, hypogonadism, dwarfism and geophagia. American Journal of Medicine, 31: 532 (1961); [58] Michaelson, G Zinc therapy in acrodermatitis enteropathica; Acta dermatológica 54:377(1974).

Sulfato

La mayoría de sulfatos son solubles en el agua, con excepción de los sulfatos de plomo, bario y estroncio [61]. El sulfato disuelto se considera como un soluto permanente del agua. Sin embargo, se puede reducir a sulfuro, volatilizado al aire como H_2 , precipitado como una sal insoluble o incorporada en organismos vivientes [53].

El sulfato del intestino humano se absorbe muy poco; penetra lentamente las membranas celulares de los mamíferos y se elimina rápidamente por los riñones.

Las personas que no están acostumbradas a beber agua con niveles elevados de sulfato pueden experimentar diarrea y deshidratación. Los niños son a menudo más sensibles al sulfato que los adultos. Como precaución, aguas con niveles superiores a 400 mg/L no deben ser usadas en la preparación de alimentos para niños. Niños mayores y adultos se acostumbran a los niveles altos de sulfatos después de unos días.

Los animales también son sensibles a altos niveles de sulfato. En animales jóvenes, altos niveles pueden estar asociados con diarrea crónica y grave, y en algunos casos, la muerte. Como ocurre con los humanos, los animales tienden a acostumbrarse al sulfato con el tiempo. Si el sulfato en el agua supera los 250 mg/L, un sabor amargo o medicinal puede hacer que sea desagradable beber esa agua.

El nivel máximo de sulfato sugerido por la OMS, Génova 1993, es de 500 mg/L. las directrices de la unión Europea son más recientes, 1998, sugiriendo un máximo de 250 mg/L de sulfato en el agua destinada al consumo humano.

[53] Quality criteria water, Washington DC Environmental Protection Agency, 1976; [59] Honstead, J.F. y Brady, D.N. the uptake and retention of ^{32}P and from the consumption of Columbia River fish Health physics, 13. 455 (1967). [60] OMS, Serie de informes Tecnicos, N° 532, 1973 (los oligoelementos en la nutrición humana: informe comité de Expertos de la OMS). [61] Browing, E. Toxicity of Industrial metals, 2° ed. Londres, Butterworths 1969.



4. ÁREA DE ESTUDIO

El río Sayaquira se encuentra ubicado en el cantón Ichoca, municipio Ichoca de la Provincia Inquisivi del Departamento de La Paz, la cabecera del río se ubica en las coordenadas UTM X=684442,407; Y= 8111968,20 con una altitud de 4471 m.s.n.m. y el extremo final del mismo se ubica en las coordenadas, X=689499,273; Y=8103916,83 y una altitud de 3627 m.s.n.m.

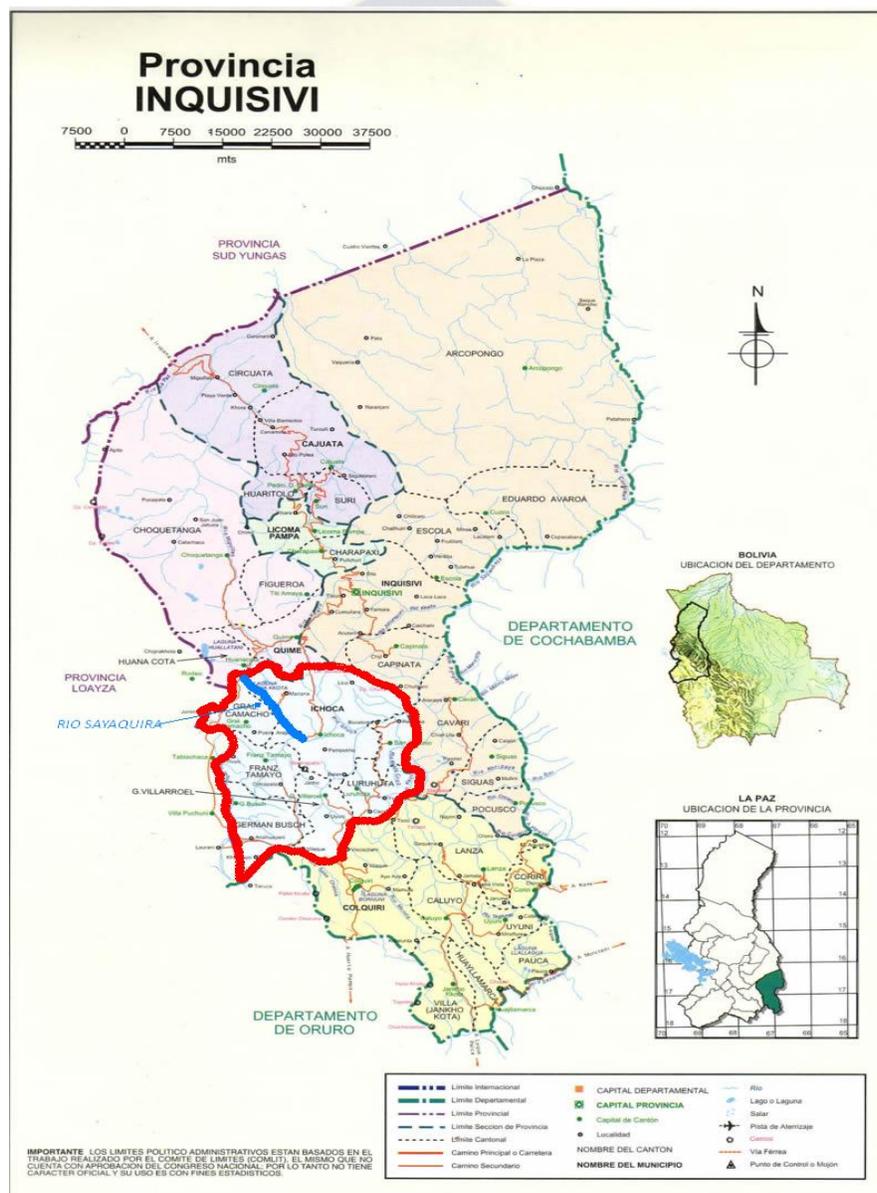


Figura 11: Ubicación del área de estudio, río Sayaquira (PDM Ichoca).

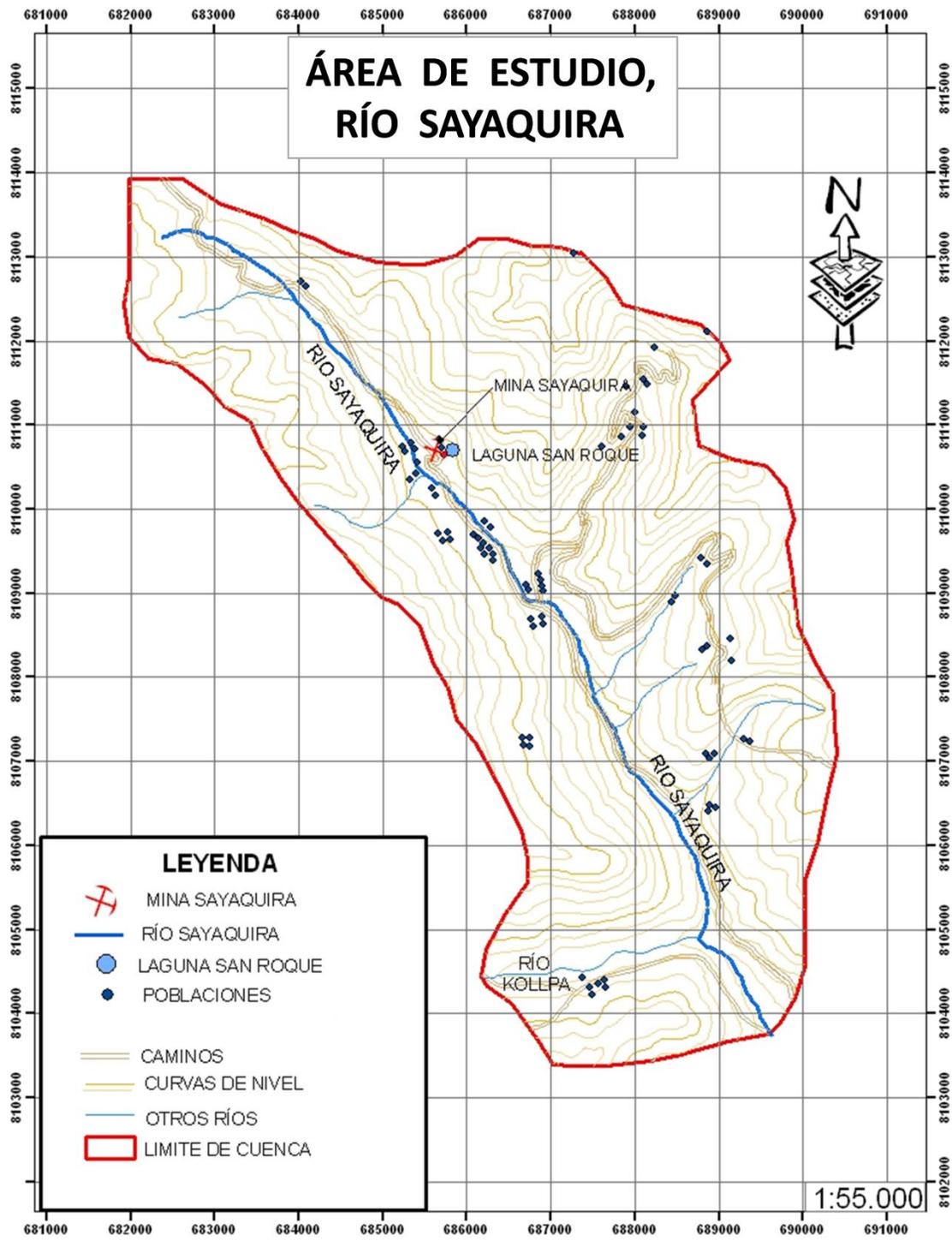


Figura 12: Río Sayaquira y otros. Elaboración propia mediante programa ArcGIS-ArcMap (versión 9.3).

4.1. Hidrografía de la región

El sistema hidrográfico del área de estudio está vinculado al río Ayopaya el mismo que hecha sus aguas a la cuenca fluvial Amazonas. Los principales ríos afluentes al río Ayopaya son: el río Quime que corre de SO a NE al igual que el Río Sayaquira que aguas más abajo toma el nombre de río Ichoca y Rea Rea para luego desembocar en el río Ayopaya. Ambos ríos atraviesan transversalmente la región.

Las estaciones seca y lluviosa controlan los cursos de agua, durante la época seca la mayor parte de las quebradas y riachuelos están casi secos; los ríos principales llevan regular cantidad de agua. En la estación lluviosa las quebradas se vuelven torrenciales y los ríos aumentan considerablemente su caudal sobre todo en las quebradas que presentan una gradiente considerable.

4.2. Geomorfología de la región

Los caracteres topográficos y geomorfológicos que existen en esta parte muestran un contraste acentuado pues esta zona presenta un relieve topográfico característico con elevaciones prominentes que hacen que el terreno sea muy abrupto, con serranías altas y valles profundos. Dentro del ciclo geomórfico la zona de estudio estaría en un estado juvenil. Ésta afirmación se basa en los siguientes hechos:

- a) Ríos grandes troncales consecuentes, con tributarios pequeños, los que están extendidos por erosión retrograda siendo fuertes las pendientes de estos.
- b) Los valles tienen perfiles transversales en forma de V y son profundos tales como los valles de Quime, Challbuma, Rea Rea, Kollpa y otros.
- c) No existe ningún desarrollo de llanura aluvial y los estados de los valles se levantan desde los márgenes de los ríos o cerca de ellos.
- d) Donde los cursos de ríos, cruzan capas de roca particularmente resistentes, se presentan rápidos y algunas cascadas, aunque estas son pequeñas y pocas.

Con todo lo anteriormente expuesto se puede definir la geomorfología de la zona como: región montañosa compleja [62].

Los glaciares del área son de tipo confinados a cursos más o menos definidos y dentro de este tipo lo clasificamos como glaciares de circo que ocupan nichos localizados en las laderas de las montañas, también según el mecanismo de su movimiento se puede clasificar como corrientes de hielo que avanzan principalmente bajo la influencia directa de la gravedad y su movimiento es esencialmente lineal o vertical: éste movimiento está regido por la topografía subyacente [63].

Esta región está ocupada casi en su totalidad por rocas sedimentarias, las cuales son distinguibles litológicamente y estratigráficamente, que pertenecen a la secuencia paleozoica compuestas en todo su conjunto por rocas clásticas [62].

4.3. Yacimientos minerales de la región

A la cordillera de Santa Vera Cruz, ubicada al sud de la cordillera Central, se la ha denominado “faja Estannífera” de Bolivia, esta faja constituye la zona Filoniana más rica y extensa del mundo la que se extiende desde el sud del Perú hasta el norte de Argentina. En esta zona cordillerana es donde se observa una primera bifurcación de las líneas tectónicas con las cuales depósitos estanníferos están relacionados [64].

La intrusión de Santa Vera Cruz causó una mineralización intensa en los alrededores, minerales de W, Sn, Cu, Ag, Pb, Zn, etc. Están presentes como las principales y de mayor abundancia.

En la zona mencionada aparece una distribución de compuestos sulfurosos correspondientes a minerales de Pb, Zn, Ag, Cu, etc. La distribución térmica de los minerales está dada de la siguiente forma:

- De alta a media temperatura.

Wolframita y asociados de Casiterita-Wolframita.

Wolframita, Cuarzo, Pirita, Arsenopirita.

Secuencia de deposición

Wolframita, Cuarzo, Pirita, Arsenopirita.

- Minerales de media temperatura.

Sn, principalmente Casiterita de tipo mesotermal de Cornwall.

4.4. Densidad poblacional

Tabla N° 12: Densidad poblacional.

SAYAQUIRA	Mujeres					TO-TAL	Hombres					Tot al	TO-TAL
	Nº de familia	0-5	6 - 18	19- 39	40- 64		65 a más	0-5	6 - 18	19- 39	40- 64		
54	18	32	35	24	24	133	15	37	32	30	23	137	270

Fuente: En base a información del diagnóstico realizado, Agosto 2008.

Después de la población de General Camacho la población de Sayaquira está afectada de forma directa por actividades mineras puesto que el río que lleva su nombre siendo éste la principal fuente de agua misma que no se puede emplear para ningún tipo de consumo, a la que tiene acceso los pobladores, ganado y río abajo sembradíos.

4.5. Clima

De acuerdo al mapa de climas de la UDAPE Ichoca, en todas sus poblaciones, presenta un clima de Estepa con invierno seco y frío.

- **Temperatura media ambiente**

Tabla N° 13: Temperatura media ambiente (°C) año 2007.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2007	9.8	9.4	9.1	7.0	3.3	0.3	2.1	1.5	4.7	6.5	7.8	9.8

Fuente: SENAMHI

Es de 6.03 C°; con una máximas de 18.1 °C, registradas fueron en los meses de octubre a diciembre; las temperaturas mínimas promedio fue de -6.19 C°, registradas en los meses de mayo, junio, julio y agosto.

- **Temperatura máxima**

El promedio es de 18.39 °C; los meses de máximas temperatura se registran en octubre a enero. En cuadro siguiente se observa el detalle.

Tabla N° 14: Temperatura máxima media (°C) año 2007.

Año	En	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2007	18.2	16.1	18.5	18.6	18.5	16.5	17.4	18.4	17.4	19.0	19.3	19.2

Fuente: SENAMHI

- **Temperatura mínima** anual promedio es de 6.53 °C; las temperaturas mínimas extremas se presentan desde los meses de mayo hasta agosto.

Tabla N° 15: Temperatura mínima media (°C).

Año	En	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2006	1.5	2.6	-0.3	-4.7	-11.9	-15.8	-13.0	-15.4	-7.9	-6.1	-3.7	0.4

Fuente: SENAMHI

4.6. Precipitaciones pluviales, periodos

La precipitación promedio anual es de 31.29 mm lo que indica una baja extrema cantidad de precipitación. Los meses más lluviosos en la región se registra en diciembre con 86.5mm a febrero con 156.1mm respectivamente, la temporada seca comienza en mayo hasta agosto donde se registra 0.0 mm de precipitación.

Tabla N° 16: Precipitación total en el año 2007.

Año	En	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2007	61.5	156.1	10.9	5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	19.8	13.6	21.6	86.5

Fuente: SENAMHI

4.7. Humedad relativa y viento

La humedad relativa promedio anual tiene una variación espacial entre 50%.

Los vientos provienen de dos direcciones principales Este y Oeste, que corresponde a las dos estaciones de verano e invierno.



CAPÍTULO V

5. METODOLOGÍA DEL MONITOREO DEL RÍO SAYAQUIRA

5.1. Estudio preliminar

Se realizó un reconocimiento preliminar del área de estudio, en fecha 5 de noviembre de 2010, donde se identificaron los puntos de muestreo a su vez se registraron poblaciones, sembradíos y la mina Sayaquira que pertenece a la empresa minera Barrosquira, como posible fuente de contaminación.

5.1.1. Recolección de información y consideraciones

Se recabó información de precipitación fluvial, clima de la región y lugares aledaños.

No se pudo encontrar datos sobre la calidad del cuerpo de agua en estudio que se hubiesen realizado anteriormente. Además se recolectó datos de estudios técnicos de exploración minera. También se recolectaron cartografías de la provincia Inquisivi necesarias para ubicar el área de estudio los puntos de muestreo, poblaciones afectadas, curso del cuerpo de agua y ubicación de las probables fuentes de contaminación.

Finalmente se escogió los sitios potenciales, que podrían tener efectos negativos en el cuerpo de agua y se llevó a cabo el reconocimiento del terreno donde se inventario todos los factores que puedan influenciar, tanto directa o indirectamente la calidad del cuerpo de agua. Estos incluyeron todas las descargas o captaciones tanto puntuales como difusas que podrían tener un efecto significativo. También se cubrió con información geográfica, topográfica, clima, hidrología, geología, usos del terreno, urbanización, industrialización y agricultura.

Todas las visitas de campo se realizaron en coordinación con las autoridades de la región, personal del departamento de seguridad y salud ambiental dependiente de la gobernación de La Paz y el conocimiento de la empresa minera Barrosquira.

5.1.2. Accesibilidad

Para la recolección de muestras se transporta una carga apreciable de equipo de muestreo y muestras de agua, la distancia que se debe caminar desde el punto de toma hasta el transporte debe ser mínima, bajo esta consideración los puntos de muestreo fueron accesibles salvo aquellos que ya fueron definidos en el estudio preliminar y que por los desastres naturales (deslizamientos derrumbes) en la época lluviosa se convirtieron en lugares inaccesibles.

5.2. Puntos de muestreo

Tabla N° 17: Ubicación de puntos de muestreo en el trayecto del río Sayaquira.

Ubicación de puntos de muestreo y códigos respectivos		Coordenadas UTM		Altura msnm
		X	Y	
Trinidad, antes de la mina	PM 1	684442,41	8111968,20	4471
San José, antes de la mina	PM 2	685004,85	8111372,92	4422
Sayaquira, después de la mina	PM 3	686085,75	8109902,93	4285
Sayaquira, después del pueblo del mismo nombre	PM 4	686542,68	8109093,34	4245
Sayaquira, después de sembradíos	PM 5	687600,16	8107675,72	3972
Sayaquira, antes del aporte del río Kollpa	PM 6	688790,10	8104916,35	3680
Sayaquira, después del aporte del río Kollpa	PM 7	689499,27	8103916,83	3627
Laguna San Roque	T 1	685829,78	8110704,56	4735
Río Kollpa	T 2	688769,21	8104895,03	3676
Mina Sayaquira, cerca del polvorín *	M 1	685555,00	8110728,54	4441
Mina Sayaquira, antes del relave *	M 2	685483,66	8110686,14	4375
Mina Sayaquira, después del relave y filtro artesanal *	M 3	685449,02	8110449,72	4331

*Puntos de muestreo en predios de la mina Sayaquira que no están contemplados en éste estudio y se tomaron para recabar información del funcionamiento del filtro que emplea la empresa. Se tomaron muestras en éstos puntos durante la primera campaña de muestreo.

Fuente: Elaboración propia en base al reconocimiento preliminar y coordenadas ubicadas mediante GPS.

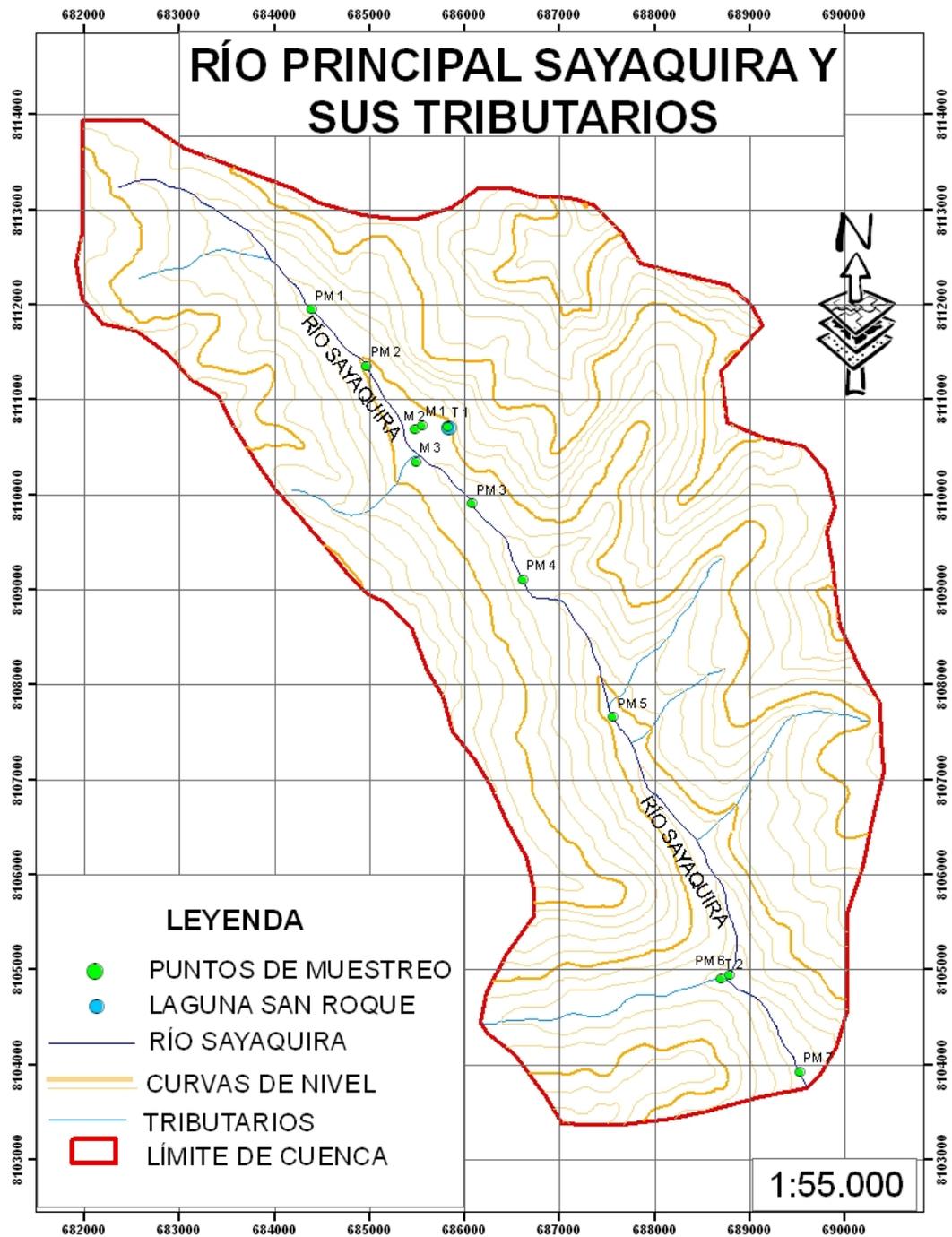


Figura 13: Ubicación de puntos de muestreo PM 1 al PM 7, T 1, T 2 y en inmediaciones de la mina Sayaquira; M 1, M 2 y M 3. Elaboración propia mediante programa ArcGIS - ArcMap (versión 9.3).

Para la selección de los puntos de muestreo se siguieron criterios hidrológicos básicos como ser: caudal uniforme, sección continua del río, aportes primarios al río y accesibilidad al punto. Bajo estas consideraciones se tomaron en cuenta dos aportes al río los cuales contribuyen tanto en época seca como húmeda y finalmente se fijaron nueve puntos de muestreo.

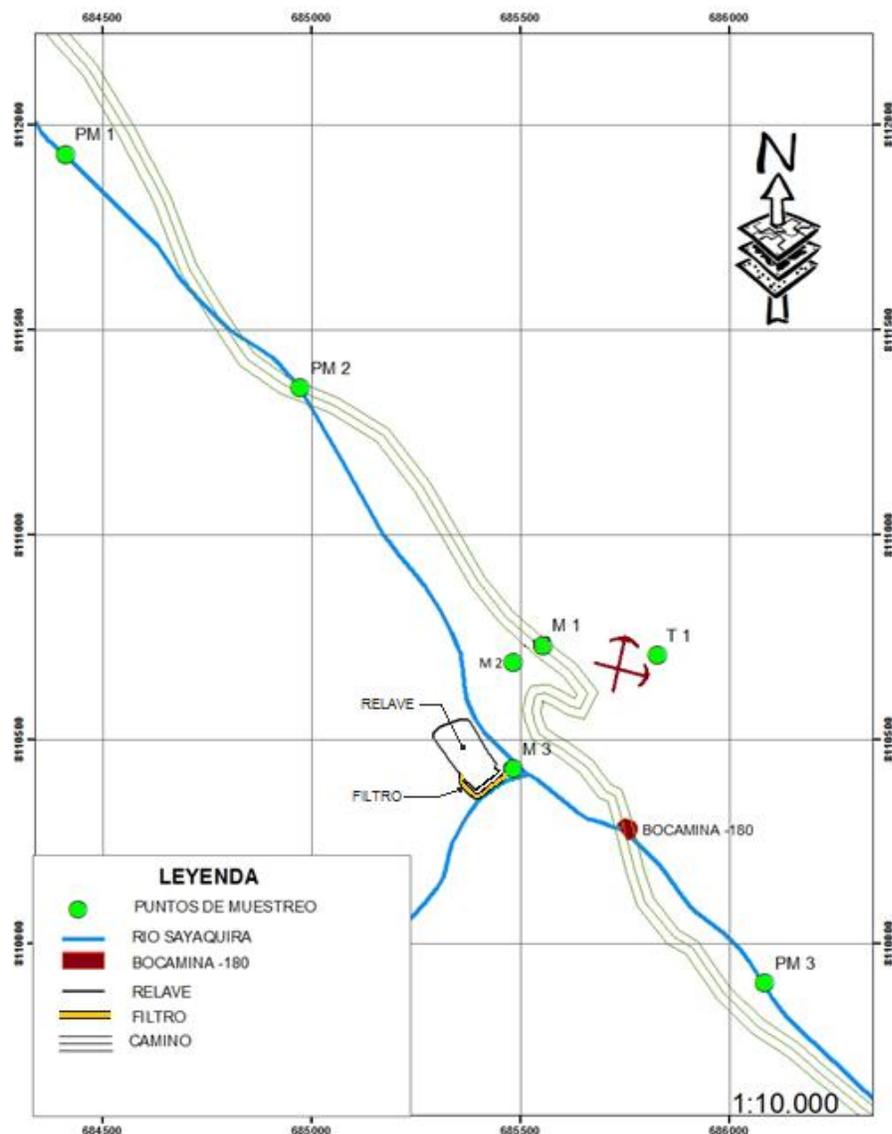


Figura 14: Puntos de muestreo en predios de la mina Sayaquira, perteneciente a la empresa Barrosquira, M 1, M 2 y M 3. Ubicación de la bocamina del nivel -180. Elaboración propia mediante programa ArcGIS - ArcMap (versión 9.3).

En la Figura 14, se muestran los puntos M 1, M 2 y M 3, de los cuales se tomaron muestras solo en la 1° campaña de muestreo ya que no están contemplados dentro del monitoreo de este trabajo y fueron tomados para recabar información del funcionamiento del filtro que emplea la empresa. Solo se tomaron muestras en éstos puntos durante la primera campaña de muestreo en coordinación con el Ing. Luis Paz que se encontraba a cargo de las instalaciones de la mina Sayaquira durante nuestra 1° campaña de muestreo.

Cabe mencionar que dentro de la microcuenca existen otros tributarios los cuales, en época seca, no aportan al río Sayaquira de manera considerable, por esta razón no se los consideró para la fijación de puntos.

5.3. Metodología de muestreo

5.3.1. Épocas de muestreo

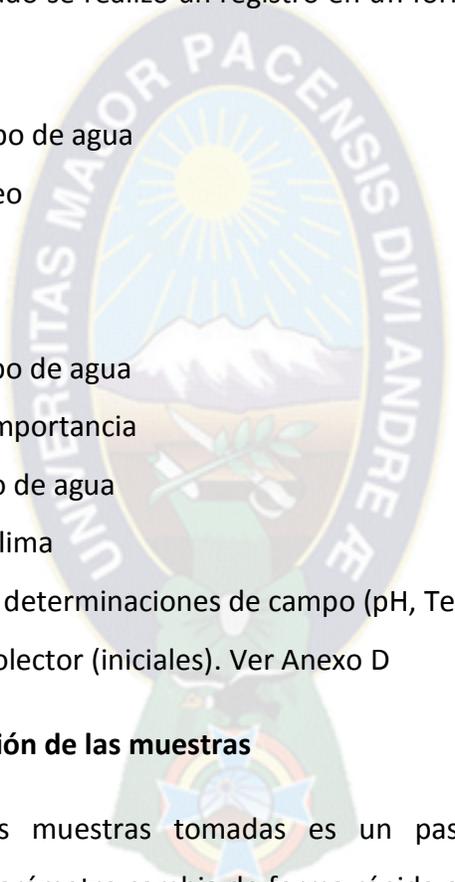
Según información obtenida en el SENAMHI de precipitaciones fluviales reportadas por las estaciones Quime, Caxata, Circuata y Chorocona (Anexo C), las cuales son las más cercanas al área en estudio, se pudo determinar los meses de época seca y húmeda; una vez definidas las épocas se plantearon las fechas de muestreo Tabla N°18.

5.3.2. Representatividad de las muestras e información del muestreo

Se tomó precauciones para la recolección de muestras, evitando los límites de agua-tierra, orillas del río, remoción de sedimentos, etc. Se tomaron muestras puntuales en los puntos: PM 1, PM 2, PM 4, PM 5, PM 6, T 1 y T2, para tener mejor información en lugares críticos (PM3 y PM 7) se realizó un muestreo compuesto; ocho horas continuas de jornada, en cuanto a la información del muestreo todas y cada una de los recipientes fueron etiquetadas en cada una de las campañas de muestreo donde se específico lo siguiente:

Época de muestreo
Fecha
Tiempo
Preservativo añadido
Identidad del recolector (iniciales)

Además de este etiquetado se realizó un registro en un formulario donde se especificó lo siguiente:

Nombre del cuerpo de agua
Época de muestreo
Fecha
Tiempo
Aspecto del cuerpo de agua
Observación de importancia
Caudal del cuerpo de agua
Condiciones del clima
Resultados de las determinaciones de campo (pH, Temperatura, conductividad,) 
Identidad del recolector (iniciales). Ver Anexo D

5.3.3. Preservación de las muestras

La preservación de las muestras tomadas es un paso importante ya que la concentración de cada parámetro cambia de forma rápida en algunos casos o de forma lenta en otros y pocos presentan una estabilidad permanente. Las reacciones que afectan la concentración de parámetros son biológicas, químicas y físicas habiendo métodos de preservación para disminuir cada una de estas reacciones, cabe recalcar que estos métodos causan un efecto de retardación y no de fijación.

Las muestras para su conservación fueron refrigeradas y para su preservación, acidificadas (Anexo E).

5.3.4. Medición de parámetros en campo

Se determinaron los siguientes parámetros in situ:

1) Determinación de pH.

Método: electrométrico basado en la diferencia de potencial que existe entre un electrodo de vidrio y uno de referencia, mediante un pH-metro HACH (HACH Sension 156 multiparameter) y electrodo también HACH modelo 51910.

2) Determinación de la temperatura.

Método: la medida de la temperatura es efectuada con la ayuda del electro termómetro HACH modelo 51910.

3) Determinación de la conductividad.

Método: se efectúa mediante el principio del puente de Kohlrausch o puente de Wheastone, en corriente alterna con un conductímetro HACH (HACH Sension 156 multiparameter).

4) Determinación del potencial y sólidos totales disueltos (TDS).

Método: mediante el equipo HACH (HACH Sension 156 multiparameter).

5) Medida del caudal.

Método: Aforo de líquidos mediante varillas para aforo a vadeo, molinete y contador de revoluciones marca AOTT, micromolinete y contador de revoluciones marca AOTT, molinete marca SIAP con cobertura en velocidad desde 0.05 m/seg hasta 5 m/seg.

5.4. Métodos de análisis

Tomando en cuenta los resultados del análisis cualitativo, realizado en predios de CPTS (Centro de Promoción de Tecnologías Sostenibles) en las muestras de la primera campaña de muestreo, se determinaron los parámetros de la Tabla N° 19.

Las determinaciones correspondientes se realizaron en los laboratorios de la Carrera de Química Industrial de la Facultad Técnica y en el Área de Hidroquímica de la Carrera de Ciencias Químicas de la Facultad de Ciencias Puras y Naturales.

Tabla N° 18: Campañas de muestreo.

Campaña de muestreo	Época	Fecha	Observaciones
Primera	Seca	22 y 23 de Noviembre de 2010	
Segunda	Húmeda	14 y 15 de Febrero de 2011	Inaccesibilidad a los puntos de muestreo PM 4 y PM 5 a causa de derrumbes en el camino.
Tercera	Húmeda	4 y 5 de Abril de 2011	Fecha dos veces reprogramada por la inaccesibilidad a causa de derrumbes en el camino.
Cuarta	Seca	18 y 19 de Mayo de 2011	Fecha reprogramada a falta de personal del SENAMHI y falta de transporte.
Quinta	Seca	15 y 16 de Junio de 2011	Campaña suspendida por conflictos regionales que no permitieron el ingreso.

Tabla N° 19: Metodología de Análisis.

Parámetro	Método Empleado
Acidez*	Volumétrico
Dureza	Cálculo
Sólidos Totales*	Gravimétrico
Arsénico**	Absorción Atómica – Generación de Hidruros
Calcio**	Absorción Atómica - Llama
Cadmio**	Absorción Atómica - Llama
Cobre **	Absorción Atómica - Llama
Hierro**	Absorción Atómica - Llama
Magnesio**	Absorción Atómica - Llama
Manganeso**	Absorción Atómica - Llama
Plomo**	Absorción Atómica – Horno de Grafito
Potasio**	Absorción Atómica - Llama
Sodio**	Absorción Atómica - Llama
Zinc**	Absorción Atómica - Llama
Nitrógeno (Nitrato)*	Espectrofotometría UV-VIS
Sulfato*	Turbidímetro
Cloruro*	Volumetría

(*) Determinado en laboratorios de la Carrera Química Industrial Facultad Técnica.

(**) Determinado en laboratorios del Área de Hidroquímica Carrera Ciencias Químicas Facultad Ciencias Puras y Naturales.

Ver Anexo G.



CAPÍTULO VI

6. RESULTADOS DEL ESTUDIO E INTERPRETACIÓN

Para realizar la interpretación, de resultados obtenidos en laboratorio, nos basamos en el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH) de la Ley 1333 (Anexo A), realizando la comparación de las concentraciones de los diferentes parámetros determinados con las concentraciones límites, establecidas en éste reglamento, correspondientes a cada parámetro, así mismo se realiza la interpretación por épocas; siendo la 1° y 4° campaña de muestreo época seca y la 2° y 3° campaña de muestreo época húmeda.

La falta de valores en gráficas y tablas, en los puntos PM 4 y PM 5, se debe a la inaccesibilidad a los mismos, por deslizamientos ocurridos en la zona a consecuencia de las intensas lluvias. En la 3° y 4° campaña de muestreo se pudo acceder al punto de muestreo PM 4, con mucha dificultad, no siendo el caso del punto PM 5.

6.1. Resultados físico-químicos y gráficas

Tabla N° 20: Resultados de parámetros Físicoquímicos, 1° campaña de muestreo.

Punto de Muestreo	pH	Potencial Eh (mV)	Temperatura (°C)	Conductividad (µs)	TDS (mg/L)	Sólidos Totales
PM 1	5,98	185,70	11,80	65,00	63,00	130,00
PM 2	6,69	147,90	12,30	98,30	91,20	130,00
PM 3	2,62*	401,30	11,30	802,00	590,00	810,00
PM 4	2,51*	400,80	14,00	788,00	570,00	910,00
PM 5	2,49*	399,60	11,90	645,00	537,00	650,00
PM 6	2,53*	400,80	14,40	641,00	524,00	620,00
PM 7	2,69*	396,20	16,10	543,00	440,00	670,00
T 1	3,32*	359,50	8,00	92,90	70,20	90,00
T 2	8,06	83,20	17,40	376,00	181,00	280,00
M 1	2,59*	393,40	7,70	424,00	310,00	320,00
M 2	2,73*	390,40	8,10	504,00	338,00	5840,00
M 3	2,62*	393,70	10,70	548,00	456,00	660,00
CLASE A	6 a 8.5				1000	
CLASE D	8.5 a9				1500	
(*) Valores que se encuentran por debajo del valor mínimo permisible.						

Fuente: Elaboración propia en base a resultados obtenidos in situ (excepto sólidos totales).

Tabla N° 21: Resultados de parámetros Fisicoquímicos, 2° campaña de muestreo.

Punto de Muestreo	pH	Potencial Eh (mV)	Temperatura (°C)	Conductividad (µs)	TDS (mg/L)	Sólidos Totales
PM 1	6,57	146,70	6,00	30,70	16,80	30,00
PM 2	5,93	189,00	7,60	40,30	10,60	20,00
PM 3	3,19*	409,75	9,60	342,10	210,00	237,30
PM 4	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
PM 5	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
PM 6	3,08*	327,30	7,70	197,60	94,40	120,00
PM 7	6,20	173,17	9,28	136,90	64,90	500,00
T 1	4,04*	277,80	5,00	16,09	7,01	12,00
T 2	7,71	94,50	7,80	165,90	79,10	270,00
CLASE A	6 a 8.5				1000	
CLASE D	8.5 a9				1500	
(*) Valores que se encuentran por debajo del valor mínimo permisible.						
(N/R) No realizado a causa de la inaccesibilidad al punto de muestreo.						

Fuente: Elaboración propia en base a resultados obtenidos in situ (excepto sólidos totales).

Tabla N° 22: Resultados de parámetros Fisicoquímicos, 3° campaña de muestreo.

Punto de Muestreo	pH	Potencial Eh (mV)	Temperatura (°C)	Conductividad (µs)	TDS (mg/L)	Sólidos Totales
PM 1	6,33	158,10	13,80	47,00	18,90	50,00
PM 2	6,09	170,20	10,50	65,10	30,00	80,00
PM 3	2,62*	422,70	9,75	777,75	544,10	630,00
PM 4	2,94*	422,00	9,20	736,00	384,00	400,00
PM 5	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
PM 6	3,32*	345,60	5,60	453,00	219,00	300,00
PM 7	4,36*	299,31	10,59	266,63	127,90	450,00
T 1	3,98*	325,30	9,30	143,60		50,00
T 2	8,43	79,80	6,40	277,00	131,00	200,00
CLASE A	6 a 8.5				1000	
CLASE D	8.5 a9				1500	
(*) Valores que se encuentran por debajo del valor mínimo permisible.						
(N/R) No realizado a causa de la inaccesibilidad al punto de muestreo.						

Fuente: Elaboración propia en base a resultados obtenidos in situ (excepto sólidos totales).

Tabla N° 23: Resultados de parámetros Fisicoquímicos, 4° campaña de muestreo.

Punto de Muestreo	pH	Potencial Eh (mV)	Temperatura (°C)	Conductividad (µs)	TDS (mg/L)	Sólidos totales
PM 1	7,26	174,60	10,10	60,10	27,90	40,00
PM 2	7,44	165,50	9,80	73,10	30,00	38,00
PM 3	3,12*	415,45	4,00	920,00	446,40	820,00
PM 4	3,12*	403,90	8,40	878,00	422,00	900,00
PM 5	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
PM 6	3,55*	375,80	1,10	584,00	268,00	480,00
PM 7	3,60*	336,77	6,09	584,00	200,80	650,00
T 1	3,98*	355,40	6,80	155,50	72,30	83,00
T 2	8,49	109,20	2,90	367,00	165,40	250,00
CLASE A	6 a 8.5				1000	
CLASE D	8.5 a 9				1500	
(*) Valores que se encuentran por debajo del valor mínimo permisible.						
(N/R) No realizado a causa de la inaccesibilidad al punto de muestreo.						

Fuente: Elaboración propia en base a resultados obtenidos in situ (excepto sólidos totales).

Tabla N° 24: Resultados de la medición de caudales por campaña de muestreo.

Punto de Muestreo	1° Campaña Caudal (m ³ /s)	2° Campaña Caudal (m ³ /s)	3° Campaña Caudal (m ³ /s)	4° Campaña Caudal (m ³ /s)
PM 1	0,003	0,586	0,030	0,010
PM 2	0,013	0,836	0,059	0,044
PM 3	0,101	0,983	0,187	0,158
PM 4	0,090	N/R	0,202	0,134
PM 5	0,087	N/R	N/R	N/R
PM 6	0,166	C/R	0,445	0,193
PM 7	0,213	C/R	0,706	0,323
T 2	0,031	1,151	0,221	0,063
(C/R) Condiciones muy riesgosas, arrastre de piedras por el río y caudal elevado.				
(N/R) No realizado a causa de la inaccesibilidad al punto de muestreo.				

Fuente: Elaboración propia en base al informe proporcionado por el SENAMHI.

6.1.1. pH

Como ya se mencionó en principio nos basaremos en el RMCH, en segundo lugar s en la Tabla N° 25, extraída de la Evaluación Ambiental del Lago Poopó y sus ríos tributarios realizada por la Universidad Técnica de Oruro.

Tabla N° 25: Clasificación del cuerpo de agua, según su pH.

Clasificación	pH
Altamente ácidas	1.5 a 4.5
Blandas ácidas	3.5 a 5.5
Blandas ligeramente ácidas	5.0 a 7.0
Muy salinas	6 a 9
Duras neutras a alcalinas	7.0a 8.5
Blandas alcalinas	7.5 a 11

Fuente: Evaluación ambiental del lago Poopó y sus ríos tributarios Dic 2005 – Feb 2007.

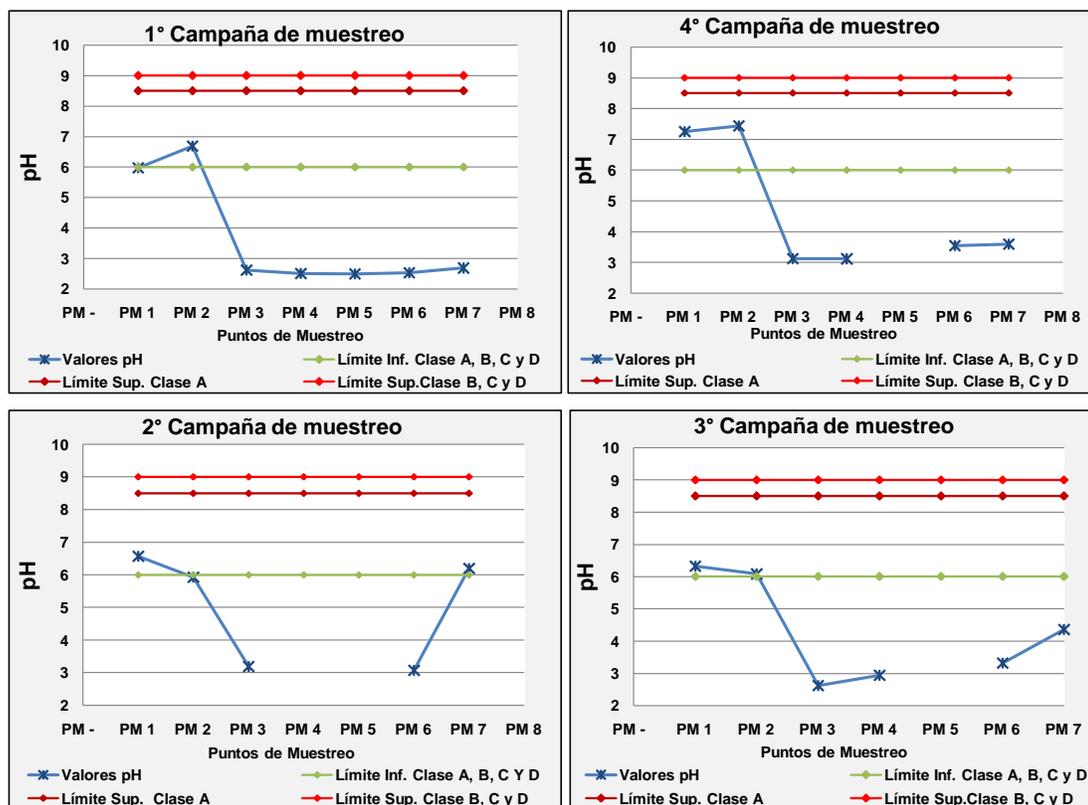


Figura 15: Resultados pH Vs puntos de muestreo; época seca 1° y 4° campaña de muestreo, época húmeda 2° y 3° campaña de muestreo (elaboración propia).

Se puede observar que en época seca el comportamiento de los valores de pH son similares, los puntos PM1 y PM2 se encuentran dentro de la clasificación "A" (Tabla N° 11) y de acuerdo a la Tabla N° 25 se clasifican como aguas blandas ligeramente ácidas, al mismo tiempo podemos apreciar un descenso en el valor de pH de un promedio de 6.8 de los puntos anteriores a un promedio de 2.8 en el punto PM 3 el cual se mantiene relativamente constante en los puntos PM 4, PM 5, PM 6 y PM 7. Este descenso tan brusco puede deberse a las actividades mineras que se realizan en la región, mismas que originan drenajes ácidos de mina, en ese sector y hace que estas aguas se encuentren fuera de las clasificaciones del RMCH y se clasifiquen de acuerdo a la tabla N°25 como aguas altamente ácidas.

En época húmeda, el comportamiento de los puntos PM 1 y PM 2 se mantiene similar al de la época seca, por lo que se encontrarían dentro de la clase "A" Tabla N° 11; al igual que en la época seca existe un descenso brusco del pH en el punto PM3 que se mantiene de forma relativamente constante hasta el punto PM 6 por lo que se encuentran por encima de toda clasificación del reglamento y se consideran como aguas altamente ácidas (Tabla N° 25), a diferencia de la época seca existe un ascenso del pH con un promedio de 5.28 en el punto PM 7, esto puede deberse a la dilución ocasionada por el aporte de aguas del río Kollpa (T 2), el cual presenta un promedio de pH de 8.28. El punto PM 7, pese al ascenso de pH, no cumple con los límites de la reglamentación mientras que su clasificación (tabla N° 25) es de agua blanda ligeramente ácida.

6.1.2. Sólidos totales disueltos

Podemos observar que, en ambas épocas de muestreo (Tablas 20, 21, 22 y 23), los valores de sólidos totales disueltos (TDS), se encuentran por debajo del límite de la clase "A" del Reglamento y por tanto se encuentran dentro de ésta clasificación.

6.2. Resultados del análisis químico y gráficas

Tabla N° 26: Resultados del análisis químico, 1° Campaña de Muestreo.

Punto de Muestreo N°	Parámetros analizados										
	Na mg/L	K mg/L	Ca mg/L	Mg mg/L	Mn mg/L	Fe mg/L	As µg/L	Cu µg/L	Cd µg/L	Pb µg/L	Zn µg/L
PM 1	2,38	0,31	4,94	1,26	DLD	0,02	18,33	DLD	DLD	3,09	94,00
PM 2	3,01	0,36	7,03	2,83	DLD	0,03	2,70	DLD	DLD	1,97	23,00
PM 3	6,2	1,42	23,63	37,43	8,33	107,75	4873,00	2275,00	40,00	27,02	6825,00
PM 4	5,68	1,36	19,93	28,26	6,83	101,65	4026,00	1800,00	36,00	45,05	6100,00
PM 5	6,88	1,48	20,28	27,00	6,58	72,75	3628,00	1650,00	DLD	24,08	5875,00
PM 6	2,88	0,58	8,53	13,35	2,53	29,28	1051,00	1325,00	DLD	9,99	2325,00
PM 7	0,22	0,62	11,40	16,38	2,09	21,48	864,00	325,00	DLD	9,46	1723,00
T 1	0,88	0,14	0,65	0,75	0,05	0,12	11,89	260,00	DLD	2,82	207,00
T 2	12,50	5,89	21,90	27,05	DLD	DLD	23,70	DLD	DLD	3,79	41,00
M 1	21,45	0,83	4,25	9,45	1,84	22,00	510,00	2075,00	30,00	20,43	1772,00
M 2	7,85	4,62	13,68	30,00	6,50	247,00	28570,0	3100,00	49,00	319,80	4850,00
M 3	4,23	2,51	27,58	19,00	5,48	52,50	2343,5	2550,00	33,00	44,38	5025,00
CLASE A	200		200	100	0,5	0,3	50	50	5	50	200
CLASE D	200		400	150	1	1	100	1000	5	100	5000
Valores que se encuentran por encima del valor máximo permisible, clase "D"											
(DLD) Valor que se encuentra por debajo del límite de detección del equipo.											

Fuente: Elaboración propia en base a resultados obtenidos en laboratorio.

Tabla N° 27: Resultados del análisis químico, 2° Campaña de Muestreo.

Punto de Muestreo N°	Parámetros analizados										
	Na mg/L	K mg/L	Ca mg/L	Mg mg/L	Mn mg/L	Fe mg/L	As µg/L	Cu µg/L	Cd µg/L	Pb µg/L	Zn µg/L
PM 1	0,32	0,31	3,40	1,81	0,06	1,45	22,29	DLD	DLD	6,06	63,00
PM 2	0,40	0,32	3,85	1,95	0,07	1,39	14,25	DLD	DLD	4,04	82,00
PM 3	0,84	0,97	7,36	6,50	0,79	16,00	1128,50	1225,00	DLD	8,40	1095,00
PM 4	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
PM 5	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
PM 6	0,71	0,69	6,36	5,25	0,54	10,50	525,75	1325,00	DLD	15,91	848,00
PM 7	0,96	0,90	8,73	8,00	0,44	8,56	287,75	325,00	DLD	26,43	598,00
T 1	0,55	0,14	1,55	0,65	0,02	DLD	10,81	DLD	DLD	2,28	36,00
T 2	0,67	1,02	8,71	12,63	0,25	6,03	DLD	DLD	DLD	24,56	95,00
CLASE A	200		200	100	0,5	0,3	50	50	5	50	200
CLASE D	200		400	150	1	1	100	1000	5	100	5000
Valores que se encuentran por encima del valor máximo permisible, clase "D"											
(DLD) Valor que se encuentra por debajo del límite de detección del equipo.											
(N/R) No realizado a causa de la inaccesibilidad al punto de muestreo.											

Fuente: Elaboración propia en base a resultados obtenidos en laboratorio.

Tabla N° 28: Resultados del análisis químico, 3° Campaña de Muestreo.

Punto de muestreo N°	Parámetros Analizados										
	Na mg/L	K mg/L	Ca mg/L	Mg mg/L	Mn mg/L	Fe mg/L	As µg/L	Cu µg/L	Cd µg/L	Pb µg/L	Zn µg/L
PM 1	5,88	0,30	2,98	1,37	0,01	0,01	10,98	DLD	DLD	17,94	46,00
PM 2	2,50	0,41	4,34	1,83	0,03	DLD	4,89	DLD	DLD	1,24	36,00
PM 3	14,60	0,68	16,25	14,20	3,62	53,90	2164,50	525,00	DLD	10,91	2817,00
PM 4	17,85	0,67	15,15	13,55	3,44	50,75	1891,50	438,00	DLD	9,52	2588,00
PM 5	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
PM 6	13,25	0,65	10,59	7,83	1,61	18,86	791,75	1613,00	DLD	6,14	1398,00
PM 7	12,65	0,74	12,09	11,56	1,12	11,54	551,25	338,00	DLD	5,52	990,00
T 1	0,48	0,46	1,78	1,89	0,19	0,22	26,37	338,00	DLD	6,30	443,00
T 2	16,35	1,11	16,76	18,25	0,03	DLD	DLD	DLD	DLD	1,81	94,00
CLASE A	200		200	100	0,5	0,3	50	50	5	50	200
CLASE D	200		400	150	1	1	100	1000	5	100	5000
Valores que se encuentran por encima del valor máximo permisible, clase "D"											
(DLD) Valor que se encuentra por debajo del límite de detección del equipo.											
(N/R) No realizado a causa de la inaccesibilidad al punto de muestreo.											

Fuente: Elaboración propia en base a resultados obtenidos en laboratorio.

Tabla N° 29: Resultados del análisis químico, 4° Campaña de Muestreo.

Punto de Muestreo N°	Parámetros Analizados										
	Na mg/L	K mg/L	Ca mg/L	Mg mg/L	Mn mg/L	Fe mg/L	As µg/L	Cu µg/L	Cd µg/L	Pb µg/L	Zn µg/L
PM 1	10,97	0,32	5,98	1,74	0,01	DLD	16,61	DLD	DLD	1,49	40,00
PM 2	8,73	0,40	5,92	2,28	0,02	DLD	3,41	DLD	DLD	0,45	22,00
PM 3	14,90	0,91	17,68	16,25	4,88	71,05	2360,50	1075,00	DLD	17,60	3517,00
PM 4	0,52	0,86	17,77	15,58	4,63	63,25	2142,00	950,00	DLD	12,71	3433,30
PM 5	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
PM 6	11,45	0,71	12,07	10,42	2,13	28,00	950,75	1490,00	DLD	7,99	1900,00
PM 7	14,35	0,96	15,24	14,00	1,41	20,00	770,25	1020,00	DLD	15,97	1253,00
T 1	0,29	0,55	2,73	2,28	0,19	0,05	19,95	700,00	DLD	2,91	446,00
T 2	19,55	0,67	21,03	23,88	0,02	DLD	DLD	DLD	DLD	6,27	122,00
CLASE A	200		200	100	0,5	0,3	50	50	5	50	200
CLASE D	200		400	150	1	1	100	1000	5	100	5000
Valores que se encuentran por encima del valor máximo permisible, clase "D"											
(DLD) Valor que se encuentra por debajo del límite de detección del equipo.											
(N/R) No realizado a causa de la inaccesibilidad al punto de muestreo.											

Fuente: Elaboración propia en base a resultados obtenidos en laboratorio.

6.2.1. Sodio

Como se puede apreciar, en el gráfico de la Figura 16, panel a), en ambas épocas de muestreo los valores de los análisis no superan los 20 mg/L de sodio sabiendo que el límite de la clase "A" de la Ley 1333 es de 200mg/L de concentración de sodio, se concluye que el aporte de sodio no es significativo puesto que todos los puntos a lo largo del río se encuentran por debajo de los límites de la Ley 1333.

6.2.2. Potasio

Las gráficas que reflejan los valores de potasio Figura 16, panel b), en ambas épocas seca y húmeda, no presentan límites de ninguna clase, esto se debe a que no se cuentan con valores máximos admisibles en el RMCH, por lo tanto sólo podemos hacer notar las bajas concentraciones y como se incrementan a partir del punto PM3 al PM7, esto puede deberse a la actividad minera, manteniéndose casi constante ésta subida tanto en época seca y húmeda donde la concentración de potasio no supera los 1.5mg/L .

6.2.3. Calcio

El comportamiento de calcio reflejado Figura 16, panel c), muestra un incremento en su concentración en época seca (1° y 4° campaña de muestreo) en relación con la época húmeda (2° y 3° campaña de muestreo), pese a éste incremento, la concentración de calcio más alta es de 23.63 mg/L que no supera los límites del RMCH de la Ley 1333 sabiendo que el valor límite es de 200mg/L.

6.2.4. Magnesio

En la Figura 16, panel d), podemos ver los valores encontrados de Mg, tanto en época seca como húmeda, se encuentran muy por debajo de los límites de la clase "A" establecidos por la Ley (100 mg/L), a la vez coinciden con la denominación de aguas blandas de la tabla N° 25.

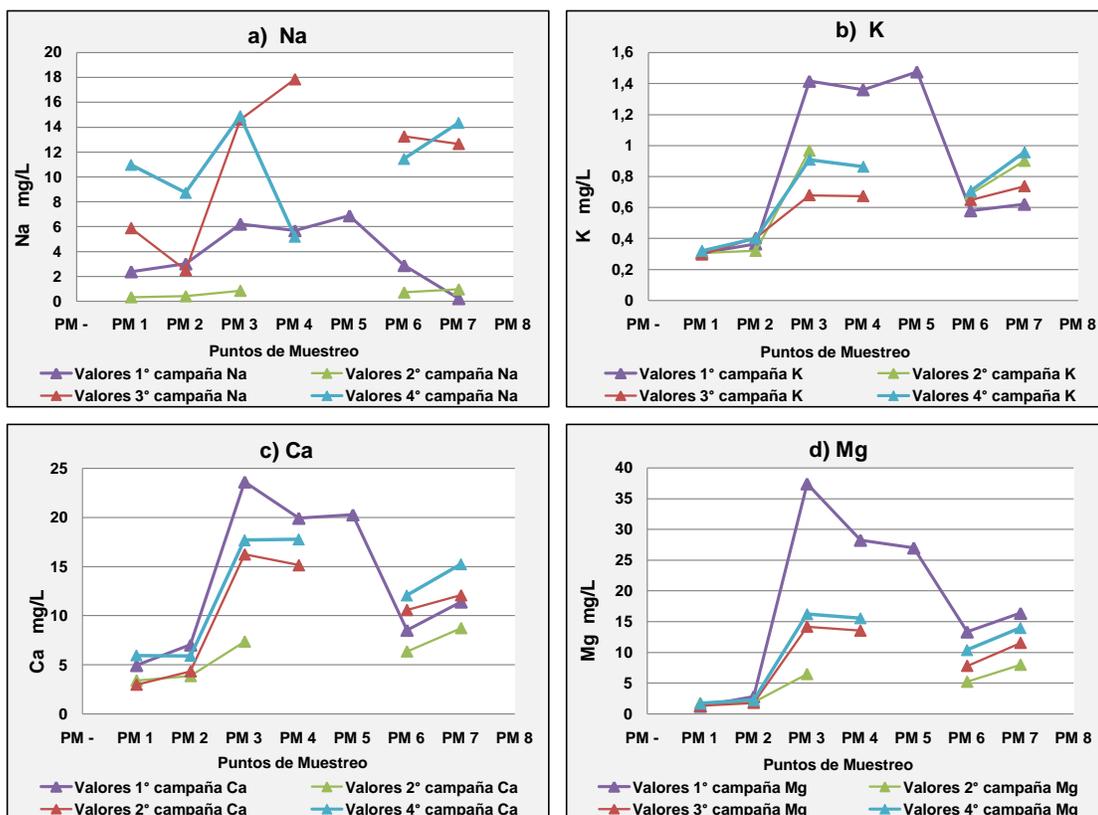


Figura 16: Comportamiento de las concentraciones de; Na, K, Ca y Mg vs puntos de muestreo, en las cuatro campañas de muestreo (elaboración propia).

6.2.5. Manganeso

En la Figura 17 vemos que los valores obtenidos de Mn, en época seca y húmeda, en los puntos PM 1 y PM2, son inferiores al límite Clase "A", 0,5 mg/L, en cambio los valores de concentración de Mn en los puntos PM 3, PM 4, PM 5, PM 6, y PM 7, en época seca son críticas, esto puede deberse a la intensa actividad minera que hay en esta zona siendo el pH altamente ácido, que favorece a que éste elemento se encuentre en solución, ocasionando que la concentración de Mn se encuentre por encima del límite de la clase "D" 1 mg/L. Al mismo tiempo podemos ver que en la 2° campaña de muestreo, época húmeda, la concentración de Mn disminuye y se encuentra por debajo del límite de la clase "D", esto es posible por el incremento de caudal en el río en estas fechas por efecto de las lluvias, en cambio en la 3° campaña, también en época húmeda, la concentración de Mn incrementa nuevamente esto puede ser

ocasionado por la disminución del caudal del río durante ésta campaña. En época seca hay presencia significativa de Mn y en época húmeda disminuye la concentración sustancialmente.

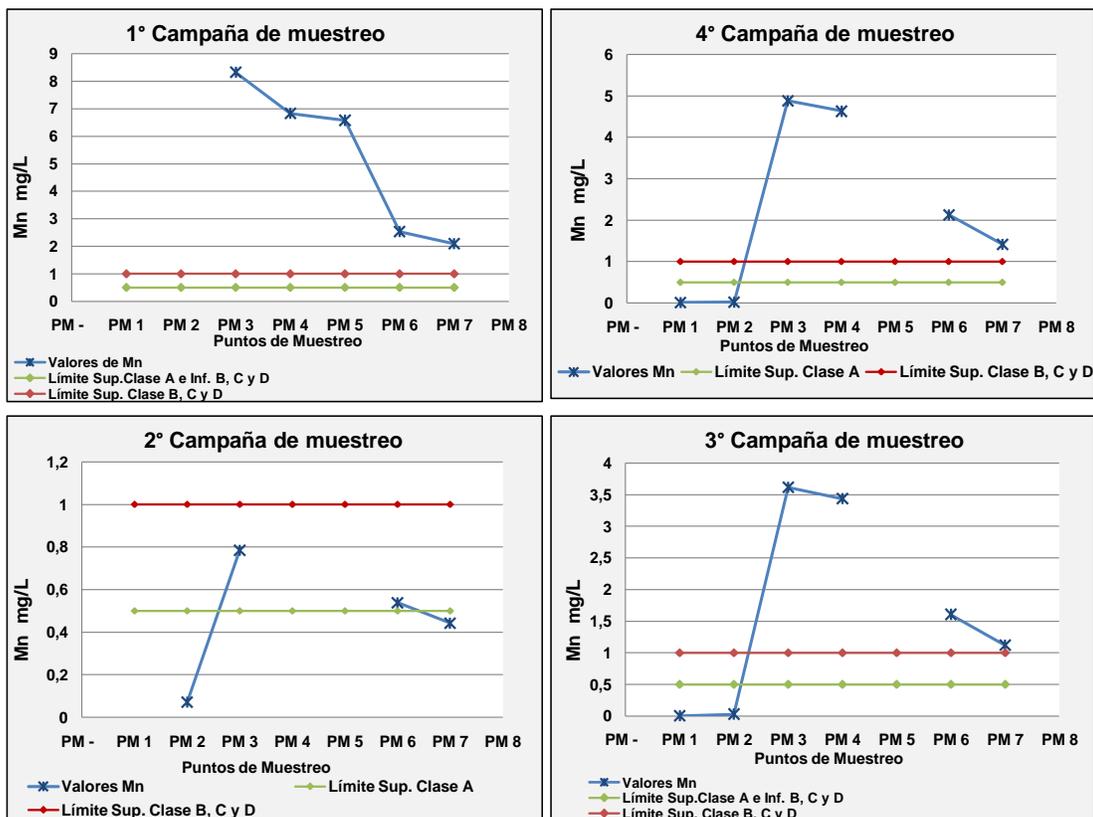


Figura 17: Comportamiento de la concentración de Mn vs puntos de muestreo; época seca 1° y 4° campaña de muestreo, época húmeda 2° y 3° campaña de muestreo (elaboración propia).

6.2.6. Hierro

En la Figura 18 se observa las gráficas de la época seca, podemos ver que la concentración de Fe, en los puntos PM 1 y PM 2, está por debajo del límite de la clase “D”, 1 mg/L en cambio los puntos PM 3, PM 4 y PM 5 de ésta época, muestran concentraciones de Fe críticas que se encuentran por encima de la clase “D”. Estas concentraciones críticas de hierro pueden ser producto de la oxidación de piritas que se da en medios ácidos, asimismo en los dos últimos puntos PM 6 y PM 7 la

concentración de Fe disminuye a causa de la precipitación de éste elemento como Fe(III) en sus distintas formas, posiblemente schwerimannita y jarrosita.

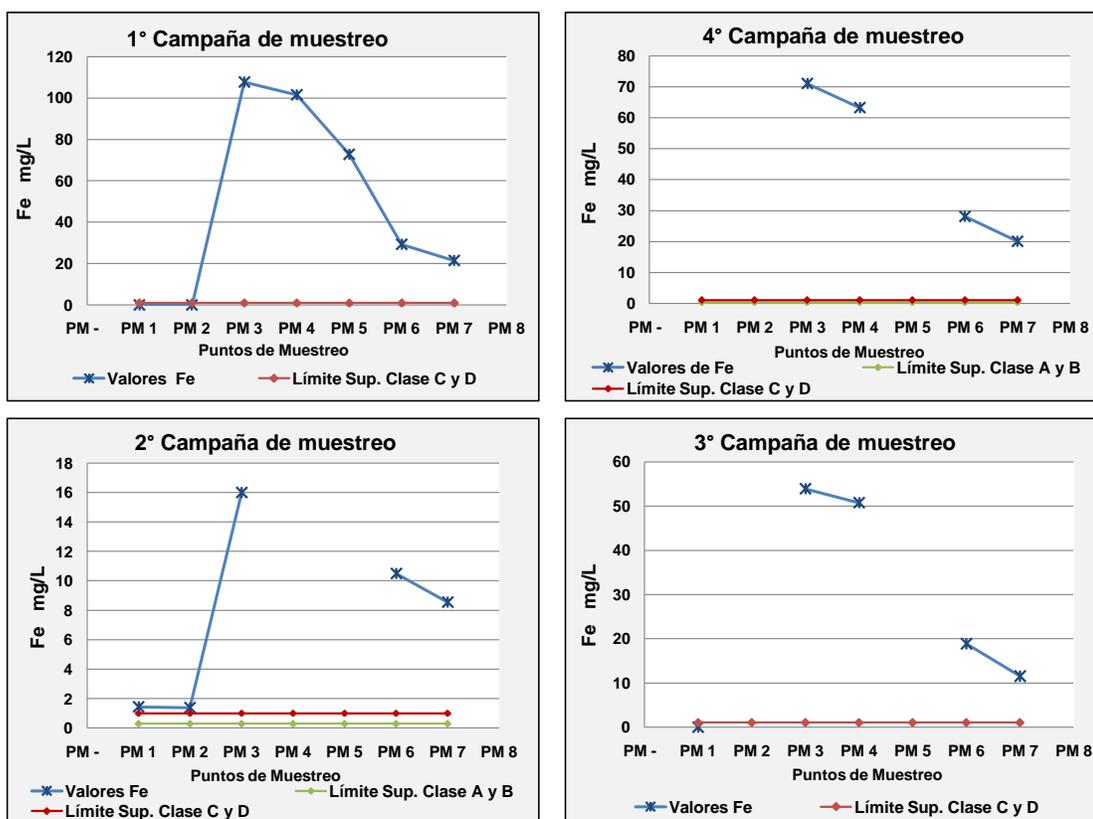


Figura 18: Comportamiento de la concentración de Fe vs puntos de muestreo; época seca 1° y 4° campaña de muestreo, época húmeda 2° y 3° campaña de muestreo (elaboración propia).

En época húmeda, debemos resaltar que los puntos PM 1 y PM 2 tienen valores inferiores a límite de la clase “A” de la Ley y solo en la 2° campaña de muestreo presentan valores superiores a la clase “D”, esto podría ser causa de la movilización y transporte de este elemento, desde su lugar de origen, mediante el agua que proviene del escurrimiento superficial, ya que esta campaña es la más significativa de la época húmeda. Pese al efecto de dilución de esta época los valores de hierro en los puntos PM 3, PM 4, PM 5, PM 6, y PM 7 están por encima de la clasificación “D” 1 mg/L del reglamento y muestran un comportamiento paralelo al de la época seca.

6.2.7. Arsénico

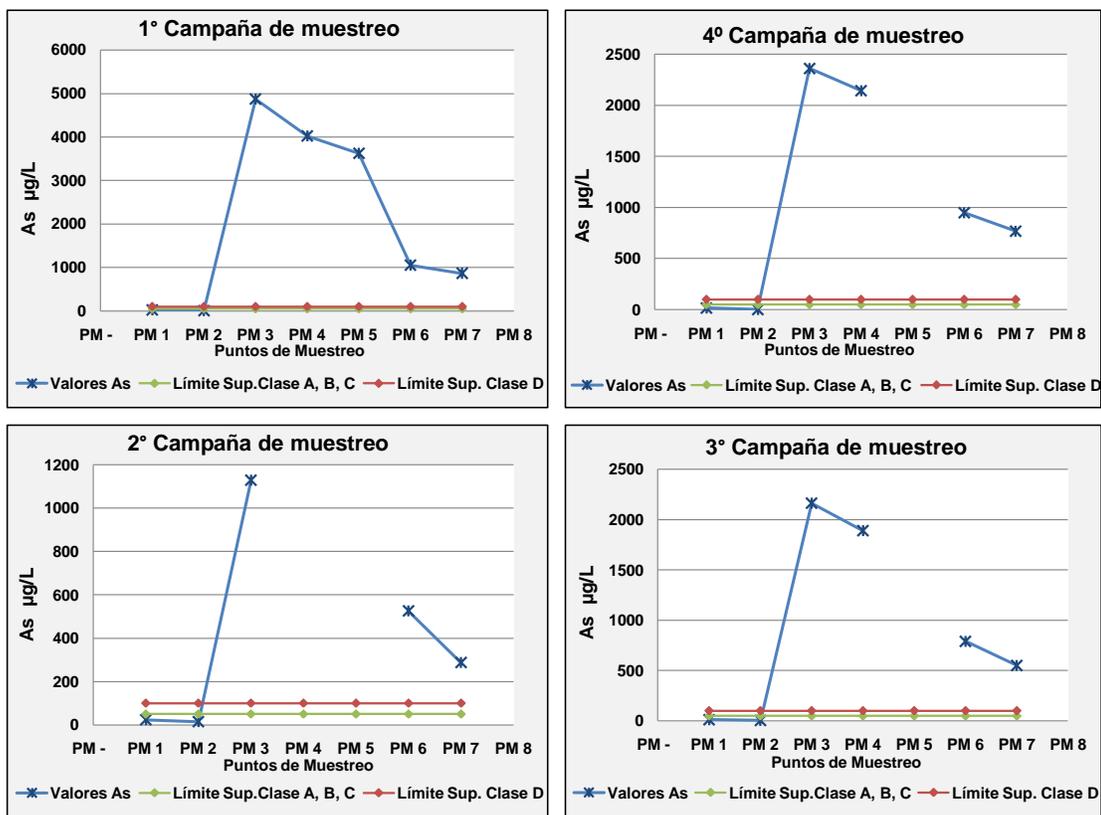


Figura 19: Comportamiento de la concentración de As vs puntos de muestreo; época seca 1° y 4° campaña de muestreo, época húmeda 2° y 3° campaña de muestreo (elaboración propia).

Las detecciones en los análisis de arsénico se realizaron a nivel traza por lo que los valores se expresan en µg/L, (ppb). En los puntos PM 1 y PM 2 los valores obtenidos son inferiores a los límites de la clase "A" 50 µg/L tanto en época seca y húmeda, a diferencia de los valores obtenidos de los puntos PM 3, PM 4 y PM 5 que en ambas épocas presentan valores de concentración críticos y están por encima de la clase "D" 100 µg/L del reglamento. Estas cantidades excesivas de arsénico pueden ser el resultado de la oxidación de arsenopiritas, acelerada por las actividades mineras que se realizan antes de estos puntos, ya que la disolución de estos sulfuros ricos en arsénico libera elevadas concentraciones de este elemento en medio ácido. Sin embargo existe una disminución en la concentración de arsénico en los puntos PM 6 y PM 7 debido a que éste elemento es coprecipitado por minerales secundarios de Fe(III) produciendo

un proceso natural de atenuación de arsénico, sin embargo la concentración en estos puntos continua por encima de la clase “D” siendo crítica aún.

6.2.8. Cobre

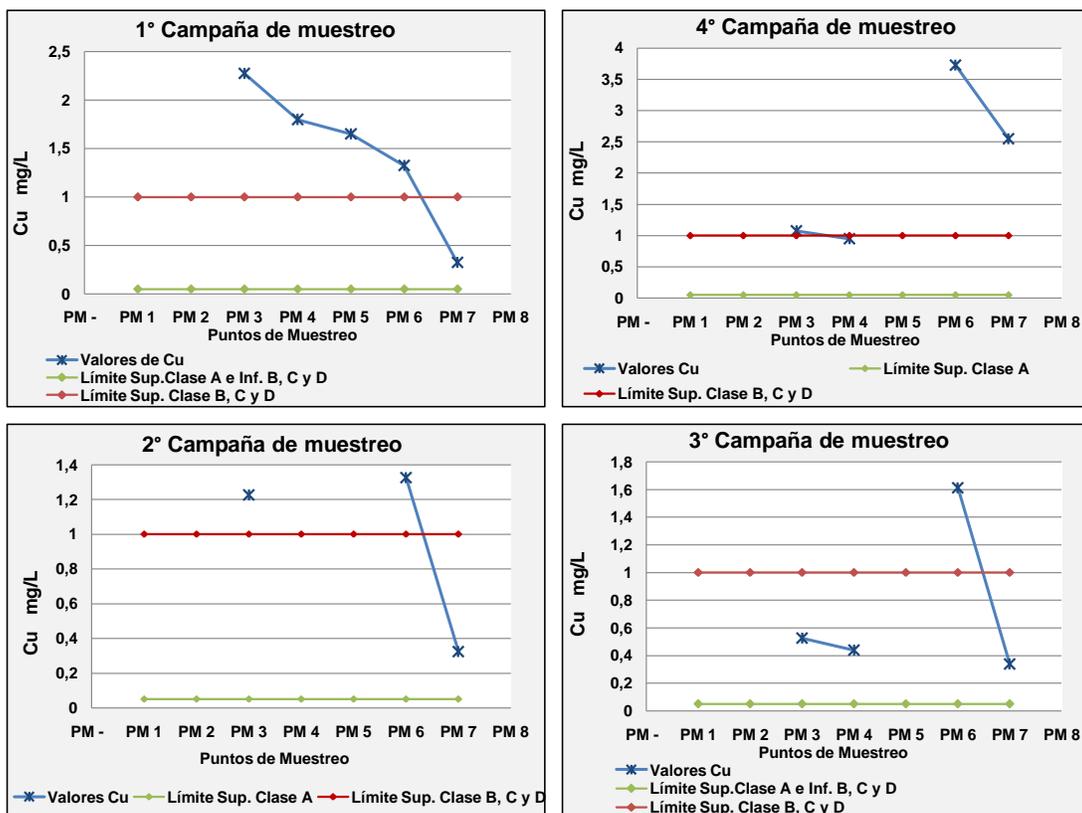


Figura 20: Comportamiento de la concentración de Cu vs puntos de muestreo; época seca 1° y 4° campaña de muestreo, época húmeda 2° y 3° campaña de muestreo (elaboración propia).

Como se puede observar en la Figura 20, el comportamiento de la concentración de cobre es variado tanto en época seca y húmeda, pero se mantiene constante en los puntos PM 1 y PM 2 los cuales son inferiores al límite de la clase “A” 0,05 mg/L, a diferencia de los puntos PM3, PM4 y PM 6, que se encuentran por encima de la clase “D” 1,0 mg/L, podemos observar también un descenso de la concentración en el punto PM 7 este descenso hace que este dentro de la clase “B” 1,0 mg/L, este descenso puede deberse a la dilución que ocasiona el aporte del río Kollpa que se encuentra entre el punto PM 6 y el PM 7.

6.2.9. Plomo

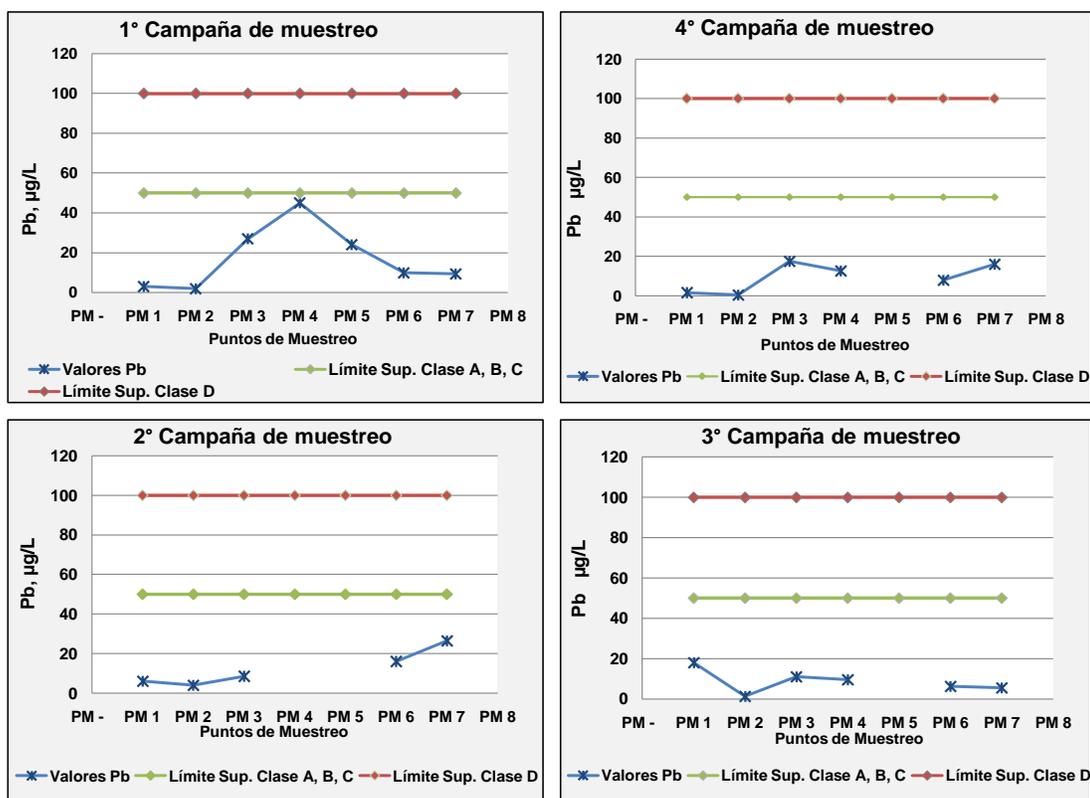


Figura 21: Comportamiento de la concentración de Pb vs puntos de muestreo; época seca 1° y 4° campaña de muestreo, época húmeda 2° y 3° campaña de muestreo (elaboración propia).

Como se puede observar en la Figura 21, las concentraciones de Pb presentan un comportamiento variable tanto en época seca como húmeda, pese a este comportamiento los valores obtenidos están por debajo del límite establecido por la clase "A" 0,05 mg/L del reglamento.

6.2.10. Cadmio

En la determinación de las concentraciones de cadmio en épocas seca y húmeda se obtuvieron valores inferiores al límite de detección del equipo (0.03 mg/L), los únicos puntos que están por encima del límite de detección son; PM3 y PM4 de la 1° campaña de muestreo (Figura 22). Ambos valores son críticos al estar muy por encima de la clase "D" 0,005mg/L del RMCH y se encuentran ubicados después de la mina Sayaquira.

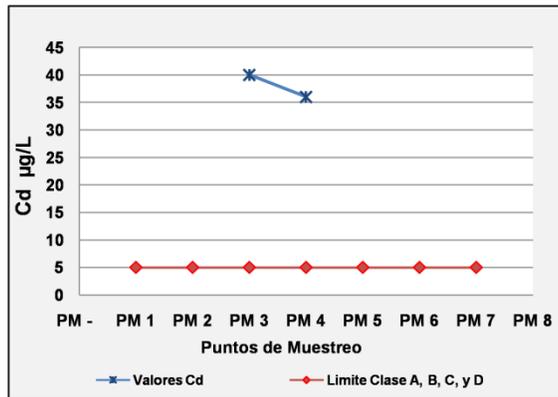


Figura 22: Comportamiento de la concentración de Cd vs puntos de muestreo, durante la 1° campaña de muestreo.

6.2.11. Zinc

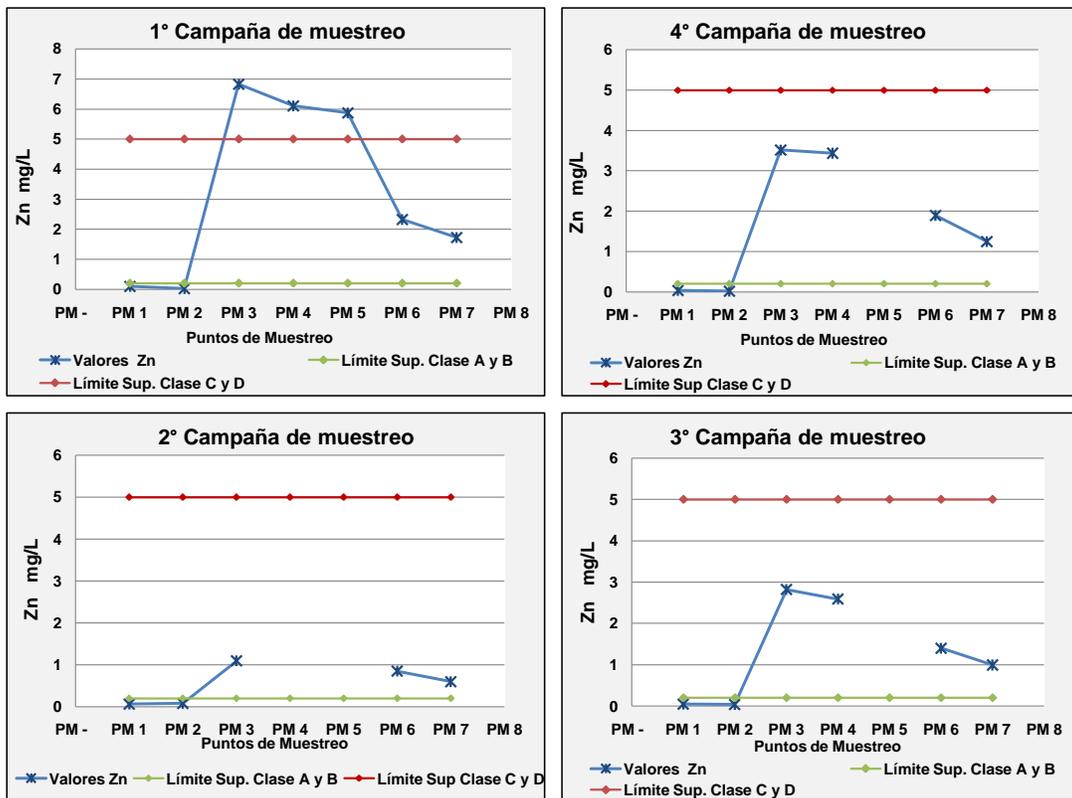


Figura 23: Comportamiento de la concentración de Zn vs puntos de muestreo; época seca 1° y 4° campaña de muestreo, época húmeda 2° y 3° campaña de muestreo (elaboración propia).

En los gráficos de la Figura 23, vemos a los puntos PM 1 y PM 2 por debajo del límite de la clase “A” 0,2 mg/L tanto en época seca como húmeda pero podemos observar que en época seca la concentración de Zn se incrementa superando los límites del reglamento, en los puntos PM 3, PM 4 y PM 5 de la 1° campaña, en la época húmeda los valores de concentración, en los puntos PM 3 PM 4, PM 5, PM6, y PM 7, disminuyen y se encuentran dentro de la clase “C” 0,5 mg/L y “D” 5 mg/L.

6.3. Resultados del análisis de Aniones mayoritarios, Acidez y Dureza

Tabla N° 30: Resultados, 1° Campaña de Muestreo.

Punto de Muestreo	SO ₄ ⁻² mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	Cl ⁻ mg/L	Dureza Ca + Mg mg/L	Acidez mg CO ₃ Ca /L
PM 1	13,29	17,92	0,98	17,53	10,56
PM 2	17,80	17,87	0,98	29,18	9,60
PM 3	179,05	47,32	2,65	213,11	294,47
PM 4	167,80	47,25	2,35	166,13	229,85
PM 5	145,27	46,18	0,80	161,81	176,94
PM 6	190,32	46,34	0,65	76,26	160,95
PM 7	156,53	44,55	0,85	95,90	97,59
T 1	6,53	17,63	1,96	4,69	25,92
T 2	65,09	17,71	0,40	166,08	
M 1	89,87	19,70	0,55	49,53	86,18
M 2	156,53	19,80	2,55	157,69	146,33
M 3	88,96	19,97	2,45	147,10	164,79
CLASE A	300	20	250		
CLASE D	400	50	500		

Fuente: Elaboración propia en base a valores obtenidos en laboratorio.

Tabla N° 31: Resultados, 2° Campaña de Muestreo.

Punto de Muestreo	SO ₄ ²⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	Cl ⁻ mg/L	Dureza Ca + Mg mg/L	Acidez mg CO ₃ Ca /L
PM 1	40,15	0,62	0,93	15,94	3,50
PM 2	48,29	0,51	0,96	17,64	4,00
PM 3	123,43	0,82	3,74	45,15	63,50
PM 4	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
PM 5	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
PM 6	77,96	0,72	5,14	37,50	25,50
PM 7	101,41	0,75	5,14	54,74	4,50
T 1	0,10	0,23	1,87	6,56	6,50
T 2	154,53	1,56	6,07	73,73	
CLASE A	300,00	20,00	250,00		
CLASE D	400,00	50,00	500,00		
(N/R) No realizado a causa de la inaccesibilidad al punto de muestreo.					

Fuente: Elaboración propia en base a valores obtenidos en laboratorio.

Tabla N° 32: Resultados, 3° Campaña de Muestreo.

Punto de Muestreo	SO ₄ ²⁻ mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	Cl ⁻ mg/L	Dureza Ca+ Mg mg/L	Acidez mg CO ₃ Ca /L
PM 1	33,45	0,21	0,90	13,05	3,08
PM 2	33,79	0,28	0,98	18,36	5,13
PM 3	318,97	2,77	3,07	99,05	164,00
PM 4	362,07	2,55	3,30	93,63	180,40
PM 5	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
PM 6	137,07	1,08	5,54	58,70	70,73
PM 7	206,04	0,87	3,71	77,79	19,48
T 1	67,42	0,24	1,84	12,21	46,13
T 2	73,28	0,31	6,64	117,01	
CLASE A	300,00	20,00	250,00		
CLASE D	400,00	50,00	500,00		
(N/R) No realizado a causa de la inaccesibilidad al punto de muestreo.					

Fuente: Elaboración propia en base a valores obtenidos en laboratorio.

Tabla N° 33: Resultados, 4° Campaña de Muestreo.

Punto de Muestreo	SO ₄ ⁻² mg/L	NO ₃ ⁻ mg/L	Cl ⁻ mg/L	Dureza Ca + Mg mg/L	Acidez mg CO ₃ Ca /L
PM 1	24,29	0,05	1,15	22,11	
PM 2	24,76	0,05	1,09	24,16	
PM 3	797,60*	0,91	3,16	111,05	247,00
PM 4	608,33*	0,83	2,92	108,54	250,00
PM 5	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
PM 6	497,63*	0,06	0,91	73,02	167,20
PM 7	607,15*	0,83	1,14	95,70	133,00
T 1	141,43	0,05	2,35	16,19	29,45
T 2	105,71	0,19	0,42	150,82	
CLASE A	300,00	20,00	250,00		
CLASE D	400,00	50,00	500,00		
(*) Valores que se encuentran por encima del valor máximo permisible, clase "D"					
(N/R) No realizado a causa de la inaccesibilidad al punto de muestreo.					

Fuente: Elaboración propia en base a valores obtenidos en laboratorio.

6.3.1. Sulfatos

Los valores obtenidos de SO₄⁻², reflejados en la Figura 24, en los puntos PM 1 y PM 2 de ambas épocas, se encuentran por debajo del límite de la clase "A" 300 mg/L. Vemos también que los demás puntos PM 3 al PM 7, tienen un comportamiento variado en ambas épocas y solo la concentración de sulfatos en los puntos PM 3, PM 4, PM 6 y PM 7 de la 4° campaña, están por encima del límite de la clase "D" 400 mg/L.

Se esperaba mayores concentraciones de sulfato en todas las campañas ya que este anión proviene de la oxidación de piritas y arsenopiritas, acelerada por actividades mineras. Este comportamiento podría deberse a que una parte precipita como hidroxisulfatos de hierro.

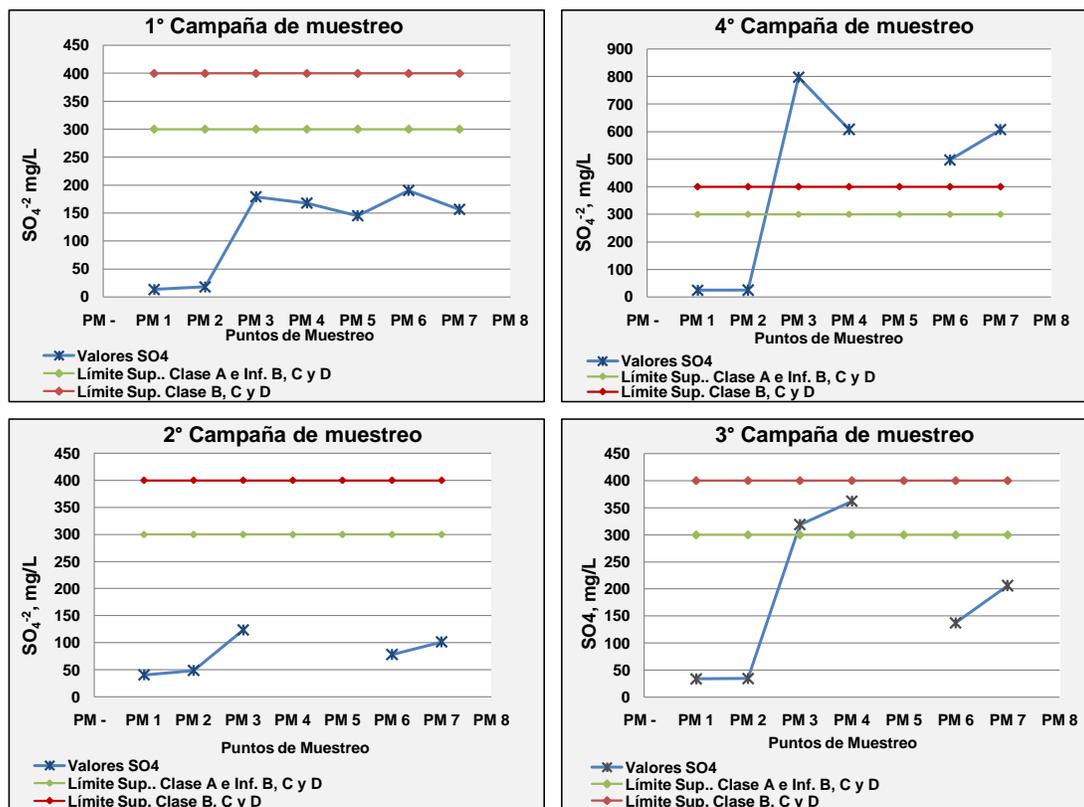


Figura 24: Comportamiento de la concentración de SO_4^{2-} vs puntos de muestreo; época seca 1° y 4° campaña de muestreo, época húmeda 2° y 3° campaña de muestreo (elaboración propia).

6.3.2. Nitratos

Como se puede apreciar, en la Figura 25 panel a), la época seca (1° y 4° campaña de muestreo) presenta un comportamiento variable tanto que en la 1ª campaña de muestreo las concentraciones de NO_3^- en los puntos PM1 y PM2 difieren con un promedio de 17.84 mg/L, pese a esta diferencia estos puntos no superan los límites de la clase "A" 20 mg/L, también podemos notar que los valores de la 1ª campaña de muestreo en los puntos PM3 al PM 7 se encuentran dentro de la clase B,C y D del RMCH lo cual no se repite en la 4ª campaña de muestreo, más al contrario no superan los 1 mg/l de NO_3^- .

En la época húmeda los valores obtenidos de NO_3^- no superan los 3 mg/l por lo que se encuentran por debajo del límite de la clase "A".

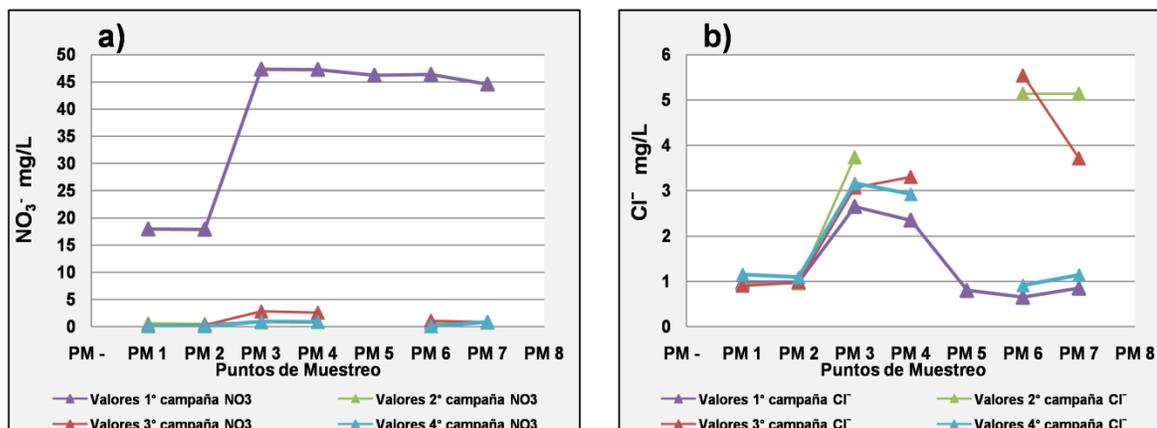


Figura 25: Panel a) resultados NO₃⁻ 1°, 2°, 3° y 4° campaña de muestreo, panel b) resultados Cl⁻, 1°, 2°, 3° y 4° campaña de muestreo (elaboración propia).

6.3.3. Cloruros

Como se puede apreciar en los gráficos obtenidos, Figura 25 panel b), la concentración de Cloruros tanto en época seca y húmeda no superan los 6 mg/l por lo que se encuentra por debajo del límite de la clase “A” del RMCH de la Ley 1333 (250 mg/L), estos valores obtenidos son característicos de aguas de tierras altas y montañas.

Mediante el programa Aquachem, realizamos una clasificación del cuerpo de agua según el contenido de aniones y cationes como: SO₄⁻², NO₃⁻, Cl⁻, Na, Ca y Mg presentes, esta clasificación se encuentra en la siguiente tabla:

Tabla N° 34: Clasificación del cuerpo de agua estudiado.

Punto de Muestreo	Época Seca		Época Húmeda	
	1º Campaña	4º Campaña	2º Campaña	3º Campaña
PM 1	Na-Ca-NO ₃ ⁻ SO ₄ ⁻²	Na-Ca-SO ₄ ⁻²	Ca-SO ₄ ⁻²	Na-SO ₄ ⁻²
PM 2	Na-Ca-Mg-NO ₃ ⁻ SO ₄ ⁻²	Na-Ca-Mg-SO ₄ ⁻²	Ca-SO ₄ ⁻²	Ca-SO ₄ ⁻²
PM 3	Mg-Ca-SO ₄ ⁻²	SO ₄ ⁻²	Mg-SO ₄ ⁻²	Mg-SO ₄ ⁻²
PM 4	Mg-Ca-SO ₄ ⁻²	SO ₄ ⁻²		Mg-SO ₄ ⁻²
PM 5	Mg-Ca-SO ₄ ⁻²			
PM 6	Mg-SO ₄ ⁻²	SO ₄ ⁻²	Ca-Mg-SO ₄ ⁻²	Na-Ca-Mg-SO ₄ ⁻²
PM 7	Mg-SO ₄ ⁻²	SO ₄ ⁻²	Ca-Mg-SO ₄ ⁻²	Mg-SO ₄ ⁻²
T 1	NO ₃ ⁻ -SO ₄ ⁻²	SO ₄ ⁻²	Ca-Cl	SO ₄ ⁻²
T 2	Ca-Mg	Na-Ca-Mg-SO ₄ ⁻²	Mg-SO ₄ ⁻²	Mg-Na-Ca-SO ₄ ⁻²

Fuente: Elaboración propia mediante programa Aquachem versión 4.0, en base a datos de concentraciones de aniones y cationes ingresados en éste programa.

6.4. Diagramas Ternarios

Mediante la utilización de diagramas ternarios, se representan las agrupaciones geoquímicas conforme a los resultados de las Tablas 26, 27, 28 y 29, basándonos en la afinidad de elementos químicos de las fases fundamentales que componen la tierra, mismas que se describen en la Tabla N° 1 Anexo B. Las cantidades de Cu, As y Zn provenientes de la meteorización, erosión, transporte y deposición de material sedimentario están influenciadas por el ambiente físico-químico que presenta el cuerpo de agua estudiado. Esta asociación de dos o tres elementos químicos, de un grupo o subgrupo, es un factor muy importante en estudios del medio ambiente ya que un elemento asociado geoquímicamente con un elemento principal en un mineral puede ser un contaminante peligroso para el ser humano aunque el elemento principal no lo sea.

6.4.1. Cu-As-Zn En la 1° campaña de muestreo

En la figura 26, podemos observar la distribución de los puntos PM 3, PM 4, PM 5, PM 6 y PM 7 muy cerca de los ejes Zn-As y Zn-Cu, se observa también la presencia del punto T 1 casi sobre el eje Zn-Cu. También vemos la falta en la representación de los puntos PM 1 y PM 2, éstos no se grafican ya que la concentración de Cu que tienen ambos puntos se encuentra por debajo del límite de detección del equipo empleado.

Al mismo tiempo no existe distribución de las muestras sobre el eje Cu-As, esto se puede deber a la falta de relación geoquímica directa entre éstos dos elementos.

6.4.2. Cu-As-Zn En la 2° campaña de muestreo

En la Figura 27 de esta campaña de muestreo solo vemos los puntos PM 3, PM6 y PM 7 que se encuentran distribuidos casi en la zona central del diagrama, la falta de los demás puntos es debida a que la presencia de Cu está por debajo del límite de detección; que es el caso de los puntos PM 1, PM2, T1 y T 2. Otro factor es la falta de

accesibilidad a los puntos de muestreo por derrumbes y deslizamientos característicos de la región en época húmeda, éste es el caso de los puntos PM 4 y PM 5.

6.4.3. Cu-As-Zn En la 3° campaña de muestreo

En la Figura 28 se observan los resultados de éste muestreo, reflejando los puntos PM3, PM4 y PM7 sobre el eje de los elementos Zn-As demostrando la relación geoquímica existente entre ambos elementos. En estos puntos, vemos también los puntos PM 6 y T 1 más cerca del eje Zn-Cu.

6.4.4. Cu-As-Zn En la 4° campaña de muestreo

En los resultados de ésta campaña Figura 29 se puede observar una clara zonificación de los puntos representados en el diagrama. En la Zona A tendríamos los puntos PM 1 y PM 2 que no están representados por las bajas concentraciones de Zn y As, también porque la concentración de Cu está por debajo del límite de detección. La Zona B sería compuesta por los puntos PM 3 y PM 4 que se encuentran muy cerca del eje Zn-As, en la Zona C los puntos PM 6 y PM 7 y finalmente el punto T 1 que está sobre el eje Zn-Cu.

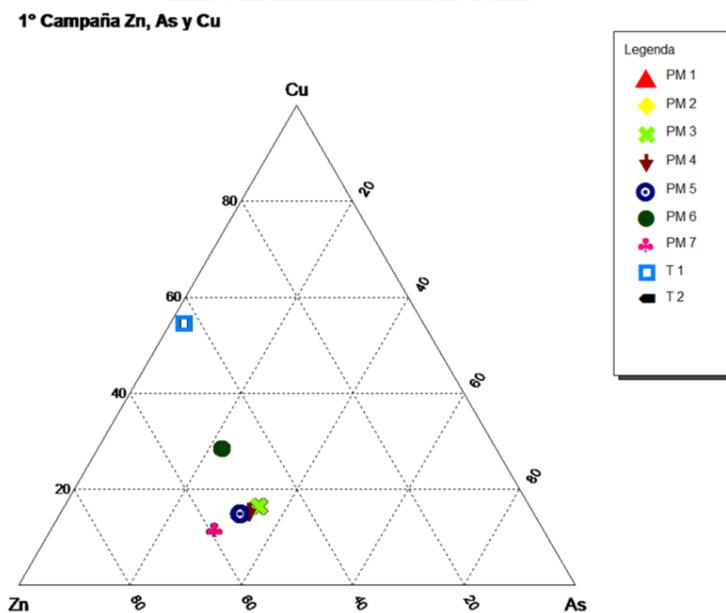


Figura 26: Diagrama Trilineal cobre-arsénico-zinc, 1° campaña de muestreo. Elaboración propia mediante programa Aquaquem versión 4.0.

2° Campaña Zn, As y Cu

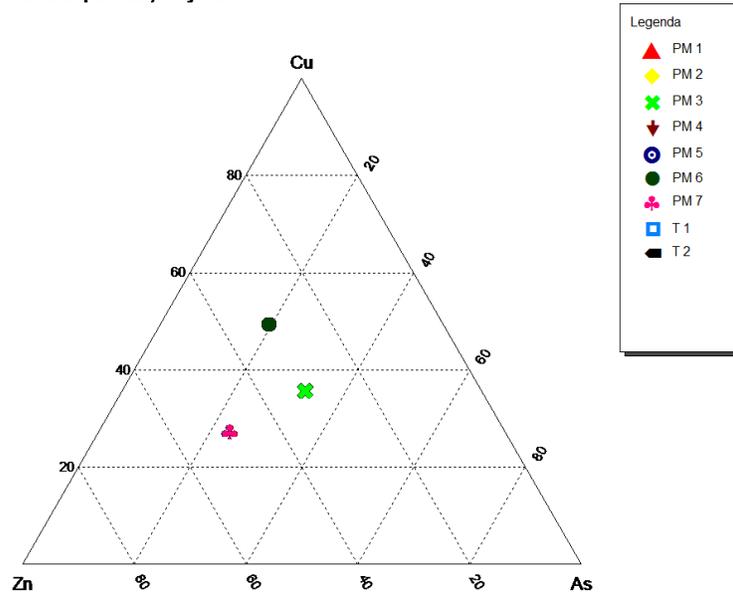


Figura 27: Diagrama Trilineal cobre-arsénico-zinc, 2° campaña de muestreo. Elaboración propia mediante programa Aquachem versión 4.0.

3° Campaña Zn, As y Cu

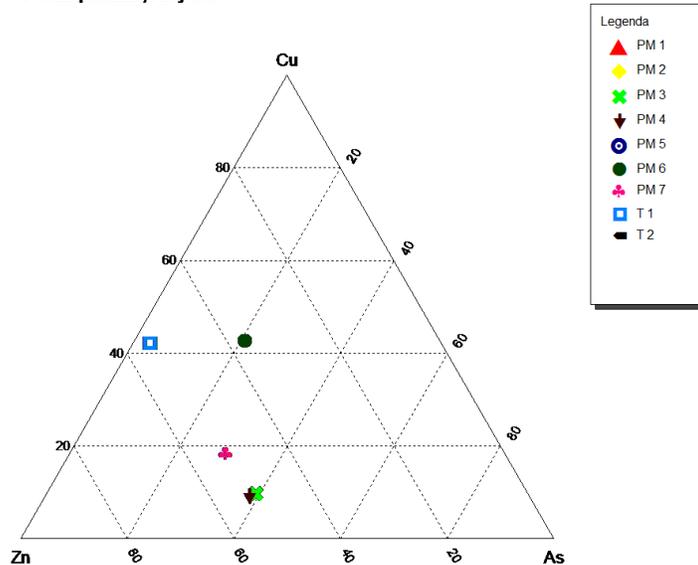


Figura 28: Diagrama Trilineal cobre-arsénico-zinc, 3° campaña de muestreo. Elaboración propia mediante programa Aquachem versión 4.0.

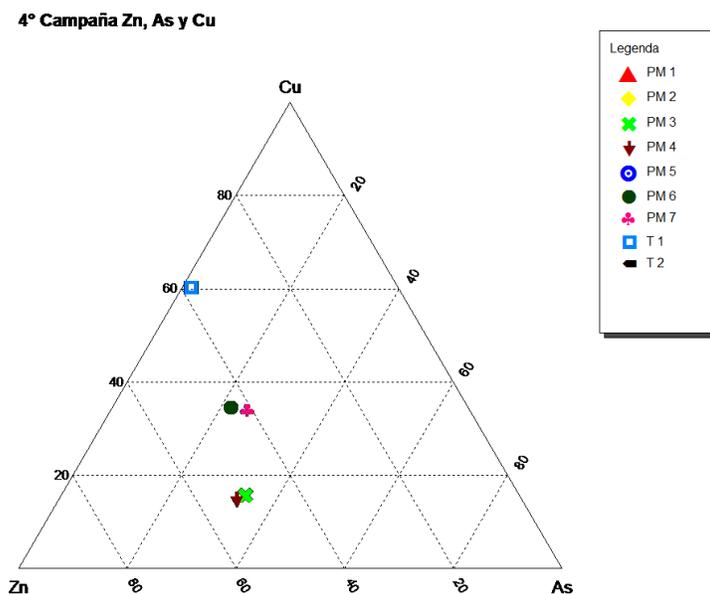


Figura 29: Diagrama Trilineal cobre-arsénico-zinc, 4° campaña de muestreo. Elaboración propia mediante programa Aquachem versión 4.0.

6.5. Relación Fe-As

Para la representación de estos iones se utilizan diagramas de Scatter, provistos por el programa AquaChem versión 4.0, haciendo referencia de la migración supergénica, con respecto al agua.

Se pueden observar diagramas confeccionados por épocas teniendo: 1° y 4° Campaña de muestreo como la Época Seca y 2° y 3° Campaña de muestreo como la Época Húmeda.

6.5.1. Época Seca

En las figuras 30 y 31 se observan los puntos PM 1 A, PM 2 A, PM 1 D y PM 2 D con un potencial por debajo de los 200 mV, un pH comprendido entre 5 a 7 y por lo tanto una baja concentración de Fe y As; en cambio en los puntos PM 3 A, PM 4 A, PM 5 A, PM 3 D y PM 4 D, que se encuentran ubicados después de la mina Sayaquira, la concentración de Fe y As aumenta de forma considerable, este fenómeno se podría

deber a las actividades mineras y su efecto ya mencionado, por otro lado se observa también que aguas abajo la concentración de Fe y As disminuye en los puntos PM 6 A, PM 7 A, PM 6 D y PM 7 D lo que se explica por el tramo del río ocasionando un efecto decantador, que tiene mayor influencia sobre elementos en suspensión y no sobre aquellos en solución y por la capacidad de retención de arsénico que tiene el hierro en sus distintas fases, también puede deberse a la dilución por escorrentía subsuperficial y subterránea que se manifiestan en época seca.

El río Tributario de ambas campañas T 1 A y T 1 D, muestran el mismo comportamiento no representando un aporte en las concentraciones de Fe y As registradas, por otro lado el río tributario T 2 no se muestra en las gráficas por tener concentraciones por debajo del límite de detección del equipo empleado.



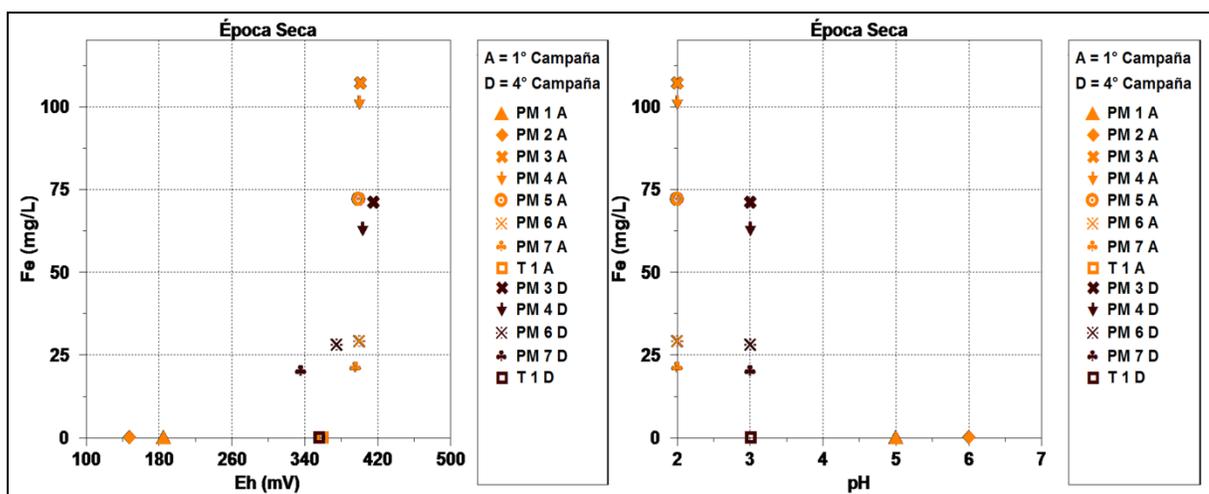


Figura 30: Diagrama Scatter: Fe vs Eh, Fe vs pH en época seca (elaboración propia).

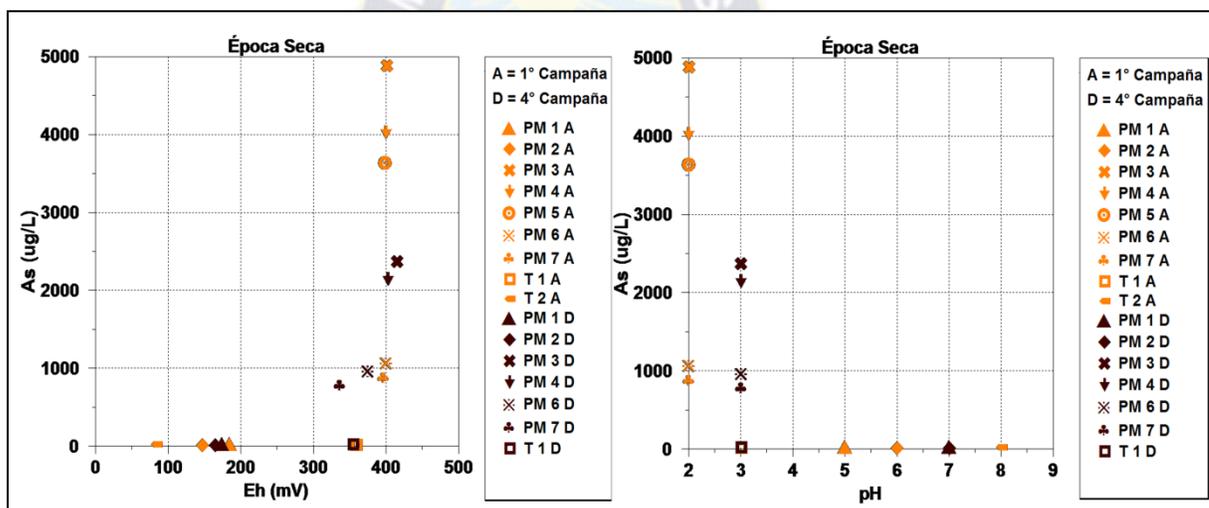


Figura 31: Diagrama Scatter: As vs Eh, As vs pH en época seca (elaboración propia).

6.5.2. Época Húmeda

En la 2ª y 3ª campaña de muestreo, comprendidos en esta época, se observa una situación algo diferente con una dispersión mayor y disminución en las concentraciones de Fe y As, este fenómeno se da a consecuencia de la dilución por escorrentía superficial y aportes de vertientes que en la época seca no se presentaban, casi todos los puntos se encuentran con concentraciones cercanas exceptuando los puntos PM 3 C y PM 4 C del tercer muestreo, que están después de la mina Sayaquira, que presentan una mayor concentración por estar cerca de la mina. Toda esta

representación de punto nos da nuevamente indicios de que podría zonificar el tramo del río Sayaquira por las concentraciones de Fe y As.

Nuevamente se ve que el río Tributario T 1 en ambas, si bien presenta un pH ácido, no aporta a las concentraciones de Fe y As además el tributario T 2 no se grafica por tener concentraciones por debajo del límite de detección.

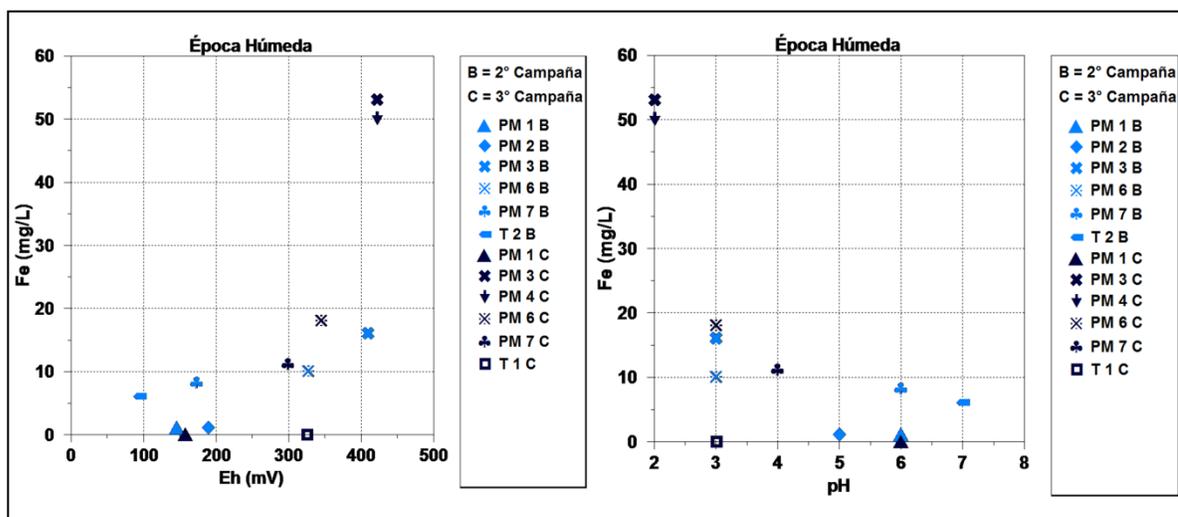


Figura 32: Diagrama Scatter: Fe vs Eh, Fe vs pH en época húmeda (elaboración propia).

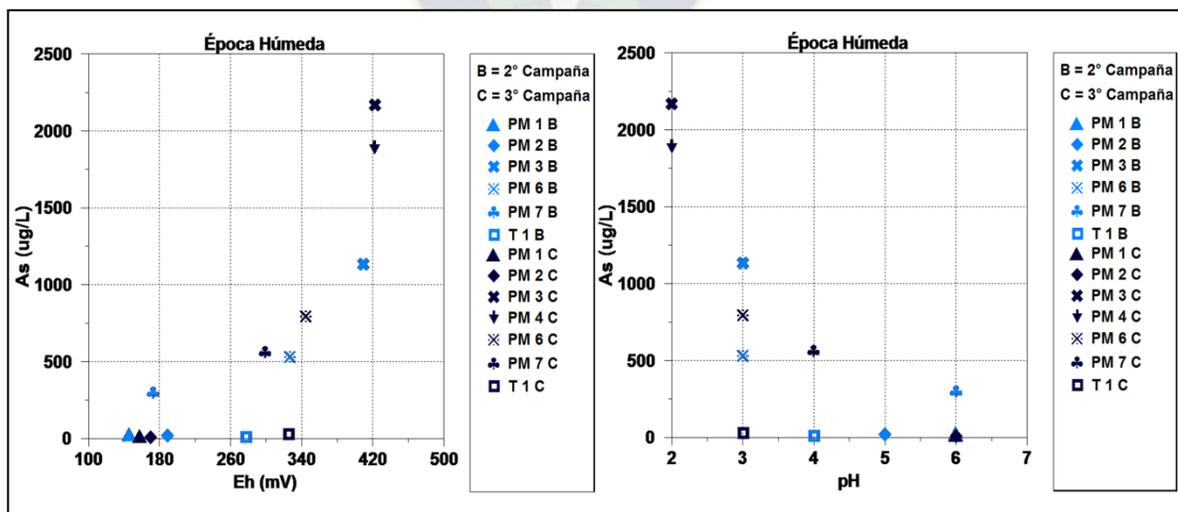


Figura 33: Diagrama Scatter: As vs Eh, As vs pH en época húmeda (elaboración propia).

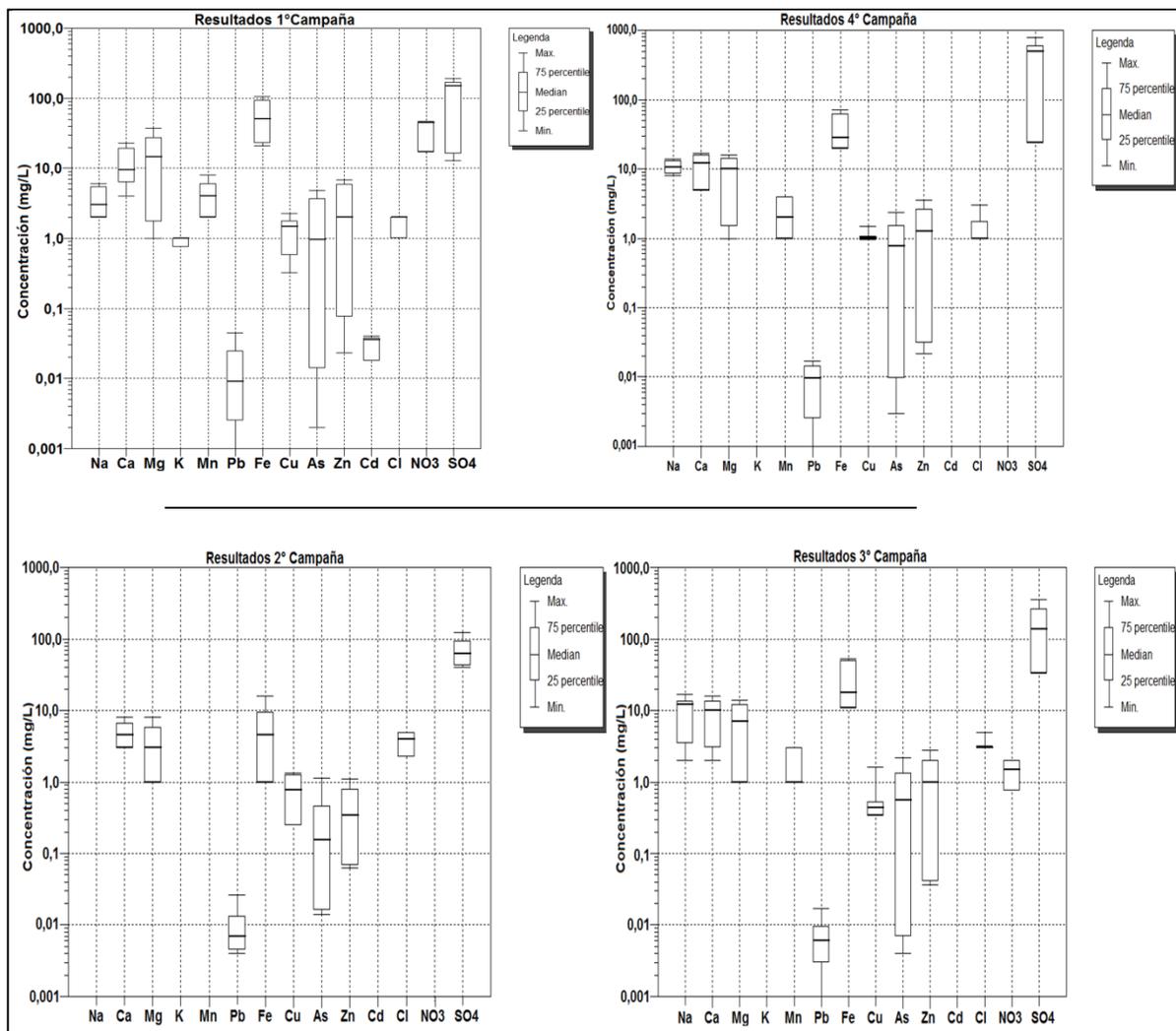


Figura 34: Diagramas (Box and Whisker): Na, Ca, Mg, K, Mn, Pb, Fe, Cu, As, Zn, Cd, Cl⁻, NO₃⁻ y SO₄⁻², 1° y 4° campaña (época seca), 2° y 3° campaña (época húmeda). Elaboración propia mediante programa Aquachem versión 4,0.

En la Figura 34 se observa que, las concentraciones de todos los parámetros determinados son mayores en época seca (1° y 4° campaña) en comparación con la época húmeda (2° y 3° campaña), esto se debe a que en época seca el caudal del río Sayaquira es mucho menor que en época húmeda.



7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

7.1. Diagnóstico de la calidad del cuerpo de agua

La discusión de los resultados, a partir de los datos de los análisis químicos y físico-químicos de las muestras de las aguas del río Sayaquira, se circunscribe a la normativa ambiental vigente descrita en el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH) de la Ley 1333 de Medio Ambiente.

En éste Reglamento, los cuerpos de agua se clasifican según su aptitud de uso y de acuerdo con las políticas ambientales del país en el marco del desarrollo sostenible de acuerdo a la Tabla N° 11 del Capítulo III.

Así mismo se consideran los artículos 6° y 7° del RMCH que indican:

ARTICULO 6° Se considera como PARÁMETROS BÁSICOS, los siguientes:

DBO5; DQO; Colifecales NMP; Oxígeno Disuelto; Arsénico Total; Cadmio; Cianuros; Cromo Hexavalente; Fosfato Total; Mercurio, Plomo; Aldrin; Clordano; Dieldrín; DDT; Endrín; Malatión; Paratión.

ARTICULO 7° En la clasificación de los cuerpos de aguas se permitirá que hasta veinte de los parámetros especificados en el Cuadro N° A-1 Anexo A superen los valores máximos admisibles indicados para la clase de agua que corresponde asignar al cuerpo, con las siguientes limitaciones:

- *1° Ninguno de los veinte parámetros puede pertenecer a los PARÁMETROS BÁSICOS del Art. 6°.*
- *2° El exceso no debe superar el 50% del valor máximo admisible del parámetro (ver cuadro N° A-1 Anexo A)*

7.1.1. Calidad de Aguas, Laguna San Roque T 1 y el río Kollpa T 2

El agua que proviene de la laguna San Roque (T 1) no aportan de manera significativa en la concentración de ningún parámetro determinado, ya que estas provienen del deshielo del glaciar de Santa Vera Cruz y se transportan mediante mangueras de 4" hasta casi llegar al río Sayaquira. Al estar la laguna cerca del glaciar no permite un transporte masivo de materiales meteorizados, fragmentados o disueltos, a esto se suma que no existe ningún tipo de actividad antropogénica en el trayecto de las aguas que bajan del deshielo, hasta llegar a la laguna.

Parte de las aguas que por el gradiente considerable tienden a bajar de la laguna, se utilizan en el ingenio de la mina Sayaquira, en el proceso de tratamiento del mineral, para luego seguir el tratamiento respectivo, otra parte se infiltra al interior de la montaña misma.



Foto N° 2 Laguna San Roque.

Las aguas que aporta el río Kollpa (T 2), aguas básicas, no incrementan de manera significativa la concentración de ningún parámetro considerado crítico, por el contrario, al sumarse al río Sayaquira, aumentan el caudal provocando un efecto de dilución y un ligero aumento en la concentración de Na, K, Ca, Mg y SO_4^{-2} , también se

incrementa levemente el valor de pH. Estos incrementos se observan en el punto PM 7 de todas las campañas.

De acuerdo con los resultados obtenidos en T 1 y T 2, están por debajo de los límites de la clase "D", por tanto, no incurren en el artículo 6° y 7° del RMCH de la ley 1333.

7.1.2. Calidad de las aguas del Río Sayaquira

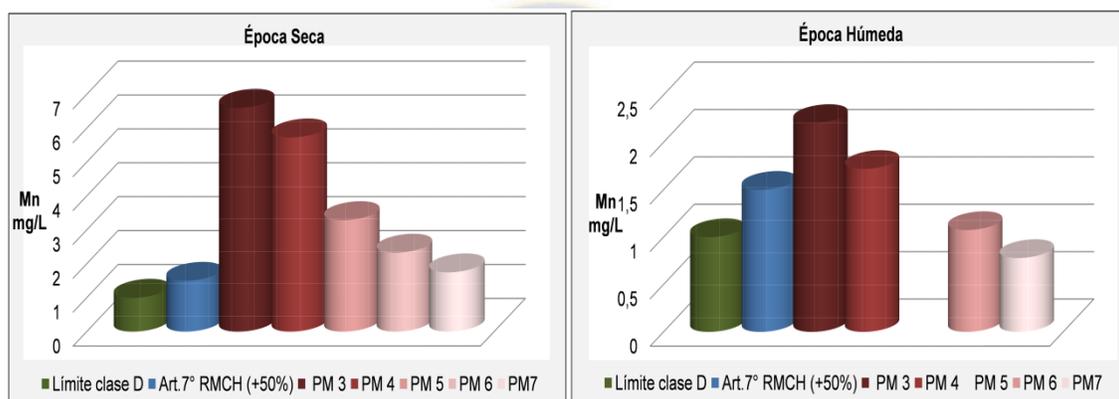


Figura 35: Exceso en la concentración de Mn respecto al límite clase "D" más el 50% del valor máximo admisible.

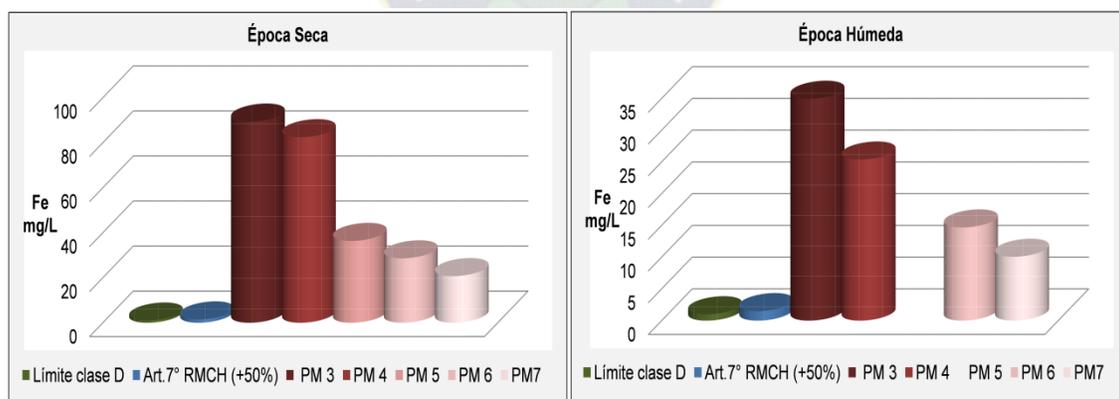


Figura 36: Exceso en la concentración de Fe respecto al 50% del valor máximo admisible.

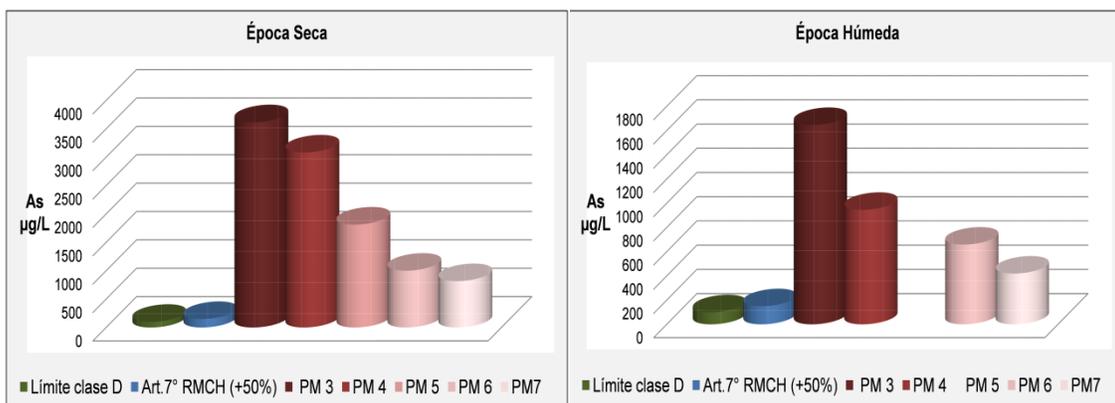


Figura 37: Exceso en la concentración de As respecto al 50% del valor máximo admisible.

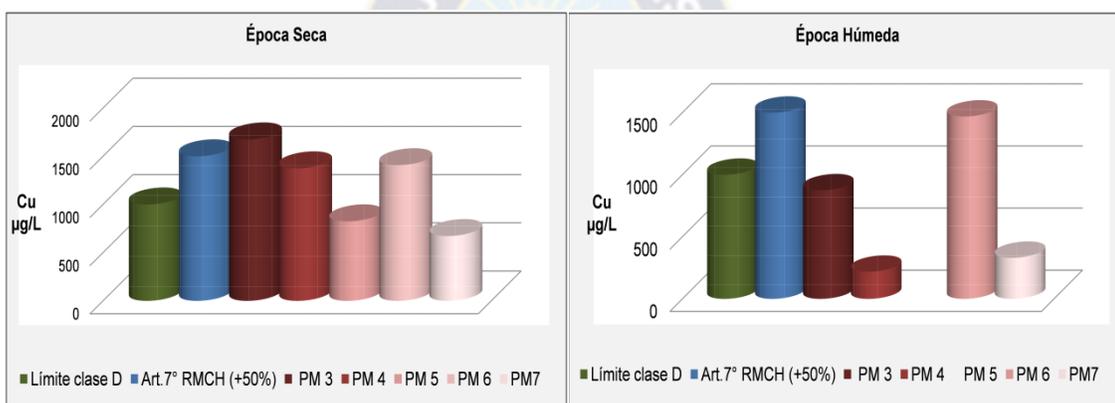


Figura 38: Exceso en la concentración de Cu respecto al 50% del valor máximo admisible.

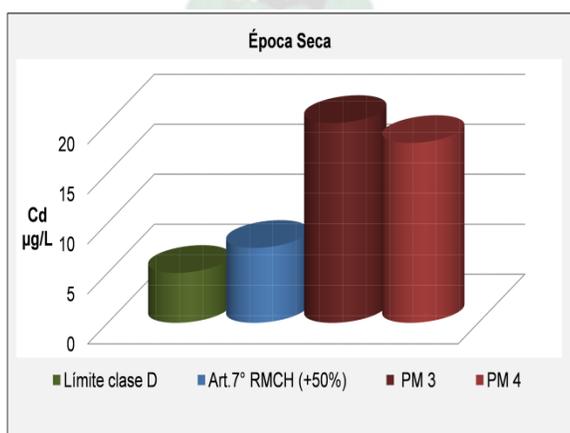


Figura 39: Exceso en la concentración de Cd respecto al 50% del valor máximo admisible.

El río Sayaquira en su condición de río juvenil, de primer orden, en su curso alto, contiene poco oxígeno disuelto y un pH casi neutro (PM 1 y PM 2 de ambas épocas), por lo tanto no presenta concentraciones elevadas de elementos como Mn, Fe, As, Cu y Cd, sin embargo se puede evidenciar concentraciones críticas de éstos después de la descarga de aguas tratadas y drenajes ácidos de la mina Sayaquira que se encuentra en las riveras del río (Figura 14).

Ésta región es parte de la faja Estañífera de Bolivia, el intrusivo de Santa Vera Cruz contiene minerales de Sn, W, Pb, Zn y Ag como mayoritarios, a su vez presenta también una distribución de compuestos sulfurosos como Cuarzo, Piritas y Arsenopiritas. Al modificarse las condiciones del mineral, en este caso mediante la molienda luego de su extracción, se aumenta drásticamente la superficie de contacto del mineral con el oxígeno del ambiente y con el agua lo que ocasiona que los compuestos sulfurosos aceleren su oxidación, catalizados de forma directa o indirecta por poblaciones microbianas del género *Thiobacillus*, dando productos como Fe (II), Fe (III), H_2SO_4 , H_3AsO_4 , sulfatos y otros que se disuelven y transportan, en el agua que proviene de la laguna San Roque y en aguas subterráneas de los niveles -30 y -60 de la mina Sayaquira.

Así mismo, es evidente que el conjunto de aguas ácidas descargadas al río Sayaquira; superficiales, subterráneas (emergentes del nivel -180) además de las tratadas por la mina, son responsables de las concentraciones críticas de Mn, Fe, As, Cu y Cd evidenciado en los valores que presenta el punto PM 3 en ambas épocas (ver Tablas N° 26, 27, 28 y 29).

A partir del punto PM 3 en adelante el agua superficial es rica en oxígeno disuelto y las condiciones de pH varían de acuerdo con lo expresado en las Tablas N° 20, 21, 22 y 23; PM 3, PM 4, PM 5, registran valores que oscilan entre 2,5 a 3 en ambas épocas; PM 6 y PM 7 2,5 a 3,6 (época seca), 3,0 a 6,0 (época húmeda). Éstas variaciones son muy importantes en la precipitación de metales como el hierro y

manganeso al igual que en la coprecipitación de arsénico, no obstante no se descarta la posibilidad de que aguas ácidas subsuperficiales y subterráneas emerjan en algunos puntos de éste trayecto manteniendo elevada la concentración en solución de Mn, Fe y As en ambas épocas (Figura 35, 36 y 37) incluso después del aporte del río tributario Kollpa.

En época seca la concentración de Cu y Cd llega a niveles peligrosos en los puntos PM 3 y PM 4, en cambio en época húmeda la concentración de Cu está por debajo del límite de la clase "D" del RMCH y la concentración de Cd se encuentra por debajo del límite de detección del equipo. Cabe hacer notar que la concentración de Cu en el punto PM 6 mantiene un comportamiento similar en ambas épocas, esto puede deberse a que antes de éste punto existe el aporte de aguas que provienen de vertientes y de la laguna Wara Warani.

Después de los resultados obtenidos y con los valores reflejados en las Figuras 35, 36, 37, 38 y 39 podemos concluir que el cuerpo de agua estudiado vulnera el artículo 6° (RMCH), por tener presencia de parámetros básicos como As y Cd, además del artículo 7° (RMCH); exceso mayor al 50% del valor máximo admisible en los parámetros Mn, As, Fe, Cu, y Cd, éste último solo en época seca. Al mismo tiempo los valores de SO_4^{-2} en los puntos PM 3 y PM 4 de la 4° campaña (época seca) también vulneran el artículo 7° (RMCH), aguas abajo en los puntos PM 6 y PM 7 están sobre el límite de la clase "D" del mismo reglamento, este incremento en la concentración de sulfatos se podría deber a que durante la jornada de muestreo la mina trabajó mineral de taqueo, es decir, que ingresa mineral ya tratado y oxidado al proceso de extracción de estaño.

7.1.3. Calidad de aguas que circulan en la mina Sayaquira



Foto N° 3: Tratamiento pasivo (filtro artesanal) implementado por la empresa minera.

El cuerpo de agua que circula en el proceso gravimétrico de extracción de la mina Sayaquira, para después ser tratada, proviene de la laguna San Roque (agua de deshiele).

De acuerdo con resultados expresados en las tablas 26 y 30 y el cuadro N°1 A1 Anexo A, podemos identificar, en el cuerpo de agua, aquellos parámetros que no cumplen con el artículo N° 6 y N° 7 mencionados al principio de éste capítulo.

Tabla N°35: Parámetros que exceden la Ley 1333.

M 1	M 2	M 3
As	As	As
Cd	Cd	Cd
Cu	Cu	Cu
Fe	Fe	Fe
	Pb	
	Mn	Mn
Zn	Zn	Zn

Es importante hacer notar que hay una disminución considerable, en el punto M 3, en la concentración de los parámetros descritos en la Tabla N° 35, esto se debe a que las aguas que provienen del ingenio de la mina Sayaquira (M 2), son tratadas en los relaves y posteriormente se tratan de forma pasiva mediante un filtro, la muestra tomada en el punto M 3, refleja los resultados del tratamiento pasivo empleado.

El filtro empleado está compuesto por piedra caliza, carbón, abono, arena y tepes en una extensión de 60 m aproximadamente 1,20 m de ancho y 1,3 m de profundidad además de estar en permanente inundación (Fotografía N° 3). Al ser éste filtro muy similar a un humedal anaerobio de flujo horizontal, disminuye el oxígeno disuelto, reduce el Fe^{+3} a Fe^{+2} y genera alcalinidad, bajo estas nuevas condiciones el Fe^{2+} y otros cationes metálicos pueden ser inmovilizados como sulfuros en el ambiente reductor del substrato orgánico reteniendo el arsénico.

Tabla N° 36: Disminución de las concentraciones (con ayuda del filtro implementado) de parámetros que no cumplen con la ley 1333.

M 2	M 3
As = 28570,00 [µg/L]	As = 2343,50 [µg/L]
Cd = 49,00 [µg/L]	Cd = 33,00 [µg/L]
Cu = 3100,00 [µg/L]	Cu = 2550,00 [µg/L]
Fe = 247,00 [mg/L]	Fe = 52,50 [mg/L]
Pb = 319,80 [µg/L]	Pb = 44,38 [µg/L]
Mn = 6,50 [mg/L]	Mn = 5,48 [mg/L]
Zn = 4850,00 [µg/L]	Zn = 5025,00 [µg/L]*
(*) Porcentaje de aumento en la concentración.	

A pesar de la disminución en la concentración de parámetros como As, Fe, Mn, Cu y Cd, el cuerpo de agua tratado aún vulnera los artículos 6° y 7° del RMCH de la ley 1333 y es descargo en el río Sayaquira, unos metros abajo se encuentra la bocamina del nivel -180 que descarga aguas ácidas que provienen de fuentes subterráneas contaminadas (Figura 14, Foto N° 4). La descarga del nivel -180 aumenta de forma

crítica las concentraciones de los parámetros expresados en la tabla N° 35 y por lo tanto no hay mejoras en la calidad del río a partir de éste sector.



Foto N° 4: Salida de aguas ácidas de la bocamina (nivel -180)

7.1.4. Representación de cationes y aniones empleados en la clasificación de cuerpos de agua.

En la Figura 41 se muestran las concentraciones, a lo largo del río Sayaquira, de cationes y aniones (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , SO_4^{-2} , HCO_3^- , Cl^-). Para realizar dicha representación de cationes y aniones, se ingresan datos en meq/L en el programa AquaChem versión 4.0 y SIG, al mismo tiempo éste programa nos brinda una clasificación del tipo de agua, basándose en los aniones y cationes mencionados, descrita en la Tabla N° 34.

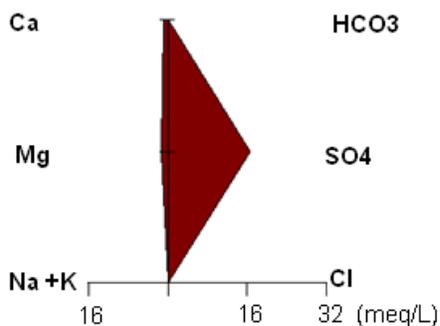


Figura 40: Ejemplo de la distribución de cationes y aniones mediante el programa Aquachem versión 4,0 (gráfico inicial).

-Época Seca

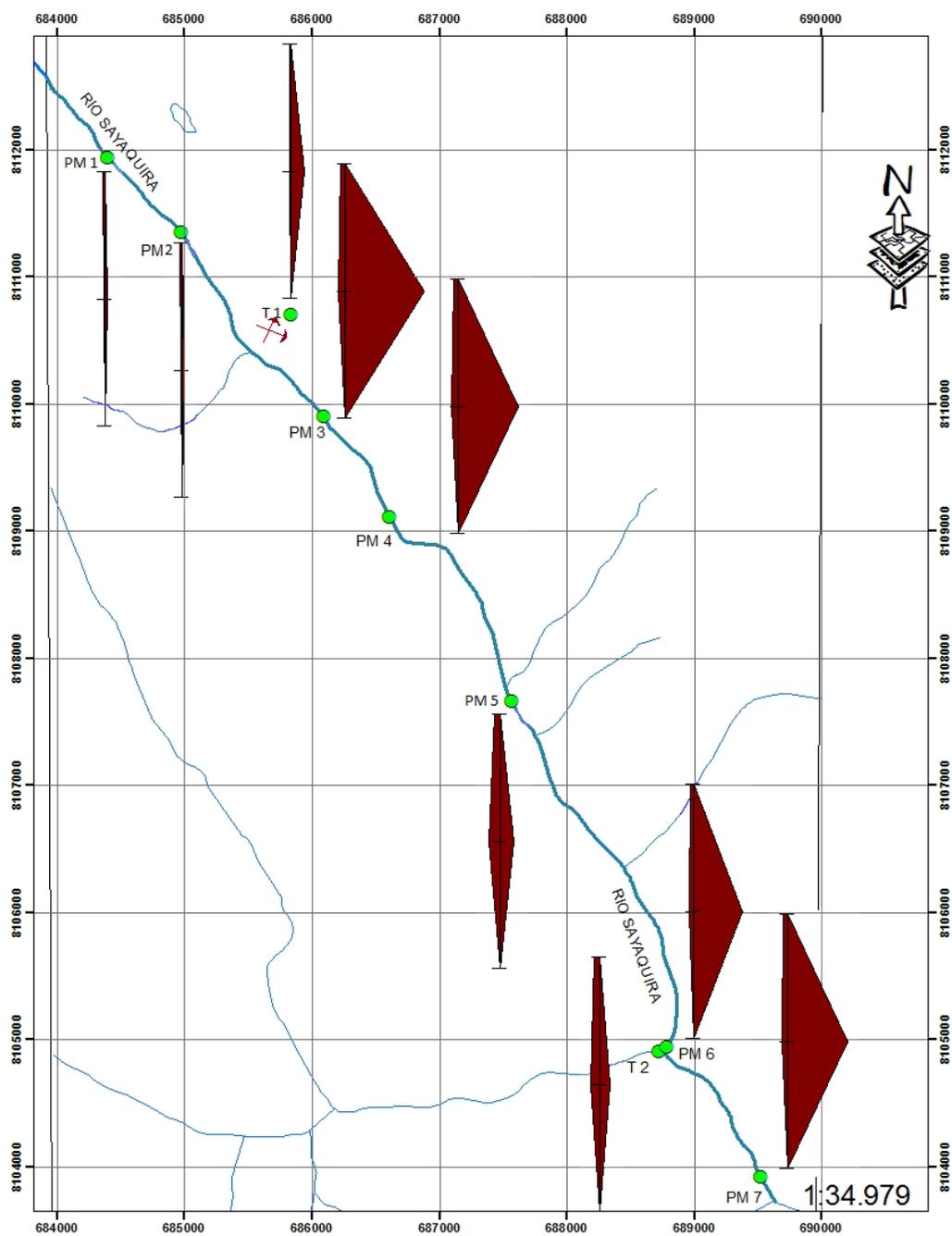


Figura 41: Representación de aniones y cationes en época seca. Elaboración propia mediante programa Aquachem (versión 4,0) y ArcGIS – ArcMap (versión 9.3).

-Época Húmeda

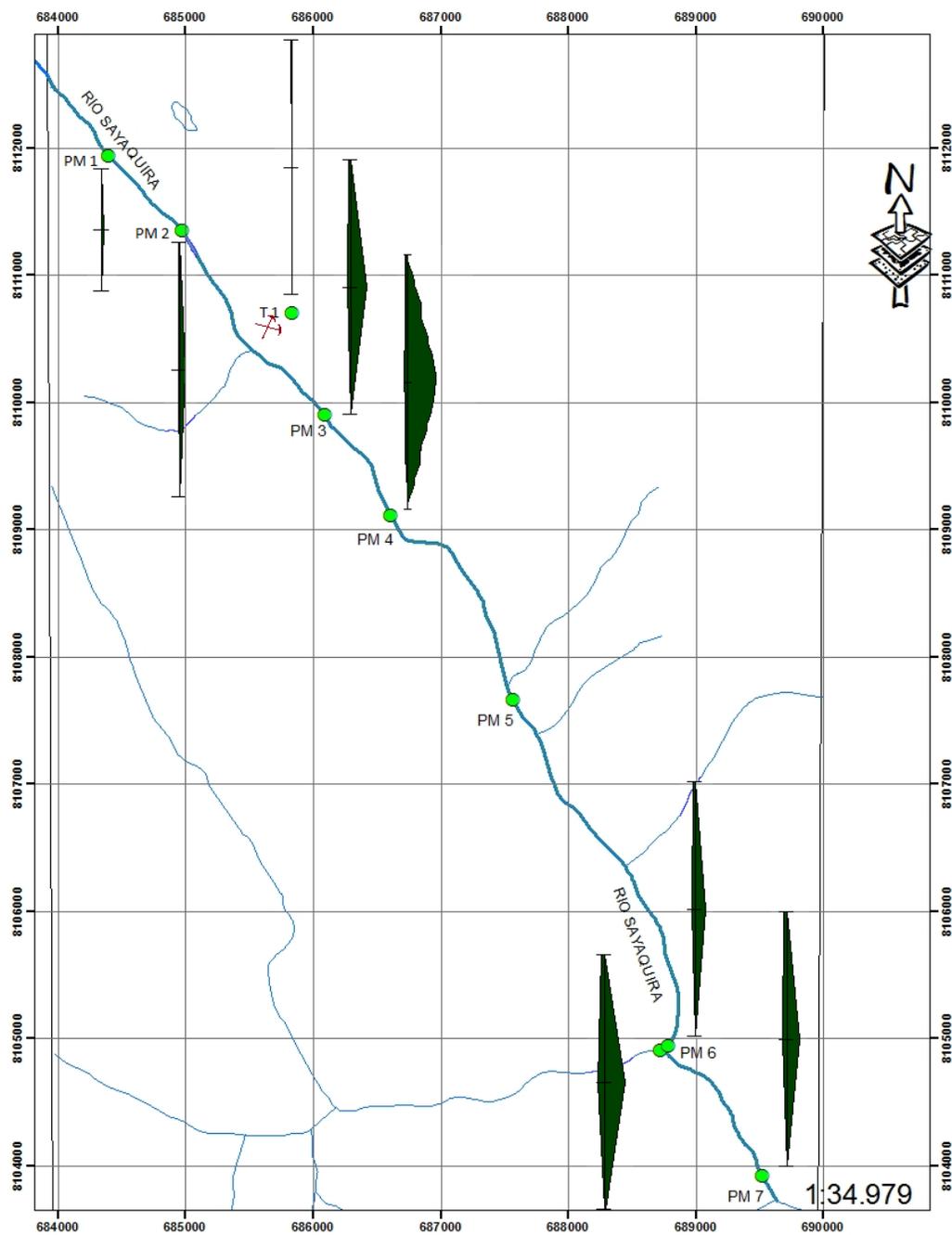


Figura 42: Representación de aniones y cationes en época húmeda. Elaboración propia mediante programa Aquachem (versión 4,0) y ArcGIS – ArcMap (versión 9.3).

7.2. Flujo de masa de elementos mayoritarios

Los principales contaminantes como ser Cd, Cu, Zn y As además del Fe y Mn se reflejan en las siguientes tablas:

Tabla N° 37: Promedio época seca.

Punto de Muestreo	CAUDAL m ³ /día	Mn Kg/día	Fe Kg/día	As Kg/día	Cu Kg/día	Cd Kg/día	Zn Kg/día
PM 1	241,920	0,003	0,005	0,004	DLD	DLD	0,016
PM 2	673,920	0,011	0,021	0,002	DLD	DLD	0,015
PM 3	3724,560	24,597	332,976	13,471	6,239	0,149	19,260
PM 4	3412,800	19,552	281,385	10,525	4,693	0,123	16,268
PM 5	2514,240	16,531	182,911	9,122	4,149	DLD	14,771
PM 6	30134,880	70,184	862,988	30,161	42,415	DLD	63,660
PM 7	7705,980	13,505	159,803	6,297	5,182	DLD	11,467
	m ³ /Mes	Kg/Mes	Kg/Mes	Kg/Mes	Kg/Mes	Kg/Mes	Kg/Mes
PM 1	4838,400	0,050	0,100	0,080	DLD	DLD	0,320
PM 2	13478,400	0,220	0,420	0,040	DLD	DLD	0,300
PM 3	74491,200	491,940	6659,510	269,420	124,770	2,980	385,190
PM 4	68256,000	391,040	5627,710	210,500	93,850	2,460	325,350
PM 5	50284,800	330,620	3658,220	182,430	82,970	DLD	295,420
PM 6	602697,600	1403,680	17259,750	603,220	848,300	DLD	1273,200
PM 7	154119,600	270,090	3196,060	125,930	103,650	DLD	229,330
(DLD) Concentración que se encuentra por debajo del límite de detección del equipo.							

Fuente: elaboración propia en base a resultados obtenidos en laboratorio y campo.

Tabla N° 38: Promedio época húmeda.

Punto de Muestreo	CAUDAL m ³ /día	Mn Kg/día	Fe Kg/día	As Kg/día	Cu Kg/día	Zn Kg/día
PM 1	8873,280	0,271	6,455	0,148	DLD	0,484
PM 2	12890,880	0,664	17,944	0,123	DLD	0,761
PM 3	16841,880	37,069	588,624	27,730	14,737	32,943
PM 4	2904,480	9,986	147,402	5,494	1,272	7,517
PM 5	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
PM 6	12821,760	13,758	188,243	8,446	18,835	14,399
PM 7	20338,200	15,925	204,379	8,532	6,742	16,149
	m ³ /Mes	Kg/Mes	Kg/Mes	Kg/Mes	Kg/Mes	Kg/Mes
PM 1	177465,600	5,410	129,110	2,950	DLD	9,670
PM 2	257817,600	13,280	358,880	2,470	DLD	15,210
PM 3	336837,600	741,380	11772,470	554,600	294,730	658,850
PM 4	58089,600	199,710	2948,050	109,880	25,440	150,340
PM 5	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R	N/R
PM 6	256435,200	275,150	3764,850	168,930	376,700	287,980
PM 7	406764,000	318,500	4087,570	170,640	134,840	322,970

(DLD) Concentración que se encuentra por debajo del límite de detección del equipo.
(N/R) No realizado a causa de la inaccesibilidad al punto de muestreo.

Fuente: Elaboración propia en base a resultados obtenidos en laboratorio y campo.

CAPÍTULO VIII



8. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha evaluado la calidad de agua del río Sayaquira y sus tributarios más importantes, mediante muestras tomadas en el trayecto del mismo, durante época seca y húmeda, considerando el impacto de las actividades mineras que se apostan en las riveras del río. Después de ésta evaluación podemos afirmar lo siguiente:

8.1. Diagnóstico de la calidad de los tributarios T 1 y T2

De acuerdo a los resultados obtenidos, ambos cuerpos de agua concluimos que:

- El cuerpo de agua proveniente de la Laguna San Roque T 1 cumple con la clasificación “D” del RMCH Ley 1333, por lo tanto es apta para abastecimiento doméstico de agua potable después de almacenamiento prolongado, tratamiento físico-químico completo (Tabla N° 11, Anexo A Tabla N° 1), también es apta para el abastecimiento industrial y la navegación.
- El cuerpo de agua proveniente del río Kollpa T 2 cumple con la clasificación A del RMCH Ley 1333, por lo tanto es apta para abastecimiento doméstico de agua potable, después de solo una desinfección y ningún tratamiento, recreación de contacto primario, protección de recursos biológicos, riego, abastecimiento industrial, acuicultura (Tabla N° 11, Anexo A Tabla N° 1).
- El caudal del río Kollpa T 2 provoca un leve efecto de dilución que es más notorio en época húmeda.

8.2. Diagnóstico de las aguas del Río Sayaquira

De acuerdo a los resultados obtenidos, en ambas épocas, podemos zonificar el cauce del río Sayaquira en tres partes (Figura 43): Zona A que comprenden los puntos de muestreo PM 1 y PM 2, Zona B comprendida por los puntos PM 3, PM 4 y PM 5 y Zona C comprendida por los puntos PM 6 y PM 7 .

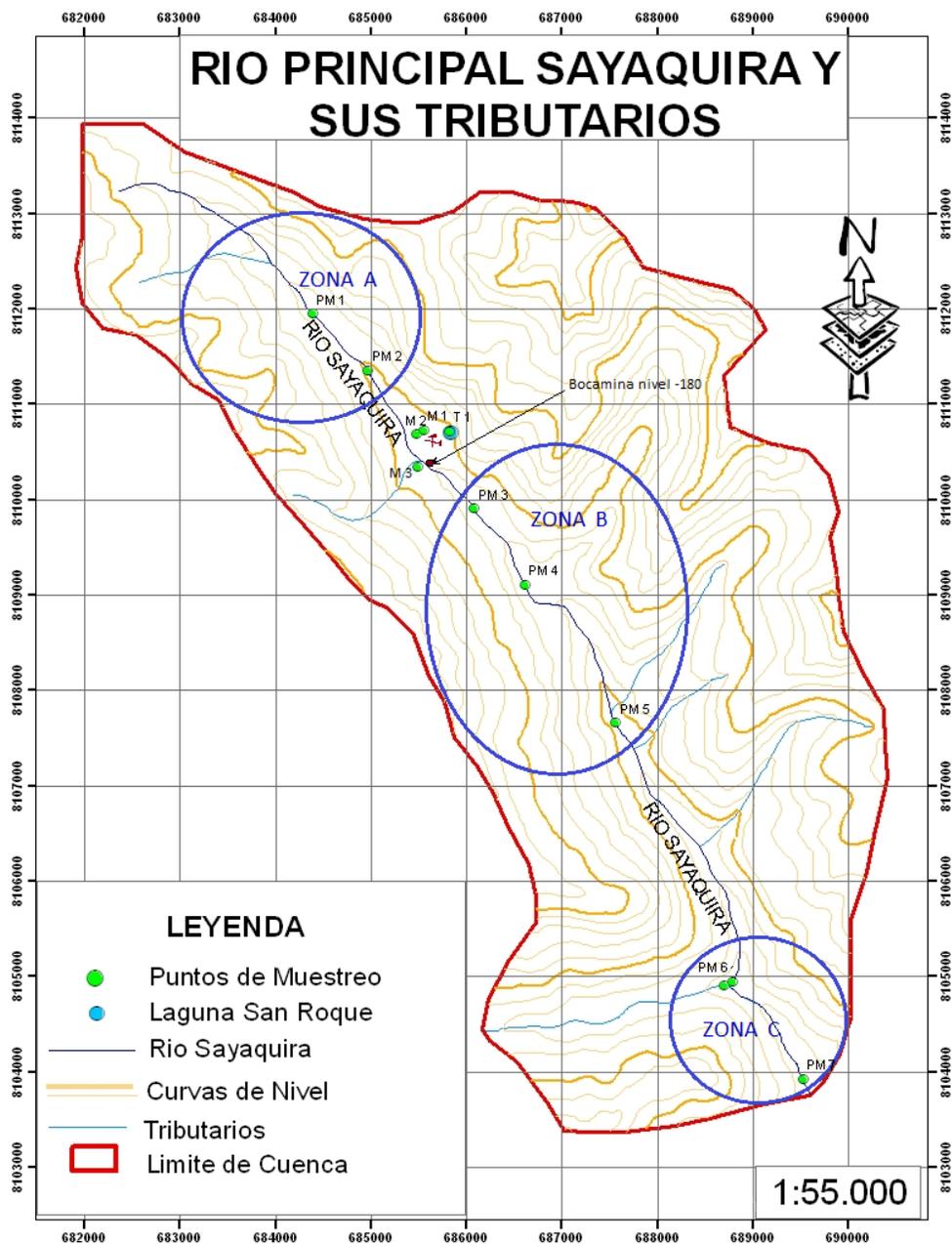


Figura 43: Tramo del río Sayaquira dividido en zonas. Elaboración propia mediante programa ArcGIS - ArcMap (versión 9.3).

La zona A no sufren el impacto de ninguna actividad antropogénica (minería) y muestra un comportamiento similar en ambas épocas manteniendo un pH de 6 a 7 además ningún parámetro determinado tiene concentraciones que estén por encima

del límite de la clase “A” del RMCH Ley 1333 clasificándose en la misma, por lo tanto c (Tabla N° 11, Anexo A).

La zona B del río Sayaquira en ambas épocas presenta las mayores concentraciones de elementos como Cd, Cu, Fe, Mn, Zn y As además de un pH ácido, debido a que recibe descargas de aguas ácidas y aguas tratadas provenientes de la mina Sayaquira, por lo tanto el agua en ésta zona no es apta para ningún uso (Tabla N° 11 del capítulo III).

La zona C presenta una disminución, a consecuencia de la trayectoria del río y su efecto decantador, en las concentraciones de Cu, Fe, Mn Zn y As, además la concentración de Cd está por debajo del límite de detección del equipo y se evidencia una mayor precipitación de hierro como Fe^{+3} en sus diferentes formas debido a que el pH de éstos puntos está entre 3 a 4 en época seca y de 3 a 6 en la época húmeda. Sin embargo, y pese al aporte del tributario T 2, todavía se registran valores de concentración que están por encima de la clase “D” del RMCH Ley 1333 en ambas épocas y por tanto no son aptas para ningún uso descrito en la tabla N° 11.

Los valores de concentración en cationes y aniones como: Mg^{+2} , Ca^{+2} , Na^+ , K^+ , SO_4^{-2} , NO_3^- y Cl^- , de las tres zonas y en ambas épocas, se encuentran por debajo del límite permisibles de la clase “D” RMCH Ley 1333 exceptuando la concentración de SO_4^{-2} en la cuarta campaña de muestreo en los puntos PM 3 al PM 7.

En época seca la concentración de todos los parámetros en todos los puntos es mucho más elevada que en la época húmeda.

Los resultados del tratamiento pasivo que emplea la mina Sayaquira son positivos reflejados en la disminución de la concentración de parámetros como Mn, Fe, As, Cu, Cd y Pb (Tabla N° 26, Tabla N° 36) pero no son suficientes estando aún, las concentraciones, por encima del límite permisible de la clase “D” del RMCH Ley 1333 no siendo aptas para consumo humano, abrevadero de animales, riego etc.

Las aguas descargadas al río Sayaquira que provienen del la bocamina del nivel - 180 al no tener ningún tratamiento (Figura N° 14, foto N° 4) aumentan de forma crítica la concentración de Mn, Fe, As, Cu y Cd en época seca y Mn, Fe, As en época húmeda.

Se concluye en éste estudio la existencia de contaminantes de origen minero en el río Sayaquira siendo los más críticos Arsénico, Hierro y Manganeso por sus altas concentraciones en ambas épocas además de Cadmio y Cobre en época seca. Estos elementos en concentraciones tan elevadas son nocivos para la actividad biológica, contaminan el cauce del río, no cumplen con la reglamentación nacional (artículos 6° y 7°) y no son aptas para ningún uso especificado en la Tabla N° 11, extraída del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica Ley N° 1333.





CAPÍTULO IX

9. RECOMENDACIONES

- Captar el agua proveniente de la zona A efectuando el proceso de desinfección mediante gas Cloro (en concentración de 0,8 a 2 g/m³, luego de un ensayo en laboratorio), posteriormente almacenar ésta agua de forma adecuada (tanque).
- Luego de la desinfección se podrá usar estas aguas para el abastecimiento doméstico de agua potable, riego, abastecimiento industrial y abrevadero de animales.
- De acuerdo con los resultados de los valores de concentración obtenidos en los puntos M 2 y M 3, evaluación en la zona B, topografía de la región y el área que puede disponer la empresa minera, se sugiere mejorar las condiciones del tratamiento pasivo empleado (filtro artesanal, foto N° 3) tomando como referencia los siguientes sistemas de tratamientos de Drenajes Ácidos de Mina y Roca pasivos: sistema Humedal Anaerobio, Sistemas de Producción Sucesiva de Alcalinidad (SAPS) con adición de Humedales Aerobios o de lo contrario una combinación de todos éstos tratamientos pasivos descritos en el capítulo III, así mismo se sugiere incrementar las caídas en el filtro.
- En el caso de la bocamina del nivel -180, la empresa minera deberá construir canaletas impermeabilizadas que aislen y conduzcan las aguas, emergentes de éste nivel, hacia un tratamiento pasivo que podría ser el mismo que se está empleando actualmente (mejorado) u otra alternativa de tratamiento (Capítulo III - 3.10.). Una vez tratadas estas aguas se podrán descargar en el río Sayaquira.
- Realizar un estudio en las aguas del río Poquiri, que determine la existencia de contaminantes de origen minero, ya que este río recibe la descarga del río Sayaquira y Totoma.
- Realizar un estudio, que determine la existencia de contaminantes de origen minero, en las aguas subterráneas que se encuentran en los niveles -30 y -60 de la mina Sayaquira y de acuerdo a los resultados obtenidos se verá la alternativa de uso.

BIBLIOGRAFÍA

APHA, AWWA, WPCF, 1992; Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales, Ed. Diaz Santos SA.

Aquachem versión 4.0, Schlumberger Water Service, Water Quality Data Analysis Plotting and Modelig, Copyrights 2006, Waterloo Hydrogeologic, Ing.

ArcGis-ArcMap version 8.0.

Asta M., Robert J., Ayora C., Atenuación Natural de Arsénico en el Drenaje Acido de Mina.

Carvajal M. J., 2009, Caracterización química e isotópica del sistema hidrológico de la cuenca de Elqui.

Castañeta R., Determinación de metales por absorción atómica a la llama.

Centro de Noticias OPS/OMS Bolivia 31 de octubre de 2006.

Clair N., Perry L., McCarty Gene F.,Parkin, Química para Ingeniería Ambiental.

Escobari J., 2003, Problemática Ambiental en Bolivia.

Espinoza G.,2010, Manual de laboratorio, Aplicada Inorgánica QMC 303.

Flores M.L., 2009, Evaluación de la contaminación de las aguas del río Jillusaya del departamento de la paz. Tesis para optar al título de Licenciatura en Ciencias Químicas.

Guía ambiental para el manejo de aguas en actividades Minero – metalúrgicas

Hoja Topográfica IGM, Hoja 141 prov SA 1956 Bolivia, Escala 1:50 000.

Ibarz Jose, Química General

La Razón, Los minerales y su efecto en la salud.

Ley N° 1333, Ley y Reglamento del Medio Ambiente, primera Edición, editorial U.P.S, La Paz.

López E., Aduvire O. y Baretino D., Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro.

McGraw Hill 1964, Hidrología

Monitoreo del lago Poopó y sus ríos tributarios, 2005-2007, Evaluación ambiental.

Nielsen A. Morillas V., 1992, Geoquímica aplicada.

Nordgren M., 2011, Cambios climáticos percepciones, efectos y respuestas en cuatro regiones de Bolivia.

OPS/OMS, 1987, Guías para la calidad del agua potable.

Plan de desarrollo Municipal, PDM 2009 - 2013 Ichoca Quinta Sección Municipal Provincia Inquisivi.

Plano catastral, Sector Sayaquira, cantón Ichoca provincia Inquisivi, escala 1:40,000.

Postigo, L, Química general aplicada.

Proyectos: GRANT (Glaciares y Recurso Agua en los Andes Tropicales), IAI CRN 2047.

Quintanilla J., Lorini J., 1993, Informe Final, Sistema hidrológico del altiplano (A.H.S.), cuenca río Desaguadero Bolivia.

Ramírez E., Impactos del cambio climático y gestión del agua sobre la disponibilidad de recursos hídricos para las ciudades de La Paz y El Alto. Instituto de Hidráulica e Hidrología, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.

Ramos O., 2006, Estudio comparativo de las pérdidas de fosforo y nitrógeno del bosque de niebla, cuenca de San Alberto, Oxapampa, Perú. Tesis para optar al título de Licenciado en Ciencias Químicas.

Ramos O., Pérdida de nitrógeno del bosque de neblina en la subcuenca Oxapampa, Perú.

Revollo R., 1967, Estudio Geológico de la cordillera de Santa Vera Cruz.

Richard D. Beaty Jack D. Técnicas de Atómica

Toledo Alejandro, 1999, El agua en México y el mundo.

Urrutia, M.; Graña, J.; Garcia-Rodeja, R.; Macias, F., Procesos de oxidación de pirita en medios superficiales: potencial acidificante e interés para la recuperación de suelos de mina.

Páginas web consultadas

http://es.wikipedia.org/wiki/Agua#Distribuci.C3.B3n_de_agua_en_la_naturaleza

<http://radio.rpp.com.pe/cuidaelagua/la-disponibilidad-de-agua-en-el-mundo-es-50-menor-que-hace-50-anos/>

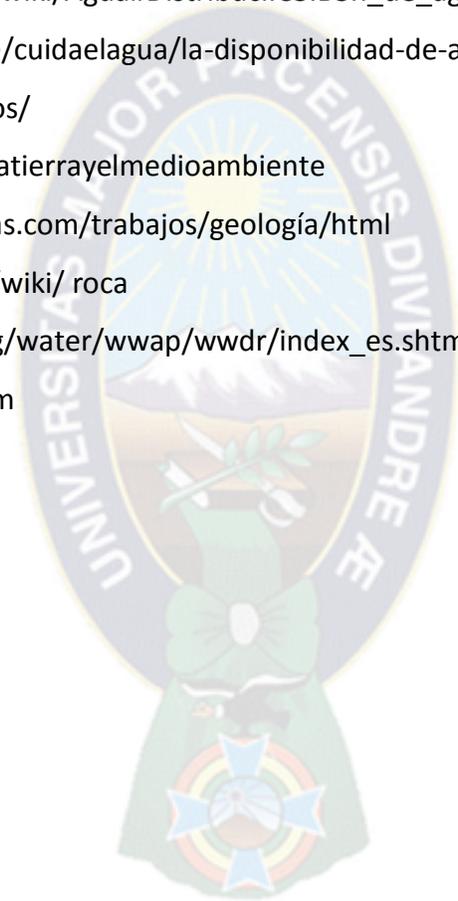
<http://www.cienciasdelatierrayelmedioambiente>

<http://www.monografias.com/trabajos/geología/html>

[http://es.wikipedia.org/wiki/ roca](http://es.wikipedia.org/wiki/roca)

http://www.unesco.org/water/wwap/wwdr/index_es.shtml

<http://www.normas.com>



ANEXO A

LÍMITES MÁXIMOS ADMISIBLES DE PARÁMETROS EN CUERPOS RECEPTORES

Tabla N° 1: Límites máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores.

N°	PARÁMETRO	UNIDAD	CANCE- RÍGENOS	CLASE "A"	CLASE "B"	CLASE "C"	CLASE "D"
1	2	3	4	5	6	7	8
1	pH		NO	6.0 a 8.5	6.0 a 9.0	6.0 a 9.0	6.0 a 9.0
2	Temperatura	°C		+/_3°C de receptor	+/_3°C de receptor	+/_3°C de receptor	+/_3°C de receptor
3	SÓLIDOS disueltos totales	mg/l		1000	1000	1500	1500
4	Aceites y Grasas	mg/l	NO	Ausentes	Ausentes	0,3	1
5	DBO	mg/l	NO	<2	<5	<20	<30
6	DQO	mg/l	NO	<5	<10	<40	<60
7	NMP colifecales NMP	N/100 ml	NO	<50y<5en80% de muestras	<1000y<20 en 80% de muestras	<5000y<1000 en 80% de muestras	<5000y<5000 en 80% de muestras
8	Parásitos	N/l		<1	<1	<1	<1
9	Color mg Pt/l	mg/l	NO	<10	<50	<100	<200
10	Oxígeno disuelto	mg/l	NO	<80%sat.	<70%sat.	<60%sat.	<50%sat.
11	Turbidez	UNT	NO	<10	<50	<100-<2000***	<200 -<10000***
12	SÓLIDOS sedimentarios	mg/l	NO	<10mg/l	30mg/l 0.1 ml/l	<50mg/l <1 ml/l	<100mg/l <1 ml/l
13	Aluminio	mg/l		0.2c. Al	0.5c. Al	1.0c. Al	1.0c. Al
14	Amoniaco	mg/l	NO	0.05c. NH3	1.0c. NH3	2c. NH3	4c. NH3
15	Antimonio	mg/l	NO	0.01c. Sb	0.01c. Sb	0.01c. Sb	0.01c. Sb
16	Arsénico total	mg/l	SI	0.05c. As	0.05c. As	0.05c. As	0.1c. As
17	Benceno	mg/l	SI	2.0c. Benc.	6.0c. Benc.	10.0c. Benc.	10.0c. Benc.
18	Bario	mg/l	NO	1.0c. Ba	1.0c. Ba	2.0c. Ba	5.0c. Ba
19	Berilio	mg/l	SI	0.001c. Be	0.001c. Be	0.001c. Be	0.001c. Be
20	Boro	mg/l		1.0c. B	1.0c. B	1.0c. B	1.0c. B
21	Calcio	mg/l	NO	200	300	300	400
22	Cadmio	mg/l	NO	0,005	0,005	0,005	0,005
23	Cianuros	mg/l	NO	0,02	0,1	0,2	0,2
24	Cloruros	mg/l	NO	250c. Cl	300c. Cl	400c. Cl	500c. Cl
25	Cobre	mg/l	NO	0.05c. Cu	1.0c. Cu	1.0c. Cu	1.0c. Cu
26	Cobalto	mg/l		0.1c. Co	0.2c. Co	0.2c. Co	0.2c. Co

27	Cromo Hexavalente	mg/l	SI	0.05c. Cr Total	0.05c. Cr ⁺⁶	0.05c. Cr ⁺⁶	0.05c. Cr ⁺⁶
28	Cromo Trivalente	mg/l	NO		0.6c. Cr ⁺³	0.6c. Cr ⁺³	1.1c. Cr ⁺³
29	1.2 Dicloroetano	ug/l	SI	10,0	10,0	10,0	10,0
30	1.1 Dicloroetileno	ug/l	SI	0,3	0,3	0,3	0,3
31	Estaño	mg/l	NO	2.0c. Sn	2.0c. Sn	2.0c. Sn	2.0c. Sn
32	Fenoles	ug/l	NO	1c. C6 H5 OH	1c. C6 H5OH	5c. C6H5OH	10c.C6H5OH
33	Hierro Soluble	mg/l	NO	0.3c. Fe	0.3c. Fe	1.0c. Fe	1.0c. Fe
34	Fluoruros	mg/l	NO	0.6 1.7c.F	0.6 1.7c.F	0.6 1.7c.F	0.6 1.7c.F
35	Fosfato Total	mg/l	NO	0.4c. Ortofosfato	0.5c. Ortofosfato	1.0c. Ortofosfato	1.0c. Ortofosfato
36	Magnesio	mg/l	NO	100c. Mg	100c. Mg	150c. Mg	150c. Mg
37	Manganeso	mg/l	NO	0.5c. Mn	0.1c.Mn	0.1c.Mn	0.1c.Mn
38	Mercurio	mg/l	NO	0.001 Hg	0.001 Hg	0.001 Hg	0.001 Hg
39	Litio	mg/l		2.5c. Li	2.5c. Li	2.5c. Li	5c. Li
40	Niquel	mg/l	SI	0.05c.Ni	0.05c.Ni	0.5c. Ni	0.5c. Ni
41	Nitrato	mg/l	NO	20.0c. NO3	50.0c. NO3	50.0c. NO3	50.0c. NO3
42	Nitrito	mg/l	NO	<1.0c. N	1.0c. N	1.0c. N	1.0c. N
43	Nitrógeno total	mg/l	NO	5c. N	12c. N	12c. N	12c. N
44	Plomo	mg/l	NO	0.05c. Pb	0.05c. Pb	0.05c. Pb	0.1c. Pb
45	Plata	mg/l	NO	0.05c. Ag	0.05c. Ag	0.05c. Ag	0.05c. Ag
46	Pentaclorofenol	mg/l	SI	5	10,0	10,0	10,0
47	Selenio	mg/l	NO	0.01c Se	0.01c Se	0.01c Se	0.05c Se
48	Sodio	mg/l	NO	200	200	200	200
49	SÓLIDOS flotantes			Ausentes	Ausentes	Ausentes	<ret.malla 1mm ²
50	Sulfatos	mg/l	NO	300c SO4	400c. SO4	400c. SO4	400c. SO4
51	Sulfuros	mg/l	NO	0,1	0,1	0,5	1,0
52	S.A.A.M. (Detergentes)	mg/l		0,5	0,5	0,5	0,5
53	1.1.1.2 Tetracloroetano	mg/l	NO	10	10	10	10
54	1.1.1. Tricloroetano	mg/l	SI	30	30	30	30
55	Tetracloruro de Carbono	mg/l	SI	3	3	3	3
56	2.4.6. Triclorofenol	mg/l	SI	10	10	10	10
57	Uranio total	mg/l		0.02c. U	0.02c. U	0.02c. U	0.02c. U
58	Vanadio	mg/l	NO	0.1c. V	0.1c. V	0.1c. V	0.1c. V
59	Zinc	mg/l	NO	0.2c. Zn	0.2c. Zn	5.0c. Zn	5.0c. Zn

Tabla N° 2: Límites Permisibles en cuerpos de agua superficiales

Parámetro	Unidad	Consumo Humano	Consumo Animal	Riego
Temperatura	° C	9-15	SI	SI
C.E.	mS/cm	0.1-1.0	1.50	1.50
pH		6.5-8.5	6.5-9.0	5.5-9.0
T.D.S	mg/L	500-1500	5.000	500-3500
OD	mg/L	>4	>4	3-9
Tasa de saturación	%	SI	SI	SI
Alcalinidad total	mg/L	610	SI	SI
Bicarbonatos	mg/L	SI	SI	280
Carbonatos	mg/L	Solo aparece a partir de pH=8.3	SI	75
Fosfatos	mg/L	3.5	7.0	65
Nitratos	mg/L	40	50	40
Cloruros	mg/L	250	400	400
Sulfatos	mg/L	400	800	400
Calcio	mg/L	200	SI	SI
Magnesio	mg/L	100	SI	200
Sodio	mg/L	120	200	300
Potasio	mg/L	1000	SI	SI
Hierro	mg/L	0.30	1.0	5.0
Manganeso	mg/L	0.30	1.0	0.5-5.0
Arsénico	mg/L	0.05	0.2	0.1-2.0
Cobre	mg/L	1.0	0.5	0.2
Plomo	mg/L	0.05	0.10	5.0-10.0
Zinc	mg/L	5.0	5.0	5.0

Fuente: OPS/OMS (1985), Bremond y Perdón (1987), Ministerio de Salud y Bienestar Social (1987), Canovas(1986), Ayr y Estcot(1984), Drasovsky (1986), Task Force on Water Quality Guidelines (1987)

ANEXO B

Tabla N° 1: Afinidad de los elementos de las fases principales que componen la tierra.
 Compilada con datos de varios autores sobre la base del trabajo de Goldschmidt, 1937.

Fase Siderófila	Fase Calcófila	Fase Litófila	Fase Atmófila	Fase Biófila
Fe, Ni, Co Ru, Rh, Pd Re, Os, Ir, Pt, Au Ge, Sn, Sb (Pb), C, (As), P Mo, W (Nb), Ta Se, Te Cu, Ga	(O), S, Se, Te Fe, Cr, (Ni), (Co) Cu, Zn, Cd, Pb Sn, Ge, Mo, (O) As, Sb, Bi Ag, (Au), Hg Ru, (Pt), (Rh) Ga, In, Tl, (Pd)	O, (S), (P), (H), (C) Si, Ti, Zr, Hf, Th Li, Na, K, Rb, Cs F, Cl, Br, I B, Al, (Ga), Sc Y, TR (La-Lu) Be, Mg, Ca, Sr, Ba (Fe), V, Cr, Mn Nb, Ta, W, U (Tl), (Ge), (Zn) (N)	(H), C, N, O F, Cl, Br, I Ar, He, Ne, Kr, Xe	C, H, O, N, P S, Cl, I (Ca), (Mg) (K), (Na) (V), (Mn) (Fe), (Cu)

Fuente: Fundamentos Geoquímicos Teóricos y Práctico.

Tabla N°2: Movilidades de elementos en ambientes supergénicos (de Perel'man, 1967,
 modificada por Rose y otros 1979)

Movilidad Relativa	Oxidante (pH 5-8)	Oxidante (pH <4)	Reductor
Muy móvil (K>10)	Cl, Br, I, As, Rn He, C, Ni, Mo, B (Se, Te, Re?)	Cl, Br, I, As, Rn He, C, N, B	Cl, Br, I, Rn, He
Moderadamente Móvil (K=1-10)	Ca, Na, Mg, Li, F Zn, Ag, U, V, As (Sr, Hg, Sb?)	Ca, Na, Mg, Sr Li, F, Zn, Cd Hg, Cu, Ag, Co N, U, V, As, Mn, P	Ca, Na, Mg, Li Sr, Ba, Ra, F, Mn
Ligeramente móvil (K=0,1-1)	K, Rb, Ba, Mn, Si Ge, P, Pb, Cu, Ni Co, (Cd, Be, Rn, In, W?)	K, Rb, Ba, Si Ge, Ra	K, Rb, Si, P, Fe
Inmóvil (K<0,1)	Fe, Al, Ga, Sc, Ti Zr, Hf, Th, Pa, Sn TR, Grupo Pt, Au (Cr, Nb, Ta, Bi, Cs)	Fe, Al, Ga, Sc, Ti Zr, Hf, Th, Pa, Sn Tr, grupo Pt, Au As, Mo, Se	Fe, Al, Ga, Ti, Zr Hf, Th, Pa, Sn, TR Grupo Pt, Au, Cu Ag, Pb, Zn, Cd, Hg Ni, Co, As, Sb, Bi U, V, Se, Te, Mo, In O, (Nb, Ta, Cs)

Fuente: Fundamentos Geoquímicos Teóricos y Práctico.

ANEXO C

DATOS DE: PRECIPITACIÓN TOTAL (mm)

ESTACION: CAXATA

LATITUD S.: 17° 08'

PROVINCIA: LOAYZA

LONGITUD W.: 67° 20'

DEPARTAMENTO: LA PAZ

ALTURA (msnm): 4100

PRECIPITACION (mm)

ENDE 1969-1972

AÑO	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1969						1,1	18,0	9,4	0,0	10,5	42,5	101,7
1970	69,9	35,4	37,5	9,7	6,1	3,8	1,6	4,0	57,4	66,5	60,0	143,5
1971	166,0	526,0	257,0	16,0	0,0	59,0	0,0	0,0	6,0	36,0	57,6	163,0
1972	158,0	92,0	268,0	70,0	0,0	0,0	0,0	0,0				
1977											37,4	
1978	386,0	251,0	125,0	44,0	8,7	0,0	0,0					
1979												
1980									37,5	85,1	63,6	44,3
1981	117,1	140,5	106,5	49,9	4,0	0,0	0,0	100,7	48,2	95,4	55,4	69,2
1982	155,7	38,0	100,0	32,0	0,0	13,0	1,4	0,8	43,6	48,4	118,0	64,0
1983	64,0	95,8	20,0	22,5	33,0	19,3	20,5	16,0	53,6	40,0	29,0	57,4
1984	232,4	207,4	159,0	21,0	31,0	24,0	0,0	23,0	0,0	68,3	60,0	70,0
1985	94,0	112,0	70,7	54,0	28,0	0,0	0,0	0,0	74,4	48,4	68,1	89,0
1986	102,9	109,1	100,0	48,7	19,0	0,0	0,0	22,0	65,0	2,0	98,3	143,6
1987	160,6	30,8	48,0	21,0	22,9	7,0	42,3	10,0	45,5	92,7	78,8	35,2
1988	121,9	106,0	212,2	50,0	50,0	0,0	0,0	0,0	52,1	26,1	30,0	111,0
1989	56,0	49,0	37,0	73,0	19,0	4,0	7,0	6,0	20,0	7,0	88,0	54,0
1990	89,0	75,0	54,7	111,3	48,0	58,1	0,0	12,0	20,0	61,0	143,9	88,0
1991	122,6	65,0	121,0	33,0	0,0	19,0	1,0	0,0	12,0	13,0	62,0	99,8
1992	131,9	57,0	40,0	3,0	0,0	30,0	18,0	58,2	11,0	72,0	68,0	73,9
1993	116,2	71,5	73,3	21,5	5,1	6,2	0,0	70,1	35,1	94,0	21,5	44,4
1994	114,8	107,5	38,5	36,1	0,0	11,2	0,0	0,0	10,1	8,0	73,4	56,3
1995	162,4	96,0	109,7	13,2	12,0	0,0	0,0	9,1	17,5	12,3	18,6	141,7
1996	155,1	41,3	44,3	34,8	5,1	0,0	18,2	8,4	13,5	6,4	38,3	120,2
1997	101,6	90,6	112,1	30,7	7,1	0,0	0,0	3,1	55,9	38,0	67,1	27,0
1998	66,0	91,2	82,1	24,8	0,0	13,7	0,0	9,9	6,2	58,3	67,6	6,1
1999	96,6	86,0	175,2	15,6	0,0	0,0	3,0	0,0	33,7	35,9	33,7	30,7
2000	98,0	58,5	63,1	0,0	4,1	17,4	2,0	11,4	0,0	57,0	0,0	53,8
2001	166,6	64,4	43,4	14,3	0,0	6,2	11,6	20,6	6,3	42,9	29,6	49,7
2002	48,2	171,1	80,3	28,1	18,7	12,1	63,2	0	24,4	61,9	44,8	62,3

Estacion: QUIME
 Provincia: Inquisivi
 Deartamento: La Paz

Latitud Sur : 16°59'
 Longitud Oeste: 67°13'
 Altura m.s.n.m.: 3190

PRECIPITACION MENSUAL (mm)

ENDE 1969-1974

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1969						3,3	5,7	6,1	5,2	4,1	54,7	37,5
1970	168,0	126,8	96,0	73,1	15,0	27,5	24,1	3,4	44,3	57,8	53,7	184,5
1971	315,0	412,0	45,5	64,0	87,0	27,0	10,0	78,0	51,5	83,0	117,0	110,8
1972	98,5	179,5	142,5	38,5	18,5	18,5	13,5	50,5	79,5	84,5	82,0	114,0
1973	87,2	94,0	58,0	27,0	16,5	72,0	71,0	115,0	70,0	86,0	127,0	213,5
1974	295,0	355,0	*	*	*	*	12,0	107,0	30,0	123,0	55,0	20,0
1975	*	*	*	*	*	*	*	*	236,0	150,0	167,0	260,0
1976	170,0	160,0	85,0	20,0	45,0	35,0	90,0	50,0	140,0	25,0	100,0	*
1977	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	262,5
1978	289,3	197,8	254,4	83,8	22,1	0,0	16,2	*	*	*	*	*
1979	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
1980	*	*	*	*	*	*	*	*	50,3	91,7	20,0	30,8
1981	93,8	168,4	67,2	33,1	0,0	2,7	18,5	146,4	74,7	117,2	86,6	106,0
1982	200,2	101,0	226,0	71,5	1,0	9,5	2,5	22,0	43,5	65,0	133,5	121,5
1983	20,5	10,5	68,0	62,5	38,0	27,5	92,5	75,0	110,0	36,5	58,0	173,0
1984	333,0	237,5	104,5	72,5	35,0	57,5	2,0	113,5	22,5	167,0	132,0	79,5
1985	152,5	176,0	35,5	130,0	9,5	29,0	15,0	41,5	107,5	44,0	292,5	243,0
1986	142,5	96,0	250,5	48,2	7,6	0,0	43,0	16,0	21,0	54,5	140,5	301,0
1987	285,5	171,0	129,1	71,0	50,5	0,0	64,0	0,0	4,5	31,0	70,5	41,5
1988	175,0	239,5	414,5	114,0	26,5	0,0	0,0	1,0	74,0	0,0	12,5	106,5
1989	82,0	122,5	131,0	242,5	9,0	7,5	50,5	73,0	120,5	63,0	96,5	176,0
1993	95,5	128,6	55,4	32,1	15,9	3,3	11,0	58,8	108,2	91,6	141,2	123,9
1994	140,3	*	70,7	27,4	4,1	6,4	0,0	0,0	8,6	133,3	151,0	132,9
1995	140,9	110,6	190,3	9,4	0,0	0,0	0,0	0,0	21,8	18,8	57,5	95,1
1996	120,0	45,6	58,8	50,6	2,5	0,0	3,8	10,2	41,2	18,2	52,8	92,1
1997	62,3	52,8	28,4	7,7	13,4	1,5	0,0	14,6	33,8	47,8	38,5	64,0
1998	46,9	97,4	98,7	38,3	1,5	1,6	1,5	7,6	51,3	45,0	68,9	55,9
1999	96,4	121,6	121,5	48,5	2,3	1,6	18,6	0,0	36,3	23,7	30,7	63,8
2000	121,4	75,4	73,5	7,0	12,0	39,1	8,1	28,9	27,4	43,7	27,0	58,8
2001	153,2	134,9	101,8	30,1	22,8	10,7	17,7	19,0	30,7	39,5	55,2	80,0
2002	74,8	123,3	86,5	42,8	17,3	40,3	64,8	23,4	50,6	68,5	65,0	64,9

Estación:	Circuata	Latitud Sud:	16° 38' 14"
Departamento:	La Paz	Longitud Oeste:	67° 15' 08"
Provincia:	Inquisivi	Altura m/s/n/m:	2012

DATOS DE : PRECIPITACIÓN TOTAL (mm)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1995	234,0	152,0	144,3	51,9	38,9	12,0	13,2	22,1	30,7	47,8	78,5	150,6
1996	303,0	106,0	100,5	70,9	11,7	31,3	0,0	143,1	106,7	93,2	176,4	236,6
1997	367,2	258,9	170,0	73,6	81,6	1,1	6,1	26,5	34,8	23,9	59,3	110,2
1998	119,9	56,5	154,5	84,5	9,5	56,0	23,5	34,5	86,0	130,0	36,8	****
1999	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****
2000	275,4	302,6	296,7	87,2	43,8	47,2	0,0	38,4	75,9	94,6	61,3	167,9
2001	254,3	220,9	294,7	56,0	52,1	48,4	49,5	79,0	77,3	75,5	131,2	312,8
2002	142,8	230,7	199,0	86,9	28,2	26,9	113,2	82,7	59,6	138,7	159,7	83,1
2003	165,6	129,1	82,5	4,6	12,9	0,4	50,3	38,7	11,8	20,9	78,1	219,0
2004	235,2	243,7	125,4	37,3	78,1	22,7	5,0	29,9	36,3	39,5	82,7	109,4
2005	274,7	295,7	86,6	58,0	3,0	0,0	10,3	1,3	83,7	110,4	75,5	67,8
2006	243,9	77,0	136,6	38,3	10,4	0,0	2,5	26,6	****	73,4	64,5	121,0
2007	100,1	319,4	210,2	142,2	57,0	38,2	18,7	27,8	25,3	89,3	141,6	139,1
2008	289,6	185,0	151,9	29,5	15,5	17,5	23,5	41,0	41,4	108,0	97,4	169,9
2009	171,1	196,7	118,1	43,3	10,4	0,9	2,8	11,8	36,3	44,6	118,7	130,3
2010	196,6	143,5	55,5	3,3	66,1	0,0	30,3	12,4	13,5	12,8	23,3	****
SUMA	3373,4	2917,7	2326,5	867,5	519,2	302,6	348,9	615,8	719,3	1102,6	1385,0	2118,0
MEDIA	224,9	194,5	155,1	57,8	34,6	20,2	23,3	41,0	51,4	73,5	92,3	151,3

Estación:	Chorocona	Latitud Sud:	16° 52' 58"
Departamento:	La Paz	Longitud Oeste:	67° 08' 59"
Provincia:	Inquisivi	Altura m/s/n/m:	2240

DATOS DE : PRECIPITACIÓN TOTAL (mm)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1995	128,2	96,2	73,1	27,7	4,3	1,1	14,0	18,5	50,0	31,5	90,6	103,5
1996	129,8	99,3	106,9	54,4	14,4	47,5	16,9	****	****	****	****	****
1997	112,3	214,1	154,7	55,0	25,8	15,7	0,0	46,3	97,9	64,8	31,4	149,2
1998	145,0	117,6	89,5	64,4	0,9	27,3	0,0	75,1	64,1	87,4	79,2	72,0
1999	150,0	140,9	199,2	24,3	34,4	7,7	34,4	2,5	44,9	31,4	53,4	59,1
2000	188,2	130,9	121,7	19,2	7,9	69,8	19,9	42,5	74,5	94,5	34,8	58,1
2001	216,7	201,3	97,4	61,4	20,2	1,9	25,2	33,5	60,8	72,8	45,5	****
2002	40,6	125,8	123,5	95,6	30,8	34,8	87,8	34,6	****	****	****	****
2003	122,8	****	84,9	34,7	26,8	9,8	47,9	****	36,7	66,2	58,2	170,6
2004	141,2	118,2	43,9	40,1	51,5	36,6	69,6	57,5	10,8	32,9	70,0	83,6
2005	134,5	176,2	73,3	70,0	2,3	0,0	62,6	6,9	130,9	87,4	76,7	157,5
2006	159,6	125,3	59,0	54,2	4,2	4,4	0,0	40,2	5,8	50,8	90,9	116,1
2007	114,2	84,6	72,2	22,9	24,6	13,1	20,2	19,5	****	****	****	****
2008	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****	****
2009	****	****	****	****	****	****	****	****	****	33,0	39,8	58,5
2010	106,0	83,9	45,2	8,8	17,9	11,0	26,0	37,3	0,0	50,0	0,0	****
SUMA	1889,1	1714,3	1344,5	632,7	266,0	280,7	424,5	414,4	576,4	702,7	670,5	1028,2
MEDIA	134,9	131,9	96,0	45,2	19,0	20,0	30,3	34,5	52,4	58,6	55,9	102,8

ANEXO D

Calidad de agua – muestreo

Definiciones

Muestra Puntual.- muestra recogida en un lugar y momento determinados representando la composición de la fuente en ese momento y lugar. También se denomina muestra de sondeo.

Se recomienda en el caso de rubros industriales con escasa variabilidad de procesos. No se recomienda en el caso de rubros industriales con alta diversidad de procesos.

Muestra compuesta.- Muestra obtenida por mezcla en proporciones adecuadas (en forma intermitente ó continua), de dos o más muestras, o partes, de muestras a partir de las cuales se puede obtener el valor medio de la característica estudiada. Las proporciones de la mezcla se calculan generalmente a partir de las medidas de tiempo o de caudal.

La selección de procedimiento de obtención de una muestra compuesta está condicionada a las disponibilidades operacionales del muestrista.

Muestra compuesta proporcional al caudal.

Una vez tomadas las muestras puntuales, se fraccionan en laboratorio, de forma tal, que el volumen de cada una de ellas sea proporcional al caudal medio en el momento en que la muestra puntual fue tomada.

Lo anterior corresponde a:

$$V_i = \frac{Q_i}{\sum_{i=1}^{i=n} Q_i} \times V_o$$

Donde:

V_i = Volumen de muestra correspondiente al i-ésimo muestreo puntual.

Q_i = Caudal correspondiente a las condiciones de toma de la muestra i-ésima.

$\sum_{i=1}^{i=n} Q_i$ = Suma de caudales correspondiente a las “n” tomas de muestras puntuales tomadas.

V_o = Mínimo volumen de muestra necesario para la determinación

$$V_t = \sum_{i=1}^{i=n} V_i$$

Donde:

V_t = Volumen total de la muestra compuesta, en todos los casos $V_t > V_o$.

V_i = Volumen de cada una de las muestras puntuales.

Muestra compuesta proporcional al tiempo.

Se trata de una muestra compuesta en la que el volumen aportado por las simples que la integran es fijo, pero después de que cierta cantidad de flujo ha circulado luego de un periodo predeterminado por la estación de muestreo.

Criterios de muestreo

Identificación de las muestras.- se deben tomar las precauciones necesarias para que en cualquier momento sea posible identificar las muestras. Se deben emplear etiquetas pegadas o colgadas o de lo contrario enumerar los frascos anotando la información en una hoja de registro.

La etiqueta debe contener como mínimo la siguiente información:

Nombre

Ubicación (coordenadas)

Fecha y hora de recolección

Caudal

Tipo de muestra (simple o compuesta)

Especificar el ensayo a realizar (físico, químico, microbiológico, etc.)

Resultados de las mediciones in situ

Preservación de las muestras y tipos de envases.- Solo se permite solo se permite agregar a las muestras los preservantes:

Preservar las muestras durante el transporte por medio de un baño de hielo y conservarlas en refrigeración a 4 °C (277 K).

Toma de muestra.- Las muestras deben ser recogidas del centro de la corriente (en puntos alejados del borde), con la boca del frasco orientada hacia la corriente.



ANEXO E

Tabla N° 1: Preservación de Muestras (NORMATIVO).

PARAMETRO	CONTENEDOR V. BOCA ANCHA CALIBRADO	TAMAÑO DE MUESTRA	TIPO DE MUESTRA	PRESERVACIÓN	PERIODO MAXIMO DE ALMACENAJE
Aceites y grasas	V, boca ancha calibrada	1000	S, C	Adicionar HCl hasta ph<2 refrigerar	28 Días.
Bacterias	P, V	100	Simple	Refrigerar con tiosulfato de sodio	24 Horas.
Cianuros	P, V	500	S, C	Refrigerar con NaOH	14 Días.
Conductividad	P, V	500	S, C	Refrigerado	48 Horas.
Cromo VI	P (A), V(A)	300	Simple	Refrigerada	
DBO	P, V	1000	Simple	Refrigerada	48 Horas.
DQO	P, V	500	S, C	Refrigerada con H ₂ SO ₄ hasta ph <2	28 Días.
Fosfatos	V(A)	100	Simple	Para fosfatos disueltos filtrar inmediatamente refrigerar	28 Días.
Mercurio	Teflón	100	S, C	Preservar con HNO ₃ pH< 2	28 Días.
Otros Metales	P (A), V(A)	500	Simple	Para metales disueltos filtrar inmediatamente adicionar HNO ₃ ph < 2	28 Días.
N-Nitratos	P, V	100	S, C	Lo antes posible refrigerar	48 Horas
Nitratos+ Nitritos	P, V	200	S, C	Adicionar H ₂ SO ₄ hasta ph<2. Refrigerar.	28 Días.
Nitrógeno Amoniacal	P, V	500	S, C	Analizar tan pronto sea posible ó adicionar H ₂ SO ₄ hasta ph<2. Refrigerar.	28 Días.
Fenoles	P, V	500	S, C	Refrigerada con H ₂ SO ₄ hasta	28 Días.

				ph<2.	
Hidrocarburos	V (ámbar)	500	Simple	Refrigerada con H ₂ SO ₄ hasta ph<2.	28 Días.
Nitrógeno Kejeldahl	P, V	500	S, C	Refrigerada con H ₂ SO ₄ hasta ph<2.	7 Días.
ph	P, V	50	Simple	Analizar inmediatamente	2 Horas.
Sólidos	P, V	200	S, C	Refrigerada.	7 Días.
Sulfuros	P, V	100	S, C	Refrigerada añadir 4 gotas de ZnAc ₂ (CN) adicionar NaOH hasta ph>9.	28 Días.
Temperatura	P, V		Simple	Analizar inmediatamente	

P: Plástico (Polietileno de alta densidad), ó su equivalente.

S: Muestra simple.

V: Vidrio.

C: Muestra compuesta.

P(A) ó V(A): Envase enjuagado con solución de 1:1 HNO₃.

Refrigerada: Almacenada a 4°C en la oscuridad.

Fuente: IBNORCA.

ANEXO F



Foto N° 5: pH-metro multiparámetro de campo.



Foto N° 6: Contador de revoluciones marca SIAP y molinete de eje horizontal marca SIAP



Foto N° 7: Micromolinete y contador de revoluciones Z 30.



Foto N° 8: Técnicos SENAMHI



Foto N° 9: Toma de muestra puntual.



Foto N°10: Medición de parámetros in situ.



ANEXO G

Métodos de análisis

Determinación de metales por Espectrometría de Absorción Atómica a Llama

Principio

En espectrofotometría directa por absorción atómica, la muestra es aspirada y atomizada en una llama. El haz de luz de la lámpara de cátodo hueco del elemento a determinar; es dirigido a través de la llama del monocromador a un detector que mide la cantidad de luz absorbida.

La absorción depende de la presencia de los átomos libres en estado fundamental en la llama, cada metal tiene su propia longitud de onda de absorción característica, lo que proporciona un método relativamente libre de interferencias o de radiación.

La cantidad de energía absorbida en llama a una longitud de onda característica es proporcional a la concentración del elemento en la muestra, en un intervalo de concentraciones limitado

1. *Calcio*

Se uso la lámpara de cátodo hueco de calcio a una longitud de onda de 422.7nm, se preparo estándar de 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 mg/L. A las muestras y los estándares se añadió el 10% del volumen final de Sr de 5000 mg/L para evitar interferencias

2. *Magnesio*

Se uso la lámpara de cátodo hueco de magnesio a una longitud de onda de 285.1 nm, se preparo estándar de 0.05, 0.1, 0.15, 0.20, 0.25 mg/L. A las muestras, estándares se añadió el 10% del volumen final de Sr de 5000 mg/L para evitar interferencias.

3. *Sodio*

Se uso la lámpara de cátodo hueco de sodio a una longitud de onda de 589.6 nm, se preparó la siguiente curva analítica 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 mg/L. A las muestras y los estándares se añadió el 10% del volumen final de Li de 5000 mg/L para evitar interferencias.

4. *Potasio*

Se uso la lámpara de cátodo hueco de potasio a una longitud de onda de 776,5 nm, se utilizó un filtro para reducir el color por que se encuentra en la región infra rojo, se preparo estándar de 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 mg/L. A las muestras y los estándares se añadió el 10% del volumen final de Li de 5000 mg/L para evitar interferencias.

5. Hierro

Se uso la lámpara de cátodo hueco de hierro a una longitud de onda de 248,3 nm, se preparó estándares de 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 mg/L.

6. Manganeso

Se utilizó una lámpara de cátodo hueco de manganeso a una longitud de onda de 279,5 nm, se preparó estándares de 0.1, 0.2, 0.6, 0.8, 1.0 mg/L.

7. Cobre

Se utilizó una lámpara de cátodo hueco de cobre a una longitud de onda de 324,8 nm, se preparó estándares de 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 mg/L.

8. Zinc

Se utilizó una lámpara de cátodo hueco de zinc a una longitud de onda de 213,9 nm, se preparó estándares de 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 mg/L.

9. Cadmio

Se utilizó una lámpara de cátodo hueco de cadmio a una longitud de onda de 228,8 nm, se preparó estándares de 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 mg/L.

PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE PLOMO MÉTODO DE ABSORCIÓN ATÓMICA CON HORNO DE GRAFITO

Determinación de metales pesados por Horno de Grafito y Espectrofotometría Absorción Atómica a Llama

Principio

En atomización electro térmica con horno de grafito, la muestra es colocada sobre la plataforma dentro de un pequeño tubo de grafito en los extremos y alineado en el camino óptico de haz. El tubo se calienta eléctricamente en tres etapas:

La primera etapa de sacado, se realice a 120°C bajo un continuo flujo de Ar

La segunda etapa se calienta a 850°C para volatilizar las interferencias y destruir la materia orgánica, se enfría el tubo antes de pasar a la última etapa que se realice a 1800°C para que se atomice el elemento

El analito atomizado absorbe una cantidad de energía emitida por la lámpara de cátodo hueco lo que lo transforma en absorbancia y este a su vez en concentración $\mu\text{g/L}$.

Para la determinación de plomo se utilizó una lámpara de cátodo hueco de plomo a una longitud de onda de 244,8 nm, se preparó estándares de 5, 10, 20, 30, 40, 50 $\mu\text{g/L}$.

Elemento	Modificador	Masa Modificador (mg)	Volumen inyección modificador (μl)
Pb	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	0,2	10

PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE ARSÉNICO

MÉTODO DE ABSORCIÓN ATÓMICA CON GENERADOR DE HIDRUROS

Principio.-

El método físico de análisis utiliza la propiedad que tienen los átomos neutros de absorber a una cierta longitud de onda una cantidad de energía determinada.

El arsénico forma hidruros covalentes volátiles por reacción con el borohidruro de sodio en solución ácida, y su generación como gas permite que sean transferidos a una celda de cuarzo calentada a 900 °C donde se produce la disociación y atomización de los mismos. De esta forma, se realiza la determinación de arsénico por la generación de sus hidruros mediante el sistema de inyección de flujo FIAS.

Para la cuantificación se utiliza como señal analítica la altura de pico o el área de pico integrada.

Para la determinación de arsénico se utilizó una lámpara de cátodo hueco a una longitud de onda de 193,7 nm. Se preparó estándares de 10, 20, 30, 40, 50 $\mu\text{g/L}$.

DETERMINACION DE ANIONES MAYORITARIOS

1. Cloruro

Principio

En una solución neutra ligeramente alcalina, el cromato potásico puede indicar el punto final de una titulación de cloruros con nitrato de plata. Se precipita cloruro de plata cuantitativamente antes de formarse el cromato de plata rojo (método de Mohr).

Preparación de soluciones

Se prepararon las siguientes soluciones:

100ml de solución 0,0141 N de nitrato de plata.

250ml de solución 0,0141 N de cloruro de sodio.

Solución al 5% (P/V) de cromato de potasio.

Cálculo

$$\text{mg Cl}^- / \text{L} = \frac{(A - B) \times N \times 35.450}{\text{ml muestra}}$$

donde:

A= ml valoración para la muestra.

B= ml valoración para el blanco

N= normalidad de nitrato de plata

$$\text{Mg NaCl} / \text{L} = (\text{mg Cl}^- / \text{L}) \times 1,65$$

2. Nitratos

Principio

Esta técnica es usada para muestras de bajo contenido de materia orgánica. La curva de calibración de NO₃ verifica la Ley de Beer hasta los 11ppm N.

La medida de la absorción UV a 220 nm hace posible la determinación rápida de NO₃, dado que la materia orgánica disuelta puede absorber también a 220nm y NO₃ no lo hace a 275nm, se puede hacer una segunda medida a 275nm para corregir el valor de NO₃.

Esta corrección empírica dependerá de la naturaleza y concentración de la materia orgánica y puede variar de unas aguas a otras.

En consecuencia, este método no es recomendable cuando se precise una corrección importante para la absorbancia de la materia orgánica aunque puede ser útil para controlar los niveles de NO_3 en un sistema de aguas con un tipo constante de materia orgánica.

Los factores de corrección para la absorbancia de la materia orgánica se pueden establecer por el método de adiciones, en combinación con el análisis del contenido original de NO_3 por otro método. La filtración de las muestras tiene por objeto eliminar posibles interferencias de las partículas suspendidas, la acidificación con HCl 0,1 M sirve para impedir interferencias por concentraciones de NaOH o CO_3 de hasta 1ppm de CaCO_3 , el cloruro no afecta la determinación

La absorbancia final para patrones y muestras se obtiene de la siguiente ecuación:

$$A = A(220) - (2 * A(275))$$

Preparación de soluciones

Solución madre de nitrato de potasio 0,7218g disueltos en 1 L de agua destilada, 1,00ml = 100 μg $\text{NO}_3\text{-N}$, conservada con 2 ml de CHCl_3/L .

Solución intermedia de nitrato de potasio. Disolver 100ml de la solución madre en 1L de agua, 1,00 ml= 10,0 μg $\text{NO}_3\text{-N}$, conservada con 2 ml de CHCl_3/L .

Solución de HCl 1N.

Preparación de la curva patrón: a partir de la solución intermedia de nitrato se diluyó a 50ml los volúmenes de 0,0; 0,10; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0 y 4,0 ml.

Antes de la lectura se adicionó 1ml de HCl 1N a las muestras como también a los patrones.

3. Sulfatos

Principio

Éste ion precipita en un medio de ácido acético con cloruro de bario de modo que se forman cristales de sulfato de bario de tamaño uniforme. Se mide la absorbancia

luminosa de la suspensión de sulfato de bario mediante un espectrofotómetro y se determina la concentración de sulfatos por comparación de la lectura con una curva patrón.

Preparación de soluciones

Solución tampón A; se disolvió 30g de $MgCl_2 \cdot 6H_2O$, 5g acetato sodio, 1g nitrato de potasio y 20 ml de ácido acético en 500 ml de agua destilada y se completó a 1 L.

Cloruro de bario; cristales, malla 20 a 30.

Solución patrón de sulfato; se preparó una solución patrón de sulfato pesando y disolviendo 0,1479 g de Na_2SO_4 anhidro, $1ml = 100\mu g SO_4^{-2}$.

Curva patrón: a partir de la solución patrón se preparó la curva de 10, 20, 30, 40, 50, 60 y 70 mg/L.

Procedimiento

En 50 ml de muestra (diluida respectivamente), se añade 20 ml de solución tampón y una cucharada de cristales de $BaCl_2$ y se procede a agitar de forma constante por espacio de 60 segundos, luego de la agitación se procedió a la lectura.

Se trató los patrones de la misma forma.

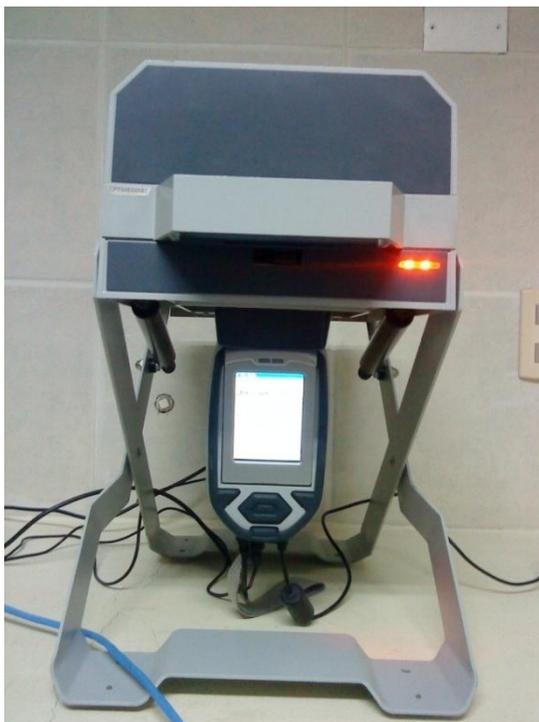


Foto N° 11: FRX, centro de promoción de tecnologías sostenibles.



Foto N° 12: Desionizador de agua destilada y micropipetas Eppendorf



Foto N° 13: Balanza analítica



. Foto N° 14: Soluciones patrón.



Foto N° 15: Trabajo en laboratorio (área de Hidroquímica).



Foto N°16: trabajo en laboratorio (área de Hidroquímica).



Foto N°17: Espectrómetro Perkin Elmer AAnalyst 200, de llama.



Foto N°18: Espectrómetro Perkin Elmer AAnalyst 100, horno de grafito.



Foto N°19: Espectrómetro Perkin Elmer AAnalyst 100, generador de hidruros.