



**DINÁMICA DE METALES PESADOS
QUE AFECTAN A LOS CUERPOS DE AGUA
DEL SISTEMA HÍDRICO LAGO TITICACA,
RÍO DESAGUADERO, LAGO POOPÓ
Y SALAR DE COIPASA – TDPS**

República del Perú
Estado Plurinacional de Bolivia
Autoridad Binacional Autónoma Lago Titicaca

**DINÁMICA DE METALES PESADOS QUE
AFECTAN A LOS CUERPOS DE AGUA DEL
SISTEMA HÍDRICO LAGO TITICACA, RÍO
DESAGUADERO, LAGO POOPÓ Y SALAR
DE COIPASA - TDPS**

Primera edición

César Gregorio Espíritu Limay
Juan José Ocola Salazar
Llojan Chuquisengo Picón
Marco Antonio Meza Álvarez

Perú - Bolivia, 2022

© **Autoridad Binacional Autónoma del Sistema Hídrico del Lago Titicaca-Río Desaguadero-Lago Poopó y Salar de Coipasa (ALT)**

Editado por:

Autoridad Binacional Autónoma Lago Titicaca (ALT)

Av. Costanera, Manzana D, Lote 26, Puno - Perú, Tel. (+5151) 601588

Av. Sánchez Bustamante esquina Calle 14 Calacoto, Piso 2 del Edificio Metrobol II No. 7995, La Paz-Bolivia, Tel.(+591-2) 2112336 - 2128393.

AUTORES

César Gregorio Espíritu Limay, Juan José Ocola Salazar,
Llojan Chuquisengo Picón, y Marco Antonio Meza Álvarez

CITAS AL DOCUMENTO

El documento deberá ser citado como sigue:

Espíritu, C.; Ocola, J.; Chuquisengo, LL. y Meza, M. Dinámica de metales pesados que afectan a los cuerpos de agua del Sistema TDPS, 2022.

Colaboradores:

Lic. Luis Fernando Cáceres Choque

Ing. Julio César Miranda Aranibar

Ing. Jaime Escalante Arcos

Personal de apoyo:

Sr. Gonzalo Candia Flores

Sr. Wilbert Mamani Llanos

Primera edición, octubre 2022

Tiraje, 50 ejemplares

Depósito Legal en la Biblioteca Nacional de Perú: 2022-09449

ISBN en la Biblioteca Nacional de Perú: 978-612-49062-0-6

Edición y diseño: Meliza Ayaviri Arias

Imprenta: Arco Iris EIRL

Calle Carabaya N° 106 Puno, Perú

Octubre, 2022

Prohibida la reproducción de este libro por cualquier medio, total o parcialmente, sin permiso expreso de la Autoridad Binacional Autónoma del lago Titicaca (ALT).

Perú - Bolivia

ÍNDICE DE CONTENIDO

Lista de figuras.....	5
Lista de tablas.....	9
Acrónimos, siglas y abreviaturas.....	11
CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES.....	13
1.1 INTRODUCCIÓN.....	13
1.2 OBJETIVOS.....	14
1.2.1 Objetivo general.....	14
1.2.2 Objetivos específicos.....	14
1.3 ALCANCE DE ESTUDIO.....	15
1.4 ÁMBITO GEOGRÁFICO.....	15
1.5 MARCO LEGAL.....	18
1.5.1 Perú.....	18
1.5.2 Bolivia.....	18
CAPÍTULO II: ASPECTOS CONCEPTUALES.....	19
2.1 CALIDAD DEL AGUA Y EFECTOS DE LOS METALES PESADOS.....	19
2.2 ORIGEN DEL ARSÉNICO.....	21
2.3 QUÍMICA DEL ARSÉNICO.....	22
2.4 TOXICIDAD DEL ARSÉNICO.....	23
2.5 LEGISLACIÓN INTERNACIONAL DEL ARSÉNICO.....	25
2.6 EXPOSICIÓN Y MOVILIZACIÓN DEL ARSÉNICO.....	26
2.7 EL POTENCIAL DE REDOX DE LAS ESPECIES DE ARSÉNICO.....	28
CAPÍTULO III: REFERENCIAS DE LA DISTRIBUCIÓN DEL ARSÉNICO.....	31
3.1 DISTRIBUCIÓN DEL ARSÉNICO.....	31
3.2 EL ARSÉNICO A ESCALA MUNDIAL.....	32
3.3 EL ARSÉNICO EN SUDAMÉRICA.....	33
3.4 EL ARSÉNICO EN LAS CUENCAS DEL SUR DE LA COSTA PERUANA.....	35
3.5 EL ARSÉNICO EN EL SISTEMA TDPS.....	36
CAPÍTULO IV: ASPECTOS METODOLÓGICOS.....	41
4.1 GUÍAS Y PROTOCOLOS DE MUESTREO.....	41
4.2 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE PUNTOS DE MUESTREO.....	42
4.3 PUNTOS DE MUESTREO.....	42
4.4 SELECCIÓN DE LABORATORIO.....	51
4.5 SELECCIÓN DE PARÁMETROS.....	55
4.6 EQUIPOS Y MATERIALES UTILIZADOS.....	56
4.7 ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD.....	58
4.8 PROCESAMIENTO DE DATOS.....	58
4.8.1 Relación de los iones y sólidos disueltos con la conductividad eléctrica (CE).....	58
4.8.2 Relaciones hidro químicas.....	59
4.8.3 Evaluación hidroquímica.....	61
4.8.4 Balance iónico.....	61
4.8.5 Diagramas hidroquímicos.....	62
4.8.6 Especiación de arsénico.....	66
4.8.7 Modelo de especiación química de arsénico (arsenito y arsenato).....	67
4.8.8 Relación oxígeno disuelto en mg/l y porcentaje de saturación (%).....	70

4.9	CRITERIOS DE EVALUACIÓN.....	71
4.9.1	Calidad de agua superficial.....	71
4.9.2	Calidad de agua subterránea.....	73
4.9.3	Calidad de agua residual municipal y potable.....	74
4.9.4	Calidad de sedimentos.....	76
	CAPÍTULO V: RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	77
5.1	CALIDAD DEL AGUA.....	77
5.1.1	Calidad de agua superficial.....	77
5.1.2	Calidad de agua subterránea.....	100
5.1.3	Calidad de agua con influencia antrópica (minera y residual municipal) y potable.....	118
5.1.4	Análisis hidroquímico del agua superficial y subterránea.....	127
5.1.5	Especiación química del arsénico en el agua superficial y subterránea.....	148
5.2	CALIDAD DE LOS SEDIMENTOS EN RELACIÓN A LOS METALES PESADOS.....	150
	CAPÍTULO VI: DISCUSIONES, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	159
6.1	DISCUSIONES.....	159
6.2	CONCLUSIONES.....	181
6.3	RECOMENDACIONES.....	183
	BIBLIOGRAFÍA.....	185

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Ámbito del sistema hídrico TDPS.....	17
Figura 2.1: Ciclo del arsénico simplificado.....	22
Figura 2.2: Movilización del arsénico en diferentes ambientes y vías de acceso a los seres humanos..	27
Figura 2.3: a) Potencial Redox y especiación del arsénico, b) Transformación de las especies de arsénico y c) Estructura química de las especies toxicológicamente relevantes.....	29
Figura 3.1: Regiones contaminadas con arsénico superpuestas en el mapa tectónico mundial.....	32
Figura 3.2: Rango de afectación de arsénico en los países del mundo con las regiones más afectadas en Asia del sur y Sudamérica.....	32
Figura 3.3: Concentración de arsénico y densidad población de Argentina.....	34
Figura 3.4: Mapa de distribución y dirección de flujo de arsénico en la zona sur del Lago Poopó. (a) Mapa de distribución de arsénico (As), y (b) Mapa de dirección de flujo del agua superficial y subterránea en la zona sur del Lago Poopó y la zona roja de mayor concentración de As llamado cinturón Pack (franja de arsénico).....	37
Figura 3.5: Mapa de ubicación de pozos, evaluados en junio 2015 y septiembre 2016, de aguas subterráneas de la cuenca del río Callacame-Desaguadero en Puno.....	39
Figura 4.1: Mapa de ubicación de los puntos de muestreo de aguas superficiales.....	52
Figura 4.2: Mapa de ubicación de los puntos de muestreo de aguas subterráneas.....	53
Figura 4.3: Mapa de ubicación de los puntos de muestreo de sedimentos.....	54
Figura 4.4: Equipos utilizados en el muestreo. (a) Multiparámetro portátil HANNA, (b) Turbidímetro HACH, (c) GPSMAP 64S.....	56
Figura 4.5: Cámara Fotográfica digital CANON	57
Figura 4.6: Materiales utilizados en el muestreo. (a) brazo muestreador de acero inoxidable y (b) filtros de jeringa Minisart y cartucho MetalSoft de separación de arsenito (As ³⁺) y arsenato (As ⁵⁺) soluble.....	57
Figura 4.7: Relación de los sólidos totales disueltos (STD) con los valores de K para diferentes tipos de agua.....	59
Figura 4.8: Gráfico de rCa/rMg y rNa/rCl que muestra los mecanismos de disoluciones.....	60
Figura 4.9: Diagrama de Stiff.....	63
Figura 4.10: Diagrama trilinear de Piper.....	64
Figura 4.11: Diagrama de Gibbs.....	65
Figura 4.12: Diagrama de Mifflin.....	66
Figura 4.13: Esquema de separación de las especies de arsénico.....	67
Figura 4.14: Relación de la solución de llenado KCl del electrodo de referencia (Ag/AgCl) y la temperatura (°C)	69
Figura 4.15: Relación de temperatura (°C) y el potencial de electrodo de referencia Ag/AgCl con solución de relleno KCl 3,5 M (Eh°).....	70
Figura 4.16: Relación de concentración en mg/l y porcentaje (%) de oxígeno disuelto del agua superficial y subterránea.....	70
Figura 5.1: Valores de pH del agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	85
Figura 5.2: Valores de oxígeno disuelto del agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	86
Figura 5.3: Valores de conductividad eléctrica (CE) del agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	86
Figura 5.4: Valores de turbidez del agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	87

Figura 5.5: Concentraciones de sólidos totales en suspensión – STS del agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	88
Figura 5.6: Concentraciones de cloruro en agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	88
Figura 5.7: Concentraciones de sólidos totales disueltos (STD) del agua superficial de Perú y Bolivia - sistema TDPS	89
Figura 5.8: Concentraciones de sulfato en agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	90
Figura 5.9: Concentraciones de calcio en agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	91
Figura 5.10: Concentraciones de sodio en agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	91
Figura 5.11: Concentraciones de arsénico en agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	92
Figura 5.12: Concentraciones de boro en agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	93
Figura 5.13: Concentraciones de antimonio en agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS..	94
Figura 5.14: Concentraciones de aluminio en agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS....	95
Figura 5.15: Concentraciones de manganeso en agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	96
Figura 5.16: Concentraciones de hierro en agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	97
Figura 5.17: Concentraciones de magnesio en agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS..	97
Figura 5.18: Concentraciones de selenio en agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	98
Figura 5.19: Concentraciones de litio en agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	99
Figura 5.20: Registro de pH en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.....	107
Figura 5.21: Concentraciones de oxígeno disuelto en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.....	107
Figura 5.22: Valores de conductividad eléctrica (CE) en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.....	108
Figura 5.23: Valores de turbidez en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.....	109
Figura 5.24: Concentraciones de sólidos totales disueltos (STD) en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.....	109
Figura 5.25: Concentraciones de fluoruro en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.....	110
Figura 5.26: Concentraciones de cloruro en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.....	111
Figura 5.27: Concentraciones de sulfato en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.....	111
Figura 5.28: Concentraciones de nitrato en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.....	112
Figura 5.29: Concentraciones de sodio en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.....	113
Figura 5.30: Concentraciones de calcio en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.....	113
Figura 5.31: Concentraciones de arsénico en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.....	114
Figura 5.32: Concentraciones de boro en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.....	115
Figura 5.33: Concentraciones de aluminio en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.....	115
Figura 5.34: Concentraciones de manganeso en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia...	116
Figura 5.35: Concentraciones de hierro en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.....	117
Figura 5.36. Concentraciones de cobre en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.....	117
Figura 5.37: Valores de pH en agua de actividades antrópicas.....	121
Figura 5.38: Concentraciones de sólidos totales en suspensión (STS) en agua de actividades antrópicas.....	121
Figura 5.39: Concentración de cloruro en agua de actividades antrópicas.....	122
Figura 5.40: Concentraciones de sodio en agua de actividades antrópicas.....	122
Figura 5.41: Concentraciones de boro en agua de actividades antrópicas.....	123
Figura 5.42: Concentraciones de litio en agua de actividades antrópicas.....	123
Figura 5.43: Concentraciones de sulfato en agua de actividades antrópicas.....	124
Figura 5.44: Concentraciones de arsénico en agua de actividades antrópicas.....	124

Figura 5.45: Concentraciones de aluminio en agua de actividades antrópicas.....	125
Figura 5.46: Concentraciones de manganeso en agua de actividades antrópicas.....	125
Figura 5.47: Concentraciones hierro en agua de actividades antrópicas.....	125
Figura 5.48: Variación de metales del agua subterránea y superficial - sistema TDPS.....	127
Figura 5.49: Relación entre la conductividad eléctrica (CE) y los sólidos totales disueltos (STD) del agua superficial y subterránea de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	128
Figura 5.50: Relación entre la suma de aniones y la conductividad eléctrica del agua superficial y subterránea de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	129
Figura 5.51: Relación entre la suma de cationes y la conductividad eléctrica del agua superficial y subterránea de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	129
Figura 5.52: Relación entre la turbidez y los Sólidos totales en suspensión (STS) en escala potencial del agua superficial y subterránea de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	130
Figura 5.53: Relación entre la turbidez y los Sólidos totales en suspensión (STS) en escala lineal del agua superficial y subterránea de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	131
Figura 5.54: Error de balance iónico (EBI) del agua superficial y subterránea de Perú y Bolivia – sistema TDPS	131
Figura 5.55: Diagrama de Piper de los pozos de agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS..	134
Figura 5.56: Diagrama de Piper de los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia – sistema TDPS..	135
Figura 5.57: Mapa Hidroquímico de aguas superficiales (ríos) en el lado de Perú.....	136
Figura 5.58: Mapa Hidroquímico de aguas subterráneas (pozos) en el lado de Perú.....	137
Figura 5.59: Mapa Hidroquímico de aguas superficiales (ríos) en el lado de Bolivia.....	138
Figura 5.60: Mapa Hidroquímico de aguas subterráneas (pozos) en el lado de Bolivia.....	139
Figura 5.61: Diagrama de Stiff de de agua subterránea de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	140
Figura 5.62: Diagrama de Stiff de agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	141
Figura 5.63: Diagrama de Gibbs (Na/Na+Ca vs STD) de los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.....	145
Figura 5.64: Diagrama de Gibbs (Cl/Cl+HCO3 vs STD) de los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.....	145
Figura 5.65: Diagrama de Mifflin de los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.....	146
Figura 5.66: Relación rNa/Cl y rCa/rMg de los pozos de aguas subterránea de Perú y Bolivia.....	146
Figura 5.67: Índices cloro alcalinos (CAI) de los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.....	147
Figura 5.68: Concentraciones de arsénico total y arsenito (As III) en diciembre 2020 del agua subterránea y superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	148
Figura 5.69: Concentraciones de arsénico total y arsenito (As III) en septiembre 2021 del agua subterránea y superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	148
Figura 5.70: Porcentajes de las especies de arsénico en diciembre 2020 del agua subterránea y superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	149
Figura 5.71: Porcentajes de las especies de arsénico en septiembre 2021 del agua subterránea y superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	149
Figura 5.72: Concentración de arsénico en los sedimentos de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	151
Figura 5.73: Concentraciones de plomo en los sedimentos de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	156
Figura 5.74: Concentraciones de cobre en los sedimentos de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	156
Figura 5.75: Concentraciones de zinc en los sedimentos de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	157
Figura 5.76: Concentraciones de cadmio en los sedimentos de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	157
Figura 6.1: Mapa de color de los porcentajes de metales suspendidos de septiembre 2021 en el agua superficial de Perú y Bolivia – Sistema TDPS.....	161

Figura 6.2: Mapa de color de los porcentajes de metales suspendidos de septiembre 2021 en el agua subterránea de Perú y Bolivia – Sistema TDPS.....	162
Figura 6.3: Concentraciones de a) aluminio total, b) hierro total, c) sólidos totales en suspensión (STS), d) turbidez y otros metales en los cuerpos de agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	165
Figura 6.4: Concentraciones de a) arsénico total, b) boro total, c) sodio total, d) antimonio total, e) cloruro y otros metales en los cuerpos de agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	166
Figura 6.5: Concentraciones de a) aluminio total, b) hierro total, c) manganeso total, d) turbidez y e) sólidos totales en suspensión (STS) en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	167
Figura 6.6: Concentraciones de a) arsénico total, b) boro total, c) sodio total, d) cloruro y e) nitrato en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	168
Figura 6.7: Porcentajes suspendido de los metales en el río San Juan de Sora Sora (BAS09).....	172
Figura 6.8: Porcentajes suspendidos de los metales en el agua subterránea y superficial de Perú y Bolivia - sistema TDPS.....	173
Figura 6.9: Concentración de arsénico total (a) y arsenito (b) del agua superficial, y concentración de arsénico total (c) y arsenito (d) del agua subterránea - sistema TDPS.....	174
Figura 6.10: Ríos con bajas concentraciones en sedimentos de a) arsénico, b) cobre, z) zinc, d) cadmio y e) plomo de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	177
Figura 6.11: Ríos con altas concentraciones en sedimentos de a) arsénico, b) cobre, z) zinc, d) cadmio y e) plomo de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	178
Figura 6.12: Concentraciones en los cuerpos de agua superficial de a) estaño, b) antimonio y c) plata de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	179
Figura 6.13: Concentraciones en los sedimentos de a) estaño, b) antimonio y c) plata de Perú y Bolivia – sistema TDPS.....	179

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1: Límite máximo de concentración de arsénico (As) en agua potable.....	27
Tabla 2.2: Límites máximos permisibles para arsénico en agua de consumo humano por diferentes países.....	27
Tabla 3.1: Lista de países afectados por la contaminación de arsénico en agua subterránea.....	33
Tabla 4.1: Documentos para la toma de muestra de agua (superficial, residual municipal, potable y subterránea) y sedimentos.....	41
Tabla 4.2: Ubicación geográfica de los puntos de muestreo de agua superficial.....	43
Tabla 4.3: Ubicación geográfica de los puntos de muestreo de agua subterránea.....	45
Tabla 4.4: Ubicación geográfica de los puntos de muestreo de sedimentos.....	47
Tabla 4.5: Ubicación política de los puntos de muestreo de agua superficial.....	49
Tabla 4.6: Ubicación política de los puntos de muestreo de agua subterránea.....	50
Tabla 4.7: Ubicación política de los puntos de muestreo de sedimentos.....	51
Tabla 4.8: Información del laboratorio para el análisis de las muestras.....	51
Tabla 4.9: Número de puntos de muestreo y parámetros de agua superficial, subterránea y sedimentos analizados en el laboratorio.....	55
Tabla 4.10: Equipos utilizados en la toma de muestra.....	56
Tabla 4.11: Criterios para establecer las facies hidroquímicas.....	61
Tabla 4.12: Valores de los parámetros de agua superficial en Perú (ECA) y Bolivia (VMA).....	72
Tabla 4.13: Valores de parámetros de agua subterránea referencial en Perú (ECA) y Bolivia (VMA)..	73
Tabla 4.14: Valores de los parámetros de agua residual y potable en Bolivia.....	75
Tabla 4.15: Concentraciones de metales en sedimentos de agua dulce según la guía canadiense.....	76
Tabla 5.1: Comparación de los resultados de aguas superficiales (ríos) con la normativa de Perú..	79
Tabla 5.2: Comparación de los resultados de aguas superficiales (ríos) con la normativa de Bolivia.....	82
Tabla 5.3: Comparación de los resultados de aguas subterráneas (pozos) con la normativa de Perú...	101
Tabla 5.4: Comparación de los resultados de aguas subterráneas (pozos) con la normativa de Bolivia.....	104
Tabla 5.5: Comparación referencial de los resultados de agua residual de la PTAR Oruro y agua potable de Pampa Aullagas con la normativa de Bolivia.....	119
Tabla 5.6: Resultados de comparación de los metales del río San Juan de Sora Sora-Huanuni con los VMA-Clase B.....	126
Tabla 5.7: Facie hidroquímica de los cuerpos de agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS...	132
Tabla 5.8: Facie hidroquímica de los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia – sistema TDPS...	133
Tabla 5.9: Clasificación de Stuyfzand del agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS..	142
Tabla 5.10: Clasificación de Stuyfzand del agua subterránea de Perú y Bolivia – sistema TDPS..	143
Tabla 5.11: Comparación referencial de los resultados de sedimentos de los ríos de Perú con la normativa canadiense.....	152
Tabla 5.12: Comparación referencial de los resultados de sedimentos de los ríos de Bolivia con la normativa canadiense.....	154

ACRÓNIMOS, SIGLAS Y ABREVIATURAS

ALT	Autoridad Binacional Autónoma del Lago Titicaca
ANA	Autoridad Nacional del Agua
APHA	American Public Health Association
As III / As ³⁺	Arsenito
As V / As ⁵⁺	Arsenato
ASH ₃	Arsina
As ⁰	Arsénico elemental
Cl ⁻	Cloruro
CE	Conductividad Eléctrica
CEQG	Canadian Environmental Quality Guidelines
DGA	Dirección General de Aguas de Chile
DIRESA	Dirección Regional de Salud Ambiental
DMA	Ácido Dimetilarsínico
EBI	Error de balance iónico
Eh	Potencial Redox con respecto a un electrodo de referencia
EPA:	Environmental Protection Agency
ECA	Estándar de Calidad Ambiental
ECA-Agua	Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para agua
F ⁻	Fluoruro
GSH	Glutation
Hab.	Habitantes
HCO ₃ ⁻	Alcalinidad por bicarbonatos
iAs	Arsenicales inorgánicos
IEC	International Electrotechnical Commission
INACAL	Instituto Nacional de Calidad
ISO	International Organization for Standardization
ISQG	Interim Sediment Quality Guideline
LPDL	Límites Permisibles para Descargas Líquidas
LRH	Ley de Recursos Hídricos
MINAM	Ministerio del Ambiente
MMA	Ácido Monometilarsínico
NB 512	Norma Boliviana 512
NO ₃ ²⁻	Nitrato
NOM	Normal Oficial Mexicana
Nt	Nitrógeno total
NTP	Norma Técnica Peruana
°C	Grados centígrados
OEA	Organización de los Estados Americanos
OEFA	Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental
OMS	Organización Mundial de Salud
ORLT	Obra de regulación del Lago Titicaca
ORP	Potencial de Óxido Reducción
PD	Plan Director
pH	Potencial de hidrógeno

PCM	Presidencia de Consejo de Ministros
PDGB	Plan Director Global Binacional
Pe	Potencial electrónico
PEL	Probable Effect Level
PHREEQC	pH-Redox-Equilibrio-lenguaje C
PMGRH	Proyecto de Modernización de la Gestión de los Recursos Hídricos
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
PO ₄ ³⁻	Fosfato
PTAP	Planta de tratamiento de agua potable
PTAR	Planta de tratamiento de agua residual
RMCH	Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica
SO ₄ ²⁻	Sulfato
SGB	Sociedad Geológica Boliviana
STD	Sólidos totales disueltos
STS	Sólidos totales en suspensión o suspendidos
TDPS	Sistema Hídrico Titicaca - Desaguadero - Poopó - Salar de Coipasa
T°	Temperatura
UV	Ultravioleta
VMA	Valores Máximos Admisibles
VMAc	Valor Máximo Aceptable
WHO	World Health Organization
WGS84	World Geodesic System 84

CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES

1.1 INTRODUCCIÓN

La Autoridad Binacional Autónoma del Sistema Hídrico del Lago Titicaca, Río Desaguadero, Lago Poopó, Salar de Coipasa (ALT); es una entidad de derecho público internacional con plena autonomía de decisión y gestión en el ámbito técnico, administrativo-económico y financiero, depende funcionalmente de los Ministerios de Relaciones Exteriores del Perú y Bolivia. Creada en 1996 por convenio binacional entre los gobiernos de Bolivia y Perú aprobado con Resolución Legislativa N° 26873 en Perú y Ley N° 1972 en Bolivia.

La ALT tiene entre algunos de sus objetivos:

- Promover y conducir las acciones, programas y proyectos, para la conservación, control y protección de los recursos hídricos e hidrobiológicos del Sistema Hídrico Titicaca - Desaguadero - Poopó – Salar de Coipasa (en adelante, Sistema TDPS) en el marco del Plan Director Global Binacional (PDGB).
- Contribuir al desarrollo sostenible en el ámbito del TDPS; basado en el aprovechamiento racional de los recursos naturales: agua, biodiversidad y suelo.
- Contribuir al control de las fuentes contaminantes que afectan la calidad de los recursos hídricos del ámbito del TDPS.

Asimismo, la ALT entre sus funciones relacionadas al presente estudio tiene:

- Estudiar y analizar instrumentos de armonización legal y reglamentaria de las normas nacionales con relación a la Gestión de Recursos Hídricos e Hidrobiológicos el TDPS.
- Apoyar y promover la preservación, recuperación, protección y conservación de los ecosistemas naturales, de acuerdo con el Plan Director (PD), tendiendo a mantener y mejorar la sustentabilidad ambiental del TDPS. Establecer normas de calidad del agua. Promover tecnologías de uso racional de los Recursos Naturales.

En ese contexto, la ALT en el marco de sus objetivos y funciones, y por acuerdo de los países, realizó el “DINÁMICA DE METALES PESADOS¹ QUE AFECTAN A LOS CUERPOS DE AGUA DEL SISTEMA HÍDRICO LAGO TITICACA, RÍO DESAGUADERO, LAGO POOPÓ Y SALAR DE COIPASA - TDPS”, cuyos trabajos de campo fueron realizados del 17 al 26 de diciembre de 2020 (época de creciente) y del 22 al 29 de septiembre de 2021 (época de estiaje). La información presentada en el presente estudio permite conocer la calidad del agua desde el punto de vista de los metales pesados mediante su dinámica; con especial énfasis en el estudio del arsénico y sus especies, tanto en aguas superficiales, subterráneas y sedimentos.

Así mismo, en base a la información disponible relacionada con la geología regional del Sistema TDPS, establece en términos generales el origen y su distribución, además de algunas causas antropogénicas, que influyen en la alteración de la calidad del agua de determinados ríos y pozos.

Cabe destacar, que las razones principales que justificaron la realización del estudio, en primer lugar, fueron los usos del agua para consumo humano, riego y bebida de animales, y la conservación del ecosistema acuático, ello teniendo en cuenta que la calidad del agua de los diversos cuerpos de agua (superficial y subterráneas) son fuentes de abastecimiento tanto, para poblaciones del ámbito rural como urbano. En segundo lugar, conocer la predominancia de las especies del arsénico: arsenito (As III) o arsenato (As V), con respecto a la incidencia negativa de una de ellas en la salud de las personas como el medio ambiente, y que considera la presencia de algunos metales pesados en altas concentraciones que constituyen un problema crítico en términos ambientales, y de salud pública, debido a su toxicidad, aunque para el caso del ámbito de estudio, no existe información al respecto.

Por lo tanto, el presente estudio constituye en una valiosa fuente de información, que permite conocer y comprender la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, y su relación con las fuentes (naturales o antropogénicas), la dinámica y la interacción con otros elementos químicos en las aguas que pueden afectar su uso; información útil para la toma de decisiones de las autoridades competentes en materia de recursos hídricos y abastecimiento de agua potable de Perú y Bolivia.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Contribuir al conocimiento de la calidad del agua y la dinámica de metales pesados que afectan a los cuerpos de agua (superficial y subterránea) del Sistema TDPS, teniendo en cuenta su uso.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar la calidad del agua y la dinámica de los metales pesados en el agua superficial y subterránea.
- Realizar el análisis hidroquímico del agua superficial y subterránea.
- Evaluar la especiación química del arsénico en el agua superficial y subterránea.

¹ En el presente estudio los metales pesados abarcan los metales de transición (hierro, aluminio, zinc, cobre, entre otros) y los metaloides (arsénico, boro y antimonio). Asimismo, incluye a los metales alcalinos (litio, sodio y potasio), alcalinos terrosos (berilio, magnesio, calcio, estroncio y bario) y un no metal (selenio).

- Evaluar la calidad de los sedimentos desde el punto de vista de los metales pesados.
- Identificar cualitativamente las fuentes de los metales pesados y en particular del arsénico.

1.3 ALCANCE DE ESTUDIO

El estudio evalúa la dinámica de arsénico (As) en sus concentraciones totales y especies químicas As III (As^{3+}) As V (As^{5+}) y otros metales totales, basados en los resultados de los análisis y mediciones de parámetros de campo de 17 puntos de aguas subterráneas (pozo de uso para consumo humano y abrevadero de animales), 27 muestras de agua superficial de ríos, dos (2) muestras de agua residual de la Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR de Oruro) y una (1) muestra de agua potable en el municipio de Pampa Aullagas dentro del sistema hídrico TDPS.

El ámbito de este sistema hídrico comprende desde la parte norte del lago Titicaca en Perú (ríos Huancané, Ramis y Coata) hasta el sur en Bolivia (ríos Lauca y Laka Jahuirá).

Los parámetros evaluados *in situ* son: pH (potencial de hidrógeno), ORP (Potencial Oxido Reducción), temperatura (T°), conductividad eléctrica (CE) y laboratorio de ensayo: sólidos totales disueltos (STD), sólidos totales en suspensión (STS), metales totales y disueltos, arsénico III (As^{3+}), alcalinidad por bicarbonatos (HCO_3^-), cloruro (Cl), sulfato (SO_4^{2-}), fluoruro (F⁻), nitrato (NO_3^{2-}), nitrógeno total (Nt) y fosfato (PO_4^{3-}). El estudio evalúa además 14 puntos de sedimentos de los ríos para análisis de metales totales en el laboratorio de ensayo de Perú.

1.4 ÁMBITO GEOGRÁFICO

El área de estudio está constituida por las cuencas hidrográficas del lago Titicaca, río Desaguadero, lago Poopó y el Salar de Coipasa denominado sistema hídrico TDPS. Este sistema hídrico transfronterizo es una cuenca endorreica cuya área comparte entre Perú, Bolivia y Chile (ver Figura 1.1).

La superficie del sistema hídrico TDPS tiene una extensión de **145 253 km²**, con una altitud promedio de 3800 m.s.n.m., siendo el punto más alto ubicado en el nevado Sajama con 6452 m.s.n.m. y el punto más bajo en el Salar de Coipasa con 3653 m.s.n.m. La geología del sistema hídrico TDPS es compleja con diversas unidades geológicas a escala regional. Los lagos más importantes en el sistema hídrico son: el Titicaca (corazón hidrológico del sistema), Poopó y Uru Uru, estos últimos recargados principalmente por las descargas del río Desaguadero, efluente del Titicaca.

El río principal del sistema TDPS es el Desaguadero, el cual nace en el extremo suroeste del lago Titicaca y después de un recorrido de 390 km, desemboca en el lago Poopó. La subcuenca del río Desaguadero drena un área de 29850 km² entre la estación hidrométrica en el Puente Internacional (Perú-Bolivia) y la estación hidrométrica de Chuquiña (antes de la bifurcación en población de La Joya) en donde el río Desaguadero se divide en dos brazos principales: izquierdo en dirección al lago Uru Uru que cuenta con casi todos los sistemas de riego importantes del Bajo Desaguadero que, por problemas de sedimentación, son el 30 a 40% del caudal del río antes de su división, y el derecho - que junto con múltiples canales – desemboca en el lago Poopó (Quintanilla et al., s. f.).

Otro río transfronterizo importante en este sistema es el Maure-Mauri (Maure en Perú y Mauri en Bolivia), afluente principal del río Desaguadero, aguas abajo de la localidad de Calacoto en Bolivia. Este río ocupa la porción sudoccidental del Altiplano Central entre 6300 y 3795 m.s.n.m. y nace en la cordillera occidental al oeste del TDPS (en territorio peruano), de origen volcánico. De otro lado, el río Lauca (transfronterizo) es el único que desemboca en el Salar de Coipasa de Bolivia, el cual nace en las lagunas de Cotaconi en Chile y cuya cuenca se emplaza sobre los 4000 m.s.n.m. en medio de cordones montañosos de gran altura (DGA, 2004).

En el sector peruano del TDPS, los ríos principales son: Ramis, Coata, Ilave, Huancané e Ilpa, Suhez (río transfronterizo) y en Bolivia, los ríos: Ccallacame, Angostura-Pizacoma, Jacha Mauri, Ingenio-Llinkhi, Caranguilla, Jacha Jahuira, Laka Jahuira, Mata Jahuira, Caracollo, Junthuma-Sajama, Ramada-Turco, entre otros ríos afluentes del río Desaguadero en el tramo Aguallamaya-Nazacara, San Juan de Sora Sora-Huanuni que desemboca en el lago Poopó.

Para evaluar la dinámica de metales pesados se realizaron dos (02) campañas de monitoreo: diciembre de 2020 (época de creciente) y septiembre de 2021 (época de estiaje).

Cabe destacar que, cada vez son más regiones en las que se conocen problemas por contaminación de arsénico, tal es el caso en Estados Unidos de América, Canadá, Bangladesh, China, India, y varios países de América Latina como México, Argentina, Bolivia, Brasil y Nicaragua, donde la fuente de arsénico es geogénica además de antropogénica (Bhattacharya et al., 2007). En Perú, en la costa, desde los valles del río Tambo (Arequipa), hasta el Caplina pasando por el Locumba.

Por otro lado, la Organización Mundial de la Salud (OMS) en el 2001 estimó que alrededor de 130 millones de personas en todo el mundo están expuestas a concentraciones de arsénico por arriba de 50 µg/l principalmente en países como Bangladesh con más de 30 millones de personas, India con 40 millones, China con 1,5 millones y Estados Unidos con 1,5 millones (Van Halem et al., 2009).

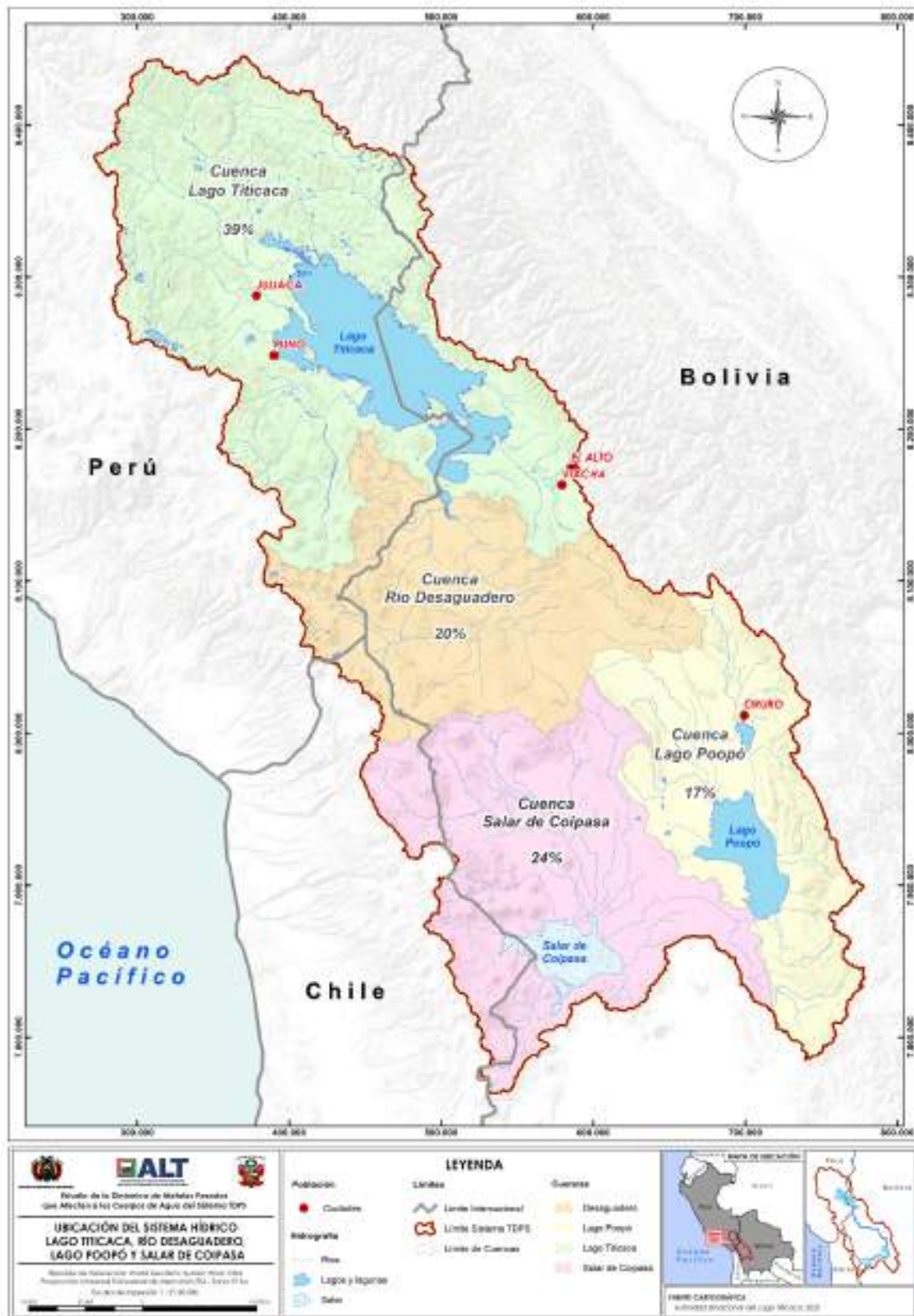


Figura 1.1: Ámbito del sistema hídrico TDPS.
Fuente: ALT, 2021

1.5 MARCO LEGAL

La gestión de la calidad del agua está regulada por un conjunto de normas tanto de carácter general, como específicas, establecidas por las respectivas autoridades competentes.

1.5.1. Perú

- Ley N° 28611, Ley General del Ambiente y sus modificatorias.
- Ley N° 29325, Ley del Sistema Nacional de Evaluación y Fiscalización Ambiental y sus modificatorias.
- Ley N° 28245, Ley Marco del Sistema Nacional de Gestión Ambiental y sus modificatorias, así como su Reglamento, aprobado mediante Decreto Supremo N° 008-2005-PCM.
- Ley N° 27446, Ley del Sistema Nacional de Evaluación del Impacto Ambiental y su Reglamento, aprobado mediante Decreto Supremo N° 019-2009-MINAM, así como sus modificatorias.
- Decreto Supremo N° 012-2009-MINAM, Política Nacional del Ambiente.
- Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, Estándares de Calidad Ambiental para Agua y establecen disposiciones complementarias para su aplicación.
- Resolución Jefatural N° 056-2018-ANA, Aprobar la Clasificación de Cuerpos de Agua Continentales Superficiales.
- Resolución Jefatural N° 010-2016-ANA, Protocolo Nacional para el Monitoreo de Calidad de Recursos Hídricos Superficiales.

1.5.2 Bolivia

- Ley N° 1333, Ley del Medio Ambiente.
- Decreto Supremo N° 24176, Reglamentación de la Ley del Medio Ambiente.
- Resolución Ministerial N° 126, Aprobar el Reglamento Nacional para el Control de la Calidad del Agua de Consumo Humano – NB 512.

CAPÍTULO II: ASPECTOS CONCEPTUALES

2.1 CALIDAD DEL AGUA Y EFECTOS DE LOS METALES PESADOS

La calidad del agua de los ríos, desde el punto de vista de los metales pesados, está determinada por la geoquímica de sus cuencas y, en algunos casos, por algunas actividades antropogénicas; entre ellas, el vertimiento de aguas residuales industriales generadas en los parques industriales de las grandes ciudades, como de la actividad minera; así como por los residuos sólidos urbanos que en el caso de la cuenca en estudio, en más del 98% carecen de un manejo adecuado; es decir, son depositados por las municipalidades y la población, ya sea sobre la superficie del suelo, quebradas o cauces de los ríos, en ambos casos expuestos a la lluvia, factor que incide en la degradación de los residuos peligrosos, principalmente baterías; filtros de aceite, fluorescentes, aceites usados, etc.

El término "metales pesados" se refiere a los metales y metaloides presentes en el ambiente con una densidad mayor a 5 g/cm³ y masa atómica superior a 20, lo que abarca a 51 elementos de la tabla periódica (Raffa et al., 2021). De todos los metales pesados, los más importantes son: aluminio (Al), berilio (Be), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), cadmio (Cd), cromo (Cr), mercurio (Hg), plomo (Pb), arsénico (As), molibdeno (Mo), níquel (Ni), plata (Ag), selenio (Se), talio (Tl), vanadio (Va), oro (Au) y zinc (Zn).

Algunos de ellos son importantes en la dieta como el Fe, Se, Zn, Cu, Mn, y V, que en cantidad de trazas son esenciales en los procesos biológicos como: respiración, biosíntesis de compuestos complejos, sistema nervioso, regulación, y funcionamiento de enzimas (Ali y Khan, 2018). Mientras que, otros no cumplen una función fisiológica conocida y alteran la salud como el As, por lo que se recomienda siempre evitarlos (Londoño et al., 2016).

Hoy en día, en muchas partes del mundo, los principales problemas de la calidad del agua de las aguas superficiales y subterráneas, es la contaminación por metales pesados, en muchos casos, debido a la propia naturaleza de sus cuencas, y exacerbada por las actividades antrópicas.

Debido a la toxicidad de los metales pesados en los cuerpos de agua, estos son considerados como un serio problema para las poblaciones que se abastecen directamente de las fuentes superficiales o

subterráneas para el uso primario y poblacional²; constituyendo, además, un riesgo nocivo para los ecosistemas acuáticos y el ambiente.

Por otro lado, la contaminación del agua con metales pesados constituye un problema para las entidades que se encargan de la potabilización del agua, debido a los altos costos que implica remover metales en las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP).

Respecto a los efectos de la toxicidad de los metales pesados, existe abundante información, que refieren, que, en muchos cuerpos de agua en el sistema TDPS, las concentraciones de metales pesados exceden los criterios de las normas. En el caso de Perú los Estándares de Calidad Ambiental para Agua (ECA-agua); **no obstante, no existe información con la que se demuestre que el agua de “mala calidad” debido a la presencia de metales pesados, ha causado problemas de salud pública.** Tampoco existe información, respecto a los impactos que causa las altas concentraciones de algunos metales pesados en los ecosistemas. Ello quiere decir que tales efectos pueden ser a largo plazo, que son mínimos, o que estos no han sido investigados, o que las poblaciones expuestas, han sido adaptadas.

Actualmente, al menos en territorio peruano, la contaminación de los ríos Ramis, Coata y Llallimayo han generado serios conflictos sociales, con reclamo de la población a las autoridades locales, regionales y nacionales la solución de los problemas de contaminación del agua de los ríos mencionados que registraron altas concentraciones de metales pesados indicados en los diversos monitoreos realizados por la Autoridad Nacional del Agua (ANA).

Uno de los principales conflictos relacionados con los metales pesados, en específico con el arsénico y boro, ocurre en el ámbito del proyecto minero Tía María en los distritos de Cocachacra, Punta de Bombón, Mejía y Deán Valdivia, provincia de Islay, departamento de Arequipa en Perú. Este conflicto se basa en problemas ambientales relacionado con el agua del río Tambo y su acuífero (socio-ambientales), los cuales son de uso intensivo en las actividades agrícolas y cuya preocupación de la población es que el proyecto minero afecte la calidad y cantidad para el riego y el consumo. OEFA (2017) señala que las concentraciones históricas de arsénico y boro del río Tambo, en su curso por el valle agrícola, y los canales de riego excedieron los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua del 2017. Cabe señalar, que este importante río, es la fuente de abastecimiento de agua potable para los pobladores de la provincia de Islay (52264 hab.), en el departamento de Arequipa-Perú.

Al ser el arsénico el elemento de mayor preocupación a nivel binacional (Bolivia y Perú) y escalar a nivel mundial con preocupaciones por organismos internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS o en sus siglas en inglés, WHO), a continuación, se da énfasis conceptuales en dicho metaloide para ser discutido a mayor detalle en el presente estudio.

2 De acuerdo con lo indicado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2018), se establece las clases de uso de agua; siendo su otorgamiento y ejercicio en prioridad siguiente:

Uso primario: Consiste en la utilización directa y efectiva de la misma, en las fuentes naturales y cauces públicos de agua con el fin de satisfacer necesidades humanas primarias (Art. 36° de la Ley de Recursos Hídricos – LRH). El acceso a las fuentes naturales y artificiales de agua para el uso primario es libre y gratuito, se ejerce sin afectar la propiedad de terceros ni a los bienes asociados del agua. (Art. 57° del Reglamento de la LRH).

Uso poblacional: Consiste en la captación del agua una fuente o red pública, debidamente tratada con el fin de satisfacer las necesidades humanas básicas. Cabe precisar, que para el agua de uso poblacional requiere ser debidamente tratada independientemente de la categoría asignada al cuerpo de agua (Art. 39° de la Ley de LRH).

2.2 ORIGEN DEL ARSÉNICO

El arsénico, un metaloide, es el vigésimo elemento más abundante en la corteza terrestre y forma parte de más de 245 minerales, con mayor cantidad de compuestos que contienen sulfuro, junto con el cobre, níquel, plomo, cobalto u otros metales, los que son móviles en el medio ambiente. (Mandal y Suzuki, 2002). La contaminación por arsénico es uno de los problemas ambientales globales debido a la tendencia creciente de urbanización, industrialización, así como a la erupción volcánica y la meteorización de los sedimentos que contienen arsénico (Al-Makishah et al., 2020).

Las fuentes de contaminación por arsénico son tanto naturales como antropogénicas y la escala de contaminación varía de local a regional (Bhattacharya et al., 2007), mientras que la meteorización continental podría haber contribuido en gran medida al ciclo del arsénico a lo largo del tiempo geológico (Anawar et al., 2003).

El arsénico presente en el ambiente que proviene de fuentes naturales asociada a fuentes geológicas: meteorización a partir de rocas parentales (roca madre) o las emisiones volcánicas y las actividades biológicas. El arsénico de origen natural en el agua está controlado por tres factores: geosfera-atmósfera (fuente primaria de arsénico), sus procesos de movilización/retención entre la fase sólida/fase líquida (interacción), y su transporte como especie disuelta en las soluciones acuosas (Bundschuh et al., 2008).

La litosfera es fuente geogénica de contaminación por arsénico, y es generalmente una combinación de diferentes rocas madre y minerales que contienen arsénico; estos incluyen carbonatos óxidos, silicatos y sulfuros (Drahota y Filippi, 2009). Asimismo, el arsénico está en altas concentraciones en sedimentos y lutitas de grano fino ricos en materia orgánica (Anawar et al., 2003). Este elemento se encuentra en un nivel prioritario entre los principales contaminantes del medio ambiente (Smedley y Kinniburgh, 2002; Bundschuh et al., 2008).

De otro lado, por lo general, el arsénico existe en gran medida en la arsenopirita (FeAsS) y la piritita (FeS) de los minerales que contienen sulfuro (Murcott, 2012). Incluso se ha encontrado arsenopirita como un mineral prominente que contiene arsénico en el medio ambiente (Henke, 2009). Estudios anteriores han identificado la arsenopirita como una fuente de arsénico debido a los minerales de sulfuro que se encuentran en la corteza terrestre, así como a la formación de lecho rocoso en área contaminadas con arsénico (Al-Makishah et al., 2020).

Otras fuentes de este elemento son las actividades antropogénicas como la minería, las fundiciones de metales y los conservantes de madera (Bundschuh et al., 2008), además del uso de fertilizantes y plaguicidas que intervienen en el ciclo natural del arsénico (ver Figura 2.1).

Si bien no existe una minería dedicada de forma exclusiva a la explotación o beneficio de arsénico, éste se genera en forma de residuo (ganga) de la mayor parte de actividades mineras, principalmente en forma de arsenopirita (. En agricultura, el empleo de pesticidas basados en arsénico se constituye en una fuente antropogénica difusa. Aún hoy, se emplean compuestos de arsénico orgánico como monometilarsénico (MMA) y dimetilarsénico (DMA) como herbicidas en tierras agrícolas y huertos. El uso del conservante de arsenato de cobre cromado en la industria de la madera (basado en las

características biocidas de cobre - Cu^{2+} y arsenato - As^{5+}) causa una contaminación generalizada en los suelos y ambientes acuáticos (Nriagu et al., 2007).

Los efluentes industriales son responsables de las formas inorgánicas y orgánicas de contaminación por arsénico. La contaminación por arsénico de las aguas subterráneas y superficiales provienen de la escorrentía urbana y agrícola, las industrias que utilizan metales, la meteorización de rocas y minerales, los volcanes y la minería son las principales fuentes de contaminación por arsénico (Al-Makishah et al., 2020).

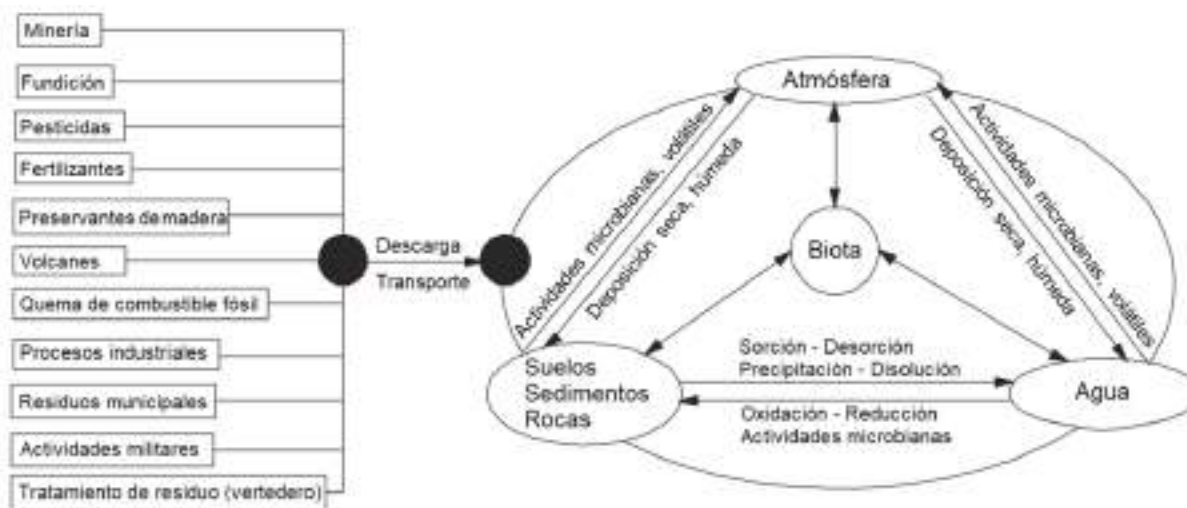


Figura 2.1: Ciclo del arsénico simplificado. Fuente: Wang y Mulligan (2006).

2.3 QUÍMICA DEL ARSÉNICO

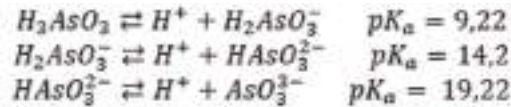
El arsénico es un elemento químico con el símbolo As y está en la tabla periódica (grupo 15) junto con nitrógeno (Nt), fósforo (P), antimonio (Sb) y bismuto (Bi). El número atómico (Z) del arsénico es 33 y la masa atómica es 74.921 uma (Henke, 2009 y Chen et al., 2013). Según la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (2009), el As es altamente soluble en el agua.

El arsénico es un metaloide³ con estados de oxidación -3, 0, +3, +5, cuya fase disuelta del arsénico en aguas naturales usualmente está enlazada con el oxígeno para formar las formas inorgánicas principales: arsenito (As^{3+}) y arsenato (As^{5+}) (Henke, 2009), los cuales junto con el arsénico sólido elemental (As^0) y el estado gaseoso conocido como arsina (As^{3-}) son las principales especies existentes en la naturaleza (Al-Makishah et al., 2020).

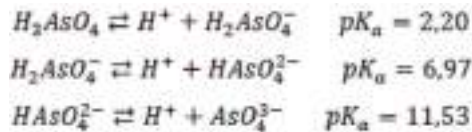
El arsenato y arsenito dependen del potencial redox y del pH del agua (Yan et al., 2000) y son estados de oxidación comunes en el agua potable que forman parte de los sistemas ácidos de arsénico (H_3AsO_4) y arsenoso (H_3AsO_3), respectivamente. Los arsenatos son estables en condiciones aeróbicas u oxidantes, mientras que los arsenitos son estables en condiciones anaeróbicas o levemente reductoras (Choong et al., 2007).

3 De acuerdo con Long y Nelson (2016), los metaloides son elementos químicos con propiedades intermedias entre los metales y no metales.

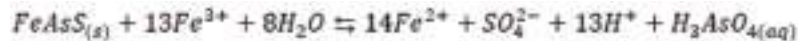
En las aguas reductoras, el arsénico se encuentra principalmente en el estado de oxidación trivalente (As^{3+}) en forma de ácido arsenioso que se ioniza de acuerdo con las siguientes ecuaciones a temperatura 25°C (Henke, 2009)⁴:



Mientras, el arsénico pentavalente (As^{5+}) se disocia de acuerdo con las siguientes reacciones:



Las citadas reacciones de disociación ácido-base forman parte de los cambios fisicoquímicos del agua por los drenajes ácidos de mina o ácidos de roca a partir de la oxidación de arsenopirita (FeAsS) según la siguiente reacción (Nriagu et al., 2007):



Estos drenajes producen altas concentraciones de arsénico y otros metales pesados como cadmio, cobre, hierro, plomo, níquel y zinc. La adsorción de arsénico (As) en superficies de hidróxidos de hierro, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, es el principal sumidero de As en los citados drenajes; no obstante, dicha adsorción puede ser solo transitoria ya que los cambios en las condiciones redox (Eh) y el pH pueden dar como resultado la disolución de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ y liberación de As (Nriagu et al., 2007).

Los principales procesos responsables de las concentraciones de arsénico en las aguas subterráneas incluyen la precipitación o disolución de minerales, la adsorción o desorción, las transformaciones químicas, el intercambio iónico y la actividad biológica (Welch et al., 1988). Factores como el pH, el potencial redox, la composición de la solución, los iones que compiten y forman complejos, la mineralogía del acuífero, la cinética de reacción y la hidráulica de un sistema acuático pueden afectar la concentración y especiación del arsénico (Yan et al., 2000).

2.4 TOXICIDAD DEL ARSÉNICO

El arsénico está dentro del grupo de las toxinas esenciales (junto con otros metales como el selenio), puesto que en cantidades trazas (orden de los $\mu\text{g}/\text{l}$ o ppb) es necesario para el crecimiento y el metabolismo, pero es tóxico en altas concentraciones (Stolz et al, 2002). **La toxicidad del arsénico depende del estado de oxidación, solubilidad en el medio biológico, velocidades de absorción y eliminación, tamaño de partícula y otras propiedades fisicoquímicas (Rangel et al., 2015).**

El nivel de toxicidad del arsénico decrece en: arsina (AsH_3) > arsenito (As III) > arsenato (As V) > ácido monometilarsónico (MMA) > ácido dimetilarsínico (DMA) > arsénico elemental (As^0). El arsénico elemental no es común y las arsinas están en ambientes reductores (Tsai et al., 2009).

4 Los valores de las constantes de disociación ácida (pKa) son tomadas del libro de título: The Geochemistry of Natural Waters: Surface and Groundwater Environments del autor James Denver de 1997 citado por Henke (2009).

Las especies inorgánicas de arsénico son de 10 a 60 veces más tóxicas que los compuestos orgánicos (MMA y DMA) (Thirunavukkarasu et al., 2002). Para los humanos, el arsenato es 60 veces menos tóxico que el arsenito (Ferguson y Gavis, 1972; Bundschuh et al., 2008), el cual es poco soluble en agua, y por tanto menos biodisponible (Kumaresan y Riyazuddin, 2001).

La exposición humana a los arsenicales inorgánicos (iAs)⁵ se ha asociado con una variedad de efectos en la salud, defectos neurológicos y neoplasias⁶ de la piel, el hígado, los riñones y la vejiga (Vega et al., 2001). Asimismo, la intoxicación por este elemento se conoce como arsenicosis, la cual se manifiesta mediante patologías en otro tipo de cáncer como de pulmones, enfermedades gastrointestinales, neurológicas, hematológicas y otras afecciones no cancerígenas como infarto al miocardio, diabetes, y en algunos casos bajo peso al nacer, aborto y el síndrome de hiperqueratosis - hiperpigmentación (Litter et al., 2019).

Con respecto a la toxicidad de arsenito (As III) está relacionada a su alta afinidad por los grupos sulfhidrilo de biomoléculas como el glutatión (GSH)⁷ y otros compuestos como el **ácido** lipoico (antioxidante) y residuos de cisteínas de las proteínas o enzimas (Sharma y Sohn, 2009). En cuanto a la toxicidad del arsenato (As V), al ser semejante químicamente a los fosfatos (formación de ésteres menos estables con estado de oxidación +5), lo sustituye e ingresa a las células a través de su sistema de transporte e interfiere con el normal proceso de fosforilación oxidativa mediante la inhibición (Tsai et al., 2009).

La **arsina es la forma más tóxica del arsénico** (agente hemolítico potente en el ámbito industrial). Este compuesto de arsénico se forma al contacto del metaloide con el hidrógeno, produciendo un gas incoloro de mayor densidad que el aire y ligera solubilidad en el agua. El mecanismo de intoxicación es mediante el ingreso del gas al organismo por vía respiratoria y que pasa directo a la circulación, oxidando la hemoglobina con reducción drástica el contenido de glutatión⁸ de los glóbulos rojos (Bucio, 2004). Con relación a la metilación de las especies inorgánicas en animales y personas, Vahter (1999) indica:

Hay una marcada variación en la sensibilidad a la toxicidad del arsénico entre especies de animales estudios, por lo que no todos producen cáncer. **También se ha sugerido que existe una variación en la susceptibilidad entre los seres humanos que podría darse por diferencia en su metabolismo, puesto que el arsénico inorgánico se metila en humanos, animales y microorganismos, pero existen diferencias considerables entre especies e individuos.**

5 Abreviación usada para diferentes compuestos de arsénico: iAs, arsénico inorgánico; iAs^{III}, arsenito; iAs^V, arsenato; MAs, especies metilarsénico (MAs^{III}, ácido metilarsonita y MAs^V, ácido metilarsónico); DMAs, especies dimetilarsénico (DMAs^{III}, ácido dimetilarsenioso y DMAs^V, ácido dimetilarsínico); entre otros (Vega et al., 2001).

6 Una neoplasia (llamada también tumor o blastoma) es una masa anormal de tejido, producida por multiplicación de algún tipo de células; esta multiplicación es descoordinada con los mecanismos que controlan la multiplicación celular en el organismo, y los supera. Además, estos tumores, una vez originados, continúan creciendo, aunque dejen de actuar las causas que los provocan. La neoplasia se conoce en general con el nombre de cáncer. Disponible en: http://publicacionesmedicina.uc.cl/PatologiaGeneral/Patol_090.html. Consultado el 10 de abril de 2022.

7 Denzoin et al., 2013 indica que «El glutatión (L-g-glutamyl-L-cisteinil-glicina) es un tripéptido hidrosoluble formado por los aminoácidos ácido glutámico, cisteína y glicina».

8 El glutatión reduce las moléculas de hemoglobina (glóbulos rojos) para que recuperen su habilidad de transportar oxígeno a las células. La reducción permite la capacidad de ganar electrones y así recuperar la función de la hemoglobina en el transporte de oxígeno. Disponible en: <https://mas-glutation.com/21-beneficios-glutation-globulos-rojos.html>. Consultado el 4 de abril de 2022.

Asimismo, Vather (1999) indica que el ácido monometilarsónico (MMA) y ácido dimetilarsínico (DMA) son producto de la metilación del arsénico inorgánico en muchas especies de mamíferos. El MMA y DMA son rápidamente excretadas en la orina que el arsénico inorgánico, especialmente el arsenito (As III), que es altamente reactivo con los componentes tisulares.

El arsenato (As V) absorbido se reduce a arsénico trivalente (As III) hasta un 50-70% antes de que se unan los grupos metilo, lo que parece ser común para la mayoría de las especies.

El patrón de metilación del arsénico también puede verse influido por una variedad de factores como la edad, el sexo, el embarazo, el nivel de exposición, los hábitos de fumar, el estado nutricional y los factores dietéticos (Tseng, 2009). El arsénico ingresa al medio ambiente a través de la bioacumulación de la flora y fauna portadora de arsénico, así como la transformación microbiana en el ecosistema. Diferentes plantas y microbios son capaces de absorber el arsénico y están influyendo en la transformación del arsénico de un estado químico a otro a través de la oxidación microbiana (Al-Makishah et al., 2020).

Dependiendo de las condiciones fisicoquímicas del medio ambiente, algunos compuestos de arsénico se pueden solubilizar fácilmente en agua y, de ahí, ser tomados por los microorganismos, dando lugar a altos niveles de biodisponibilidad (Tsai et al., 2009).

Respecto a los efectos de la toxicidad de los metales pesados, existe abundante información, que refieren, que, en muchos cuerpos de agua en el TDPS, las concentraciones de metales pesados exceden los criterios de las normas. En el caso de Perú los Estándares de Calidad Ambiental para Agua (ECA-agua); no obstante, no existe información que demuestre que el agua de «mala calidad» debido a la presencia de metales pesados, y en particular del As han causado problemas de salud pública. Tampoco existe información, respecto a los impactos que causa las altas concentraciones de algunos metales pesados en los ecosistemas. Ello quiere decir que tales efectos pueden ser a largo plazo, que son mínimos, o que estos no han sido investigados, o existe cierto nivel de adaptación.

Tseng (2009) indica que la toxicidad del arsénico está estrechamente relacionada con el metabolismo y depende en gran medida del estado de metilación y el estado de valencia de los metabolitos. El cuerpo humano metila el arsénico inorgánico ingerido a ácido monometilarsénico (MMA) y ácido dimetilarsénico (DMA), ambos, menos reactivos con los componentes de los tejidos que las especies inorgánicas (Ng et al., 2003; Rodríguez et al., 2003). Las especies de arsénico metiladas son desechadas por el cuerpo más rápido que las especies inorgánicas. La metilación ocurre principalmente en el hígado con cantidades más pequeñas en otros órganos como riñones y pulmón (Rossman, 2003).

La literatura especializada relacionada con los efectos negativos del arsénico (As) a la salud de los seres humanos alrededor del mundo, como se ve, es abundante y reiterativa. No obstante, desde la realidad de la población de algunas regiones, sobre todo en la Costa Sur de Perú, el Norte de Chile y algunas zonas del TDPS, donde la calidad del agua de los ríos, quebradas y, en algunos casos, de las aguas subterráneas usadas como fuentes de abastecimiento para consumo humano contienen altas concentraciones de As, no se ha encontrado evidencias estadísticas sobre estos efectos negativos a la salud; lo que llamó la atención y obligó a indagar un poco más sobre este aspecto.

El As bebido mediante la ingesta de agua, se absorbe rápida y casi exclusivamente en el intestino delgado, entre el 40-100%; desde donde pasa al torrente sanguíneo que distribuye al cuerpo, donde el destino principal es el hígado, el cual ingresa a los hepatocitos por medio de la Proteína Transportadora de Aniones Orgánicos (OATP-C), GLUTA2 y la Aquagliceroporina-9 (AQP9) (FAO, 2021). En el hígado, se lleva a cabo el proceso de metilación, gracias a la acción de la enzima Ar3MT. Cabe señalar que este proceso, es considerado desintoxicante, aunque posee cierto grado de toxicidad (Fano, 2021). Finalmente, el As será excretado principalmente por la vía urinaria.

Spotorno (2017)⁹ sostiene que “*La historia evolutiva del Homo sapiens ha sido modelada por múltiples factores sucesivos (...). Incluye adaptaciones reproductivas, metabólicas, cognitivas y sociales, que le permitieron conquistar la Tierra*”. Este es un buen punto de partida, que quizá permita centrar la discusión científica, sobre si hay o no efectos negativos en la salud de la gente que consume agua con altas concentraciones de As, teniendo en consideración el proceso de adaptación reproductiva y metabólica.

En América del Sur existe adaptación genética al As, ello tomando en cuenta el ambiente, la exposición histórica de poblaciones del Norte de Chile, Argentina y del Sur de Perú a ríos con altas concentraciones de As, superiores a los 10 ug por litro de agua (valor indicado por la OMS); en segundo lugar, los efectos dañinos que produce en las personas, debido a que normalmente no pueden eliminar el As por medio de la orina, proceso en el que participa la **enzima As3MT (arsénico [+3 estado de oxidación] metiltransferasa)**, que es una **proteína modificada por el respectivo gen que se ubica en el cromosoma 10 humano** (Spotorno, 2017). Sin embargo, el 2015 los científicos suecos descubrieron que un grupo de mujeres de la localidad de San Antonio de Cobre, al Norte de Argentina, tenían una **notable capacidad de aumentar la cantidad de As eliminado a través de la orina, característica favorable determinada por una serie de mutaciones únicas en el ADN vecino al gen As3MT** (Schlebusch et al., 2015). Estos investigadores sugieren que las secuencias reguladoras, actualmente otorgan **protección adaptativa al agua con altas concentraciones de As**. Quizá sea esta la razón fundamental, que asociada a la predominancia de la especie menos tóxica del arsénico (arsenato - AsV), por la que en la zona de estudio y en particular en la Costa Sur de Perú, no hay poblaciones afectadas por el As.

Lo antes mencionado, en el contexto del área de estudio, como en otras regiones, merece una reflexión científica, que conlleve a realizar investigaciones en materia de salud pública relacionadas con el arsénico, ello teniendo en cuenta la exposición crónica de la población a este metaloide, con la finalidad de determinar si existe o no afectación a la salud de la gente. Asimismo se debe considerar que la contaminación del agua por As y otros metales pesados es un aspecto muy sensible socialmente, principalmente en Perú.

2.5 LEGISLACIÓN INTERNACIONAL DEL ARSÉNICO

Debido a la preocupación del daño a la salud a la población, la Organización Mundial de la Salud (WHO) considera perjudicial la concentración de arsénico superior a 10 µg/L en el agua de consumo humano (WHO, 2003). Este metaloide también ocupa el primer lugar en la lista de productos contaminantes de

9 El PhD. Angel Spotorno es actual investigador del Programa de Genética Humana de la Facultad de Medicina de la Universidad de Chile

agua de la Agencia de Protección Ambiental (EPA), por lo que en 2006 se redujo en Estados Unidos la concentración de arsénico en agua potable de 50 µg/l a 10 µg/l (EPA, 2006). Asimismo, la Norma Oficial Mexicana 127 (NOM-127-SSA1-1994) modificada en el 2000 establece la concentración de arsénico en el agua potable en 25 mg/l para uso y consumo humano que deben cumplir los sistemas de abastecimiento públicos y privados (ver Tabla 2.1).

Tabla 2.1: Límite máximo de concentración de arsénico (As) en agua potable

Organismo	Concentración de As (µg/l)
Organización Mundial de la Salud (WHO) (2003)	10
Agencia de Protección Ambiental (2006)	10
NOM-127-SSA1-1994 (2000)	25

Fuente: Rangel et al. (2015).

Varios países y organizaciones del mundo han reglamentado el nivel de contaminante máximo arsénico en agua de consumo humano como se evidencia en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Límites máximos permisibles para arsénico en agua de consumo humano por diferentes países

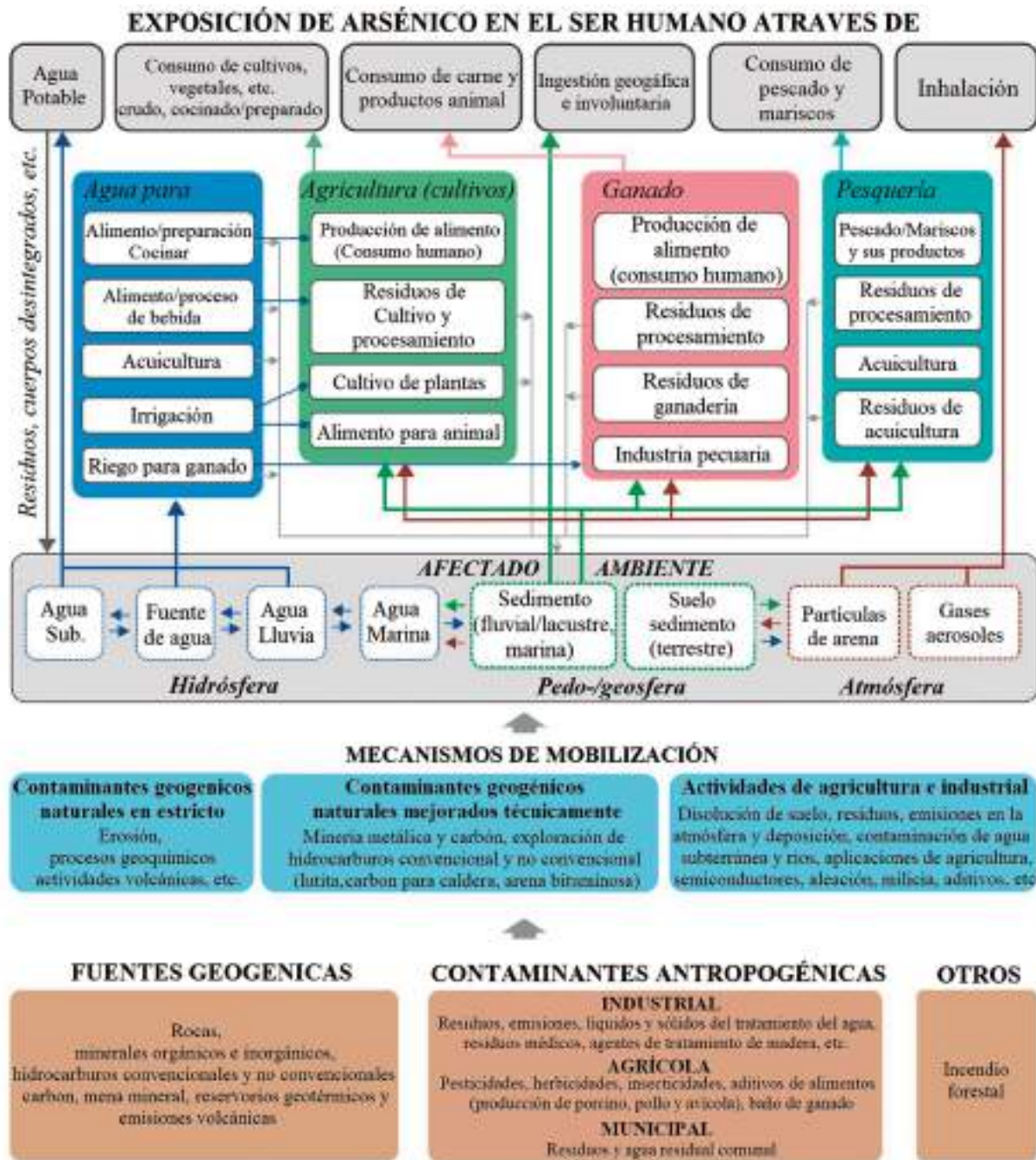
País/Otro	Valor permisible (µg/l)	Consumo
Unión Europea	10	Humano
Perú	10	Humano
Bolivia	50	Humano
India, Bangladesh, Vietnam	50	Humano

Fuente: Elaboración propia.

Lo antes mencionado, en el contexto del área de estudio, merece una reflexión científica, que conlleve a realizar investigaciones en materia de salud relacionadas con el arsénico, ello teniendo en cuenta la exposición de la población a este metaloide.

2.6 EXPOSICIÓN Y MOVILIZACIÓN DEL ARSÉNICO

El arsénico (As) proviene principalmente de fuentes naturales como rocas volcánicas pero que por diferentes formas químicas puede ser convertido a través de procesos geoquímicos (Al-Makishah et al., 2020) a fuentes antrópicas como la agricultura, minería, madera, entre otros. Las actividades humanas aumentan la concentración de arsénico en la corteza terrestre por las actividades industriales y económicas, así como por la exploración excesiva en diferentes sectores de desarrollo (ver Figura 2.2). De hecho, se ha encontrado que la concentración de arsénico en la corteza terrestre es entre 100 y 1000 veces mayor que los niveles históricos como resultado de las actividades industriales (Al-Makishah et al., 2020).



Fuente: Adaptado de Bundschuh et al. (2021).

La exposición al arsénico ocurre por tres vías principales: inhalación de aire, ingestión de alimentos, agua y por absorción dérmica. Miles de personas en diferentes partes del mundo están expuestas al arsénico a través del agua potable, el suelo o alimentos contaminados (Vather, 1999).

Un estudio realizado por Smith et al. (2018) en poblaciones del norte de Chile, revelo que el arsénico tiene un período de latencia muy alto, lo que se refiere al tiempo que hay desde la exposición hasta la aparición de los síntomas. En este mismo trabajo, se llevó a cabo un análisis de datos de un periodo de 40 años, donde se demostró que hubo un mayor incremento de enfermedades como cáncer luego de la

disminución en la exposición al arsénico, demostrando así que la latencia es un factor importante para evaluar las implicaciones en la salud pública.

Los organismos que habitan zonas acuáticas continentales o marinas como invertebrados o algas se encuentran frente a una mayor exposición de arsénico; sin embargo, algunos organismos son más susceptibles a la acumulación de este metaloide, un ejemplo son los peces detritívoros, los cuales debido a sus hábitos alimenticios son más propensos a bioacumularlo en tejidos y órganos como el hígado (Bundschuh et al., 2021).

La contaminación de los suelos agrícolas por el riego con aguas subterráneas contaminadas con arsénico en sistemas de cultivo inundados y de tierras altas es un tema de creciente preocupación, que amenaza la seguridad alimentaria y la salud humana. El riego constante de arsénico con el agua de riego en el suelo aumenta la concentración de arsénico en el suelo (>10 mg/kg), lo que aumenta la transferencia del arsénico a las plantas (Gillispie et al., 2015).

El arsénico puede incorporarse fácilmente en la cadena alimenticia debido a su amplia difusión en todo el reino animal y vegetal; no obstante, el pescado, las frutas y las verduras contienen principalmente arsénico orgánico; menos del 10% del arsénico en estos alimentos existe en forma inorgánica, aunque el contenido de arsénico de muchos alimentos como leche y productos lácteos, carne de res y cerdo, aves y cereales es principalmente inorgánico del 65% al 75% (Mandal y Suzuki, 2002).

2.7 EL POTENCIAL DE REDOX DE LAS ESPECIES DE ARSÉNICO

La reacción redox (oxidación-reducción) es un tipo de reacción química en donde se transfieren electrones entre dos especies y se usa ampliamente en los estudios de aguas subterráneas debido a que las condiciones redox afectan su calidad de varias formas como la solubilidad del cromo (III) y cromo (VI), y adsorción del As (III) y As (V) sobre los óxidos metálicos. Esta influencia y otras en las reacciones químicas y biológicas del potencial redox conducen a tener un indicador de las condiciones de oxidación-reducción en los sistemas acuíferos (Holm y Curtiss, 1989).

Las condiciones redox (potencial redox u ORP, Eh) y el pH controlan el estado de oxidación del arsénico y por ende la especie con estructura química y reacciones que le da diferente movilidad y reacción en el ambiente (ver Figura 2.3), siendo las especies químicas más tóxicas y móvil el arsenito (As III) (Bundschuh et al., 2008; Basu et al., 2014). En el rango de pH de 6,5 a 8,5, el potencial redox influencia, de manera sensible, la movilidad de arsénico en el agua subterránea del arsenito (As III) o arsenato (As V) (Smedley y Kinniburgh, 2002; Bundschuh et al., 2008).

Generalmente, el As (V) predomina sobre el As (III) bajo condiciones oxidantes en aguas superficiales, mientras que en el agua subterránea pueden estar en los dos estados de oxidación que depende de la entrada de arsénico, las condiciones redox y la actividad biológica (Bundschuh et al., 2008). Las correlaciones para la medición del ORP, han demostrado ser positivos y negativos indicando que el arsénico en aguas subterráneas está en sus dos estados de oxidación As (III) y As (V) (Calcina, 2017).

Las reacciones Redox tienen efectos en la especiación de As por lo que pueden controlar indirectamente su adsorción-desorción, condicionada por la presencia de otros iones para la adsorción como el fosfato para el As (V), que al tener un comportamiento geoquímico similar competirán por los lugares de intercambio, que de igual manera sucede con otros metales como el molibdeno (Mo), selenio (Se) y vanadio (V) (Bundschuh et al., 2008).

La importancia del análisis del potencial Redox, radica en cómo se da el comportamiento del As en el ambiente, a fin de determinar cuál especie es dominante, para posteriormente realizar estudios puntuales en las zonas afectadas por contaminación de As.

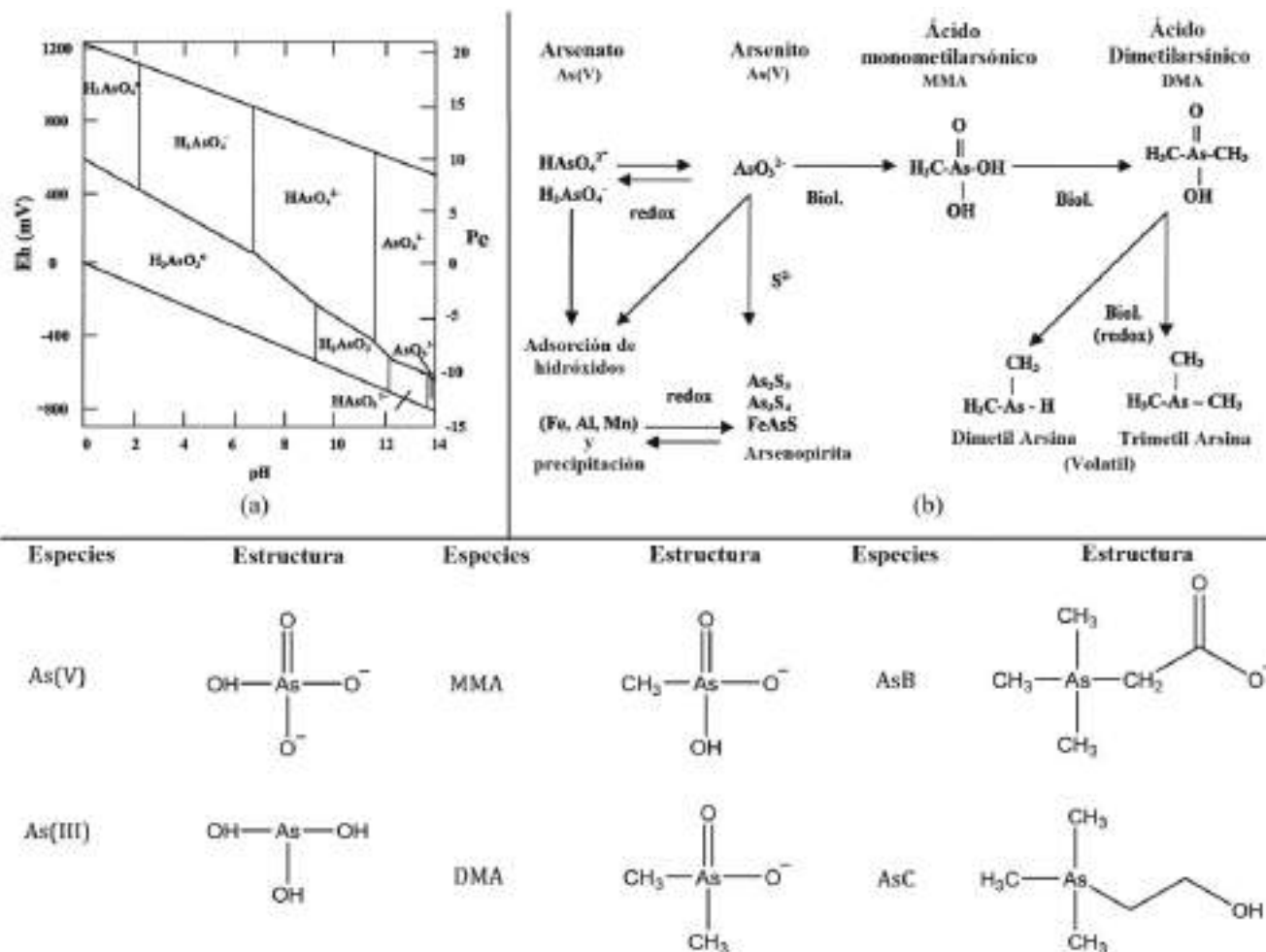


Figura 2.3: a) Potencial Redox y especiación del arsénico, b) Transformación de las especies de arsénico y c) Estructura química de las especies toxicológicamente relevantes.

Fuente: Adaptado de Bundschuh et al. (2021).

CAPÍTULO III: REFERENCIAS DE LA DISTRIBUCIÓN DEL ARSÉNICO

3.1 DISTRIBUCIÓN DEL ARSÉNICO

El arsénico (As) es un elemento ampliamente distribuido en la naturaleza (atmósfera, hidrósfera, y biosfera) con aproximadamente el $5 \times 10^{-4} \%$ de la corteza terrestre (Bundschuh et al., 2008).

Cuando hay mayor presencia geológica natural de arsénico, se pueden encontrar altos niveles en aguas subterráneas como es el caso de Bangladesh, India, China, Taiwán, Mongolia, Chile, Argentina, México y numerosos lugares de Estados Unidos de Norteamérica (Smedley y Kinniburgh, 2002).

Las actividades antropogénicas como la minería es otra fuente de contaminación por arsénico a nivel mundial, que ocurre en países como China, Inglaterra, Tailandia, Zimbabue, Ghana, México, Brasil, Estados Unidos y Canadá (Al-Makishah et al., 2020).

3.2 EL ARSÉNICO A ESCALA MUNDIAL

La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que alrededor de 200 millones de personas en el mundo están potencialmente expuestas a altas concentraciones de arsénico en las aguas subterráneas y potable mayor al valor guía de la OMS de $10 \mu\text{g/l}$ (Naujokas et al., 2013), con tendencia al incremento debido a las nuevas áreas contaminadas (Smedley y Kinniburgh, 2002; Murcott, 2012). Las exposiciones continuas de arsénico representan una amenaza importante para la salud pública.

La mayoría de esta población expuesta vive en países del sur de Asia como Bangladesh, Camboya, India, Nepal y Vietnam. Además, se han encontrado niveles elevados de arsénico en varios países de América Latina, como Argentina, Bolivia, Chile y México. Estimaciones recientes sugieren que al menos 4,5 millones de personas en América Latina están expuestas a niveles de arsénico superiores a $50 \mu\text{g/l}$ (George et al., 2014).

La contaminación por arsénico en el agua subterránea es notablemente alta en los alrededores de la región del Himalaya, y en las faldas de los cinturones montañosos actuales como el cinturón alpino-himalaya del Tíbet y la Cordillera de los Andes (ver Figura 3.1). Las regiones afectadas por el arsénico están confinadas principalmente en las cuencas sedimentarias cercanas a los cinturones montañosos modernos y las áreas deltaicas (Shaji et al., 2021).

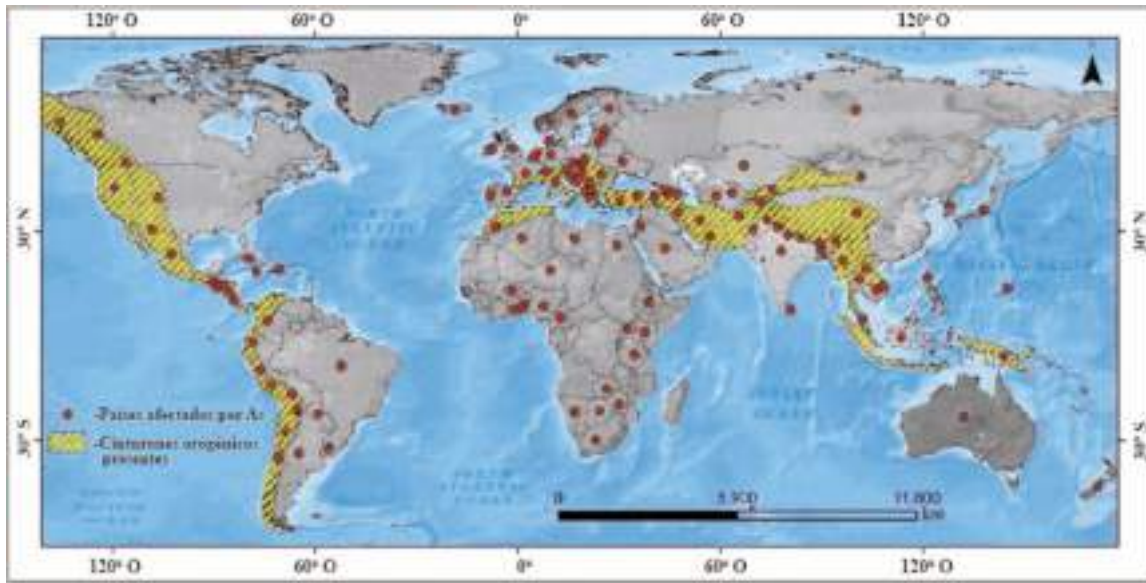


Figura 3.1: Regiones contaminadas con arsénico superpuestas en el mapa tectónico mundial. Fuente: Shaji et al. (2021).

En total son 107 países las que están afectados por contaminación de arsénico en las aguas subterráneas (mayor al valor de la OMS de 0,01 mg/l) con los reportes más altos provenientes de Asia (32) y Europa (31), seguida de África (20), América del Norte (3), América del Sur (9), América del Centro (10) y Oceanía (4). Los detalles de los 107 países afectados se muestran en el mapa mundial (ver Figura 3.2) y la lista de países se muestra en las Tabla 3.1.

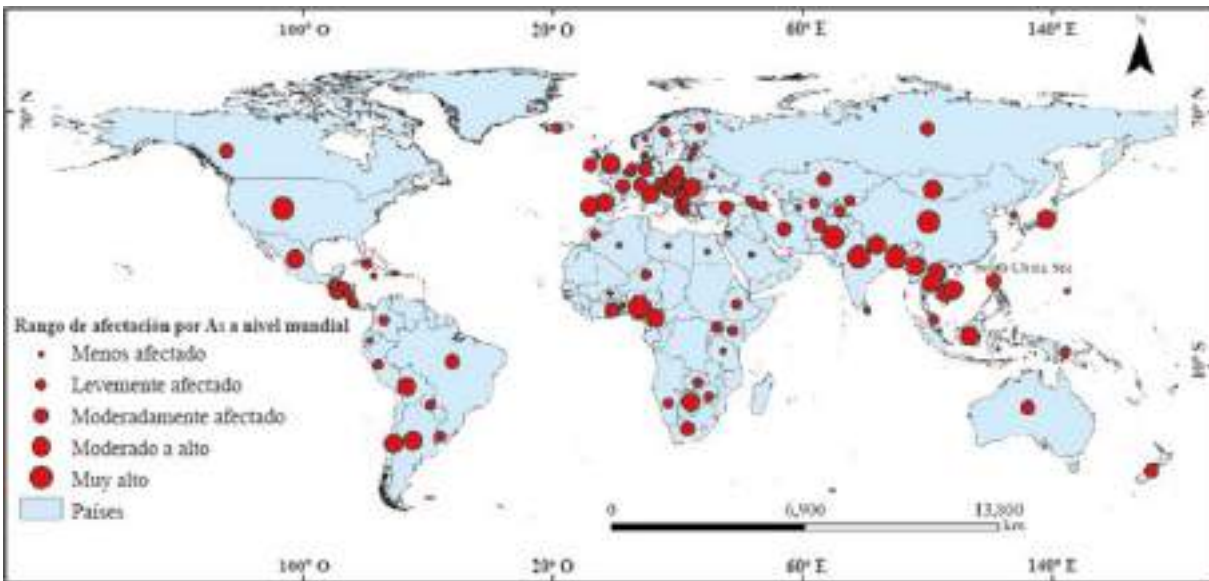


Figura 3.2: Rango de afectación de arsénico en los países del mundo con las regiones más afectadas en Asia del sur y Sudamérica. Fuente: Shaji et al. (2021).

Tabla 3.1: Lista de países afectados por la contaminación de arsénico en agua subterránea

Continente	Número de países afectados
América del Norte	Canadá, México y Estados Unidos de América (3)
América Central	Costa Rica, Cuba, República Dominicana, El Salvador, Guatemala, Honduras, Jamaica y Nicaragua (8)
América del Sur	Argentina, Bolivia , Brasil, Chile, Colombia, Ecuador, Paraguay, Perú y Uruguay (9)
Asia	Afganistán, Armenia, Azerbaiyán, Kirguistán, Bangladesh, Cambodia, China, Georgia, India, Indonesia, Irán, Japón, Jordania, Laos, Kazajistán, Corea, Malasia, Mongolia, Birmania, Nepal, Pakistán, Filipinas, Rusia, Arabia Saudita, Sri Lanka, Tajikistán, Tailandia, Turquía, Turkmenistán, Uzbekistán y Vietnam (32)
Europa	Albania, Austria, Bélgica, Croacia, República Checa, Bosnia-Herzegovina, Dinamarca, Estonia, Finlandia, Francia, Alemania, Grecia, Hungría, Islandia, Irlanda, Italia, Letonia, Lituania, Macedonia, Países Bajos, Noruega, Polonia, Portugal, Rumania, Serbia, Eslovaquia, España, Suecia, Suiza, Ucrania y Reino Unido (31)
África	Algeria, Bostwana, Burkina Faso, Camerún, Egipto, Etiopía, Gana, Kenia, Libia, Malawi, Marruecos, Namibia, Níger, Nigeria, Sudáfrica, Tanzania, Togo, Uganda, Zambia y Zimbawe (20)
Oceanía	Australia, Guam, Nueva Zelanda y Papua Nueva Guinea (4)

Fuente: Shaji (2021).

3.3 EL ARSÉNICO EN SUDAMÉRICA

Las principales fuentes y vías de contaminación por arsénico en Latinoamérica son: (1) vulcanismo y geotermalismo: (i) rocas, fluidos y cenizas volcánicas (incluye el transporte a larga escala) y (ii) fluidos geotérmicos y su explotación; (2) lixiviación natural y movilización acelerada de depósitos de minerales metálicos (principalmente sulfúricos) por la minería y actividades relacionadas; (3) yacimientos de carbón y su explotación; (4) reservorios de hidrocarburos y agua de producción; (5) transporte de solutos y sedimentos a través de los ríos hacia el mar; (6) arsénico atmosférico (polvo y aerosol); y (7) exposición al arsénico por geofagia e ingestión involuntaria (Bundschuh et al., 2021).

En Sudamérica la distribución del arsénico es muy amplia, encontrándose en países como Argentina, Chile, Ecuador, Perú, Bolivia, entre otros (Bundschuh et al., 2012). Las características geotérmicas y las actividades volcánicas son comunes en América Latina y son fuentes de origen del arsénico (Morales-Simfors et al., 2020).

Así, el arsénico es movilizado por lluvia y disolución de las rocas de la cadena volcánica y transportada como agua subterránea, antes de que se descargue en los ríos, que son golpeados a los pies de las montañas andinas. Este mecanismo también explica la liberación de As en aguas subterráneas y superficiales en Perú; por ejemplo, el Lago Aricota (ciudad de Ilo), que es alimentado por los ríos Collazas y Salado, que atraviesan la zona del volcán Yucamane.

El entorno geotectónico de los Andes australes de Argentina y Chile es favorable para la presencia de sistemas geotérmicos y volcanes activos en donde se registran altas concentraciones de arsénico (máximo de 6,17 mg/l) y antimonio en el rango de 0,0011 mg/l a 0,326 mg/l) en las aguas termales del tipo clorurada sódica (Na-Cl) en la provincia de Jujuy (Peralta, et al., 2017).

Otro de los países sudamericanos afectados por arsénico es Argentina, entre los diferentes estudios realizados, Litter et al. (2019) indica que alrededor de 4 millones de personas están en riesgo por consumo de arsénico, siendo la llanura Chaco-Pampeana (10 millones de hectáreas) la región más afectada del País con el 86% de las muestras de agua subterránea superaron el valor de la Organización Mundial de Salud (OMS) de 10 µg/l (ver Figura 3.3).

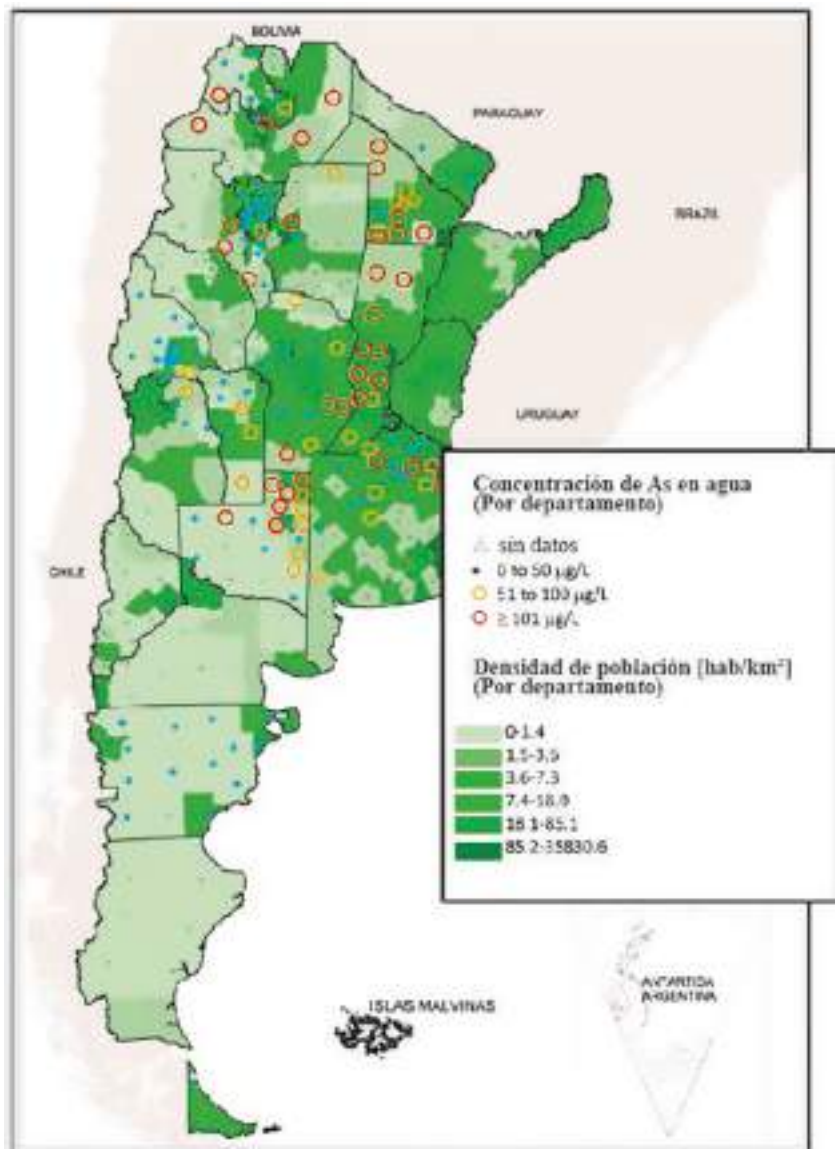


Figura 3.3: Concentración de arsénico y densidad población de Argentina. Fuente: Litter et al. (2019).

3.4 EL ARSÉNICO EN LAS CUENCAS DEL SUR DE LA COSTA PERUANA

El arsénico es un metaloide presente y predominante en las aguas de las cuencas de los ríos Caplina, Uchusuma, Maure y Locumba en la región Tacna (Perú), asociado fundamentalmente a la calidad geoquímica de sus cuencas de origen volcánico. Relacionados a la litología aflorante, donde abundan minerales de origen volcánico ricos en arsénico, boro, hierro, aluminio y manganeso (Ocola, 2015).

Esta situación ha dado lugar a que en diversos lugares afloren aguas geotermales con elevado contenido de minerales, tal es el caso de las Borateras de Chillicolpa en la cuenca del río Maure (cuenca transfronteriza entre Perú y Bolivia), ubicadas a más de 4200 m.s.n.m. y próximas al volcán Tutupaca (Ocola, 2015), de las cuales emanan un caudal aproximado de 75 l/s con concentraciones de 20 mg/l de boro y 10 mg/l de arsénico, las cuales terminan afectando la calidad de las aguas del río Maure, en cual nace en la confluencia del riachuelo Anchoaque y los desagües de la Laguna Tacata y desemboca en el río Desaguadero en territorio boliviano.

Las aguas de los ríos Caplina, Uchusuma y Locumba en la región Tacna, se encuentran afectadas por altas concentraciones de As. En el caso del río Caplina la concentración media al 2012 fue de 0,1405 mg/l, en Uchusuma 0,1694 mg/l y en Locumba 0,4973 mg/l, concentraciones que exceden la Categoría 3 de los ECA-agua (0,1 mg/l), riego de vegetales.

No obstante, con esta calidad de agua, se riegan alrededor de 7656 ha y se abastece alrededor de 350 mil habitantes (Ocola, 2015), en algunos casos previo tratamiento. Se precisa, que para el caso de las fuentes de agua para consumo humano con características naturales hidrogeológicas (como es el caso de los ríos mencionados), la Autoridad de Salud podrá admitir concentraciones de arsénico en el agua tratada, de hasta 0,05 mg/l (por encima de los 0,01 mg/l establecido en el D.S. N° 031-2010-SA)¹⁰, siempre que no afecte la salud de las personas.

La alerta “SITUACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO EN LA REGIÓN TACNA – 2017”¹¹, según el estudio realizado el 2016, concluye que, de las 52 comunidades y localidades evaluadas en la región Tacna-Perú, el 65% de ellas registraron niveles de arsénico (As) con concentraciones que oscilan entre 0,15 mg/l y 0,60 mg/l, por encima del LMP de 0,01mg/l del citado el Decreto Supremo N° 031-2010-SA; que la presencia de arsénico en el ámbito urbano es por “contaminación natural” de las aguas superficiales que abastecen a la ciudad de Tacna, en la que habitan 321 mil habitantes.

Pese a esta situación, a la fecha no existe resultados de investigaciones científicas, que demuestre los efectos a la salud de las personas debido al consumo de agua con concentraciones de As por encima de la norma sanitaria, ni mucho menos los efectos en el medio ambiente.

¹⁰ Disponible en: http://www.digesa.minsa.gob.pe/publicaciones/descargas/Reglamento_Calidad_Agua.pdf.

¹¹ Afectación y vulneración al derecho a la salud en la región Tacna, por consumo de agua contaminada por agentes peligrosos; principalmente arsénico, plomo y boro. Los estudios de la DIRESA Tacna muestran en situación de alto riesgo al 48% de los 27 distritos evaluados de toda la región Tacna.

3.5 EL ARSÉNICO EN EL SISTEMA TDPS

En el Altiplano de Bolivia, dentro del sistema TDPS, se registró la presencia de arsénico geogénico en concentraciones altas en la parte sur del Lago Poopó, especialmente en la población de Quillacas con aproximadamente 250 µg/l (Ormachea et al., 2016) y pozos de profundidad mayor a 30 m en el valle bajo de Cochabamba con registro de concentraciones de hasta 581,7 µg/l (Escalera y Ormachea, 2017).

Investigaciones realizadas por diversos Institutos, Universidades e investigadores¹² muestran la distribución de arsénico en diferentes áreas de Bolivia, incluidos algunos pozos en las tierras bajas, que tienen concentraciones de arsénico mayores a 10 µg/l (Escalera et al., 2020).

Otros estudios refieren que el arsénico del agua superficial y subterránea de la cuenca del Lago Poopó se moviliza por procesos naturales, actividades mineras y la actividad volcánica como los que aportan los ríos Sevaruyo y Marqués al sur del Lago. La fuente del arsénico y otros elementos trazas fueron: la meteorización de minerales de sulfuro y oxidación de piritita y/o arsenopiritita en áreas mineralizadas; la desorción del arsénico de las superficies de óxido férrico hidratado (HFO) en área no minera y la ceniza volcánica meteorizada (Ramos et al., 2012).

En la cuenca del lago Poopó (sierra andina de Bolivia), el agua de los ríos y del mismo lago contienen arsénico total entre 0,09 mg/l y 0,14 mg/l en áreas no afectadas por actividades mineras y hasta 2,0 mg/l en ríos influenciados por actividades mineras. Las concentraciones de arsénico en el agua subterránea están en el rango de 0,01 a 0,09 mg/l (García y Bundshuh, 2006).

En el lago Poopó, las concentraciones más altas de arsénico corresponden a la temporada seca 0,21 - 0,22 mg/l frente a 0,02 mg/l en la temporada de lluvias, mientras que el máximo de las cargas tributarias está asociado con la estación húmeda (0,01–0,38 mg/l) vs. 0,01–0,05 mg/l en la estación seca. Por el contrario, los sedimentos de los ríos y los lagos contienen concentraciones similares de arsénico tanto en la estación húmeda como en época seca (Nriagu et al., 2007).

El estudio realizado por Ormachea et al. (2013) al sur del Lago Poopó determinó elevadas concentraciones de arsénico (As) en 24 puntos de muestreo de agua subterránea y superficial en noviembre 2009 y marzo 2010. El agua subterránea es del tipo o facie predominante Na-Cl-HCO₃ o Ca-Na-HCO₃, con pH neutro o ligeramente básico y carácter oxidante o moderadamente reductor. Las concentraciones de As en el agua superficial y subterránea son más altas en el llamado cinturón Pack o franja de arsénico (ver Figura 3.4) y pueden estar relacionadas con los sedimentos aluviales enriquecidos con arsénico.

12 Grupos que trabajaron en el proyecto: Detección y remoción de arsénico natural en áreas desfavorecidas con abastecimientos de aguas subterráneas (Bolivia). Disponible en: <http://asbolivia.upb.edu/>. Consultado el 9 de abril de 2022.

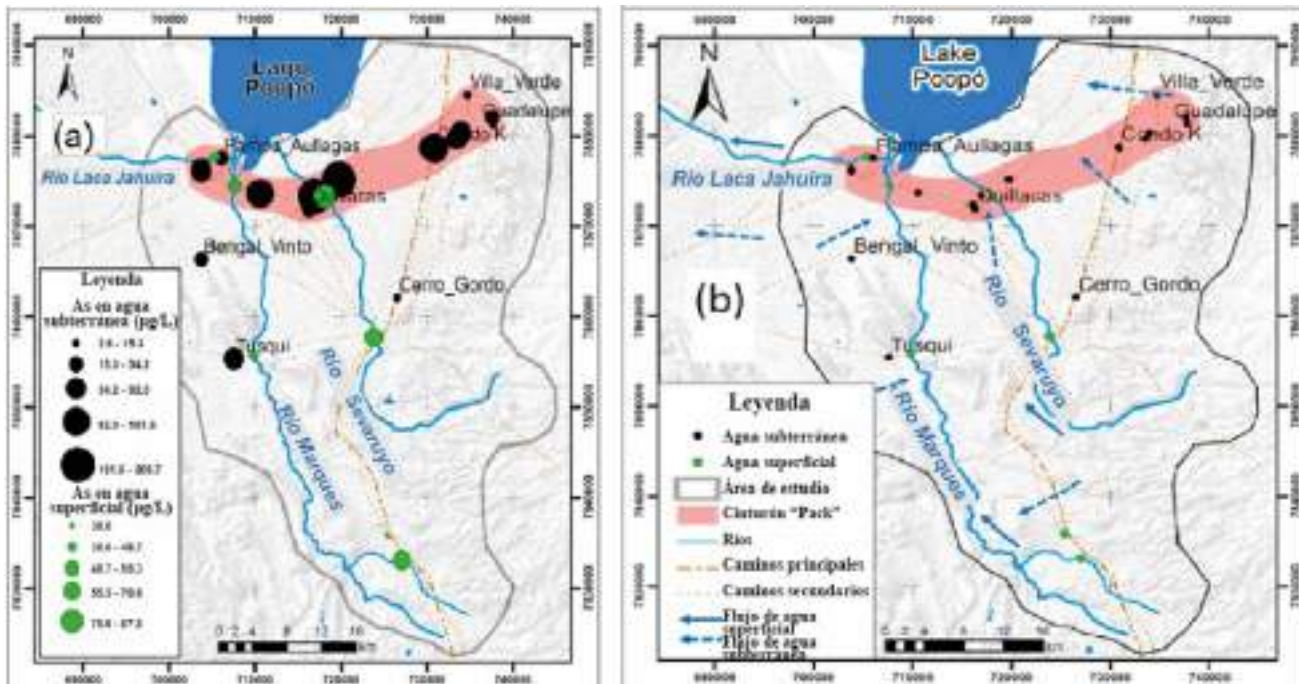


Figura 3.4: Mapa de distribución y dirección de flujo de arsénico en la zona sur del Lago Poopó. (a) Mapa de distribución de arsénico (As), y (b) Mapa de dirección de flujo del agua superficial y subterránea en la zona sur del Lago Poopó y la zona roja de mayor concentración de As llamado cinturón Pack (franja de arsénico). Fuente: Quino et al. (2021).

La predominancia de sedimentos de grano fino facilita la liberación de As. La extracción secuencial de los sedimentos y los índices de saturación calculados indican que el As está asociado a los óxidos e hidróxidos de Fe, que son probablemente los adsorbentes más importantes del arsénico en los sedimentos (Ormachea et al., 2013). Los estudios en Perú, específicamente en la cuenca del Lago Titicaca, han demostrado la incidencia de As en aguas tanto subterráneas como en superficiales.

Tal es así que Apaza y Calcina (2014) reportaron contaminación natural por As en el agua subterránea en la zona de Carancas (Desaguadero) y Huata (cuenca del río Coata). Así, altas concentraciones de arsénico en Carancas (hasta 500 mg/l) está asociado a un ambiente reductor del acuífero confinado con oxígeno menores a 1 mg/l y niveles altos de hierro disuelto mayores a 0,3 mg/l. Mientras que, **en Huata, el arsénico está presente en un medio oxidante debido a la poca profundidad de la superficie freática del acuífero donde el oxígeno disuelto está presente en mayor concentración con correlación directa con el arsénico.**

George et al. (2014) realizó estudios para determinar la afectación por arsénico en Puno, tomando muestras de agua subterránea y superficial del 2005 al 2012 en los distritos de Achaya (Azángaro), Ananea (cuenca alta del río Ramis), Caracoto, Juliaca, Platería, Puno, San Antón y Taraco. De todos ellos, todos los pozos de Juliaca y el 95% de Caracoto presentaron concentraciones de As que superaron el límite recomendado por la OMS de 10 µg/l.

Calcina (2017) evaluó la procedencia, factores de movilidad y transporte de arsénico total en los pozos de aguas subterráneas de la cuenca del río Callacame-Desaguadero en Puno en 11 muestras en junio 2015 y 22 muestras en septiembre 2016 (ver Figura 3.5). El rango de concentración de arsénico en

el agua fue de 1,4 a 446 ug/L (mayor a los 10 ug/l de la OMS). La presencia de arsénico en la citada cuenca es de fuentes naturales y no antrópicas que provienen de la meteorización y disolución de las rocas volcánicas y sedimentos por lixiviación. La movilidad y transporte de arsénico se da bajo condiciones reductoras del ambiente debido a la presencia de material orgánico y los cambios de pH y potencial de oxidación (Eh) del medio, lo que causa la disolución de los óxidos-hidróxidos de hierro y por ende la subsecuente liberación de arsénico al medio acuoso.

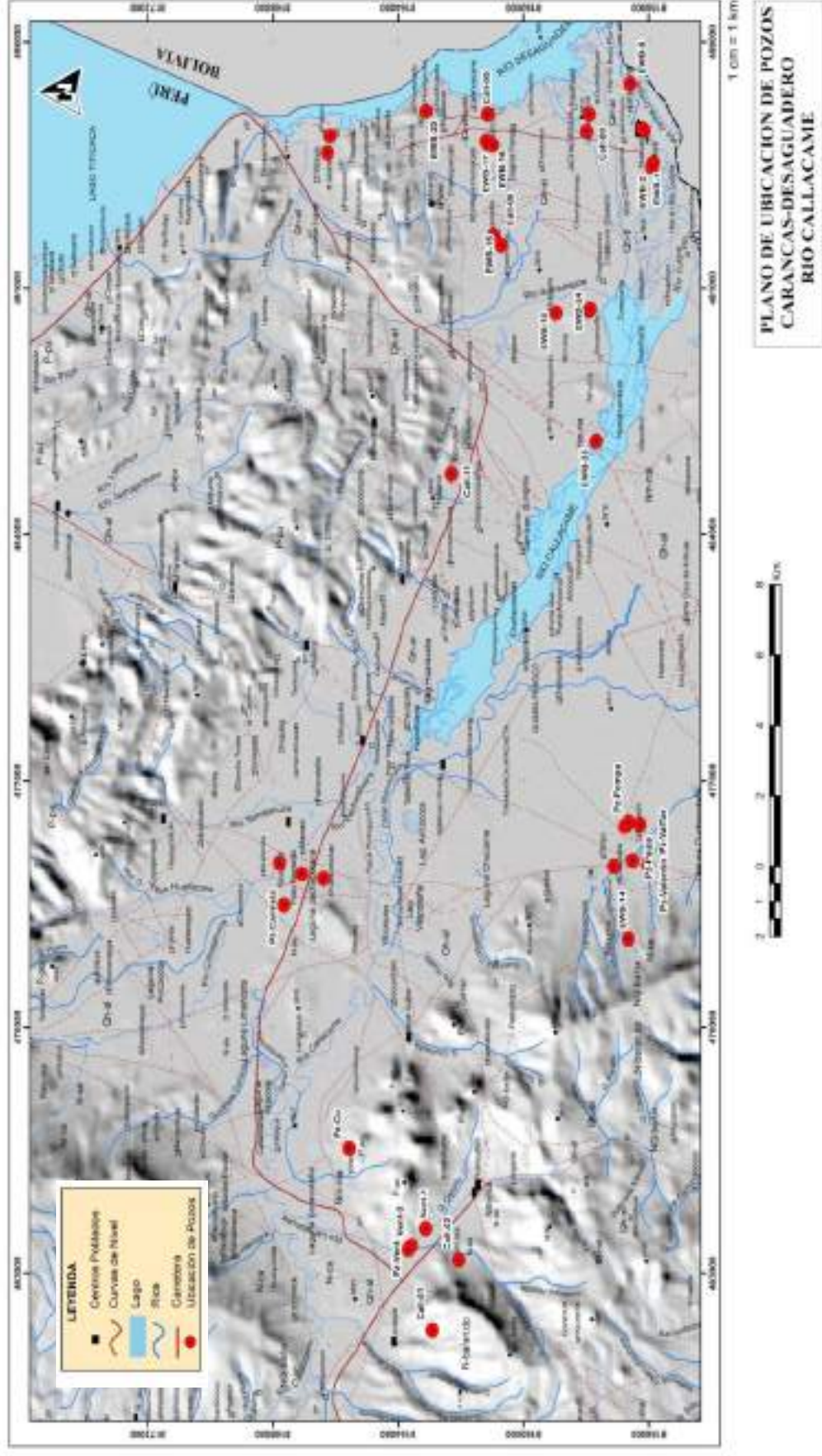


Figura 3.5: Mapa de ubicación de pozos, evaluados en junio 2015 y septiembre 2016, de aguas subterráneas de la cuenca del río Callacame-Desaguadero en Puno. Fuente: Modificado de Calcina (2017).

CAPÍTULO IV: ASPECTOS METODOLÓGICOS

4.1 GUÍAS Y PROTOCOLOS DE MUESTREO

Para la ejecución de la Dinámica de metales pesados que afectan a los cuerpos de agua del sistema hídrico TDPS se aplicaron las guías y protocolos de monitoreo para calidad de los diferentes tipos de agua: superficial, residual municipal y subterránea y los sedimentos indicados en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Documentos para la toma de muestra de agua (superficial, residual municipal, potable y subterránea) y sedimentos

Matriz ambiental	Nombre del documento	Sección	Dispositivo legal	Entidad	País
Agua superficial	Protocolo Nacional para el monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales	5.1, 5.3, 5.4 y 6	Resolución Jefatural N.º 010-2016-ANA	Autoridad Nacional del Agua (ANA)	Perú
Agua residual municipal	Protocolo de Monitoreo de Calidad de Efluentes de las plantas de tratamiento de Agua Residual doméstica o municipales	6	Resolución Ministerial N.º 273-2013-VIVIENDA	Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento	
Agua potable	Agua Potable – Toma de muestras (segunda revisión)	5,6, 7 y 8	NB 496:2016	Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA)	Bolivia
Agua subterránea	National Field Manual for the Collection of Water-Quality Data de la U.S. Geological Survey TWRI book 9	Todo	-	U.S. Geological Survey	Estados Unidos
Sedimentos	Manual técnico Métodos para colección, almacenamiento y manipulación de sedimento para análisis químicos y toxicológicos de la Agencia para la Protección Ambiental de los Estados Unidos (Methods for collection, storage and manipulation of sediments for chemical and toxicological analyses: technical manual, 2001)	4	-	Agencia de Protección Ambiental (EPA)	
	Procedimiento de Operación Estándar – Standard Operating Procedure (SOP). #EH-02, Muestreo de Sedimento, de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, adaptado del ERT/EAC SOP # 2016	11	-		

Fuente: Elaboración propia.

4.2 CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE PUNTOS DE MUESTREO

Los criterios para la selección del punto de muestreo de aguas superficiales y subterráneas fueron los siguientes:

- **Accesibilidad al sitio de muestreo**

El punto de muestreo de aguas (superficiales y subterráneas) y sedimentos está en un lugar de fácil acceso con los caminos existentes, tanto vehiculares y peatonales que sean necesarios, de tal forma que cómodamente se obtienen las muestras y transportar la carga que implican los equipos portátiles y materiales de muestreo (frascos, preservantes, muestreador, entre otros).

- **Representatividad de la muestra**

El punto de recolección de las muestras de aguas (superficiales y subterráneas) y sedimentos es lo más representativo posible de las características totales del cuerpo de agua, esto significa que el cuerpo de agua debe estar mezclado totalmente en el lugar de muestreo, relacionado específicamente con la turbulencia, velocidad y apariencia física del cuerpo de agua, adquiriendo que la muestra sea lo más homogénea posible.

- **Seguridad de la muestra**

El punto de muestreo, sus alrededores y las condiciones meteorológicas deben garantizar la seguridad de las personas responsables del muestreo, minimizando los riesgos de accidentes y de lesiones personales, por lo que se tomaron todas las precauciones y utilizar los equipos de seguridad y de protección personal (incluye las medidas contra el COVID19). En los ríos se prestó especial atención a posibles crecientes, deslizamientos o arrastre de objetos sólidos grandes hacia la corriente.

4.3 PUNTOS DE MUESTREO

La ubicación geográfica de los puntos de muestreo evaluados de agua superficial y residual municipal se indica en la Tabla 4.2, agua subterránea en la Tabla 4.3 y sedimentos en la Tabla 4.4.

Tabla 4.2: Ubicación geográfica de los puntos de muestreo de agua superficial

Código de punto de muestreo	Fecha de Muestreo (dd/mm/aa)	Hora (h)	Coordenadas UTM WGS 84		Zona	Altitud (m.s.n.m.)	Descripción
			Este	Norte			
Bolivia							
BAS01	26/12/2020	07:30	537727	8187368	19K	3819	Margen izquierda del río Katari, a 10 metros aguas arriba del puente de conexión entre las comunidades de Cohana y Lacaya.
	27/09/2021	11:10					
BAS02	21/12/2020	08:40	541642	8092892	19K	3806	Mitad del río Desaguadero, en el puente colgante “Condordia” que une los municipios de Calacoto y Corocoro a 7,40 km aguas arriba de la confluencia con el río Mauri.
	25/09/2021	14:40					
BAS03	21/12/2020	07:50	538767	8088393	19K	3803	Margen izquierda del río Mauri; a 3,00 km aguas arriba de la afluencia al río Desaguadero y 20 metros del puente peatonal de Calacoto (capital).
	25/09/2021	15:40					
BAS04	21/12/2020	10:00	545024	8078020	19K	3793	Margen izquierda del río Desaguadero; a 11,0 km aguas abajo de la confluencia con el río Mauri y bajo del puente vehicular Tupac Katari.
	25/09/2021	13:30					
BAS05	20/12/2020	17:00	487886	8063009	19K	3943	Margen izquierda del río Mauri, a 19 km aguas abajo de la afluencia del río Caquena, en el puente General Pérez.
	26/09/2021	16:20	474338	8062066	19K	3963	Margen derecha del río Mauri; a 1,00 km aguas abajo de la afluencia del río Caquena en la localidad de Eduardo Avaroa (km. 232 ferrocarril Arica-La Paz).
BAS06*	26/12/2020	14:00	701938	8007881	19K	3707	Aguas residuales de la ciudad de Oruro tomada del colector hacia las lagunas anaeróbicas de la planta de tratamiento de agua residual (PTAR) de Oruro.
	22/09/2021	17:30					
BAS07	22/12/2020	14:30	695712	8005318	19K	3709	Brazo izquierdo del río desaguadero, margen derecha a 20 metros aguas arriba del Puente “Español”, entrada suroeste a 3 km de la ciudad de Oruro.
	23/09/2021	13:20					
BAS08*	22/09/2021	17:55	702706	8006272	19K	3715	Salida de las aguas residuales al Lago Uru Uru de las lagunas facultativas y maduración de la planta de tratamiento de agua residual (PTAR) de Oruro.
BAS09	23/12/2020	16:30	717245	7990452	19K	3742	Margen izquierda del río San Juan de Sora Sora; a 10 metros aguas abajo del puente “Machacamarca” y 20 km al sureste de la ciudad de Oruro.
	24/09/2021	16:40					
BAS10	23/12/2020	15:10	709002	7990423	19K	3740	Mitad del río Huanuni, a 1,8 km aguas abajo de la planta concentradora o Ingenio Machacamarca en la comunidad del mismo nombre.
	25/09/2021	08:00	662750	8033830	19K	3727	Margen derecha del río Desaguadero; a 1,0 km aguas arriba de su bifurcación y 160 metros aguas abajo del puente “La Joya” de la carretera Oruro-La Joya.

Código de punto de muestreo	Fecha de Muestreo (dd/mm/aa)	Hora (h)	Coordenadas UTM WGS 84		Zona	Altitud (m.s.n.m.)	Descripción
			Este	Norte			
BAS11	22/12/2020	13:15	674346	7974191	19K	3713	Brazo derecho del río Desaguadero, margen derecha a 18 km aguas abajo del puente “Aroma”.
	23/09/2021	11:40	663151	7985231	19K	3714	Brazo derecho del río Desaguadero, margen derecha a 10 metros aguas arriba del Puente “Aroma”, a 5,5 km al suroeste de Toledo (capital).
BAS12	22/12/2020	08:50	583600	7926605	19K	3714	Margen derecha del río Lauca; a 20 metros aguas arriba del puente del mismo nombre, a 8,0 km al noreste de la capital del municipio de Huachacalla.
	23/09/2021	06:50					
BAS13	23/12/2020	09:35	680061	7886870	19K	3690	Margen derecha del río Laka Jahuira; a 6 km al oeste de la localidad de Maramara, desvío en 15,3 km de la carretera Santuario de Quillacas-Orinoca.
	24/09/2021	09:20					
Perú							
PAS01	18/12/2020	10:40	414904	8317727	19L	3830	Mitad del río Huancané; a 100 metros aguas arriba del puente “Huancané” y 8,85 km de la confluencia con el río Ramis.
	28/09/2021	12:50					
PAS02	18/12/2020	11:25	406194	8313419	19L	3823	Margen izquierda del río Ramis; a 100 metros aguas arriba del puente viejo “Ramis” y 8,25 km de la confluencia con el río Huancané.
	28/09/2021	12:00					
PAS03	18/12/2020	09:37	415508	8308041	19L	3825	Margen izquierda del río Ramis; a 4,35 km aguas abajo de la confluencia con el río Huancané y 3,35 km aguas arriba de la confluencia con el Lago Titicaca.
	28/09/2021	13:40					
PAS04	17/12/2020	17:30	372269	8291334	19L	3830	Margen izquierda del río Coata; a 20 metros aguas abajo del Puente “Unocolla” y 400 metros de la confluencia del río Lampa y Cabanillas.
	29/09/2021	06:45					
PAS05	18/12/2020	15:15	397430	8278963	19L	3826	Margen izquierda del río Coata; a 50 metros aguas arriba del puente “Coata” de la carretera Huata - Pusi.
	28/09/2021	16:10					
PAS06	18/12/2020	16:20	402293	8274995	19L	3813	Margen derecha de la zona de mezcla del río Coata con el Lago Titicaca, localidad Putucuni Coata.
	29/09/2021	10:00					
PAS07	19/12/2020	18:26	451398	8228400	19K	3815	Margen izquierda del río Ilave; a 3,5 km antes de la desembocadura al Lago Titicaca, por la vía a la localidad de Santa Rosa de Huayllata.
	27/09/2021	16:40					
PAS08	19/12/2020	19:02	428680	8218149	19K	3831	Margen izquierda del río Ilave; a 5,70 km aguas arriba de la ciudad de Ilave y a 3,35 km del puente vehicular Desaguadero – Puno.
	28/09/2021	07:20					

Código de punto de muestreo	Fecha de Muestreo (dd/mm/aa)	Hora (h)	Coordenadas UTM WGS 84		Zona	Altitud (m.s.n.m.)	Descripción
			Este	Norte			
PAS10	20/12/2020	12:44	392047	8104761	19K	4446	Salida de la laguna Vilacota al río Maure cerca de su margen izquierda
	26/09/2021	08:40	394099	8103736	19K	4445	Mitad del curso del agua; a 3,25 km de la salida de la laguna Vilacota, con acceso mediante el desvío de la ruta Mazocruz-Japopunco.
PAS11	20/12/2020	13:56	443180	8077729	19K	4097	Mitad del río Maure, en el antiguo paso de cemento y del puente del Centro Poblado Maure Pucuyo, a 9,2 km aguas arriba de la frontera Perú-Bolivia.
	26/09/2021	12:30					
PAS12	27/09/2021	14:15	495984	8168440	19K	3828	Mitad del río Desaguadero, en el puente internacional donde se ubica las compuertas de la Obra de Regulación del Lago Titicaca (ORLT).
PAS13	28/09/2021	09:40	385496	8264468	19L	3820	Margen izquierda del río Illpa, a 20 metros aguas arriba del puente "Illa" ubicada a 150 metros al noroeste de la unidad de peaje Caracoto-Illpa.

(*) En el cauce del río Tagarete se instaló la Plata de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) que colecta las aguas servidas de la ciudad de Oruro de las diferentes fuentes: domiciliarios, hospitalarios, industriales, entre otros.

Nota: La precisión de la medición de las coordenadas fue de ± 3 m.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.3: Ubicación geográfica de los puntos de muestreo de agua subterránea

Código de punto de muestreo	Fecha de Muestreo (dd/mm/aa)	Hora (h)	Coordenadas UTM WGS 84		Zona	Altitud (m.s.n.m.)	Descripción
			Este	Norte			
Bolivia							
BAU01	21/12/2020	15:05	680664	8056790	19K	3881	Pozo tajo abierto sin paredes, plataforma de concreto y tapa, cuya agua es usada para el consumo familiar y abrevadero de ganado en la localidad de Kemalla - municipio de Caracollo.
	22/09/2021	08:25					
BAU02	22/12/2020	16:00	701119	8023897	19K	3710	Pozo de producción PP-11 del Servicio Local de Acueductos y Alcantarillado (SeLA)-Oruro; en el pueblo de Challapampa Chico al noreste de la ciudad de Oruro.
	22/09/2021	10:35					
BAU03	22/12/2020	16:50	697261	8021373	19K	3725	Pozo de producción PP-24 del Servicio Local de Acueductos y Alcantarillado (SeLA)-Oruro; en la urbanización Villa Esperanza al norte de la ciudad de Oruro.
	22/09/2021	11:35					
BAU04	26/12/2020	15:50	705131	8012912	19K	3723	Pozo de producción Los Ángeles-CIO del Servicio Local de Acueductos y Alcantarillado (SeLA)-Oruro; a 1,35 km al este del Aeropuerto Internacional Juan Mendoza.
	22/09/2021	13:10					

Código de punto de muestreo	Fecha de Muestreo (dd/mm/aa)	Hora (h)	Coordenadas UTM WGS 84		Zona	Altitud (m.s.n.m.)	Descripción
			Este	Norte			
BAU05	26/12/2020	16:30	703376	8010460	19K	3729	Pozo de producción San Isidro del Servicio Local de Acueductos y Alcantarillado (SeLA)-Oruro; en la plaza principal en construcción de la urbanización San Isidro.
	22/09/2021	14:05					
BAU06	22/12/2020	08:00	589112	7937478	19K	3745	Pozo tajo abierto con paredes y cubierta de concreto con tapa metálica a ras del suelo, cuya agua es utilizada para ganado camélido de la comunidad de Antaña – municipio de Escara.
	23/09/2021	08:15					
BAU07	23/12/2020	11:10	683245	7892012	19K	3787	Pozo tajo abierto con paredes laterales y plataforma de concreto a 50 cm del suelo con tapa metálica, cuya agua es utilizada para consumo familiar en la localidad Maramara – municipio de Andamarca.
	24/09/2021	10:20					
BAU09	23/12/2020	13:05	716059	7872341	19K	3769	Pozo tajo abierto con paredes de piedras sobresalidas y plataforma de concreto con diámetro de 3 metros sin tapa, cuya agua es utilizada para consumo humano de la municipalidad de Santuario de Quillacas.
	24/09/2021	13:35					
BAU10	23/12/2020	12:15	703840	7875981	19K	3695	Caño público que forma parte de la red de abastecimiento de agua potable del municipio de Pampa Aullagas.
	24/09/2021	12:20	703699	7876468	19K	3695	Pozo tajo abierto con paredes y plataforma de concreto sin tapa a ras del suelo, dentro de la U.E “María Sánchez de Fernández” de Pampa Aullagas.
Perú							
PAU01*	17/12/2020	12:15	376257	8290793	19L	3840	Pozo tajo abierto con electrobomba ubicada en la urbanización Nuevo Amanecer, al norte del aeropuerto Intl. Inca Manco Cápac, cuya agua es para uso familiar.
	29/09/2021	12:10					
PAU02	17/12/2020	15:22	382269	8285927	19L	3830	Pozo tajo abierto con plataforma de concreto y tapa metálica a ras del suelo y sin pared sólida al sur de la PTAR y ex botadero Chilla, con agua para uso personal.
	29/09/2021	13:00					
PAU03*	17/12/2020	14:00	379182	8285898	19L	3846	Pozo tajo abierto con paredes de piedras, sin plataforma y tapa, al noroeste del estadio Guillermo Briceño, cuya agua es para el uso familiar y riego de plantas.
	29/09/2021	13:50					
PAU04	18/12/2020	14:25	397913	8279766	19L	3833	Pozo tajo abierto con electrobomba, paredes laterales y plataforma de concreto de 25 cm de alto con tapa metálica, ubicado en la plaza del Centro Poblado Almozanche de Coata.
	28/09/2021	15:40					
PAU05	17/12/2020	16:10	393888	8279348	19L	3824	Pozo tajo abierto con electrobomba, paredes y plataforma de concreto a 50 cm de alto con tapa metálica, cuya agua es para consumo familiar y agropecuario de Huata – Puno.
	28/09/2021	16:50					

Código de punto de muestreo	Fecha de Muestreo (dd/mm/aa)	Hora (h)	Coordenadas UTM WGS 84		Zona	Altitud (m.s.n.m.)	Descripción
			Este	Norte			
PAU06	18/12/2020	17:00	399182	8276224	19L	3817	Pozo tajo abierto con electrobomba, paredes y plataforma de concreto a 70 cm de alto con tapa metálica, cuya agua es para consumo familiar y agropecuario de Huata - Puno.
	29/09/2021	09:10					
PAU07	19/12/2020	12:44	394499	8273751	19L	3826	Pozo tajo abierto con paredes laterales y plataforma de concreto a 50 cm de alto sin tapa, cuya agua es para consumo familiar y agropecuario de Huata - Puno.
	28/09/2021	17:30					
PAU08	19/12/2020	13:26	391653	8270406	19L	3816	Pozo tajo abierto con electrobomba, paredes y plataforma de concreto a 50 cm de alto con tapa metálica, cuya agua es para consumo familiar y agropecuario de Huata - Puno.
	29/09/2021	08:10					

(*) Puntos de muestreo tomados en hogares en la misma urbanización a menos de 50 metros de los ubicados en la primera campaña. Esto debido a que los habitantes de las casas en el 2020 no se encontraban presentes en esta segunda campaña.

Nota: La precisión de la medición de las coordenadas fue de ± 3 m.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.4: Ubicación geográfica de los puntos de muestreo de sedimentos

Código de punto de muestreo	Fecha de Muestreo (dd/mm/aa)	Hora (h)	Coordenadas UTM WGS 84		Zona	Altitud (m.s.n.m.)	Descripción
			Este	Norte			
Bolivia							
BS01	21/12/2020	07:50	541642	8092892	19K	3806	Margen derecha del río Desaguadero; a 7,40 km aguas arriba de la confluencia con el río Mauri. Sedimentos conformados de arcilla y limo.
	25/09/2021	14:40					
BS02	21/12/2020	10:00	538767	8088393	19K	3803	Margen izquierda del río Mauri; a 3,00 km aguas arriba de la afluencia al río Desaguadero. Sedimentos conformados de grava con arena gruesa-media.
	25/09/2021	15:40					
BS03	21/12/2020	15:05	545024	8078020	19K	3793	Margen izquierda del río Desaguadero; a 11,0 km aguas abajo de la confluencia con el río Mauri. Sedimentos conformados de arena media-fina.
	25/09/2021	13:30					
BS04	22/12/2020	14:30	702822	8004486	19K	3714	Salida de la PTAR en el Lago Uru Uru conformados por lodos con materia orgánica descompuesta por el deposición de sólidos del agua residual de la ciudad de Oruro.
	23/09/2021	13:20	695712	8005318	19K	3709	Brazo izquierdo del río desaguadero, en la margen derecha a 20 metros aguas arriba del Puente "Español". Sedimentos compuestos de limo y arena.

Código de punto de muestreo	Fecha de Muestreo (dd/mm/aa)	Hora (h)	Coordenadas UTM WGS 84		Zona	Altitud (m.s.n.m.)	Descripción
			Este	Norte			
BS05	23/12/2020	15:10	709002	7990423	19K	3740	Mitad del río Huanuni, a 1,8 km aguas abajo de la planta concentradora o Ingenio “Machacamarca” en la comunidad del mismo nombre. Sedimentos compuestos principalmente de arena.
	24/09/2021	16:40	717245	7990452	19K	3742	Margen izquierda del río San Juan de Sora Sora; a 10 metros aguas abajo del puente “Machacamarca”. Sedimentos que contienen relaves o residuos de grano fino lodoso.
Perú							
PS01	18/12/2020	10:40	415508	8308041	19L	3825	Margen izquierda del río Ramis; a 4,35 km aguas abajo de la confluencia con el río Huancané. Sedimentos compuestos principalmente de arena fina.
	28/09/2021	13:40					
PS02	17/12/2020	17:30	372242	8291366	19L	3813	Margen izquierda del río Coata, a 20 metros aguas abajo del Puente “Unocolla” y 400 metros de la confluencia del río Lampa y Cabanillas y conformados de guijarros o cantos rodados (gravas).
PS02	29/09/2021	10:00	402293	8274995	19L	3813	Margen derecha de la zona de mezcla del río Coata con el Lago Titicaca. Sedimentos que contienen arena fina y materia orgánica descompuesta.
PS03	19/12/2020	18:26	397430	8278963	19L	3826	Margen izquierda del río Coata; a 50 metros aguas arriba del puente “Coata”. Sedimentos conformados de arena gruesa-media.
	28/09/2021	16:10					
PS04	20/12/2020	12:44	451398	8228400	19K	3815	Margen izquierda del río Ilave; a 3,5 km antes de la desembocadura al Lago Titicaca. Sedimentos que contienen grava media y fina con arena.
	27/09/2021	16:40					
PS05	20/12/2020	17:00	495984	8168440	19K	3828	Mitad del río Desaguadero, en el puente internacional donde se ubica las compuertas de la Obra de Regulación del Lago Titicaca (ORLT). Sedimentos que contienen principalmente limo.
	26/09/2021	08:40	394099	8103736	19K	4445	Mitad del curso del agua; 3,25 km de la salida de la laguna Vilacota. Sedimentos conformados de arena y materia orgánica en descomposición.

Nota: La precisión de la medición de las coordenadas fue de ± 3 m.

Fuente: Elaboración propia.

En las Tablas 4.5, 4.6 y 4.7 se presenta la ubicación física-política-administrativa de los puntos de muestreo evaluados de agua superficial, agua subterránea y sedimentos respectivamente.

Tabla 4.5: Ubicación política de los puntos de muestreo de agua superficial

Código de punto de muestreo	Coordenadas UTM WGS 84		Cuerpo de Agua	Ubicación Física-Política-Administrativa			
	Este	Norte		Municipio/Distrito	Provincia	Departamento	País
BAS01	537727	8187368	Río Katari	Pucarani	Los Andes	La Paz	Bolivia
BAS02	541642	8092892	Río Desaguadero	Calacoto	Pacajes	La Paz	Bolivia
BAS03	538767	8088393	Río Mauri	Calacoto	Pacajes	La Paz	Bolivia
BAS04	545024	8078020	Río Desaguadero	Calacoto	Pacajes	La Paz	Bolivia
BAS05	474338	8062066	Río Mauri	Charaña	Pacajes	La Paz	Bolivia
BAS06	701938	8007881	Río Tagarete (actual entrada de agua residual de la PTAR de Oruro)	Oruro	Cercado	Oruro	Bolivia
BAS07	695712	8005318	Río Desaguadero	El Choro	Cercado	Oruro	Bolivia
BAS08	702706	8006272	Río Tagarete (actual salida de agua residual de la PTAR de Oruro)	Oruro	Cercado	Oruro	Bolivia
BAS09	717245	7990452	Río San Juan de Sora Sora	Machacamarca	Pantaleón Dalence	Oruro	Bolivia
BAS10 - 2021	662750	8033830	Río Desaguadero	Caracollo	Cercado	Oruro	Bolivia
BAS10 - 2020	709002	7990423	Río Huanuni	Machacamarca	Pantaleón Dalence	Oruro	Bolivia
BAS11 - 2021	663151	7985231	Río Desaguadero	Toledo	Saucari	Oruro	Bolivia
BAS11 - 2020	674346	7974191	Río Desaguadero	Toledo	Saucari	Oruro	Bolivia
BAS12	583600	7926605	Río Lauca	Cruz de Machacamarca	Litoral	Oruro	Bolivia
BAS13	680061	7886870	Río Laka Jahuirá	Andamarca	Sur Carangas	Oruro	Bolivia
PAS01	414904	8317727	Río Huancané	Huancané	Huancané	Puno	Perú
PAS02	406194	8313419	Río Ramis	Huancané	Huancané	Puno	Perú
PAS03	415508	8308041	Río Ramis	Huancané	Huancané	Puno	Perú
PAS04	372269	8291334	Río Coata	Juliaca	San Román	Puno	Perú
PAS05	397430	8278963	Río Coata	Coata	Puno	Puno	Perú
PAS06	402293	8274995	Río Coata	Coata	Puno	Puno	Perú
PAS07	451398	8228400	Río Ilave	Ilave	El Collao	Puno	Perú
PAS08	428680	8218149	Río Ilave	Ilave	El Collao	Puno	Perú
PAS10 - 2021	394099	8103736	Laguna Vilacota (curso de agua)	Susapaya	Tarata	Tacna	Perú
PAS10 - 2020	392047	8104761	Laguna Vilacota	Susapaya	Tarata	Tacna	Perú
PAS11	443180	8077729	Río Maure	Tarata	Tarata	Tacna	Perú
PAS12	495984	8168440	Río Desaguadero	Desaguadero	Chucuito	Puno	Perú
PAS13	385496	8264468	Río Ilpa	Paucarcolla	Puno	Puno	Perú

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.6: Ubicación política de los puntos de muestreo de agua subterránea

Código de punto de muestreo	Coordenadas UTM WGS 84		Cuerpo de Agua	Ubicación Física-Política-Administrativa			
	Este	Norte		Municipio/Distrito	Provincia	Departamento	País
BAU01	680664	8056790	Pozo tajo abierto	Caracollo	Cercado	Oruro	Bolivia
BAU02	701119	8023897	Pozo tubular	Paria	Cercado	Oruro	Bolivia
BAU03	697261	8021373	Pozo tubular	Paria	Cercado	Oruro	Bolivia
BAU04	705131	8012912	Pozo tubular	Oruro	Cercado	Oruro	Bolivia
BAU05	703376	8010460	Pozo tubular	Oruro	Cercado	Oruro	Bolivia
BAU06	589112	7937478	Pozo tubular	Escara	Litoral	Oruro	Bolivia
BAU07	683245	7892012	Pozo tajo abierto	Andamarca	Sur Carangas	Oruro	Bolivia
BAU09	716059	7872341	Pozo tajo abierto	Santuario de Quillacas	Avaroa	Oruro	Bolivia
BAU10 - 2020	703840	7875981	Pozo de consumo	Pampa Aullagas	Ladislao Cabrera	Oruro	Bolivia
BAU10 - 2021	703699	7876468	Pozo de tajo abierto	Pampa Aullagas	Ladislao Cabrera	Oruro	Bolivia
PAU01	376257	8290793	Pozo tajo abierto	Juliaca	San Román	Puno	Perú
PAU02	382269	8285927	Pozo tajo abierto	Juliaca	San Román	Puno	Perú
PAU03	379182	8285898	Pozo tajo abierto	Juliaca	San Román	Puno	Perú
PAU04	397913	8279766	Pozo tajo abierto	Coata	Puno	Puno	Perú
PAU05	393888	8279348	Pozo tajo abierto	Coata	Puno	Puno	Perú
PAU06	399182	8276224	Pozo tajo abierto	Coata	Puno	Puno	Perú
PAU07	394499	8273751	Pozo tajo abierto	Huata	Puno	Puno	Perú
PAU08	391653	8270406	Pozo tajo abierto	Huata	Puno	Puno	Perú

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.7: Ubicación política de los puntos de muestreo de sedimentos

Código de punto de muestreo	Coordenadas UTM WGS 84		Cuerpo de Agua	Ubicación Física-Política-Administrativa			
	Este	Norte		Municipio/Distrito	Provincia	Departamento	País
BS01	541642	8092892	Río Desaguadero	Calacoto	Pacajes	La Paz	Bolivia
BS02	538767	8088393	Río Mauri	Calacoto	Pacajes	La Paz	Bolivia
BS03	545024	8078020	Río Desaguadero	Calacoto	Pacajes	La Paz	Bolivia
BS04 - 2021	695712	8005318	Río Desaguadero	El Choro	Cercado	Oruro	Bolivia
BS04 - 2020	702822	8004486	Lago Uru Uru	Oruro	Cercado	Oruro	Bolivia
BS05 - 2021	717245	7990452	Río San Juan de Sora Sora	Machacamarca	Pantaleon Dalence	Oruro	Bolivia
BS05 - 2020	709002	7990423	Río Huanuni	Machacamarca	Pantaleon Dalence	Oruro	Bolivia
PS01	415508	8308041	Río Ramis	Huancané	Huancané	Puno	Perú
PS02 - 2021	402293	8274995	Río Coata	Coata	Puno	Puno	Perú
PS02 - 2020	372242	8291366	Río Coata	Juliaca	San Román	Puno	Perú
PS03	397430	8278963	Río Coata	Coata	Puno	Puno	Perú
PS04	451398	8228400	Río Ilave	Ilave	El Collao	Puno	Perú
PS05 - 2021	394099	8103736	Laguna Vilacota (curso de agua)	Susapaya	Tarata	Tacna	Perú
PS05 - 2020	495984	8168440	Río Desaguadero	Desaguadero	Chucuito	Puno	Perú

Fuente: Elaboración propia.

La ubicación espacial de los puntos de muestreo de aguas (superficiales y subterráneas) y sedimentos se presenta en las Figura 4.1, 4.2 y 4.3.

4.4 SELECCIÓN DE LABORATORIO

Los análisis químicos de las muestras de aguas colectadas se realizaron en el Laboratorio SGS del Perú S.A.C, acreditado por el Instituto Nacional de Calidad (INACAL) del Perú mediante la NTP-ISO/IEC 17025:2017 de acuerdo con la información de la Tabla 4.8.

Tabla 4.8: Información del laboratorio para el análisis de las muestras

Laboratorio	Dirección	N° Cédula de Notificación	Registro	Período de Vigencia	Observación
SGS del Perú S.A.C.	Sede Callao: Av. Elmer Faucett 3348 Urb. Bocanegra - Callao 1 - Lima	0637-2017- INACAL/DA	LE-002	29 de diciembre 2017 al 28 de diciembre 2021	Controles de laboratorio (blanco viajero comercial y duplicado de sólidos totales disueltos)

Información del laboratorio disponible en: <https://www.inacal.gob.pe/acreditacion/categoria/acreditados>.

Fuente: Elaboración propia.

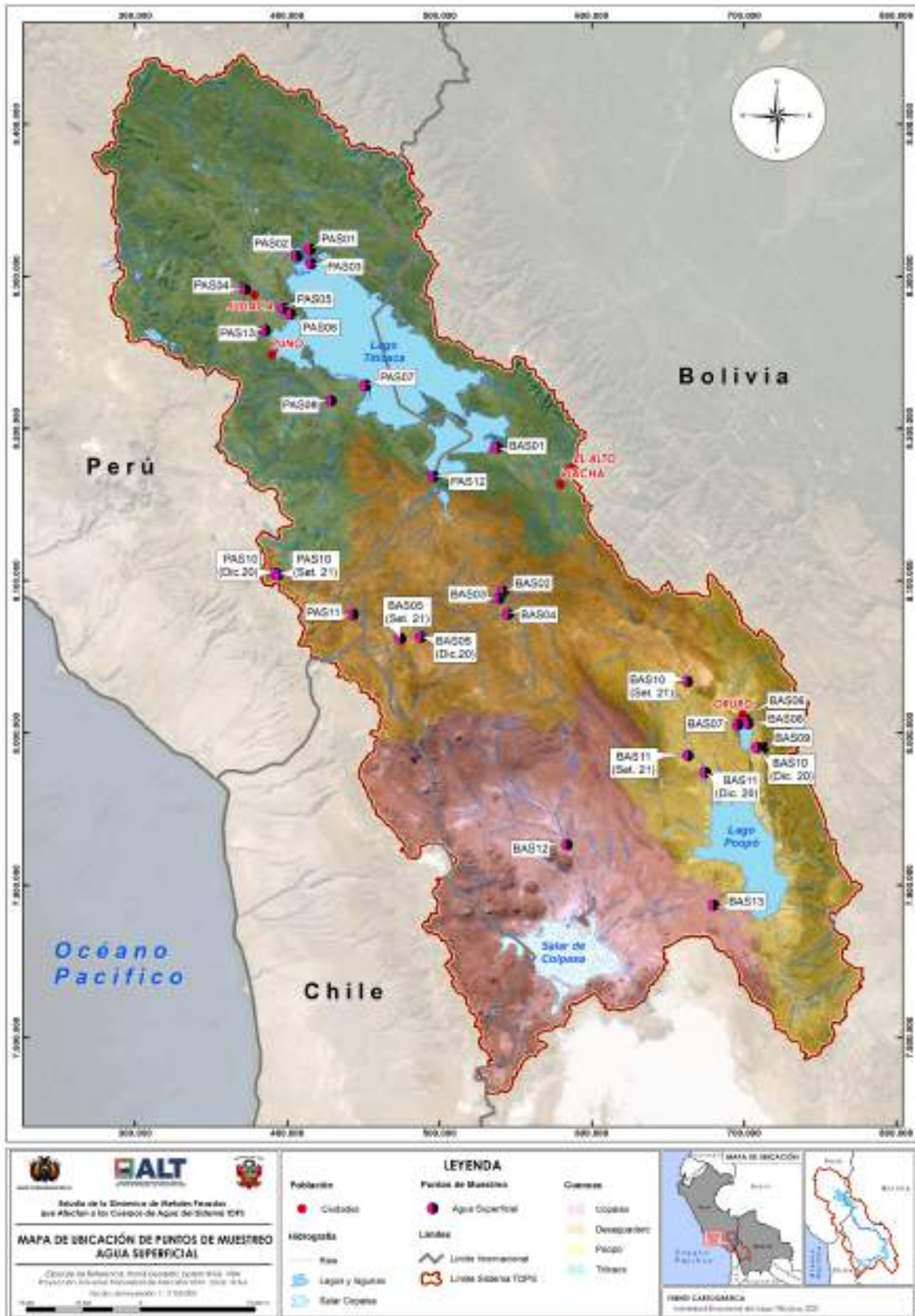


Figura 4.1: Mapa de ubicación de los puntos de muestreo de aguas superficiales.
Fuente: ALT, 2022.



Figura 4.2: Mapa de ubicación de los puntos de muestreo de aguas subterráneas.
Fuente: ALT, 2022.

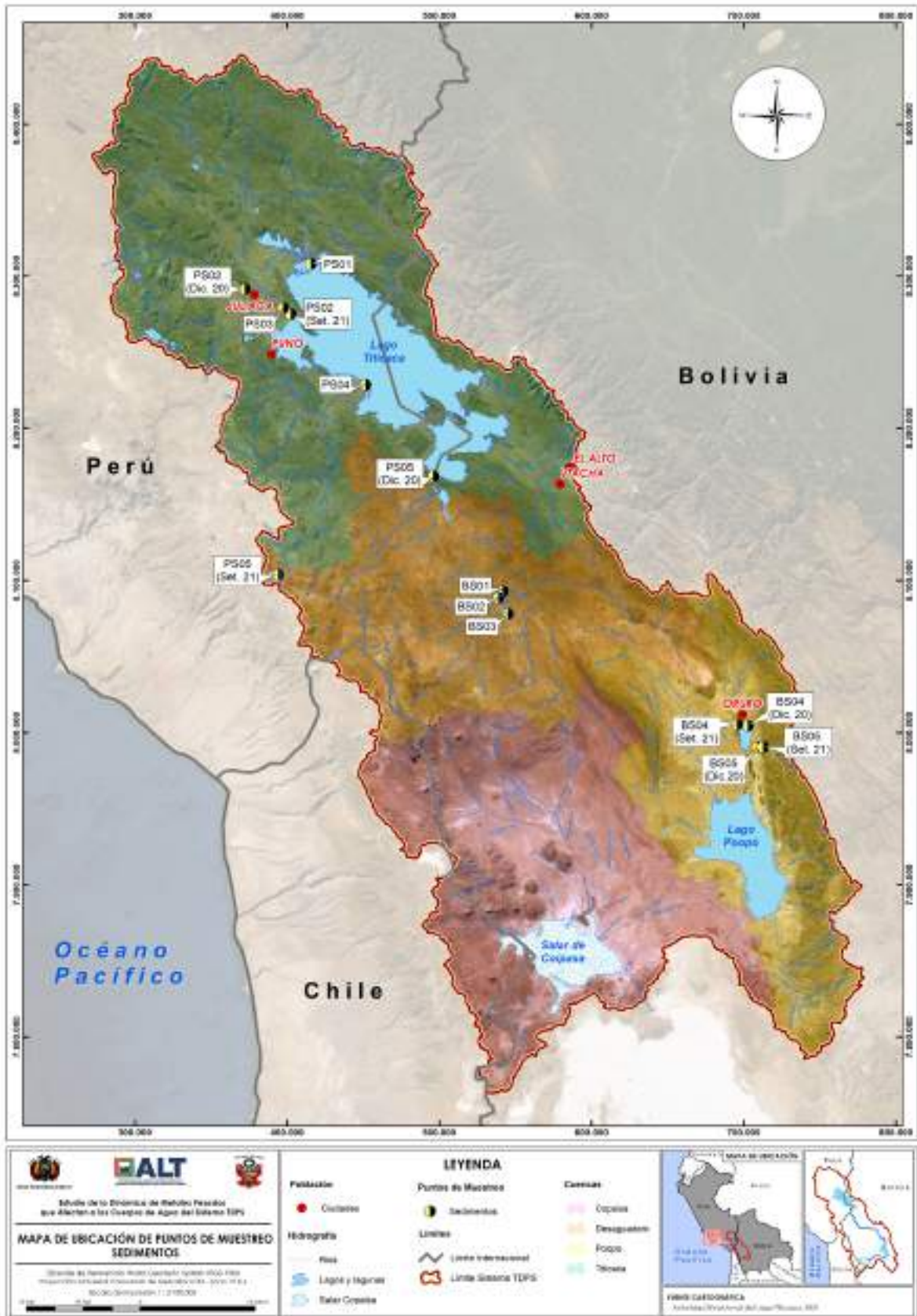


Figura 4.3: Mapa de ubicación de los puntos de muestreo de sedimentos.
Fuente: ALT, 2022.

4.5 SELECCIÓN DE PARÁMETROS

La selección de los parámetros de agua y sedimentos a ser analizados en el laboratorio acreditado se tomaron en cuenta en primer lugar los objetivos del estudio; en segundo lugar, el uso de las aguas (superficiales y subterráneas), se analizaron la cantidad de parámetros que se indican en la Tabla 4.9 para ambas campañas de monitoreo (diciembre 2020 y septiembre 2021).

Tabla 4.9: Número de puntos de muestreo y parámetros de agua superficial, subterránea y sedimentos analizados en el laboratorio

Matriz ambiental	Número de puntos de muestreo		Parámetros para analizar en el laboratorio acreditado	Observación
	Diciembre 2020	Septiembre 2021		
Agua Superficial	N.A.	25	Bicarbonatos	-
	23	N.A.	Nitrógeno Total	-
	23	N.A.	Fosfatos	-
	23	25	Cloruro	-
	23	25	Sulfato	-
	N.A.	25	Fluoruro	-
	23	25	Nitrato	-
	N.A.	25	Sólidos totales en suspensión (STS)	-
	N.A.	25	Sólidos totales disueltos	-
	23	25	Metales totales (Incluido mercurio)	-
	N.A.	23*	Metales disueltos (Incluido mercurio)	Se realizó 4 duplicados y 1 blanco de campo en septiembre 2021
23	23*	Arsénico total (As III)	Se realizó 1 duplicado en septiembre 2021	
Agua subterránea	N.A.	17	Bicarbonatos	-
	17	N.A.	Nitrógeno Total	-
	17	N.A.	Fosfato	-
	17	17	Cloruro	-
	17	17	Sulfato	-
	N.A.	17	Fluoruro	-
	17	17	Nitrato	-
	N.A.	17	Sólidos totales en suspensión (STS)	-
	N.A.	17	Sólidos totales disueltos	-
	17	17	Metales totales (Incluido mercurio)	-
	N.A.	17	Metales disueltos (Incluido mercurio)	Se realizó 2 duplicados y 1 blanco de campo en septiembre 2021
17	17	Arsénico total (As III)	Se realizó 1 duplicado en septiembre 2021	
Sedimentos	10	10	Metales totales (Incluido mercurio)	-

(*) No se evaluaron metales disueltos y arsénico total en las muestras de agua residual de Oruro, por lo que dichas muestras se adicionaron a los duplicados.

N.A.: No analizado debido a que las concentraciones fueron menores al límite de cuantificación del laboratorio o menores al valor de comparación de la normativa de cada país.

(-) No aplica debido a que los controles de calidad se establecieron en los metales.

Fuente: elaboración propia.

4.6 EQUIPOS Y MATERIALES UTILIZADOS

Los equipos de campo utilizados para la medición de los parámetros de campo, toma de muestra y registro fotográfico son indicados en la Tabla 4.10 y las Figuras 4.4 y 4.5.

Tabla 4.10: Equipos utilizados en la toma de muestra

Matriz ambiental	Equipos	Marca	Modelo	Serie
Agua superficial, subterránea y sedimentos	Multiparámetro portátil	HANNA	HI98194	5500008101
	Turbidímetro	HACH	2100Q	18090C069434
	Cámara fotográfica digital	CANON PowerShot D20	PO1734	-
	Equipo de posicionamiento	GARMIN	GPSMAP 64S	3BP172144

(-) No aplica.

Fuente: Elaboración propia.

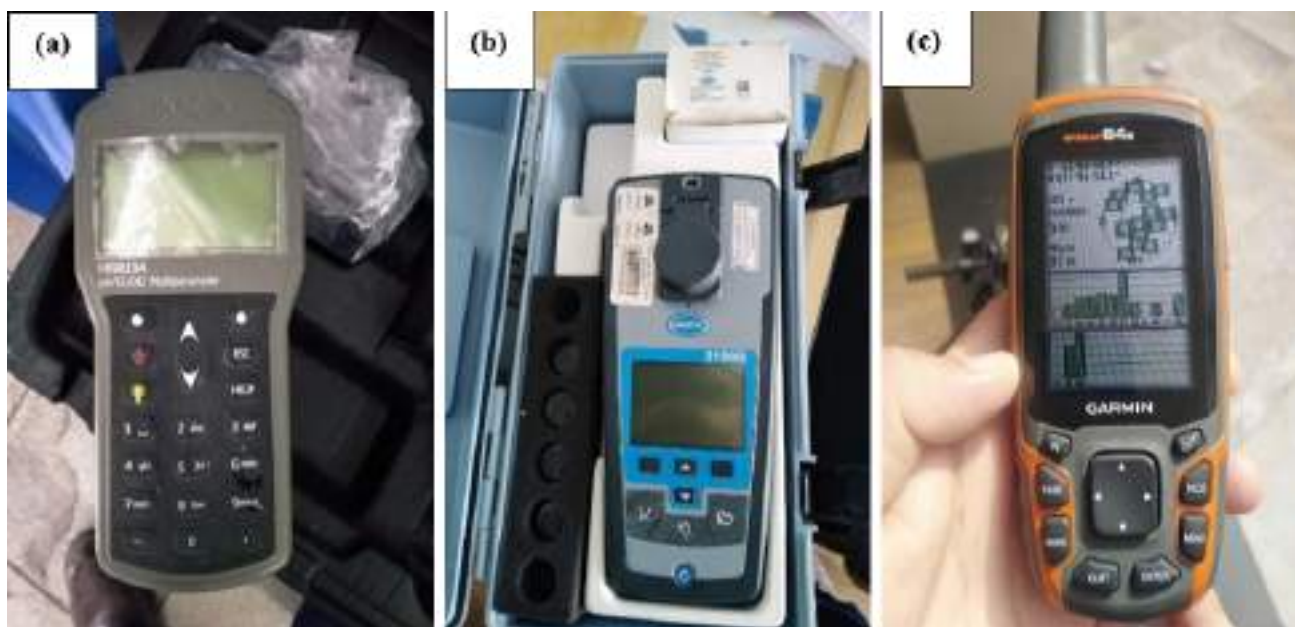


Figura 4.4: Equipos utilizados en el muestreo. (a) Multiparámetro portátil HANNA, (b) Turbidímetro HACH, (c) GPSMAP 64S.

En adición a lo anterior, para ambas salidas de campo se utilizaron los cartuchos descartables MetalSoft® de separación arsenito (As^{3+}) y arsenato (As^{5+}) soluble descrito en el punto 4.8.6, mientras que en la segunda salida de campo se usaron, en adición a los cartuchos antes indicados, los **siguientes materiales**:

- Brazo muestreador de acero inoxidable de 1,5 metros con soporte de aro ajustable para botellas de vidrio o plástico de diferentes volúmenes (250 ml a 2 litros) y brazo desmontable para un mejor transporte (Foto 4.6a).

- Filtros de jeringa Minisart® NML de la marca Sartorius (Foto 4.6b) con material de membrana hidrofílico de 0,45 μm de diámetro (\varnothing) de poro compuesto de acetato de celulosa libre de surfactantes (SFCA), carcasa del polímero de estireno butadieno metacrilato (MBS) y prefiltro de fibra de vidrio para la retención de partículas del agua



Figura 4.5: Cámara Fotográfica digital CANON.



Figura 4.6: Materiales utilizados en el muestreo. (a) brazo muestreador de acero inoxidable y (b) filtros de jeringa Minisart y cartucho MetalSoft de separación de arsenito (As^{3+}) y arsenato (As^{5+}) soluble.

4.7 ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD

Como parte del aseguramiento de la calidad del muestreo, se incluyeron los blancos de campo¹³ y viajero¹⁴ (Informe de ensayo y resultados), y la verificación diaria en campo de los equipos utilizados con los estándares respectivos. Asimismo, se siguieron los lineamientos establecidos en los protocolos citados y se aplicaron los procedimientos e instructivos vigentes de la institución.

4.8 PROCESAMIENTO DE DATOS

Los resultados fueron digitalizados y ordenados en una base de datos (hojas de cálculo de Excel), para luego ser comparados temporalmente (avenida y estiaje) mediante el uso de líneas en gráficos de barras con los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECA) de Perú y Valores Máximos Admisibles (VMA) de Bolivia para el agua superficial y subterránea, Límites Permisibles para Descargas Líquidas (LPDL) – valor diario del agua residual de Oruro y el Valor Máximo Aceptable (VMAC) de agua potable para Pampa Aullagas.

4.8.1 Relación de los iones y sólidos disueltos con la conductividad eléctrica (CE)

“...La conductividad eléctrica (CE) y los sólidos totales disueltos (STD) son parámetros de calidad de agua usados para describir la salinidad” (Rusydi, 2018). Dichos parámetros están correlacionados y su relación esta expresada de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$STD (mg/L) = k * Conductividad (\mu S/cm) \quad (4.1)$$

“...No obstante, hay diversos factores como el incremento y la composición de la concentración de los iones (diferente mezcla de sales disueltas) como el agua de mar, continental y destilada que involucran diferentes valores de K con rango de 0,60 – 0,75 para obtener una relación precisa entre los STD y la conductividad eléctrica” (Walton, 1989)¹⁵.

“...Por tal motivo, no se justifica el uso de valor de K para todos los tipos de agua con valor estándar de 0,7 (promedio del rango de 0,5 a 0,9), número utilizado en muchos medidores comerciales de CE-STD ya que se puede alcanzar hasta el 25% de error (Walton, 1989). Los valores de K se incrementan a medida que los iones son mayores; sin embargo, la relación entre la CE y STD no es directamente lineal, ya que depende de la actividad promedio de los iones disueltos específicos de todos los iones en el agua y su fuerza iónica” (Hem, 1985 citado en Rusydi, 2018).

13 **Blanco de viaje:** Control de calidad en el proceso de muestreo para evaluar la presencia de contaminación durante el transporte. El envase con el agua destilada permanece en el cooler de transporte durante todo el monitoreo (ANA, 2016).

14 **Blanco de campo:** Control de calidad en el proceso de muestreo para evaluar la contaminación en alguna parte del monitoreo. El envase se abre en campo y el agua destilada que contiene es manipulada de igual forma que las muestras de agua recolectada como el trasvase al recipiente, filtración, adición de preservantes (ANA, 2016).

15 Otros dos factores que involucran el cambio de los valores de k es la temperatura (que incrementa la movilidad de los iones a mayor temperatura, hay un incremento del 2% de la conductividad eléctrica por cada aumento de 1°C el cual es corregido por los equipos multiparámetros) y los efectos del pH en rango alto (> 9) y bajo (< 5), el cual contribuye al valor de la conductividad eléctrica que otros cationes y aniones en el agua.

“...La Figura 4.7 muestra una vista general de los valores de K con el incremento de los STD en los distintos tipos de agua como: naturales (*fresh water*), destilada, permeada (*permeates*), salobres (*brackish water*), marina (*seawaters*) y salmueras (*brines*), los cuales pueden contener una variedad de sales disueltas, por lo que se puede obtener un rango de valores de K de 0,50 a 0,85 (Walton, 1989) y 0,55 a 0,75 con mayor valor para aguas con altos sulfatos” (Hem, 1985).

“...En caso de la relación de la suma de iones (cationes o aniones) con la conductividad eléctrica, tenemos que el criterio aceptable es dado por la *American Public Health Association*” (APHA et al., 2017) mediante la ecuación 4.2.

$$100 * \Sigma \text{aniones o cationes (meq/L)} = (0,9 - 1,1) * \text{Conductividad } (\mu\text{S/cm}) \quad (4.2)$$

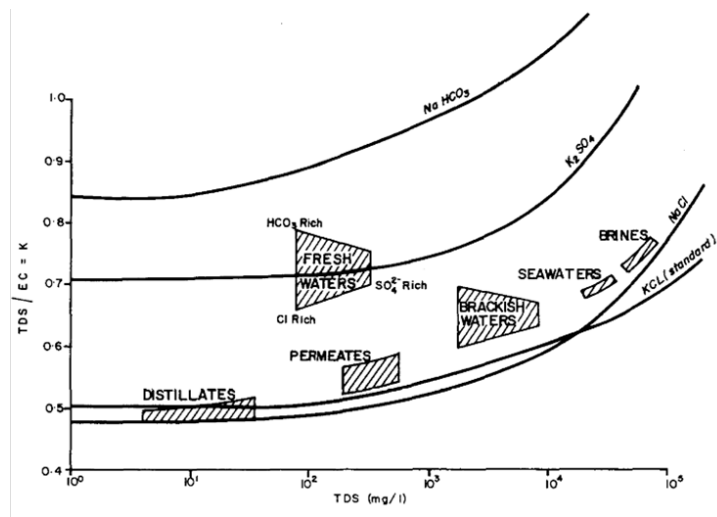


Figura 4.7: Relación de los sólidos totales disueltos (STD) con los valores de K para diferentes tipos de agua.
Fuente: Walton (1989).

4.8.2 Relaciones hidroquímicas

“...La química de los iones mayoritarios en el agua (principalmente subterránea) es una herramienta importante para determinar las fuentes de solutos y describir la evolución del agua debido a la interacción agua-roca que conduce a la disolución de minerales de carbonato, meteorización de silicatos y procesos de intercambio iónico” (Aghazadeh et al., 2017). Dichas dinámicas de los iones se pueden describir mediante diversas relaciones hidroquímicas, tal como muestra la Figura 4.8 para los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y Cl^+ .

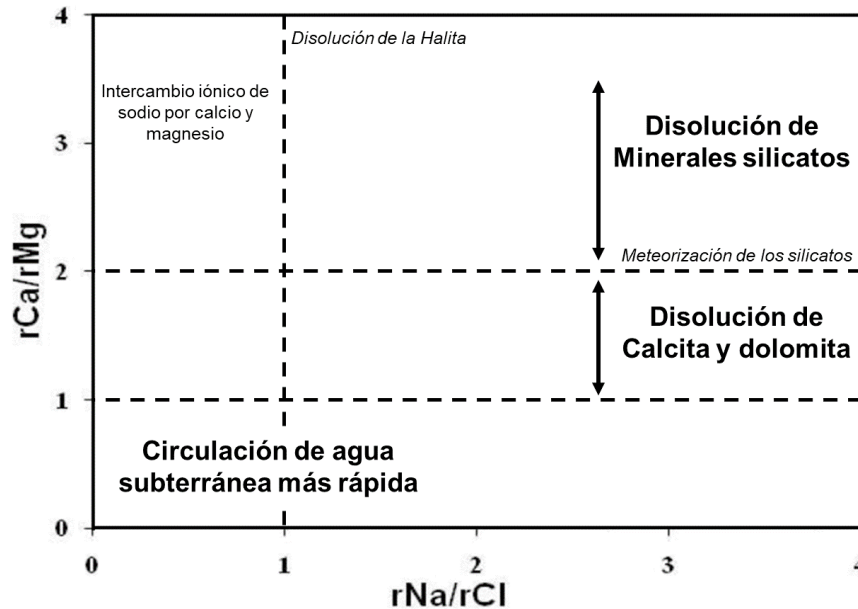


Figura 4.8: Gráfico de rCa/rMg y rNa/rCl que muestra los mecanismos de disoluciones.

Fuente: Adaptado de Gupta et al. (2016).

“...En la Figura 4.8 la relación de rNa/rCl (r : componente elemental en meq/L) es un importante indicador de fuentes de salinidad durante el flujo de agua subterránea (Gupta et al, 2016) y representa el rol de la meteorización de los silicatos. Valores de $rNa/rCl > 1$ muestra que la hidrólisis de silicatos son fuentes de Na^{2+} en el agua subterránea (Kawo y Karuppanan, 2018) y puede ser atribuido a la interacción del agua subterránea con esquisto feldespático o granito sódico” (Gupta et al., 2016).

“...De manera similar, los valores de $rCa/rMg > 2$ muestran que las fuentes de dichos cationes en el agua subterránea provienen de la meteorización de minerales de silicatos (Gupta et al., 2016). El contenido de Ca y el Mg en el agua subterránea se puede atribuir a reacciones de intercambio de bases, donde los esquistos de clorita y las rocas básicas dominan la litología del acuífero” (Gupta et al., 2016; Rusydi, 2018).

“...El valor de $rCa/rMg = 1$ indica la disolución de la dolomita, mientras que valores más altos señalan mayores contribuciones de calcita (Mayo y Loucks, 1995) hasta el valor de 2. Por tanto, registros cercanos de la línea ($rCa/rMg = 1$) significa que ocurrió la disolución de calcita y dolomita, mientras aquellos con valores superiores a 2 indicar los efectos de la meteorización de minerales de silicato” (Han et al., 2009).

“...Adicionalmente, se utilizaron los índices cloro alcalinos (CAI_1 y CAI_2) propuestos por Schoeller (1977) como intercambio de base en las permutolitas (rocas arcillosas y materia orgánica que absorben iones y de difícil identificación en los acuíferos) y el agua. Estos índices investigan los efectos de intercambio catiónico en la evolución de la calidad del agua subterránea (Kawo y Karuppanan, 2018) y el medio geológico. Los índices CAI_1 y CAI_2 se calculan a partir de las concentraciones de iones en meq/l de las siguientes ecuaciones” (Brown et al., 1975):

“...El índice CAI tiene valores negativos cuando Ca^{2+} y Mg^{2+} han sido removidos de la solución y reemplazados por Na^+ y K^+ de las rocas, lo que indica los procesos de intercambio iónico; y CAI tiene valores positivos que especifica los procesos de intercambio iónico inverso” (Gupta et al., 2016; Kanagaraj et al., 2018).

$$CAI_1 = \frac{[Cl^- - (Na^+ + K^+)]}{Cl^-} \quad (4.3)$$

$$CAI_2 = \frac{[Cl^- - (Na^+ + K^+)]}{(SO_4^{2-} + HCO_3^- + CO_3^{2-} + NO_3^-)} \quad (4.4)$$

4.8.3 Evaluación hidroquímica

“...Para caracterizar las aguas en función de la concentración de sales predominantes (cationes y aniones) e interacción con la parte orgánica y roca se elaboraron diagramas hidroquímicos (facies e índices) mediante el uso del software libre Diagrammes 6.75 del *Laboratoire d’Hydrogéologie d’Avignon* del 2021” (Simler, 2021). Para establecer las facies hidroquímicas de cada punto de muestreo se tomaron en cuenta los criterios indicados en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11: Criterios para establecer las facies hidroquímicas

Porcentaje de iones	Nombre simple	Nombre compuesto
< 40%	-	2 iones con los máximos porcentajes
> 40%	2 ^{do} ión < 30%	-
	2 ^{do} ión > 30% Diferencia entre 1 ^{er} y 2 ^{do} ión > 10%	2 ^{do} ión > 30% Diferencia entre 1 ^{er} y 2 ^{do} ión ≤ 10%

Fuente: Elaboración propia.

4.8.4 Balance iónico

“...El objetivo del balance iónico es evaluar el equilibrio de los iones en el agua en base a la comparación de las concentraciones molares de la suma de aniones (Σan) y la suma de cationes (Σcat). Este cálculo se realizó previo al análisis hidroquímico y se conoce como error balance iónico (en adelante, EBI). El porcentaje del EBI verifica la consistencia de los iones”.

“...Los iones mayoritarios presentes en la mayoría del agua superficial y subterránea son los cationes: calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+) y potasio (K^+) para el cálculo de la Σcat ; y los aniones: bicarbonatos (HCO_3^-), fluoruro (F^-), sulfato (SO_4^{2-}), cloruro (Cl^-) y nitrato (NO_3^-) para la Σan ¹⁶. Ambas sumas de concentraciones se expresan en miliequivalentes por litro (meq/L). De esa manera, se estableció el error de balance iónico de acuerdo con la siguiente ecuación” (Appelo y Postma, 2005):

$$Error\ de\ Balance\ Iónico\ (EBI) = 100 \frac{\Sigma cat - \Sigma an}{\Sigma cat + \Sigma an} \% \quad (4.5)$$

¹⁶ Los otros iones que se tomarán en cuenta son los cationes: aluminio (Al^{3+}), hierro (Fe^{2+}), manganeso (Mn^{2+}), bario (Ba^{2+}), estroncio (Sr^{2+}), litio (Li^+), iones hidronio (H_3O^+) del pH y las especies de arsénico: arsenito (As III) y arsenato (As V).

“...Aunque el EBI es un valor en porcentaje, la ecuación 6.4 incorpora un signo para mostrar la predominancia de cargas de cationes (signo positivo) o de aniones (signo negativo). En el presente estudio el EBI aceptado estuvo en el rango de -10 % a +10 %, el cual fue considerado por Dinka et al. (2015) y López (2018)”.

“...Esto se da en la mayoría de los casos en muestras ácidas con altas concentraciones de metales, resultando un EBI negativo si no se toma en cuenta sobre todos los iones hidronio (H_3O^+) del pH (de preferencia en base a su actividad y no concentración) y otras especies disueltas en mayor concentración como el aluminio (Al^{3+}) y hierro (Fe^{2+})”.

“...El EBI mayor del 2% es inevitable en los laboratorios, por lo que se debe aceptar un error mayor; no obstante, si el EBI es mayor a 5%, deberán revisarse los procedimientos, análisis y el muestreo¹⁷. El EBI con valores positivos no es afectado por los metales en el balance iónico, siendo la subestimación de HCO_3^- una de las causas más frecuentes de un EBI muy positivo”.

4.8.5 Diagramas hidroquímicos

- **Diagrama de Stiff**

“...El diagrama de Stiff es un método sofisticado para demostrar cambios verticales en la composición química del agua (Stiff Jr, 1951). Esta gráfica está compuesta por 3 ejes horizontales, cada uno de ellos uniendo el catión con anión. Todos los cationes se disponen al costado izquierdo del diagrama, y los aniones al derecho, con el Na^+ se relaciona con el Cl^- (posible influencia de agua salina o mar), el Ca^{2+} con el HCO_3^- (disolución del bicarbonato) y el Mg^{2+} con el SO_4^{2-} presentan los dos iones faltantes en predominancia” (Appelo y Postma, 2005).

“...Todos los ejes horizontales están a la misma escala (lineal) y las concentraciones están dadas en meq/L. En este tipo de diagrama sobresalen 2 características, por un lado, permite visualizar claramente diferentes tipos de agua (cada una con una configuración particular como las aguas cloruradas, sulfatadas y bicarbonatadas) y, en forma simultánea, permite dar idea del grado de mineralización (ancho de la gráfica)”.

“...Los diagramas de Stiff se pueden utilizar para visualizar aguas relacionadas iónicamente del cual se puede determinar la trayectoria del flujo. Si se conoce la trayectoria del flujo, es posible mostrar cómo la composición iónica de un cuerpo de agua cambia con el espacio y el tiempo. Estos diagramas muestran diferencias o similitudes en el agua y cambios en la composición del agua con la profundidad en secciones transversales hidrogeológicas” (Rekha, 2013). En la Figura 4.9 se muestran algunas apreciaciones de este diagrama que caracterizan varios tipos de aguas.

17 El EBI de 5% en diversos estudios de aguas subterráneas como el realizado por Singh et al. (2015).

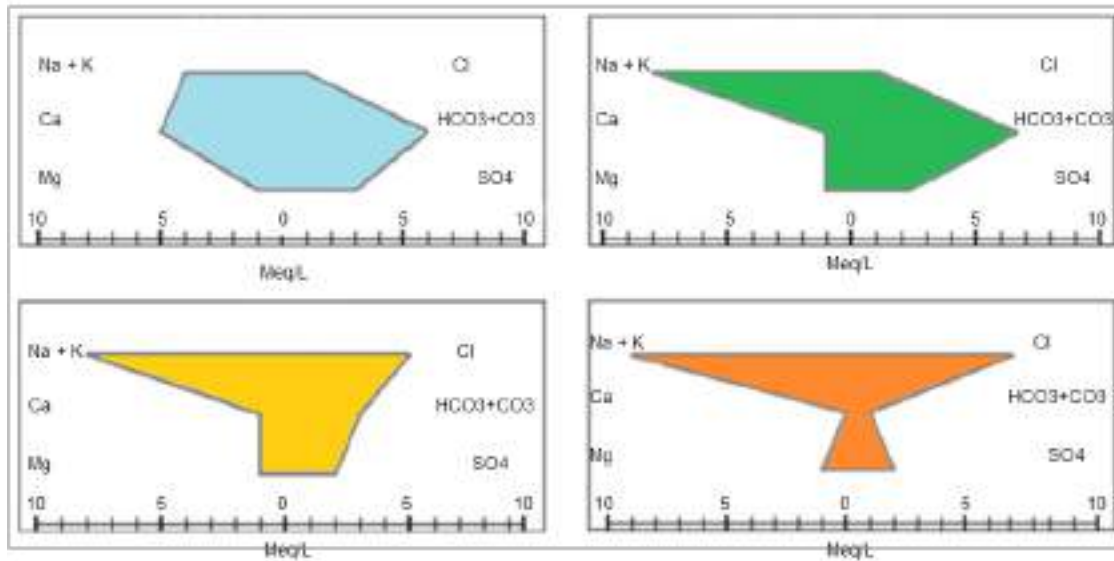


Figura 4.9: Diagrama de Stiff.

Fuente: Adaptado de Fagundo-Castillo et al. (2014).

- **Diagrama de Piper**

“...La evolución geoquímica del agua subterránea puede ser entendido mediante la construcción del diagrama trilinear de Piper (1944). El diagrama de Piper es una gráfica multifacética en la que las concentraciones porcentuales de miliequivalentes de cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+) y aniones (HCO_3^- , SO_4^{2-} y Cl^-) principales se representan en dos campos triangulares, que luego se proyectan en el campo de diamante central” (Ravikumar et al., 2015).

“...Los gráficos de Piper han sido utilizados para identificar los diferentes tipos de facies hidroquímicas basados en los aniones y cationes mayoritarios (Kanagaraj et al., 2018). Piper es el tipo de gráfico más utilizado que incluye aniones y cationes en forma simultánea y permite representar muchos análisis sin dar origen a confusiones. Las aguas geoquímicamente similares quedan agrupadas en áreas bien definidas con una representación de valores en %, por lo que se le puede asociar a una cifra como la conductividad eléctrica en forma de radio proporcional a dichas magnitudes o un listado de valores al costado del diagrama” (Custodio y Llamas, 1976).

“...El diagrama de Piper (ver Figura 4.10) también puede definir los patrones de cambio espacial en la química del agua entre unidades geológicas a lo largo de una línea de sección o trayectoria (Rekha, 2013). Por lo tanto, es útil para comprender el flujo y la calidad del agua, y cambios en los tipos de agua y sus mezclas, en base a las proporciones relativas de iones principales en lugar de las concentraciones” (Rekha, 2013).

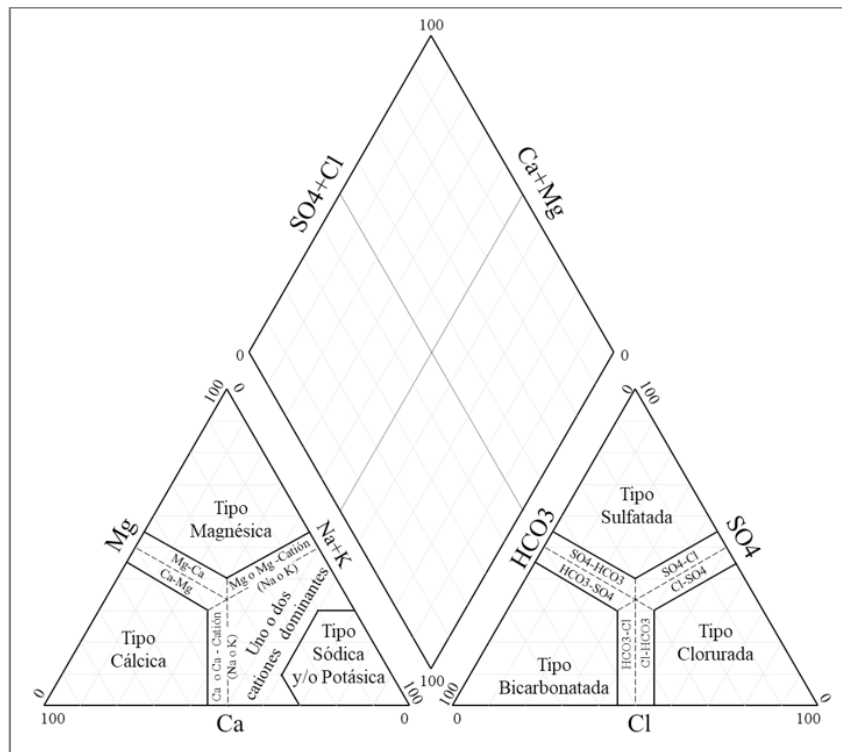


Figura 4.10: Diagrama trilinear de Piper.
Fuente: Elaboración propia.

- **Diagrama de Gibbs**

“...La química de las aguas subterráneas puede estar controlada por diferentes procesos y mecanismos. Entre los factores que pueden influir se encuentran el estado físico del acuífero, la mineralogía de la roca huésped y las condiciones climáticas. Gibbs (1970) propone dos diagramas, donde se grafican las variaciones de las razones $(Na^+ + K^+) / (Na^+ + K^+ + Ca^{2+})$ para los cationes y $Cl^- / (Cl^- + HCO_3^-)$ para los aniones en función de los sólidos totales disueltos (STD). Los tres principales mecanismos que controla la química del agua son definidos en el dominio de la precipitación atmosférica (lluvia), dominio de la roca, y dominio de los procesos de evaporización-cristalización (Torres-Rivera et al., 2019)”, ver Figura 4.11.

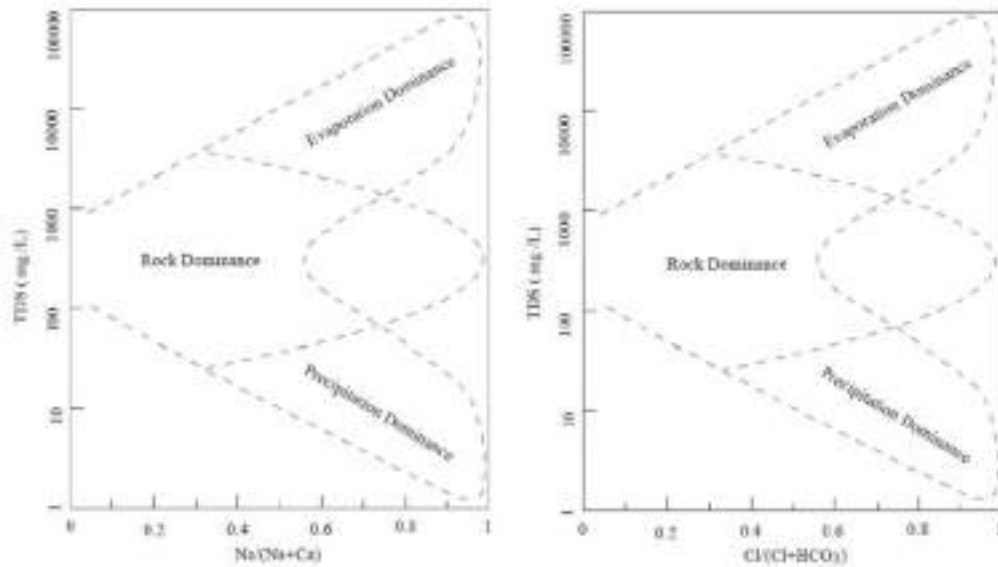


Figura 4.11: Diagrama de Gibbs.

Fuente: Modificado de Kawo y Karuppanan (2018).

“...Por otra parte, Marandi y Shand, (2018) concluyó que la aplicación del diagrama de Gibbs para el agua subterránea debería considerarse en el contexto más amplio de los procesos y la hidrogeoquímica, el cual difiere significativamente de la química del agua superficial y sus procesos, debido a la residencia más prolongada y ambientes geoquímicos más variables (por ejemplo, condiciones rédox) de muchos sistemas de agua subterránea”.

En general, el uso de interpretaciones del diagrama original de Gibbs para definir los procesos geoquímicos del agua subterránea puede simplificar la interpretación de los acuíferos y pasar por alto procesos importantes.

“...Otros diagramas como el Piper y evaluación geoquímica de isótopos conducirán a un mejor entendimiento de los procesos hidrogeoquímicos (Marandi y Shand, 2018), por lo que el diagrama de Gibbs en el presente estudio es complemento de los otros diagramas hidroquímicos”.

- **Diagrama de Mifflin**

“...El incremento de los componentes químicos como los iones durante la evolución del agua subterránea puede ser observado en el diagrama de Mifflin (Mifflin, 1968) de acuerdo con (Torres-Rivera, 2019). Este diagrama es una gráfica log-log de concentraciones de iones $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ vs. $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$, utilizada originalmente para grandes manantiales asociados con el terreno de rocas carbonatadas (Mifflin, 1968), para entender la evolución de agua subterránea y establecer diferentes tipos de flujos de agua (Torres-Rivera et al., 2019)”, ver Figura 4.12.

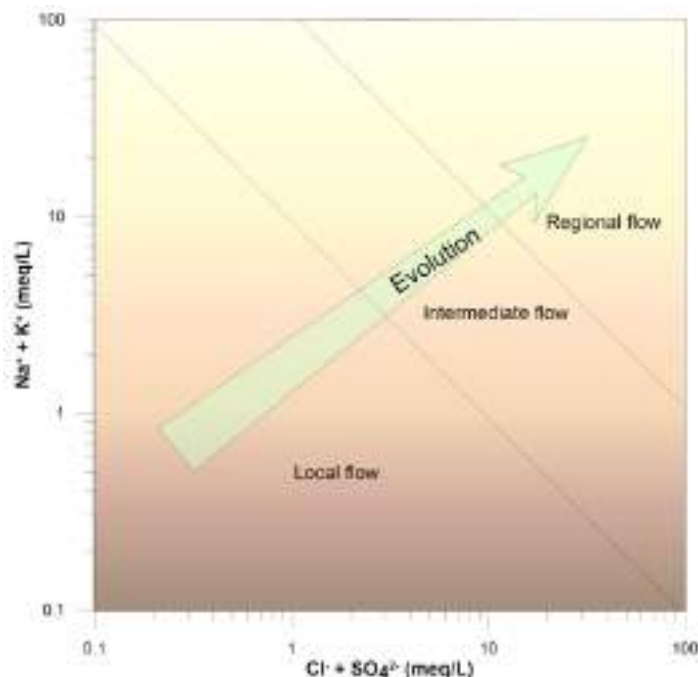


Figura 4.12: Diagrama de Mifflin.

Fuente: Modificado de Torres-Rivera et al. (2019).

4.8.6 Especiación de arsénico

El procedimiento seguido se basa en el desarrollo de la técnica y protocolo definidos por la empresa MetalSoft mediante el uso del cartucho de separación del arsenito (As^{3+}) y arsenato (As^{5+}) soluble¹⁸ para muestras de agua. El procedimiento consiste en dos pasos (ver Figura 4.13) indicadas a continuación:

El primer paso consiste en filtrar dos porciones de aproximadamente 50 ml (c/u) de la muestra de agua (superficial o subterránea) en la que se desea evaluar ambas especies químicas de arsénico a través de un filtro de jeringa (tipo disco o rombo) de $0,45 \mu\text{m}$ de diámetro de poro, una de las porciones se fija con ácido nítrico () y en ésta se determina el contenido de «arsénico disuelto».

El segundo paso es que la otra muestra filtrada y con ayuda de una jeringa plástica de 30 o 50 ml se la hace pasar a través de un cartucho desechable que contiene 2,5 g de la resina adsorbente selectiva¹⁹ a una velocidad de $60 \text{ ml} \pm 2 \text{ ml}$ o duración de filtrado menor a 1 minuto, donde se retiene el arsenato disuelto, para luego la porción filtrada (30 a 50 mL) se fija con y en ésta se determina el contenido de arsenito disuelto.

Los anteriores dos pasos se pueden realizar sin el filtro de jeringa de $0,45 \mu\text{m}$, con lo que el arsenito se calcula a partir del arsénico total. La principal condición para una adecuada adsorción de arsenato es que el pH de la muestra se encuentre en el rango de 4 a 9 unid. pH.

18 «Arsenic Speciation Cartridge». Disponible en: <http://metalssoftcenter.com/new-products/arsenic-speciation-cartridge>. Consultado el 6 de diciembre de 2021.

19 Cada cartucho desechable contiene 2,5 gramos de un adsorbente de aluminosilicato - mineral que contiene óxido de aluminio y silicio - altamente selectivo en una columna de polipropileno de $4 \times 0,3$ pulgadas (Meng y Wang, 1998).



Figura 4.13: Esquema de separación de las especies de arsénico.

4.8.7 Modelo de especiación química de arsénico (arsenito y arsenato)

Para determinar las especies químicas de arsénico (arsenito y arsenato) y sus concentraciones mediante un modelo termodinámico con reacciones cinéticamente controladas y diferentes tipos de equilibrio (solución, sólido y gases), se usó el programa PHREEQC (acrónimo de **pH-Redox-Equilibrio-lenguaje C**) en su versión 3.7.3²⁰ en la interface Notepad ++ v6.6.9 del 2021 con la base de datos wateq4f.dat²¹.

Este programa es aplicable a diferentes ambientes hidrogeoquímicos de agua natural y contaminada, experimentos de laboratorio o en procesos industriales para la simulación de reacciones químicas y procesos de transporte.

20 PHREEQC versión 3 es un programa computacional geoquímico escrito en los lenguajes de programación C y C++ que está diseñado para realizar una amplia variedad de cálculos geoquímicos acuosos. El programa se basa en la química de equilibrio de soluciones acuosas que interactúan con minerales, gases, soluciones sólidas, intercambiadores y superficies de sorción. PHREEQC implementa varios tipos de modelos como la asociación de iones (Modelo del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore y WATEQ4F), interacción iónica específica Pitzer y la teoría de la interacción iónica específica (SIT) para explicar la no idealidad de las soluciones acuosas (Parkhurst y Appelo, 2013).

21 WATEQ4F.dat es un código de especiación química de elementos en aguas naturales que asume equilibrio de fases acuosas homogéneas, excepto para especies redox y no se asume equilibrio en la solubilidad de minerales. El programa calcula la distribución de las especies acuosas, actividades iónicas e índices de saturación de minerales que indican la tendencia de un agua a disolver o precipitar un conjunto de minerales (Ball y Nordstrom, 2001). El código incluye datos termodinámicos para las especies acuosas de arsénico para su especiación acuosa y constantes de complejación de sus iones con los óxidos de hierro hidratado de acuerdo con Dzombak y Morel, 1990; además de las constantes de equilibrio para el intercambio iónico del modelo Gaines-Thomas listadas por Appelo y Postma, 2005. Disponible en https://wwwbrr.cr.usgs.gov/projects/GWC_chemtherm/software.htm. Consultado el 6 de abril de 2022.

A diferencia de otros modelos, PHREEQC incluye un mayor número de elementos (metales y metaloides) para determinar la distribución de sus especies acuosas y reacciones químicas, además cuenta con un código generalizado para facilitar el uso con otros programas como el PHAST (**PHREEQC + HST3D**) para simular el flujo de agua subterránea y transporte de solutos e interrelacionar con otros lenguajes de programación como el PYTHON.

No obstante, el programa PHREEQC tiene diferentes limitaciones, entre las cuales está la consistencia interna de los datos al considerar logaritmos de constantes de equilibrio y entalpías de reacción de varias fuentes bibliográficas, por lo que los archivos de la base de datos deben ser preliminares, y la selección de las especies acuosas y los datos termodinámicos se deja a criterio de los usuarios del programa (Parkhurst y Appelo, 2013). La información de entrada en la interface del Notepad del Phreeqc, entre paréntesis el código del elemento y compuesto para el programa es:

- pH, potencial electrónico (pe), densidad del agua (g/mL)²², temperatura (°C).
- Metales disueltos catiónicos en mg/l con un solo **estado de oxidación (E.O)**: calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na), potasio (K), bario (Ba), boro (B), litio (Li); estroncio (Sr), aluminio (Al), cadmio (Cd), plomo (Pb), zinc (Zn), níquel (Ni) y **varios E.O**: arsénico (As)²³, hierro (Fe), manganeso (Mn) y cobre (Cu).
- Aniones principales en mg/l: cloruro (Cl), bicarbonatos (HCO₃), sulfato (S (6)), fluoruro (F), nitrato (N (+5)) con masa molar (gfw) de 62,0 g/mol.

Cabe mencionar que los valores de pH y temperatura son de lectura directa de campo, mientras que los aniones y cationes metálicos provienen de los resultados de laboratorio acreditado. Con respecto al cálculo del potencial electrónico (pe) se calcula a partir de la ecuación de Nerst:

$$pe = \frac{F * Eh}{2,303 * R * T_K} \quad (4.6)$$

Donde:

F (Constante de Faraday)	: 96,42 KJ*V-1*mol-1
T_K (Temperatura en K)	: 273,15 + Temperatura en °C.
R (Constante Universal de los gases)	: 8,314472 JK-1mol-1.
Eh	: Potencial Redox relativo a un electrodo de referencia en V.

22 Para el cálculo de la densidad del agua se usó el enlace: <https://www.steamtablesonline.com/steam97web.aspx>, considerando una presión, en bar, calculada referencialmente a partir de la temperatura del ambiente y altitud del punto de muestreo de acuerdo con: <https://www.mide.com/pages/air-pressure-at-altitude-calculator> usando la conversión de 1 atm = 1,01325 bar.

23 En caso del arsénico, se correlacionó con los resultados de la metodología del uso del cartucho de separación del arsenito (As³⁺) y arsenato (As⁵⁺) soluble de la empresa MetalSoft Center.

El Eh se calcula a partir de la siguiente ecuación (James et al., 2004):

$$Eh = Eh^{\circ} + \text{potencial medido en campo (ORP)} \quad (4.7)$$

Donde:

Eh° : Potencial de referencia o media celda en mV.

ORP : Potencial Redox (Reducción-Oxidación) en mV.

El ORP se obtuvo de la lectura directa de campo del multiparámetro cuyo sensor combinado de pH/ORP que contiene una punta de detección de pH en un bulbo de vidrio con un pin de detección de ORP de platino e incorpora un electrodo de referencia doble de Ag/AgCl con solución electrolítica de 3,5 M KCl no rellenable y un sensor de temperatura incorporado²⁴. De acuerdo a la Figura 4.14, el potencial de referencia o media celda (Eh°) se puede calcular a partir de la relación de la solución KCl 3,5 M con la temperatura (°C) (Striggow, 2017).

Potencial de media celda del Electrodo de referencia Ag/AgCl

Derivado de NFM USGS, Tabla 6.5.2 (9/2005)

T (°C)	Molaridad de solución de relleno de KCl			
	3 M	3,3 M*	3,5 M	Sat / 4M
10	220	217	215	214
15	216	214	212	209
20	213	210	208	204
25	209	207	205	199
30	205	203	201	194
35	202	199	197	189
40	198	195	193	184

*Valor interpolado

Figura 4.14: Relación de la solución de llenado KCl del electrodo de referencia (Ag/AgCl) y la temperatura (°C).

24 Las características del electrodo del sensor combinado pH/ORP está en el siguiente link: <https://www.hannacolombia.com/products/product/1596/pdf> y cuya solución electrolítica de 3,5 M KCl están en: https://www.hannainst.es/parametros/5021-solucion-electrolitica-35m-kcl.html#/709-fda-no/693-volumen-230_ml. Consultado el 6 de diciembre de 2021.

La relación lineal entre el potencial de referencia de la solución de relleno KCl 3M y la temperatura (°C) se indica en la Figura 4.15 de acuerdo con la ecuación 4.8 con R² de 0,9978:

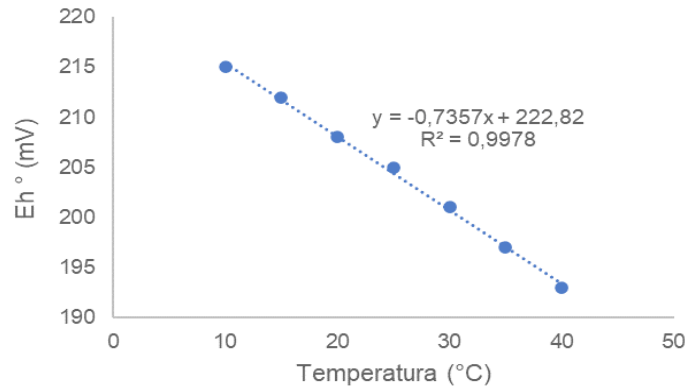


Figura 4.15: Relación de temperatura (°C) y el potencial de electrodo de referencia Ag/AgCl con solución de relleno KCl 3,5 M (Eh°).

4.8.8 Relación oxígeno disuelto en mg/l y porcentaje de saturación (%)

De acuerdo a los resultados de campo o *in situ* obtenido en las salidas de campo de diciembre 2020 y septiembre 2021, la relación de oxígeno disuelto en el agua subterránea y superficial en el sistema hídrico TDPS se muestra en la Figura 4.16. Al respecto, se obtuvo la siguiente ecuación con R² de 0,9981.

$$\text{oxígeno disuelto en \%} = 16,253 * \text{oxígeno disuelto en mg/l} \quad (4.9)$$

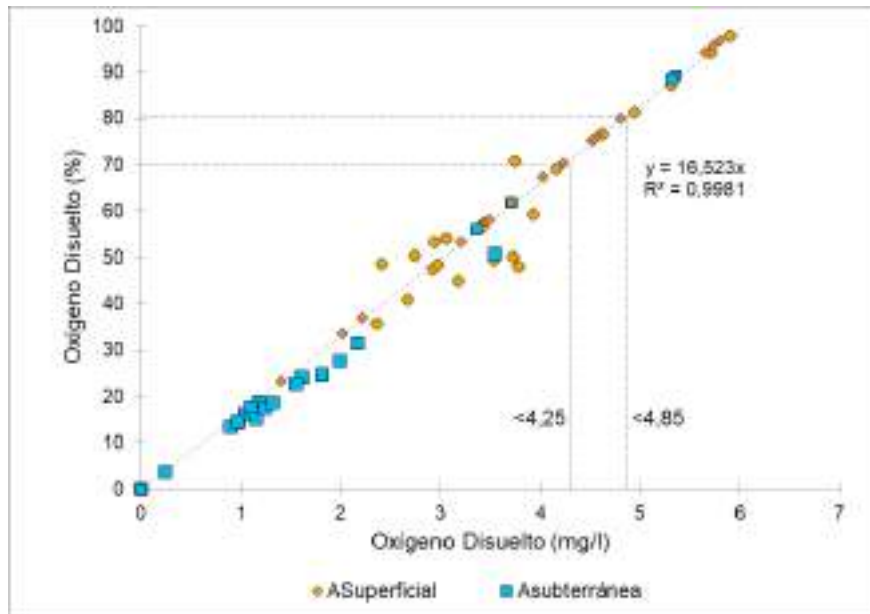


Figura 4.16: Relación de concentración en mg/l y porcentaje (%) de oxígeno disuelto del agua superficial y subterránea.

La ecuación 4.9 señala que a 80% del porcentaje de saturación del oxígeno disuelto, la concentración es 4,85 mg/l y a 70% de dicho porcentaje la concentración es 4,25 mg/l, por lo que dichos porcentajes indicados en la normativa de Bolivia serán convertidos a mg/l para homogenizar las unidades de concentración con el Perú.

4.9 CRITERIOS DE EVALUACIÓN

4.9.1 Calidad de agua superficial

Los resultados de agua superficial para Perú fueron comparados con los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua 2017 (en adelante, ECA) aprobados mediante el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM²⁵, según la clasificación de cuerpos de agua continentales superficiales establecida por la ANA.

Los ríos Ramis (0177), Huancané (01781), Coata (1761), Ilpa (0174) e Ilave (01611) están catalogados de acuerdo con la Clasificación de los Cuerpos de Aguas Superficiales aprobada mediante Resolución Jefatural N° 056-2018-ANA en la categoría 3: «Riego de vegetales y bebida de animales» en sus dos subcategorías, D1: «Riego de vegetales» y D2: «Bebida de animales», en adelante ECA-Cat3D1 y ECA-Cat3D2 respectivamente. Los ríos Coata e Ilave, aguas arriba de la ciudad de Juliaca e Ilave están clasificadas como categoría 1: «Poblacional y recreacional» en su subcategoría A2: «Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional», en adelante Cat1A2. Mientras que la laguna Vilacota y el río Mauri están clasificadas como categoría 4: «Conservación del ambiente acuático» para lagunas (ECA-Cat4E1) y ríos de la sierra (ECA-Cat4E2) respectivamente.

Asimismo, para establecer criterios de comparación y/o cumplimiento de normativa específica en el sistema hídrico TDPS, se considera los Valores Máximos Admisibles (VMA) en el Estado Plurinacional de Bolivia aprobado mediante la Clasificación de los cuerpos de agua según su aptitud de uso indicado en el cuadro N° 1 del Anexo A del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH) de la reglamentación de la Ley del Medio Ambiente²⁶ aprobada mediante Decreto Supremo N° 24176²⁷ en la Clase B: «Aguas de utilidad general, que para consumo humano requieren tratamiento físico y desinfección bacteriológica» apto para: recreación de contacto primario (natación, esquí e inmersión), riego de hortalizas consumidas crudas y frutas de cascara delgada, abastecimiento industrial, acuicultura (natural o intensiva), abrevadero de animales y la navegación.

De esa manera, en la Tabla 4.12, se presenta el listado de parámetros y los criterios de calidad de agua superficial en función de sus usos establecidos por ambos países.

25 Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias. Publicado en el diario oficial "El Peruano" el 07 de junio de 2017.

26 Ley N° 1333 promulgada el 27 de abril de 1992. Publicada en la Gaceta Oficial de Bolivia el 15 de junio de 1992.

27 Decreto Supremo N° 24176. Promulgado el 08 de diciembre de 1995.

Tabla 4.12: Valores de los parámetros de agua superficial en Perú (ECA) y Bolivia (VMA)

Parámetro	Unidad	ECA					VMA
		Cat4E1	Cata4E2	Cat1A2	Cat3D1	Cat3D2	Clase B
Parámetros <i>in situ</i>							
pH	Unid. pH	6,5 – 9,0	6,5 – 9,0	5,5 - 9,0	6,5 – 8,5	6,5 – 8,4	6,0 – 9,0
Oxígeno disuelto	mg/l	≥ 5	≥ 5	≥ 5	≥ 4	> 5	< 70% saturación (4,25 mg/l)
Conductividad eléctrica	µS/cm	1000	1000	1600	2500	5000	---
Turbidez	UNT	---	---	100	---	---	<50
Fisicoquímicos							
Sólidos totales disueltos (STD)	mg/l	---	---	1000	---	---	1000
Sólidos totales suspendidos (STS)	mg/l	≤ 25	≤ 100	---	---	---	---
Nitrógeno total	mg/l	0,315	---	---	---	---	12
Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻)	mg/l	---	---	---	518	---	---
Fosfatos (PO ₄ ³⁻)	mg/l	---	---	---	---	---	0,5
Cloruro (Cl)	mg/l	---	---	250	500	---	300
Nitrato (NO ₃ -N)*	mg/l	13	13	50	100	100	50
Sulfato (SO ₄ ²⁻)	mg/l	---	---	500	1000	1000	400
Fluoruro (F ⁻)	mg/l	---	---	---	1	---	0,6-1,7
Metales totales							
Calcio (Ca)	mg/l	---	---	---	---	---	300
Sodio (Na)	mg/l	---	---	---	---	---	200
Aluminio (Al)	mg/l	---	---	5	5	5	0,5
Arsénico (As)	mg/l	0,15	0,15	0,01	0,1	0,2	0,05
Antimonio (Sb)	mg/l	0,64	0,64	0,02	---	---	0,01
Bario (Ba)	mg/l	0,7	0,7	1	0,7	---	1
Berilio (Be)	mg/l	---	---	0,04	0,1	0,1	0,001
Boro (B)	mg/l	---	---	2,4	1	5	1
Cadmio (Cd)	mg/l	---	---	0,005	0,01	0,05	0,005
Cadmio (Cd) disuelto	mg/l	0,00025	0,00025	---	---	---	---
Cobalto (Co)	mg/l	---	---	---	0,05	1	0,2
Cobre (Cu)	mg/l	0,1	0,1	2	0,2	0,5	1
Cromo (Cr)	mg/l	---	---	0,05	0,1	1	0,6**
Estaño (Sn)	mg/l	---	---	---	---	---	2
Hierro (Fe)	mg/l	---	---	1	5	---	---
Hierro (Fe) soluble	mg/l	---	---	---	---	---	0,3
Litio (Li)	mg/l	---	---	---	2,5	2,5	2,5
Magnesio (Mg)	mg/l	---	---	---	---	250	100
Manganeso (Mn)	mg/l	---	---	0,4	0,2	0,2	1
Mercurio (Hg)	mg/l	0,0001	0,0001	0,002	0,001	0,01	0,001
Níquel (Ni)	mg/l	0,052	0,052	---	0,2	1	0,05
Plata (Ag)	mg/l	---	---	---	---	---	0,05

Parámetro	Unidad	ECA					VMA
		Cat4E1	Cat4E2	Cat1A2	Cat3D1	Cat3D2	Clase B
Plomo (Pb)	mg/l	0,0025	0,0025	0,05	0,05	0,05	0,05
Selenio (Se)	mg/l	0,005	0,005	0,04	0,02	0,05	0,01
Uranio (U)	mg/l	---	---	0,02	---	---	0,02
Talio (Ta)	mg/l	0,0008	0,0008	---	---	---	---
Vanadio (V)	mg/l	---	---	---	---	---	0,1
Zinc (Zn)	mg/l	0,12	0,12	5	2	24	0,2

*Incluye los nitritos (NO₂-N) y **Cromo trivalente. ---: No aplica.

Fuente: Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM (Perú) y Decreto Supremo N° 24176 (Bolivia).

4.9.2 Calidad de agua subterránea

En cuanto al agua subterránea de los pozos, no se cuenta con estándares nacionales de calidad ambiental para ambos países, por lo que se optó realizar la comparación de los resultados de los análisis comparados referencialmente para Perú con los ECA para Agua 2017 en la categoría 1: «Poblacional y recreacional» en su subcategoría A1: «Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento primario», en adelante ECA-Cat1A2; y en la subcategoría ECA-Cat3D2 para bebida de animales debido al uso del agua de los pozos como abrevaderos.

Así también, el agua subterránea para Bolivia fue comparado referencialmente con los Valores Máximos Admisibles (VMA) en la 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» apto para: recreación de contacto primario: natación, esquí e inmersión, riego de hortalizas consumidas crudas y frutas de cascara delgada, abastecimiento industrial y acuicultura (natural o intensiva).

La Tabla 4.13 presenta el listado de parámetros y los criterios de calidad de agua subterránea con respecto de sus usos establecidos por ambos países.

Tabla 4.13: Valores de parámetros de agua subterránea referencial en Perú (ECA) y Bolivia (VMA)

Parámetro	Unidad	ECA		VMA
		Cat1A1	Cat3D2	Clase A
Parámetros <i>in situ</i>				
pH	Unid. pH	6,5 – 8,5	6,5 – 8,4	6,0 – 9,0
Oxígeno disuelto	mg/l	≥ 6	> 5	< 80% saturación (4,85 mg/l)
Conductividad eléctrica	μS/cm	1500	5000	---
Turbidez	UNT	5	---	<10
Fisicoquímicos				
Sólidos totales disueltos (STD)	mg/l	1000	---	1000
Nitrógeno total	mg/l	---	---	5
Fosfato (PO ₄ ³⁻)	mg/l	---	---	0,4
Cloruro (Cl ⁻)	mg/l	250	---	250
Nitrato (NO ₃ -N)*	mg/l	50	100	20
Sulfato (SO ₄ ²⁻)	mg/l	250	1000	300

Parámetro	Unidad	ECA		VMA
		Cat1A1	Cat3D2	Clase A
Fluoruro (F)	mg/l	1,5	---	0,6-1,7
Metales totales				
Calcio (Ca)	mg/l	---	---	200
Sodio (Na)	mg/l	---	---	200
Aluminio (Al)	mg/l	0,9	5	0,2
Arsénico (As)	mg/l	0,01	0,2	0,05
Antimonio (Sb)	mg/l	0,02	---	0,01
Bario (Ba)	mg/l	0,7	---	1
Berilio (Be)	mg/l	0,012	0,1	0,001
Boro (B)	mg/l	2,4	5	1
Cadmio (Cd)	mg/l	0,003	0,05	0,005
Cobalto (Co)	mg/l	---	1	0,1
Cobre (Cu)	mg/l	2	0,5	0,05
Cromo (Cr)	mg/l	0,05	1	0,05
Estaño (Sn)	mg/l	---	---	2
Hierro (Fe)	mg/l	0,3	---	---
Hierro (Fe) soluble	mg/l	---	---	0,3
Litio (Li)	mg/l	---	2,5	2,5
Magnesio (Mg)	mg/l	---	250	100
Manganeso (Mn)	mg/l	0,4	0,2	0,5
Molibdeno (Mo)	mg/l	0,7	---	---
Mercurio (Hg)	mg/l	0,001	0,01	0,001
Níquel (Ni)	mg/l	0,07	1	0,05
Plata (Ag)	mg/l	---	---	0,05
Plomo (Pb)	mg/l	0,01	0,05	0,05
Selenio (Se)	mg/l	0,04	0,05	0,01
Uranio (U)	mg/l	0,02	---	0,02
Vanadio (V)	mg/l	---	---	0,1
Zinc (Zn)	mg/l	3	24	0,2

*Incluye los nitritos ((NO₂⁻-N). ---: No aplica.

Fuente: Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM (Perú) y Decreto Supremo N° 24176 (Bolivia).

4.9.3 Calidad de agua residual municipal y potable

Respecto al agua residual de la PTAR de Oruro del Estado Plurinacional de Bolivia, fue comparada con los Límites Permisibles para Descargas Líquidas (LPDL) – valor diario señalado en el Anexo A-2 del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH) de la reglamentación de la Ley del Medio Ambiente (Ley N° 1333) aprobada mediante Decreto Supremo N° 24176.

Con respecto al agua potable de Pampa Aullagas, esta fue evaluada con el Valor Máximo Aceptable (VMAc)²⁸ indicado en la Norma Boliviana 512 (NB 512): «Norma Técnica de Agua Potable – Requisitos»²⁹. Estos requisitos son físicos y organolépticos para turbidez y STD, control referencial para conductividad eléctrica y bicarbonatos (alcalinidad), y químicos para el resto de los parámetros (ver Tabla 4.14).

Tabla 4.14: Valores de los parámetros de agua residual y potable en Bolivia

Parámetro	Unidad	LPDL	VMAc
		Diario	Requisitos
Parámetros <i>in situ</i>			
pH	Unid. pH	6,9	6,5 – 9,0
Conductividad eléctrica	μS/cm	---	1500
Turbidez	UNT	---	5
Fisicoquímicos			
Sólidos totales disueltos (STD)	mg/l	---	1000
Sólidos totales suspendidos (STS)	mg/l	60	---
Bicarbonatos	mg/l	---	370*
Cloruro (Cl ⁻)	mg/l	---	250
Nitrato (NO ₃ -N)	mg/l	---	45
Sulfato (SO ₄ ²⁻)	mg/l	---	400
Fluoruro (F ⁻)	mg/l	---	1,5
Metales totales			
Calcio (Ca)	mg/l	---	200
Sodio (Na)	mg/l	---	200
Aluminio (Al)	mg/l	---	0,1
Arsénico (As)	mg/l	1	0,01
Antimonio (Sb)	mg/l	1	0,02
Bario (Ba)	mg/l	---	0,7
Boro (B)	mg/l	---	0,3
Cadmio (Cd)	mg/l	0,3	0,003
Cobre (Cu)	mg/l	1	1
Cromo (Cr)	mg/l	1	0,05
Estaño (Sn)	mg/l	2	---
Hierro (Fe)	mg/l	1	0,3
Magnesio (Mg)	mg/l	---	150
Manganeso (Mn)	mg/l	---	0,1
Mercurio (Hg)	mg/l	0,002	0,001
Níquel (Ni)	mg/l	---	0,05
Plomo (Pb)	mg/l	0,6	0,01

28 Valor establecido para los diferentes parámetros, el cual no debe ser excedido para no incidir en la salud humana.

29 Quinta revisión 2016-06-2017, Número de Referencia NB: 512: 2016 encomendado al Comité Técnico Normalizador CTN 3.1 “Agua Potable”.

Parámetro	Unidad	LPDL	VMAc
		Diario	Requisitos
Selenio (Se)	mg/l	---	0,01
Zinc (Zn)	mg/l	3	5

* Siendo el de agua potable con pH de 6,72, los bicarbonatos corresponden a la alcalinidad total de acuerdo con lo indicado en la normativa NB 512.

---: No aplica.

Fuente: Decreto Supremo N° 24176 (Bolivia).

4.9.4 Calidad de sedimentos

Para el caso de los resultados de sedimentos, estos no cuentan con una normatividad nacional de comparación para ambos países, por lo que se utilizó de manera referencial a los Estándares de la Guía de Calidad Ambiental de Canadá – CEQG (*Canadian Environmental Quality Guidelines*) del SQG (*Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life – Fresh water*)³⁰ considerados para sedimentos de agua dulce.

En la Tabla 4.15 se presenta los valores establecidos en la guía internacional para el arsénico, cadmio, cromo, cobre, mercurio, plomo y zinc, precisando la concentración por debajo de la cual no se esperan efectos biológicos adversos: valor ISQG (*Interim Sediment Quality Guideline*) y la concentración por encima de la cual se encuentran efectos biológicos adversos con frecuencia: valor PEL (*Probable Effect Level*), según la guía canadiense antes mencionada.

Tabla 4.15: Concentraciones de metales en sedimentos de agua dulce según la guía canadiense

Parámetro	Guía canadiense (CEQG)		
	ISQG (mg/kg)	PEL (mg/kg)	Año de publicación
Arsénico	5,9	17	1998
Cadmio	0,6	3,5	1997
Cromo	37,3	90	1998
Cobre	35,7	197	1998
Mercurio	0,17	0,486	1997
Plomo	35,0	91,3	1998
Zinc	123	315	1998

Fuente: Canadian Environmental Quality Guidelines (CEQG).

30 *Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life – Fresh water* (Guía de calidad ambiental de Canadá para sedimentos en cuerpos de agua dulce). http://www.ccme.ca/en/resources/canadian_environmental_quality_guidelines/ y <https://www.ccme.ca/en/summary-table>. Consultado el 8 de diciembre de 2021.

CAPÍTULO V: RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 CALIDAD DEL AGUA

En este capítulo se presenta los resultados de las lecturas de los parámetros *in situ* o campo y del laboratorio acreditado de los cuerpos de agua superficial y subterránea en el sistema hídrico TDPS. Asimismo, se muestran los resultados de los cuerpos de agua superficial influenciados notablemente por las actividades antropogénicas como la minería y las aguas residuales municipales, y de la muestra de agua potable correspondiente al municipio de Pampa Aullagas de la provincia Ladislao Cabrera del departamento de Oruro. Las concentraciones de oxígeno disuelto en % fueron convertidos a mg/l de acuerdo con la ecuación 4.9 (ver Figura 4.4).

5.1.1 Calidad de agua superficial

En este ítem se presenta los parámetros con valores u concentraciones mayores o menores a los estándares nacionales de calidad ambiental para Perú en la categoría 1-A2 (ECA-Cat1A2): aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional, categoría 3-D1 (ECA-Cat3D1): riego de vegetales, categoría 3-D2 (ECA-Cat3D2): bebida de animales y en las categorías 4-E1 (ECA-Cat4E1) y 4-E2 (ECA-Cat4E2): conservación del ambiente acuático para lagos-lagunas y ríos de la sierra respectivamente. En tanto, en Bolivia se utilizaron los Valores Máximos Admisibles de la clase B (VMA-Clase B): «Aguas de utilidad general, que para consumo humano requieren tratamiento físico y desinfección bacteriológica», ver Tablas 5.1 y 5.2.

Potencial de hidrógeno (pH)

De acuerdo con la Figura 5.1, solo en los puntos PAS10 (río Maure - salida de la laguna Vilacota) y PAS12 (río Desaguadero – compuertas de la ORLT) en septiembre 2021 registraron valores de pH por encima del rango de los ECA-Cat4E1 y E2: conservación del ambiente acuático para ríos y lagunas de la sierra. Los puntos PAS04 (río Coata – antes del puente viejo “Ramis) y PAS08 (río Ilave, a 5,0 km aguas arriba de la ciudad de Ilave), en diciembre 2020 y septiembre 2021 respectivamente, registraron valores de pH por encima del rango de los ECA-Cat1A2.

Mientras que en los puntos PAS01, PAS02, PAS03, PAS05, PAS06 y PAS07, en diciembre 2020 y septiembre 2021, registraron valores de pH por encima del rango de los ECA-Cat3D1 y ·D2: riego de vegetales y bebida de animales. De otro lado, el río Mauri en PAS10 (laguna Vilacota) en diciembre 2020 y el PAS11 (cerca del poblado Maure Pucuyo, a 9,2 km de la frontera Perú-Bolivia) en diciembre

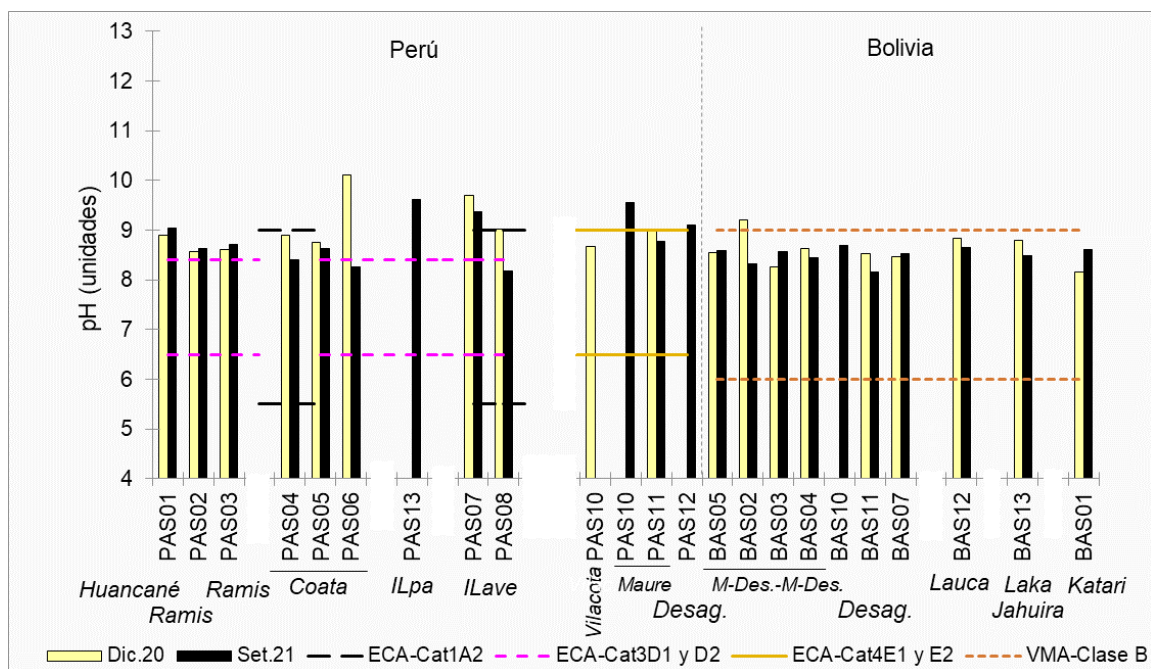
2020 y septiembre 2021 presentó pH dentro del rango de los ECA-CatE2: conservación del ambiente acuático para ríos de sierra.

En tanto, los registros de pH para Bolivia en diciembre 2020 en los puntos BAS02, BAS09 y BAS10 estuvieron fuera del rango de los VMA-Clase B: aguas de utilidad general que requieren tratamiento físico, a excepción del río San Juan de Sora Sora (BAS09) en septiembre 2021 también registró pH ácido (2,95).

Tabla 5.2: Comparación de los resultados de aguas superficiales (ríos) con la normativa de Bolivia

Fecha	YMA Clase B	Unidades	% de	Estaciones de Muestreo																	
				BAS02	BAS03	BAS04	BAS05	BAS06	BAS07	BAS08	BAS09	BAS10	BAS11	BAS12	BAS13						
Temperatura	°C	—	17.0	15.84	15.5	17.0	17.3	20.08	22.4	14.98	17.5	16.37	17.5	16.45	15.42	14.41	15.42	15.02	15.00	15.00	
	lim (pp)	6.0-9.0	6.79	5.71	6.28	6.53	6.58	6.58	6.58	6.53	6.53	6.53	6.53	6.53	6.53	6.53	6.53	6.53	6.53	6.53	
	%	< 30%	8.79	9.28	8.33	8.28	8.33	8.33	8.33	8.33	8.33	8.33	8.33	8.33	8.33	8.33	8.33	8.33	8.33	8.33	8.33
	mg/l	estándar	3.20	5.32	2.41	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42	3.42
	mg/l	estándar	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25
	mg/l	estándar	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25
Oxígeno disuelto	mg/l	—	8.19	14.16	30.96	22.08	20.90	12.22	17.00	14.22	17.60	14.22	17.60	11.90	5.98	11.90	20.19	20.60	20.19	20.60	
	mg/l	—	9.19	14.16	30.96	22.08	20.90	12.22	17.00	14.22	17.60	14.22	17.60	11.90	5.98	11.90	20.19	20.60	20.19	20.60	
	mg/l	—	8.19	14.16	30.96	22.08	20.90	12.22	17.00	14.22	17.60	14.22	17.60	11.90	5.98	11.90	20.19	20.60	20.19	20.60	
	mg/l	—	8.19	14.16	30.96	22.08	20.90	12.22	17.00	14.22	17.60	14.22	17.60	11.90	5.98	11.90	20.19	20.60	20.19	20.60	
	mg/l	—	8.19	14.16	30.96	22.08	20.90	12.22	17.00	14.22	17.60	14.22	17.60	11.90	5.98	11.90	20.19	20.60	20.19	20.60	
	mg/l	—	8.19	14.16	30.96	22.08	20.90	12.22	17.00	14.22	17.60	14.22	17.60	11.90	5.98	11.90	20.19	20.60	20.19	20.60	
Conductividad eléctrica	µmhos/cm	—	919	1416	3096	2208	2090	1222	1700	1422	1760	1422	1760	1190	598	1190	2019	2060	2019	2060	
	µmhos/cm	—	919	1416	3096	2208	2090	1222	1700	1422	1760	1422	1760	1190	598	1190	2019	2060	2019	2060	
	µmhos/cm	—	919	1416	3096	2208	2090	1222	1700	1422	1760	1422	1760	1190	598	1190	2019	2060	2019	2060	
	µmhos/cm	—	919	1416	3096	2208	2090	1222	1700	1422	1760	1422	1760	1190	598	1190	2019	2060	2019	2060	
	µmhos/cm	—	919	1416	3096	2208	2090	1222	1700	1422	1760	1422	1760	1190	598	1190	2019	2060	2019	2060	
	µmhos/cm	—	919	1416	3096	2208	2090	1222	1700	1422	1760	1422	1760	1190	598	1190	2019	2060	2019	2060	
pH	mg/l	—	2.29	1.49	2.93	1.76	2.94	1.76	2.94	1.76	2.94	1.76	2.94	1.76	2.94	1.76	2.94	1.76	2.94	1.76	
	mg/l	—	2.29	1.49	2.93	1.76	2.94	1.76	2.94	1.76	2.94	1.76	2.94	1.76	2.94	1.76	2.94	1.76	2.94	1.76	
	mg/l	—	2.29	1.49	2.93	1.76	2.94	1.76	2.94	1.76	2.94	1.76	2.94	1.76	2.94	1.76	2.94	1.76	2.94	1.76	
	mg/l	—	2.29	1.49	2.93	1.76	2.94	1.76	2.94	1.76	2.94	1.76	2.94	1.76	2.94	1.76	2.94	1.76	2.94	1.76	
	mg/l	—	2.29	1.49	2.93	1.76	2.94	1.76	2.94	1.76	2.94	1.76	2.94	1.76	2.94	1.76	2.94	1.76	2.94	1.76	
	mg/l	—	2.29	1.49	2.93	1.76	2.94	1.76	2.94	1.76	2.94	1.76	2.94	1.76	2.94	1.76	2.94	1.76	2.94	1.76	
Biomoléculas	mg/l	—	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	
	mg/l	—	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	
	mg/l	—	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	
	mg/l	—	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	
	mg/l	—	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	
	mg/l	—	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	
Sólidos Totales	mg/l	—	1003	1490	1990	2490	2990	3490	3990	4490	4990	5490	5990	6490	6990	7490	7990	8490	8990	9490	
	mg/l	—	1003	1490	1990	2490	2990	3490	3990	4490	4990	5490	5990	6490	6990	7490	7990	8490	8990	9490	
	mg/l	—	1003	1490	1990	2490	2990	3490	3990	4490	4990	5490	5990	6490	6990	7490	7990	8490	8990	9490	
	mg/l	—	1003	1490	1990	2490	2990	3490	3990	4490	4990	5490	5990	6490	6990	7490	7990	8490	8990	9490	
	mg/l	—	1003	1490	1990	2490	2990	3490	3990	4490	4990	5490	5990	6490	6990	7490	7990	8490	8990	9490	
	mg/l	—	1003	1490	1990	2490	2990	3490	3990	4490	4990	5490	5990	6490	6990	7490	7990	8490	8990	9490	
Sólidos Suspendidos	mg/l	—	660	990	1320	1650	1980	2310	2640	2970	3300	3630	3960	4290	4620	4950	5280	5610	5940	6270	
	mg/l	—	660	990	1320	1650	1980	2310	2640	2970	3300	3630	3960	4290	4620	4950	5280	5610	5940	6270	
	mg/l	—	660	990	1320	1650	1980	2310	2640	2970	3300	3630	3960	4290	4620	4950	5280	5610	5940	6270	
	mg/l	—	660	990	1320	1650	1980	2310	2640	2970	3300	3630	3960	4290	4620	4950	5280	5610	5940	6270	
	mg/l	—	660	990	1320	1650	1980	2310	2640	2970	3300	3630	3960	4290	4620	4950	5280	5610	5940	6270	
	mg/l	—	660	990	1320	1650	1980	2310	2640	2970	3300	3630	3960	4290	4620	4950	5280	5610	5940	6270	

Hidromiembro	Fecha	Mód. Carga B	Módulo D (kg/día)																					
			B4557				B4558				B4559				B4560				B4561					
			08/30	11/30	08/30	11/30	08/30	11/30	08/30	11/30	08/30	11/30	08/30	11/30	08/30	11/30	08/30	11/30	08/30	11/30	08/30	11/30		
Migración Total	regl	0.0	15.692	15.213	15.052	27.421	32.374	17.764	25.127	18.584	45.526	18.584	45.526	18.584	45.526	18.584	45.526	18.584	45.526	18.584	45.526	18.584	45.526	
Migrantes Total	regl	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
Multibanco Total	regl	—	0.0018	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
Sono Total	regl	200	90.878	19.831	69.137	492.924	423.171	99.878	79.132	194.778	291.714	194.717	291.714	194.717	291.714	194.717	291.714	194.717	291.714	194.717	291.714	194.717	291.714	194.717
México Total	regl	—	-8.8015	-0.8015	-0.8000	-0.8000	-0.8000	-0.8000	-0.8000	-0.8000	-0.8000	-0.8000	-0.8000	-0.8000	-0.8000	-0.8000	-0.8000	-0.8000	-0.8000	-0.8000	-0.8000	-0.8000	-0.8000	
México Total	regl	0.06	0.0139	0.0025	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
Colombia Total	regl	—	3.868	3.840	1.113	0.164	4.807	0.062	8.132	0.167	4.807	0.062	8.132	0.167	4.807	0.062	8.132	0.167	4.807	0.062	8.132	0.167	4.807	
Puerto Rico	regl	0.06	0.0274	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
República Total	regl	—	0.0961	0.0066	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
America Total	regl	0.06	0.09484	-0.8015	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
Business Total	regl	10.00	-8.2813	-0.2814	-0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	
Black Total	regl	—	30.52	11.25	34.52	28.24	21.88	21.45	25.27	27.28	25.27	27.28	25.27	27.28	25.27	27.28	25.27	27.28	25.27	27.28	25.27	27.28	25.27	
Blue Total	regl	—	43.81	23.81	23.18	41.71	46.23	47.25	66.38	80.61	80.27	4.84	80.27	4.84	80.27	4.84	80.27	4.84	80.27	4.84	80.27	4.84	80.27	4.84
Estados Total	regl	2	0.0108	-0.0019	0.0000	-0.0010	-0.0010	-0.0010	-0.0010	-0.0010	-0.0010	-0.0010	-0.0010	-0.0010	-0.0010	-0.0010	-0.0010	-0.0010	-0.0010	-0.0010	-0.0010	-0.0010	-0.0010	-0.0010
Europa Total	regl	—	0.302	0.2807	0.2902	0.8023	1.0233	0.8248	1.0484	0.6428	0.7201	0.8097	0.6428	0.7201	0.8097	0.6428	0.7201	0.8097	0.6428	0.7201	0.8097	0.6428	0.7201	
Territorio Total	regl	—	-0.0021	-0.0021	-0.0021	-0.0021	-0.0021	-0.0021	-0.0021	-0.0021	-0.0021	-0.0021	-0.0021	-0.0021	-0.0021	-0.0021	-0.0021	-0.0021	-0.0021	-0.0021	-0.0021	-0.0021	-0.0021	
India Total	regl	—	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	-0.0001	
Thailand Total	regl	—	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
Thailand Total	regl	—	0.1874	0.2857	0.2790	0.1457	0.0208	0.4759	0.0446	0.0587	0.0587	0.0587	0.0587	0.0587	0.0587	0.0587	0.0587	0.0587	0.0587	0.0587	0.0587	0.0587	0.0587	
Taiwan Total	regl	—	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
Uruguay Total	regl	0.00	0.0016	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
Venezuela Total	regl	0.1	0.0168	-0.0003	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
Worldwide Total	regl	—	0.0020	0.0011	0.0000	-0.0000	-0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
Yucatan Total	regl	—	0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
Zen Total	regl	0.2	0.1931	0.2973	0.3002	0.0278	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
Zucaria Total	regl	—	0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	



Desag.: Desaguadero y M-Des.-M-Des.: Mauri-Desaguadero-Maure-Desaguadero.

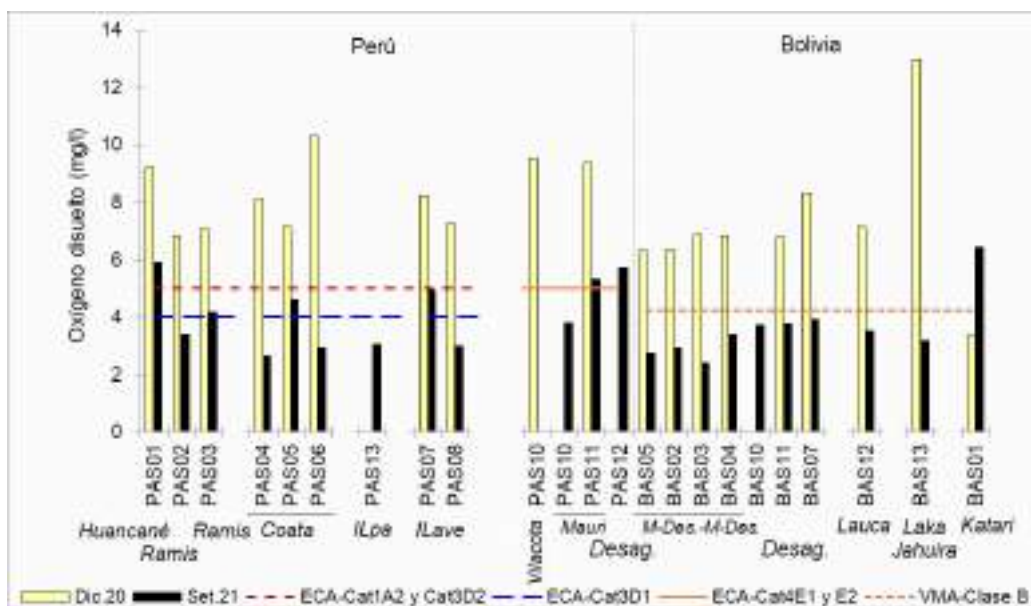
Figura 5.1: Valores de pH del agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

Según los resultados de las mediciones de pH, se observa que las aguas superficiales en el ámbito de estudio indican que estas son de naturaleza básica, con valores similares en las dos campañas de evaluación; a excepción de 11 puntos, donde pueden ser consideradas muy básicas, ya que excedieron el límite superior de las normas establecidas por cada país. Mientras que en dos puntos presentan aguas ácidas ubicadas en Bolivia, ríos San Juan de Sora Sora y Huanuni.

Oxígeno disuelto

Con respecto a la Figura 5.2, en Perú, para septiembre 2021 las concentraciones de oxígeno disuelto en PAS02 (río Ramis), PAS06 (río Coata – desembocadura al lago Titicaca) y PAS13 (río Ilpa – Puente Ilpa) los registros fueron menores al valor de los ECA-Cat3D1 y D2: riego de vegetales y bebida de animales. En tanto, el oxígeno disuelto en septiembre 2021 de PAS04 (río Coata – Puente Unocolla) y PAS08 (río Ilave – aguas arriba de la ciudad de Ilave) fueron menores al valor de los ECA-Cat1A2: aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional. Mientras que en PAS10 (río Mauri - salida de la laguna Vilacota) fue menor al valor de los ECA-CatE2: conservación del ambiente acuático para ríos de sierra.

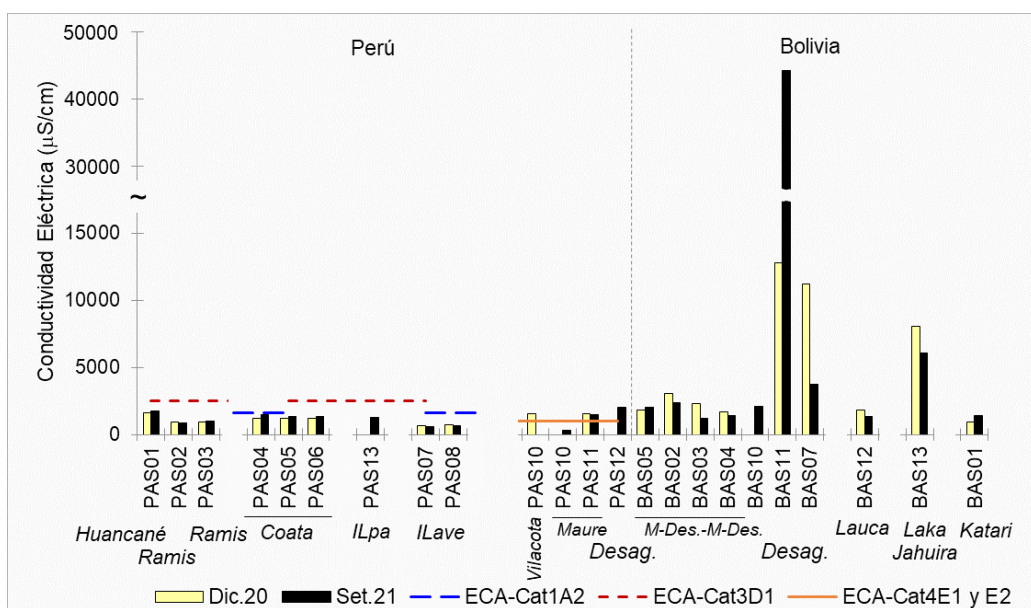
Por otro lado, el río Katari en BAS01 tuvo un comportamiento diferente a los otros cuerpos de agua de Bolivia, registrando la concentración de oxígeno disuelto en septiembre 2021 (> VMA-Clase B) mayor que en diciembre 2020 (< VMA-Clase B). Mientras que los registros para septiembre 2021 de BAS02, BAS03, BAS04, BAS05, BAS07, BAS09, BAS10, BAS11, BAS12 y BAS13 fueron menores al límite VMA-Clase B.



Desag.: Desaguadero y M-Des.-M-Des.: Mauri-Desaguadero-Maure-Desaguadero.
Figura 5.2: Valores de oxígeno disuelto del agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

Conductividad eléctrica (CE)

Con relación a la Figura 5.3, en Perú se observa que la laguna Vilacota (PAS10) en diciembre 2020, el río Mauri – Centro Poblado Maure Pucuyo (PAS11) en diciembre 2020 y septiembre 2021 y río Desaguadero en el Puente Internacional – compuertas de la ORLT (PAS12) en septiembre 2021 registraron valores de conductividad eléctrica mayores a sus respectivos ECA-Cat4E1 y E2: conservación del ambiente acuático para lagos-lagunas y ríos de sierra, respectivamente.



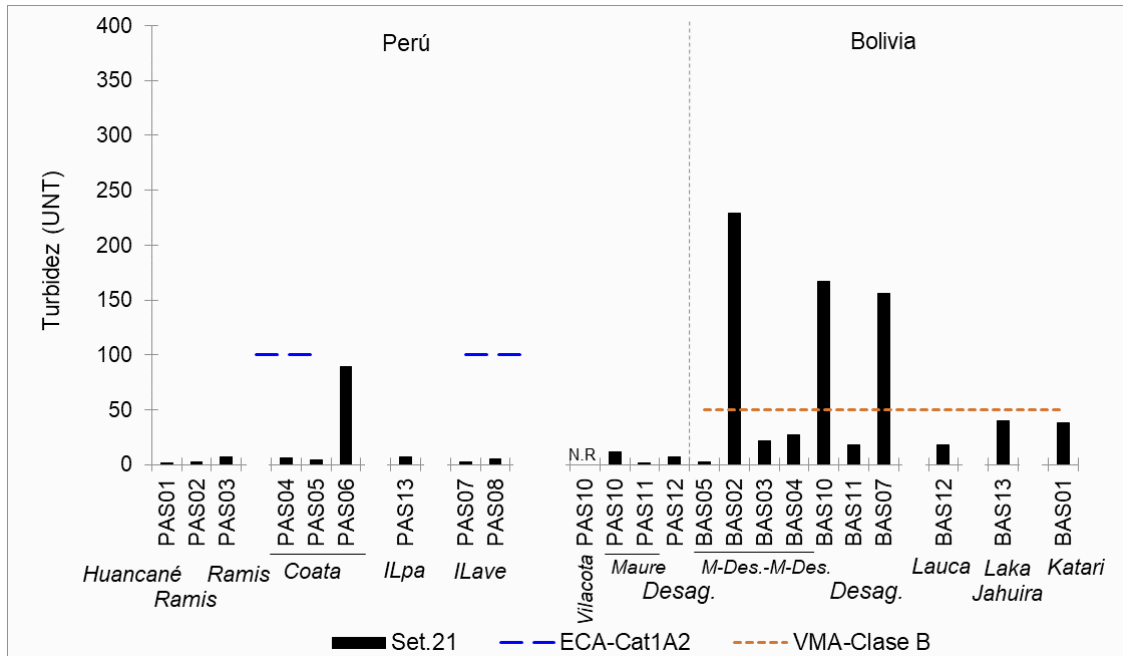
Desag.: Desaguadero y M-Des.-M-Des.: Mauri-Desaguadero-Maure-Desaguadero.
Figura 5.3: Valores de conductividad eléctrica (CE) del agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

En caso de Bolivia, el país no presenta Valores Máximos Admisibles (VMA) de conductividad eléctrica; sin embargo, se resalta que los registros de conductividad eléctrica para diciembre 2020 y septiembre 2021 en el río Desaguadero en BAS11 (Puente Aroma con valor máximo de 44250 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y BAS07 (Puente Español) y en BAS13 (río Laka Jahuira – localidad de Maramara) fueron mayores a los ECA-Cat1A2 (1600 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y ECA-Cat3D1 (2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Turbidez

Con respecto a la Figura 5.4, en Bolivia, el río Desaguadero en BAS02 (Puente colgante Concordia), BAS10 (Puente La Joya) y BAS07 (Puente Español) registraron valores mayores a los VMA–Clase B: aguas que requieren tratamiento físico para el consumo humano.

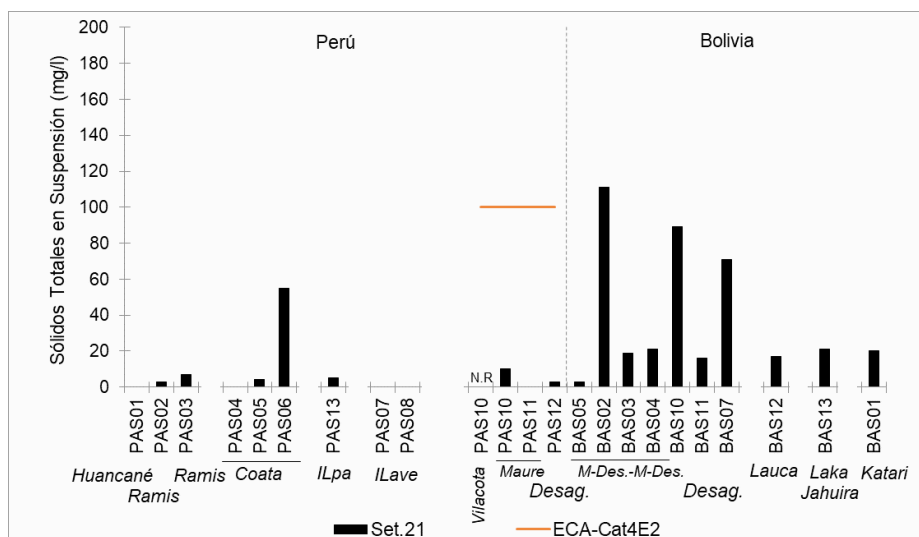
Mientras que, para Perú, en PAS04 (río Coata – Puente Unocolla) y PAS08 (río Ilave – aguas arriba de la ciudad) registraron valores de turbidez menores a los ECA-Cat1A2: aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional. Cabe resaltar que los valores de turbidez en PAS06 (río Coata – zona de mezcla con el lago Titicaca) fueron mayores a los VMA– Clase B (< 50 UNT).



Desag.: Desaguadero y M-Des.-M-Des.: Mauri-Desaguadero-Maure-Desaguadero.
Figura 5.4: Valores de turbidez del agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

Sólidos Totales en Suspensión (STS)

La Figura 5.5 muestra que, en Perú, los ríos Mauri (PAS10 y PAS11) y Desaguadero – Puente Internacional en las compuertas de la ORLT (PAS12) registraron concentraciones de STS menores a los ECA-Cat4E2: conservación del ambiente acuático para ríos de Sierra. Cabe resaltar que el valor más alto de los STS fue registrado en PAS06 (río Coata – zona de mezcla con el lago Titicaca).

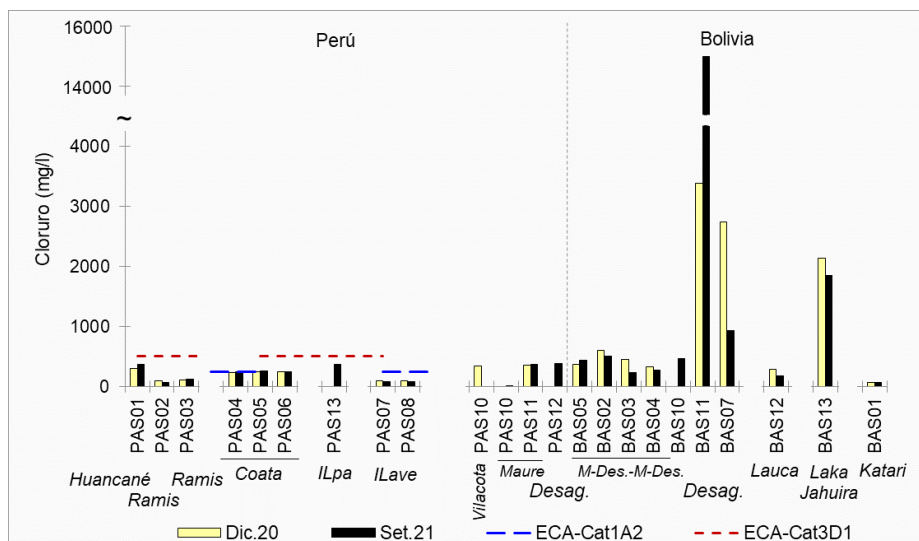


Desag.: Desaguadero y M-Des.-M-Des.: Mauri-Desaguadero-Maure-Desaguadero.
Figura 5.5: Concentraciones de sólidos totales en suspensión – STS del agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

En caso de Bolivia, el país no presenta Valores Máximos Admisibles (VMA), no obstante, los registros de los STS fueron los valores más altos en el sistema TDPS, tales como el río Desaguadero en los puntos de muestreo BAS02 (Puente colgante Concordia), BAS10 (Puente La Joya) y BAS07 (Puente Español).

Cloruro

Con respecto a la Figura 5.6, en Perú se observa que solamente la concentración de cloruro en el río Coata - Puente Unocolla (PAS04) en septiembre 2021 fue mayor que el valor establecido en los ECA-Cat1A2: aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional.



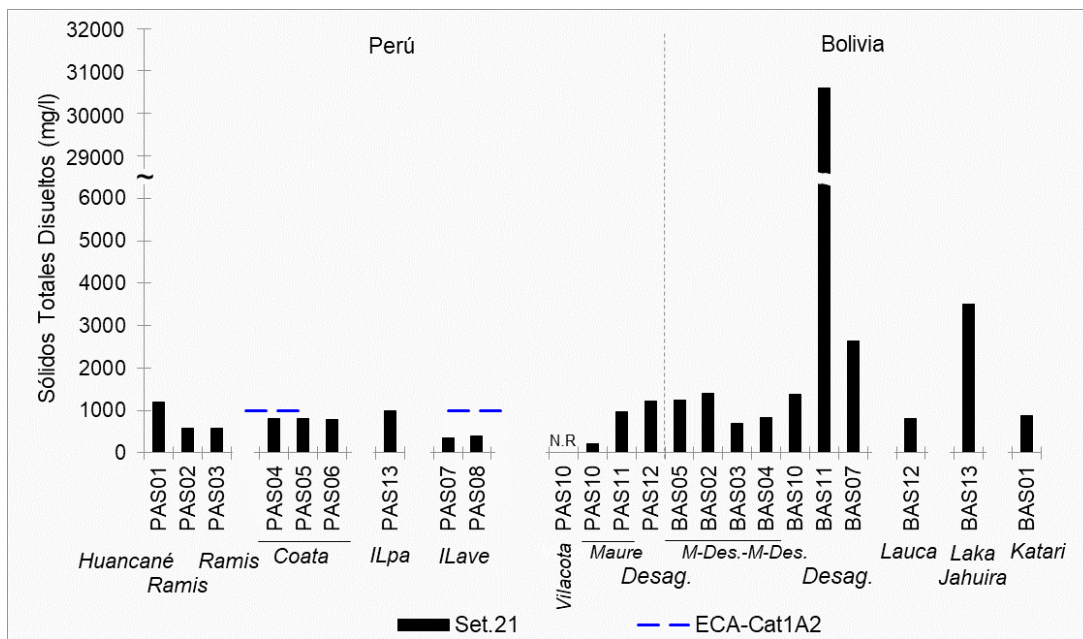
Desag.: Desaguadero y M-Des.-M-Des.: Mauri-Desaguadero-Maure-Desaguadero.
Figura 5.6: Concentraciones de cloruro en agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

En caso de Bolivia, las concentraciones de cloruro, en al menos uno de los dos meses: diciembre 2020 o septiembre 2021, en el río Desaguadero en BAS02 (Puente colgante Concordia), BAS04 (puente vehicular Tupac Katari), BAS10 (Puente La Joya), BAS11 (Puente Aroma con valor máximo de 14993 mg/l) y BAS07 (Puente Español); en BAS05 (río Mauri – aguas abajo de la confluencia con el río Caquena) y en BAS13 (río Laka Jahuira – localidad de Maramara) fueron mayores a los VMA-Clase B: aguas de utilidad general que para consumo humano requieren tratamiento físico y desinfección bacteriológica.

Sólidos Totales Disueltos (STD)

Con relación a la Figura 5.7, en el caso del Perú, las concentraciones de los STD en septiembre 2021 en PAS04 (río Coata – Puente Unocolla) y PAS08 (río Ilave – aguas arriba de la ciudad de Ilave) fueron menores a los valores establecidos en los ECA-Cat1A2: aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional.

Con respecto a Bolivia, las concentraciones de los STD, mayores a los de Perú, en el río Desaguadero en BAS02 (Puente colgante Concordia), BAS10 (Puente La Joya), BAS11 (Puente Aroma con valor máximo de 30 600 mg/l), BAS05 (río Mauri – antes de confluencia del río Caquena) y BAS07 (Puente Español); BAS09 (río San Juan de Sora Sora) y en BAS13 (río Laka Jahuira – localidad de Maramara) fueron mayores a los VMA-Clase B: aguas de utilidad general que para consumo humano requieren tratamiento físico y desinfección bacteriológica.

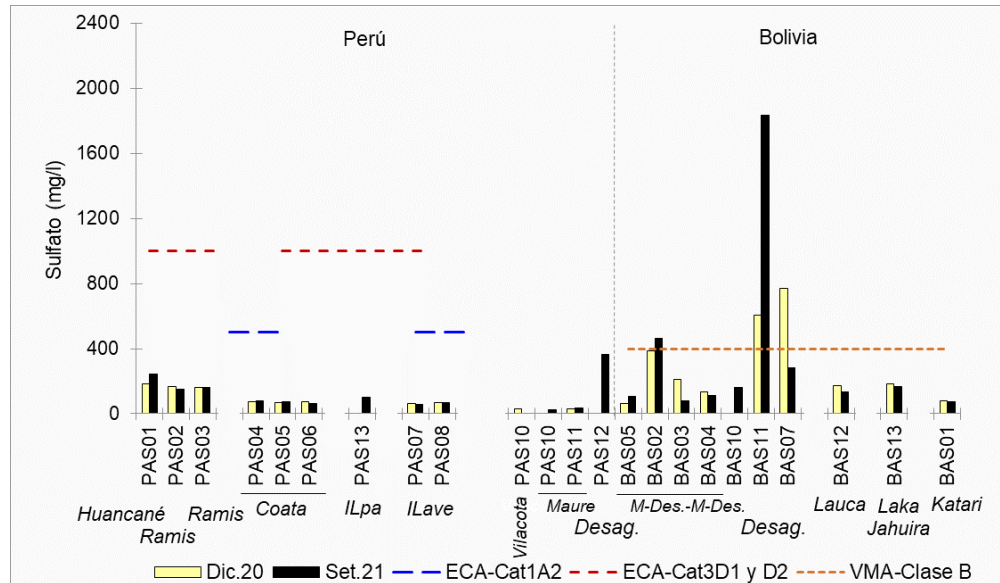


Desag.: Desaguadero y M-Des.-M-Des.: Mauri-Desaguadero-Maure-Desaguadero.

Figura 5.7: Concentraciones de sólidos totales disueltos (STD) del agua superficial de Perú y Bolivia-sistema TDPS.

Sulfato

La Figura 5.8 muestra que, para Perú, las concentraciones de sulfato fueron menores a los valores establecidos en los ECA-Cat1A2: aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional y en ECA-Cat3D1 y D2: riego de vegetales y bebida de animales.



Desag.: Desaguadero y M-Des.-M-Des.: Mauri-Desaguadero-Maure-Desaguadero.

Figura 5.8: Concentraciones de sulfato en agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

Por otro lado, para Bolivia en el río Desaguadero en BAS02 (Puente colgante Concordia) en septiembre 2021, BAS11 (Puente Aroma con valor máximo de 1830,9 mg/l) en diciembre 2020 y septiembre 2021, y BAS07 (Puente Español) en septiembre 2021 registraron valores de sulfato mayores a los VMA-Clase B: aguas de utilidad general que para consumo humano requieren tratamiento físico y desinfección bacteriológica. Asimismo, en el BAS09 (río San Juan de Sora Sora – aguas abajo del puente Machacamarca) se registraron valores de 1450,92 y 1539,15 mg/l para las muestras de diciembre 2020 y septiembre 2021 respectivamente,

Calcio

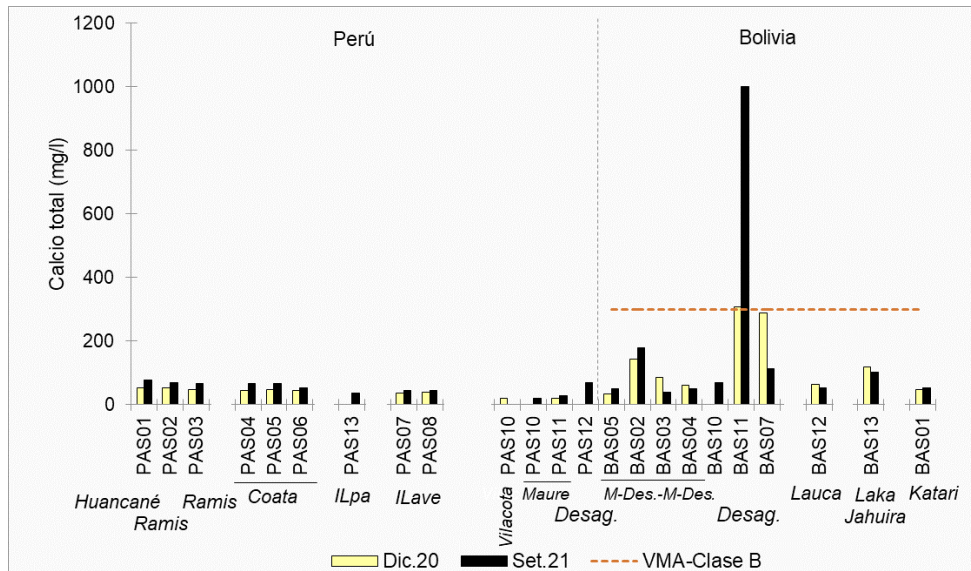
Con relación a la Figura 5.9, para Bolivia en el río Desaguadero en BSA11 (Puente Aroma con valor máximo de 1000,6 mg/l) en diciembre 2020 y septiembre 2021 registraron concentraciones de calcio mayores a los VMA-Clase B.

Para Perú, no se reportó Estándares de Calidad Ambiental (ECA); no obstante, todos los valores fueron menores a lo registrado en Bolivia.

Sodio

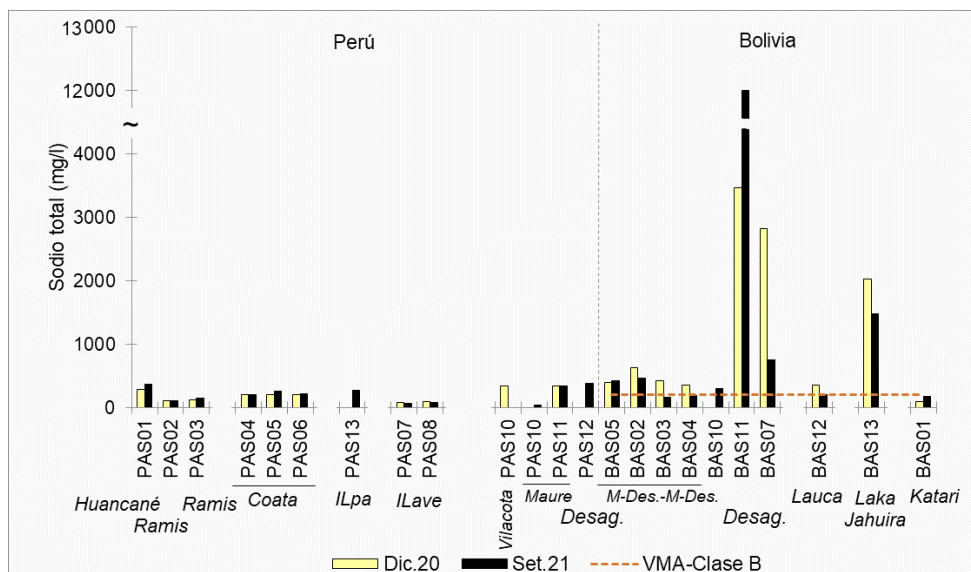
La Figura 5.10 muestra que los ríos evaluados en Bolivia: Mauri, Desaguadero, Lauca y Laka Jahuirá registraron, en al menos uno de los dos meses, concentraciones de sodio mayores a los VMA-Clase B, con los más altos valores en el río Desaguadero: BSA11 (Puente Aroma con registro máximo de 12006 mg/l) y BAS07 (Puente Español); y en BAS13 (río Laka Jahuirá – localidad de Maramara).

Con respecto al Perú, no se reportó Estándares de Calidad Ambiental (ECA); no obstante, todas las concentraciones fueron menores a lo reportado en Bolivia.



Desag.: Desaguadero y M-Des.-M-Des.: Mauri-Desaguadero-Maure-Desaguadero.

Figura 5.9: Concentraciones de calcio en agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

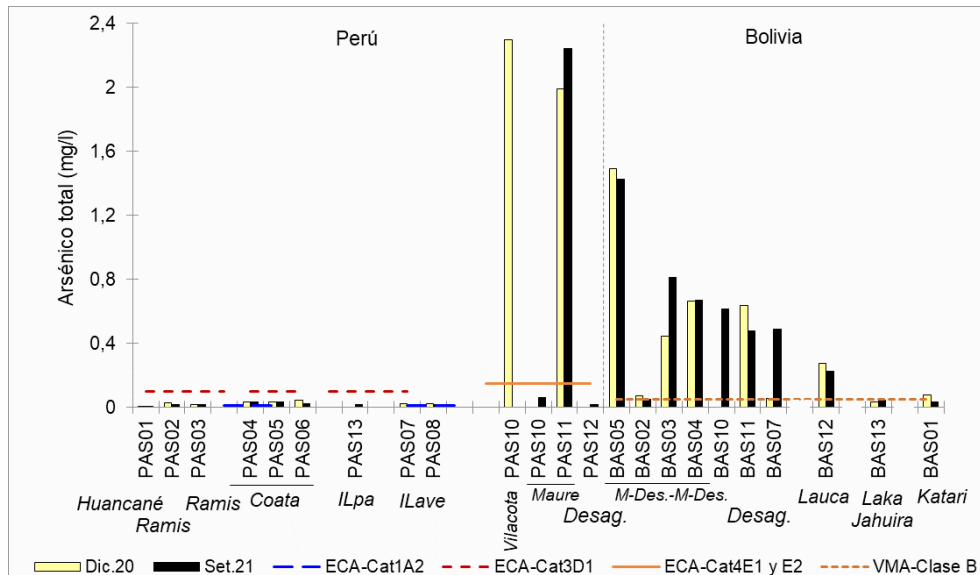


Desag.: Desaguadero y M-Des.-M-Des.: Mauri-Desaguadero-Maure-Desaguadero.

Figura 5.10: Concentraciones de sodio en agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

Arsénico

La Figura 5.11 muestra que, para Perú, el río Coata – Puente Unocolla (PAS04) y el río Ilave – aguas arriba de la ciudad de Ilave (PAS08) en diciembre 2020 y septiembre 2021 registraron concentraciones de arsénico mayores al valor establecido en los ECA-Cat1A2: aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional. Mientras que, la laguna Vilacota (PAS10) en diciembre 2020 y el río Mauri – Centro Poblado Maure Pucuyo (PAS11) en diciembre 2020 y septiembre 2021 registraron concentraciones de arsénico mayores al valor de los ECA-Cat4E1 y E2: Conservación del ambiente acuático para lagos-lagunas y ríos de sierra, respectivamente.



Desag.: Desaguadero y M-Des.-M-Des.: Mauri-Desaguadero-Maure-Desaguadero.

Figura 5.11: Concentraciones de arsénico en agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

Con relación a Bolivia, el río Desaguadero - Puente colgante Concordia (BAS02), río Laka Jahuira-localidad de Maramara (BAS13) en diciembre 2020 y septiembre 2021 y el río Katari en el puente de conexión de las comunidades Cohana y Lacaya (BAS01) en septiembre 2021 reportaron valores de arsénico menores a los VMA-Clase B: aguas de utilidad general que para consumo humano requieren tratamiento físico y desinfección bacteriológica.

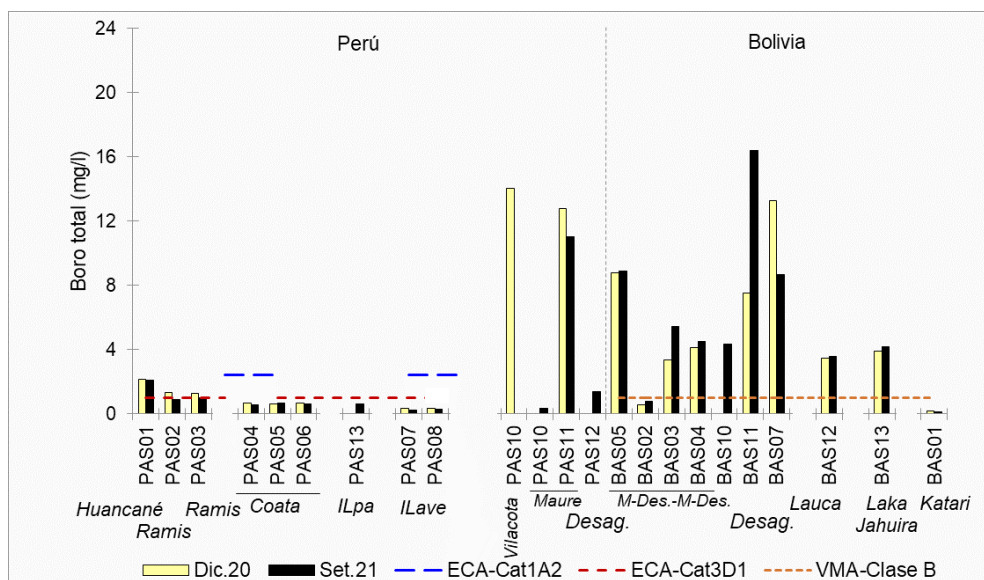
De lo antes mencionado, la cuenca binacional Mauri (código UH: 0144), que inicia en la laguna Vilacota (PAS10) en diciembre 2020 de Perú hasta aguas abajo de su confluencia con el río Caquena (BAS05) en Bolivia registraron las más altas concentraciones de arsénico de todo el sistema TDPS.

Boro

De acuerdo con la Figura 5.12, para Perú, las únicas concentraciones de boro que fueron mayores al valor de los ECA-Cat3D1: riego de vegetales se registraron en los ríos Huancané (PAS01), diciembre 2020 y septiembre 2021, y Ramis (PAS02, septiembre 2021, y PAS03 en ambos meses). Cabe señalar que, para la laguna Vilacota (PAS10) y el río Maure (PAS11) no se cuenta con valores de boro en los ECA-Cat4; no obstante, sus concentraciones son más altas - hasta 15 veces el máximo valor de los demás cuerpos de agua superficial.

Con respecto a Bolivia, solamente las concentraciones de boro en el río Katari en el puente de conexión de las comunidades Cohana y Lacaya (BAS01) y el río Desaguadero - Puente Concordia (BAS02) fueron menores a los VMA-Clase B: aguas de utilidad general que para consumo humano requieren tratamiento físico y desinfección bacteriológica.

De lo antes mencionado, la cuenca binacional Mauri (código UH: 0144), desde la laguna Vilacota (PAS10) en diciembre 2020 de Perú hasta aguas abajo de su confluencia con el río Caquena (BAS05) en Bolivia y el río Desaguadero (Bolivia) en su brazo derecho en el Puente Aroma (BAS11) y en su brazo izquierdo en el Puente Español (BAS07), registró las más altas concentraciones de boro de todo el sistema TDPS.



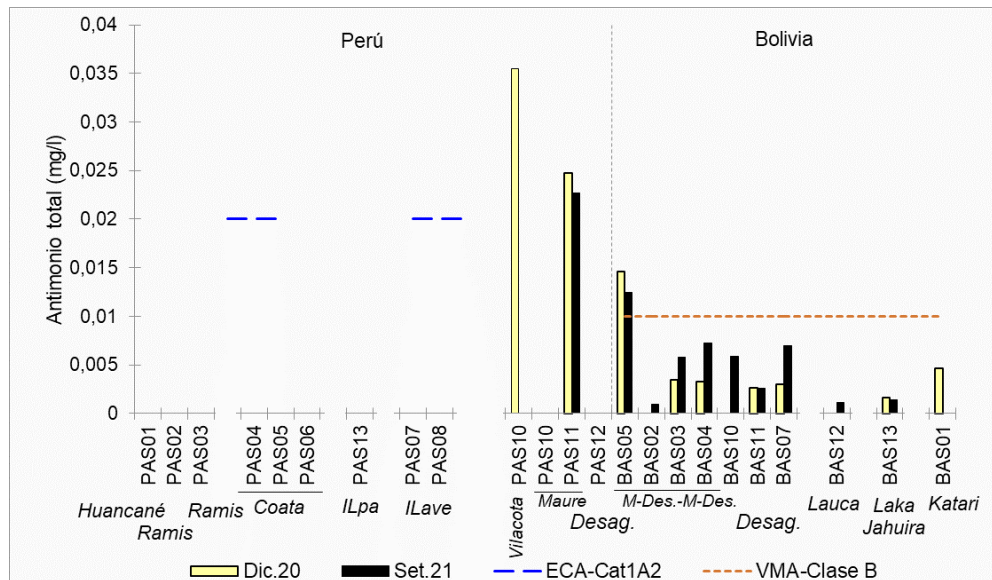
Desag.: Desaguadero y M-Des.-M-Des.: Mauri-Desaguadero-Maure-Desaguadero.

Figura 5.12: Concentraciones de boro en agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

Antimonio

La Figura 5.13 muestra que las concentraciones de antimonio en Perú fueron menores a los límites de cuantificación (<0,00013), por lo que son menores al valor del ECA-Cat1A2: aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional, en los ríos Coata – Puente Unocolla (PAS04) y el río Ilave – aguas arriba de la ciudad de Ilave (PAS08). Mientras que en los ríos Huancané (PAS01), Ramis (PAS02 y PAS03), Coata (PAS005 y PAS06) e Ilave (PAS07) e Ilpa (PAS13) las concentraciones son

menores al límite de detección, y son menores al valor del ECA-Cat3D1 y D2: riego de vegetales y bebida de animales. Entretanto, que en el río Maure (PAS10 y PAS11) y río Desaguadero (PAS12) los valores encontrados son menores a los ECA-Cat4E1 y E2: conservación del ecosistema acuático de lagunas y ríos de la sierra.



Desag.: Desaguadero y M-Des.-M-Des.: Mauri-Desaguadero-Maure-Desaguadero.

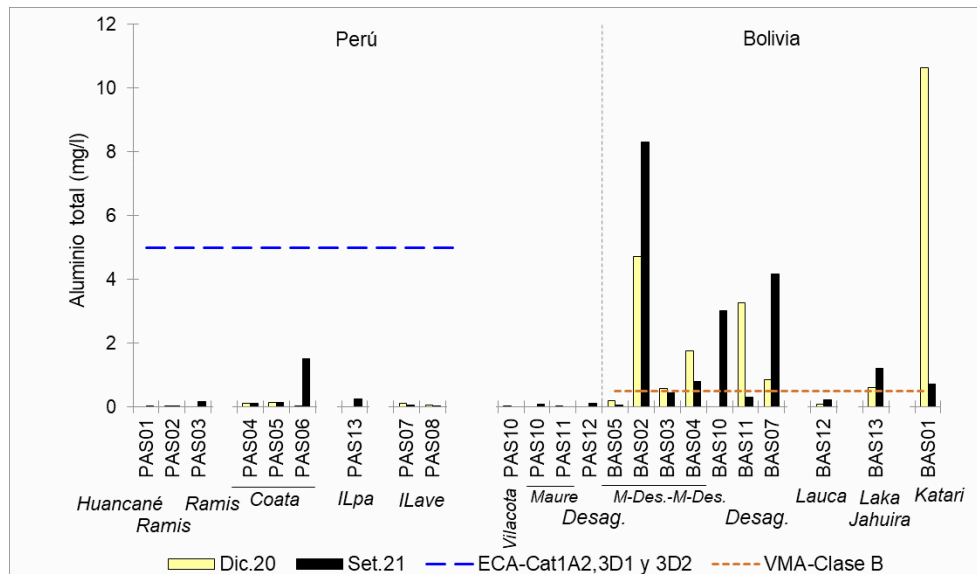
Figura 5.13: Concentraciones de antimonio en agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

Para el caso de Bolivia, las concentraciones de antimonio fueron menores a los VMA-Clase B: aguas de utilidad general que para consumo humano requieren tratamiento físico y desinfección bacteriológica, a excepción de los ríos Mauri – aguas abajo de la afluencia del río Caquena (BAS05) y San Juan de Sora Sora (BAS09), en diciembre 2020 y septiembre 2021.

La cuenca binacional Mauri (código UH: 0144), que inicia en la laguna Vilacota (PAS10) en Perú hasta aguas abajo de su confluencia con el río Caquena (BAS05) en Bolivia registraron las más altas concentraciones de antimonio de todo el TDPS.

Aluminio

La Figura 5.14 muestra que, en Bolivia, el río Desaguadero desde BAS02 (Puente colgante Concordia), BAS07 (Puente Español) hasta BAS11 (Puente Aroma), el río Mauri en BAS03 (Puente peatonal de Calacoto), el río Laka Jahuira en BAS13 (comunidad de Maramara) y el río Katari en BAS01 (puente de conexión de las comunidades Cohana y Lacaya), en al menos un mes, las concentraciones de aluminio fueron mayores a los VMA-Clase B: aguas de utilidad general que para consumo humano requieren tratamiento físico y desinfección bacteriológica.



Desag.: Desaguadero y M-Des.-M-Des.: Mauri-Desaguadero-Maure-Desaguadero.

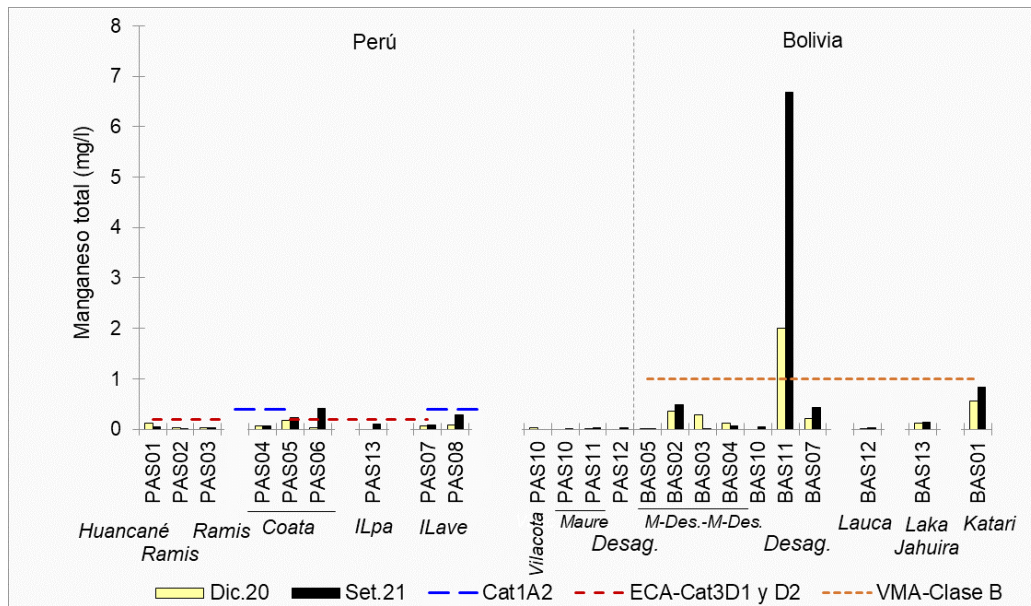
Figura 5.14: Concentraciones de aluminio en agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

Con respecto a Perú, las concentraciones de aluminio en Perú en septiembre 2021 y diciembre 2020 fueron menores a los ECA-Cat1A2: aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional y los ECA-Cat3D1 y D2: riego de vegetales y bebida de animales. Cabe resaltar que el registro de aluminio en el río Coata – zona de mezcla con el Lago Titicaca (PAS06) fue mayor a los VMA-Clase B (0,5 mg/l) de Bolivia.

Manganeso

Respecto a la Figura 5.15, las concentraciones de manganeso de los ríos evaluados en Perú fueron mayores al valor de los ECA-Cat3D1 y D2: riego de vegetales y bebida de animales solo en septiembre 2021 en el río Coata (PAS05 y PAS06), Puente Coata y zona de mezcla con el Lago Titicaca respectivamente. Cabe resaltar que en PAS06 registró el valor más alto de manganeso.

En caso de Bolivia, en el río Desaguadero (BAS11) registró las concentraciones de manganeso en diciembre 2020 y septiembre 2021, más alto en el sistema TDPS, mayores a los VMA-Clase B: aguas de utilidad general que para consumo humano requieren tratamiento físico y desinfección bacteriológica.



Desag.: Desaguadero y M-Des.-M-Des.: Mauri-Desaguadero-Maure-Desaguadero.

Figura 5.15: Concentraciones de manganeso en agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

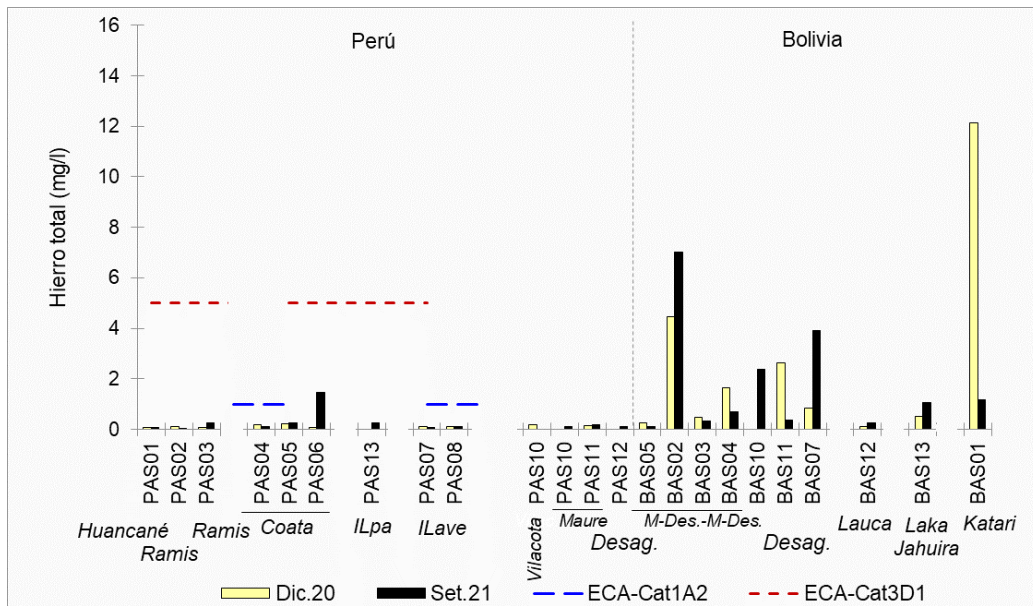
Se precisa que las concentraciones en el BAS09 (río San Juan de Sora Sora), en ambos monitoreos, las concentraciones de Mn son superiores al VMA-Clase B, las cuales son discutidas con mayor detalle en el ítem 5.1.3 del presente documento.

Hierro

En relación Figura 5.16, las concentraciones de hierro de los ríos evaluados en Perú fueron menores a sus respectivos valores de los ECA-Cat1A2: aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional y los ECA-Cat3D1 y D2: riego de vegetales y bebida de animales.

En el caso de Bolivia, el país no presenta Valores Máximos Admisibles (VMA); no obstante, los registros de hierro fueron los valores más altos en el sistema TDPS, tales como el río Desaguadero en los puntos de muestreo BAS02 (Puente colgante Concordia) en diciembre 2020 y septiembre 2021, en los puntos BAS04 (Puente vehicular Tupac Katari) y BAS11 (Puente Aroma) en diciembre 2020, y en los puntos BAS10 (Puente La Joya) y BAS07 (Puente Español) en septiembre 2021.

Cabe resaltar que, el máximo valor de hierro registrado en el sistema TDPS con 420,9724 mg/l fue en el río San Juan de Sora Sora (BAS09) cerca al puente Machacamarca, en septiembre 2021.

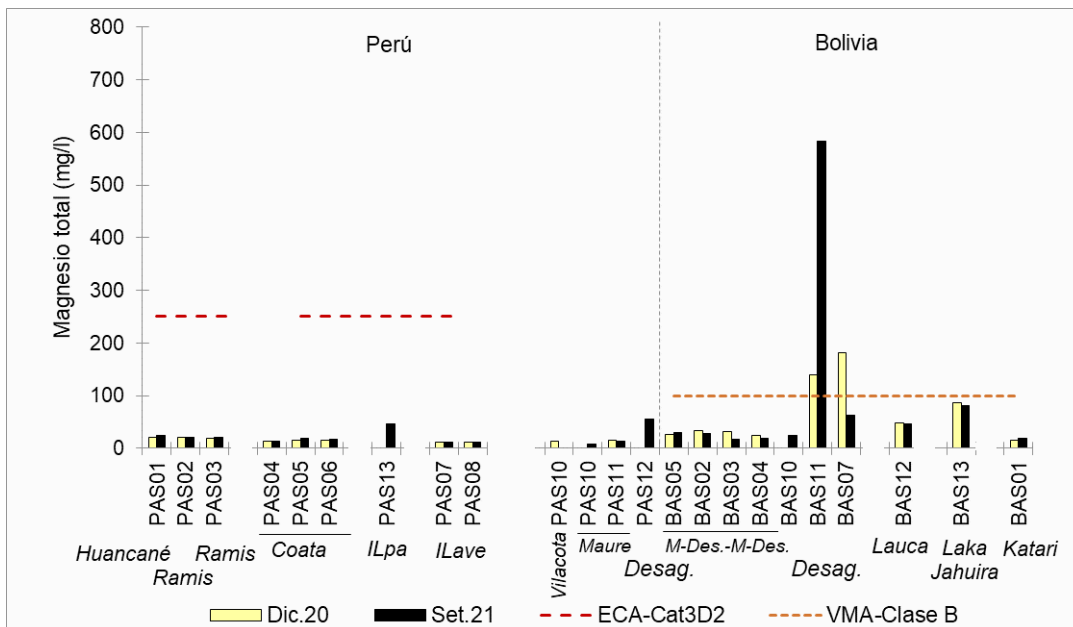


Desag.: Desaguadero y M-Des.-M-Des.: Mauri-Desaguadero-Maure-Desaguadero.

Figura 5.16: Concentraciones de hierro en agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

Magnesio

Con referencia a la Figura 5.17, las concentraciones de magnesio de los ríos evaluados en Perú fueron menores a su respectivo estándar de los ECA-Cat3D2: bebida de animales.



Desag.: Desaguadero y M-Des.-M-Des.: Mauri-Desaguadero-Maure-Desaguadero.

Figura 5.17: Concentraciones de magnesio en agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

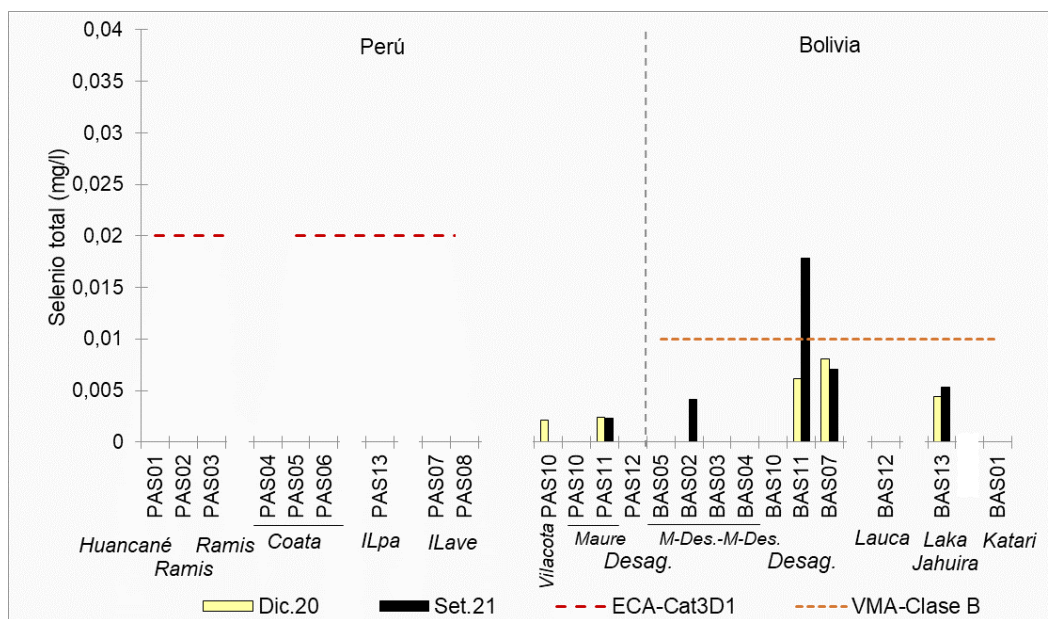
En el caso de Bolivia, el río Desaguadero – Puente Aroma (BAS11) registró concentraciones de magnesio en diciembre 2020 y en septiembre 2021, más alto en el sistema TDPS, mayores a los VMA-Clase B: aguas de utilidad general que para consumo humano requieren tratamiento físico y desinfección bacteriológica.

Asimismo, la concentración de magnesio del brazo derecho del río Desaguadero en el Puente Español (BAS07) en diciembre 2020 y río San Juan de Sora Sora cerca del puente Machacamamarca (BAS09) en septiembre 2021 fue mayores a los VMA-Clase B.

Selenio

Por lo que se refiere a la Figura 5.18, las concentraciones de selenio de los ríos evaluados en Perú fueron menores a sus respectivos estándares de los ECA-Cat3D1 y D2: riego de vegetales y bebida de animales, lo mismo ocurre con los ECA-Cat1A2 y ECA-Cat4E1 E2.

En Bolivia, el río Desaguadero (BAS11) registró concentración de selenio en diciembre 2021, más alto en el sistema TDPS, mayor a los VMA-Clase B: aguas de utilidad general que para consumo humano requieren tratamiento físico y desinfección bacteriológica.



Desag.: Desaguadero y M-Des.-M-Des.: Mauri-Desaguadero-Maure-Desaguadero.

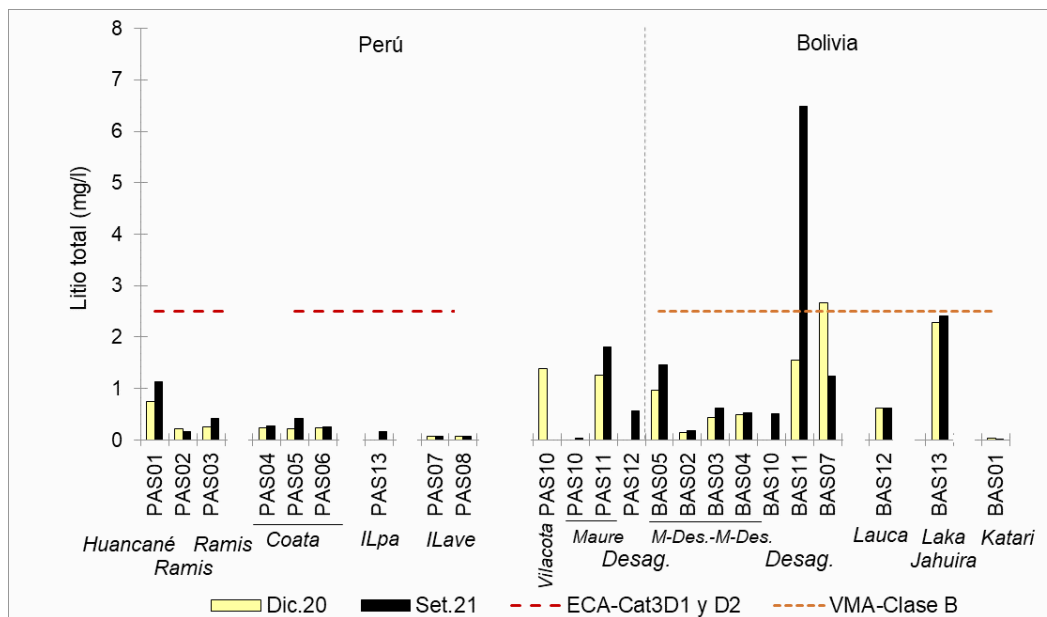
Figura 5.18: Concentraciones de selenio en agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

Se precisa que las concentraciones en el BAS09 (río San Juan de Sora Sora), en ambos monitoreos, las concentraciones de Se son superiores al VMA-clase B, las cuales son discutidas con mayor detalle en el ítem 5.1.3 del presente documento.

Litio

En lo relativo a la Figura 5.19, las concentraciones de litio de los ríos evaluados fueron en Perú menores a sus respectivos estándares de los ECA-Cat3D1 y D2: riego de vegetales y bebida de animales.

En cuanto a Bolivia, el río Desaguadero – Puente Aroma (BAS11) registró concentración de litio en septiembre 2021, más alto en el sistema TDPS, mayor a los VMA-Clase B: aguas de utilidad general que para consumo humano requieren tratamiento físico y desinfección bacteriológica. Asimismo, la concentración de litio del brazo derecho del río Desaguadero en el Puente Español (BAS07) en diciembre 2020 fue mayor a su estándar de los VMA-Clase B.



Desag.: Desaguadero y M-Des.-M-Des.: Mauri-Desaguadero-Maure-Desaguadero.

Figura 5.19: Concentraciones de litio en agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

Mercurio

Respecto al mercurio, el río Maure – Centro Poblado Maure Pucuyo (PAS11) es el único punto de muestreo cuya concentración del citado metal (0,00012 mg/l) fue mayor al rango de los ECA-Cat4E2: conservación del ambiente acuático para ríos de sierra. Mientras, las concentraciones de los demás puntos de muestreo de agua superficial en Bolivia y Perú fueron menores al límite de cuantificación del laboratorio (<0,0009 mg/l).

5.1.2 Calidad de agua subterránea

En este ítem se presenta referencialmente los parámetros con valores u concentraciones mayores a los estándares nacionales de calidad ambiental en la categoría 1-A1 (ECA-Cat1A1): aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección y categoría 3-D2 (ECA-Cat3D2): bebida de animales para Perú y los Valores Máximos Admisibles en la clase A (VMA-Clase A): «Aguas naturales de máxima calidad que las habilita como agua potable para consumo humano sin ningún tratamiento previo». Los resultados de los análisis de laboratorio se muestran en las Tablas 5.3 y 5.4.

Potencial de hidrogeno (pH)

De acuerdo con la Figura 5.20, los valores de pH en los pozos de agua subterránea de tajo abierto y de producción (SeLA-Oruro) estuvieron en el rango de valores para Perú en los ECA-Cat1A1: agua que puede ser potabilizada con desinfección y los ECA-Cat3D2: bebida de animales; y para Bolivia en el rango de valores de los VMA-Clase A: aguas naturales de máxima calidad para diciembre 2020 y septiembre 2021.

Tabla 5.3: Comparación de los resultados de aguas subterráneas (pozos) con la normativa de Perú

Parámetro	Fecha		EICA	Categoría	Población Ayacucho										PAUSE	PALEP	PALEP	PALEP
	17/12/2020	28/09/2021			17/12/2020	28/09/2021	17/12/2020	28/09/2021	17/12/2020	28/09/2021	17/12/2020	28/09/2021	17/12/2020	28/09/2021				
Temperatura	15,10	16,40	54,81	13,27	65,40	12,72	20,60	14,85	12,86	12,40	12,46	15,40	11,30	14,30	12,22			
pH	6,5 - 8,0	7,83	7,81	7,63	7,17	7,09	7,57	7,55	8,01	7,09	6,86	7,09	7,63	7,81	7,76			
Oxígeno disuelto (Valor máximo)	3,8	1,03	3,20	0,90	4,23	1,32	3,43	1,10	2,22	0,96	0,24	3,77	1,81	7,40	1,55			
Conductividad	500	507	1632	1972	1400	935	1882	1751	284	278	3900	1247	1296	744	716			
Turbidez	5	1,85	—	5,36	—	1,90	—	1,42	—	0,36	—	—	12,40	—	4,25			
Potencial oxido-reducción ORP	—	213	226	210,5	261	223,2	249	202,1	232	150,7	264	227,8	207,9	96	117,0			
Fitoquímicas																		
Bicarbonatos	mg/l	—	177,0	—	404,7	—	102,4	—	582,9	—	172,1	—	500,9	—	257,8	296,2		
Sulfatos Totales	mg/l	1008	—	372	—	988	—	1000	—	194	—	2470	—	1020	—	584		
Sulfatos Totales en Sulfatos (STS)	mg/l	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
Nitratos Total	mg/l	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
Fosfatos	mg/l	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
Cloruro (Cl ⁻)	mg/l	250	—	20,962	21,941	177,47	115,926	174,185	161,650	6,413	2,713	48,505	44,726	85,659	80,863			
Fluoruro (F ⁻)	mg/l	1,5	—	0,112	0,256	—	—	—	—	0,196	—	—	0,154	—	0,025			
Manganeso (Mn ²⁺)	mg/l	80	903	49,196	26,838	7,207	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
Sulfato (SO ₄ ²⁻)	mg/l	250	1600	44,90	34,67	63,62	71,48	69,74	64,25	7,21	5,91	75,60	92,24	386,92	413,39	2,10		
Metales																		
Plata Total	mg/l	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
Aluminio Total	mg/l	5,8	0,030	0,055	0,309	0,155	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
Asmirico Total	mg/l	0,01	0,1339	0,04853	0,02938	0,09168	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
Andróido III (Arsenato)	mg/l	0,01	0,2	0,03395	0,00751	—	0,00121	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
Boro Total	mg/l	2,4	5	6,124	0,100	0,445	0,340	0,298	0,864	0,696	0,946	0,184	0,198	0,147	9,203			
Bario Total	mg/l	0,7	—	0,0200	0,0414	0,1761	0,1423	0,1206	0,2717	0,2102	0,0980	0,1946	0,1307	0,1662	0,1467			
Berilio Total	mg/l	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
Bismuto Total	mg/l	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
Cadmio Total	mg/l	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
Cesio Total	mg/l	0,003	0,05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
Cromo Total	mg/l	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
Cobalto Total	mg/l	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
Copelo Total	mg/l	0,06	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
Cosio Total	mg/l	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
Cuadro Total	mg/l	2	0,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
Hierro Total	mg/l	6,3	—	0,0316	0,0235	0,3536	0,0947	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
Gallio Total	mg/l	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
Germacio Total	mg/l	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
Mercurio Total	mg/l	0,001	0,01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
Palasio Total	mg/l	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
Lantano Total	mg/l	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
Lio Total	mg/l	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		

Parámetro	Fecha Hoy	ECA CMTA	Liquidez	17/12/2020	29/05/2021	17/12/2020	29/05/2021	17/12/2020	29/05/2021	17/12/2020	29/05/2021	17/12/2020	29/05/2021	17/12/2020	29/05/2021	17/12/2020	29/05/2021	17/12/2020	29/05/2021
				PAL01	PAL02	PAL03	PAL04	PAL05	PAL06	PAL07	PAL08	PAL09	PAL10	PAL11	PAL12				
Líquido Total																			
Magreño Total																			
Manzanera Total																			
Mobilizada Total																			
Stable Total																			
Mixto Total																			
Netque Total																			
Fidario Total																			
Pyme Total																			
Rubedo Total																			
Análisis Total																			
Servicio Total																			
Saldo Total																			
Silva Total																			
Estado Total																			
Entabado Total																			
Tanlado Total																			
Teluso Total																			
Teúdo Total																			
Tisam Total																			
Talo Total																			
Unuso Total																			
Vasudo Total																			
Wobando Total																			
Yaluso Total																			
Zinc Total																			
Zozudo Total																			

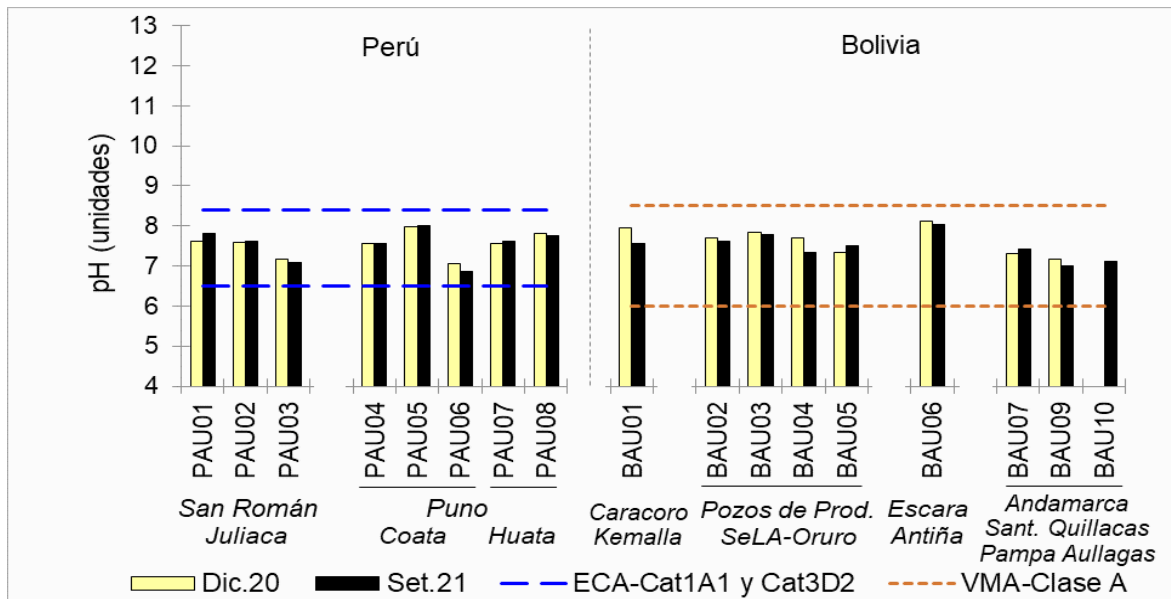
Módulos Dinámicos		17/12/2020	29/05/2021	17/12/2020	29/05/2021	17/12/2020	29/05/2021	17/12/2020	29/05/2021	17/12/2020	29/05/2021	17/12/2020	29/05/2021	17/12/2020	29/05/2021
PA01	PA02	PA03	PA04	PA05	PA06	PA07	PA08	PA09	PA10	PA11	PA12	PA13	PA14	PA15	PA16
PA01 Dinámico															
PA02 Dinámico															
PA03 Dinámico															
PA04 Dinámico															
PA05 Dinámico															
PA06 Dinámico															
PA07 Dinámico															
PA08 Dinámico															
PA09 Dinámico															
PA10 Dinámico															
PA11 Dinámico															
PA12 Dinámico															
PA13 Dinámico															
PA14 Dinámico															
PA15 Dinámico															
PA16 Dinámico															

Parámetro	Fecha	ECA	Cálculo	17/12/2020		25/09/2021		17/12/2020		25/09/2021		18/12/2020		25/09/2021		18/12/2020		25/09/2021		
				12-15	15-22	13-56	14-03	13-58	14-25	14-25	15-45	16-10	16-20	16-20	17-00	16-10	16-20	17-30	17-30	18-19
	Unidades			PAUS1	PAUS2	PAUS3	PAUS4	PAUS5	PAUS6	PAUS7	PAUS8	PAUS9	PAUS10	PAUS11	PAUS12	PAUS13	PAUS14	PAUS15	PAUS16	
Hierro Disuelto	mg/l	--	--	+0,00015	--	+0,00015	--	+0,00015	--	+0,00015	--	+0,00015	--	+0,00015	--	+0,00015	--	+0,00015	--	+0,00015
Mercurio Disuelto	mg/l	--	--	+0,00009	--	+0,00009	--	+0,00009	--	+0,00009	--	+0,00009	--	+0,00009	--	+0,00009	--	+0,00009	--	+0,00009
Plata Disuelto	mg/l	--	--	8,17	--	20,94	--	19,07	--	202,55	--	3,85	--	20,84	--	6,02	--	8,20	--	8,20
Lantano Disuelto	mg/l	--	--	+0,0015	--	+0,0015	--	+0,0015	--	+0,0015	--	+0,0015	--	+0,0015	--	+0,0015	--	+0,0015	--	+0,0015
Litio Disuelto	mg/l	--	--	0,0000	--	0,1547	--	0,0114	--	0,0602	--	0,0154	--	0,2089	--	0,0147	--	0,0106	--	0,0106
Litio Disuelto	mg/l	--	--	+0,00006	--	+0,00006	--	+0,00006	--	+0,00006	--	+0,00006	--	+0,00006	--	+0,00006	--	+0,00006	--	+0,00006
Magnesio Disuelto	mg/l	--	--	13,269	--	54,004	--	21,278	--	32,183	--	10,543	--	521,254	--	41,968	--	12,047	--	12,047
Manganeso Disuelto	mg/l	--	--	0,00411	--	0,0448	--	0,00348	--	0,0274	--	0,0312	--	0,0682	--	0,03316	--	0,3023	--	0,3023
Molibdeno Disuelto	mg/l	--	--	0,00172	--	0,00000	--	0,00014	--	0,0159	--	0,00321	--	0,00251	--	0,00507	--	0,00048	--	0,00048
Niobio Disuelto	mg/l	--	--	25,881	--	119,87	--	66,110	--	168,007	--	14,303	--	220,577	--	17,519	--	59,842	--	59,842
Niobio Disuelto	mg/l	--	--	+0,0015	--	+0,0015	--	+0,0015	--	+0,0015	--	+0,0015	--	+0,0015	--	+0,0015	--	+0,0015	--	+0,0015
Niquel Disuelto	mg/l	--	--	+0,0006	--	0,0014	--	+0,0006	--	+0,0006	--	+0,0006	--	0,0015	--	+0,0006	--	+0,0006	--	+0,0006
Niquel Disuelto	mg/l	--	--	0,087	--	+0,047	--	0,139	--	0,007	--	0,128	--	+0,047	--	0,085	--	0,191	--	0,191
Plomo Disuelto	mg/l	--	--	+0,0006	--	+0,0006	--	+0,0006	--	+0,0006	--	+0,0006	--	+0,0006	--	+0,0006	--	+0,0006	--	+0,0006
Plomo Disuelto	mg/l	--	--	0,0168	--	0,014	--	0,011	--	0,084	--	0,0009	--	0,0074	--	0,0032	--	0,0007	--	0,0007
Plomo Disuelto	mg/l	--	--	+0,00013	--	+0,00013	--	+0,00013	--	+0,00013	--	+0,00013	--	+0,00013	--	+0,00013	--	+0,00013	--	+0,00013
Selenio Disuelto	mg/l	--	--	+0,0013	--	+0,0013	--	+0,0013	--	+0,0013	--	+0,0013	--	+0,0013	--	+0,0013	--	+0,0013	--	+0,0013
Silicio Disuelto	mg/l	--	--	20,89	--	28,31	--	16,28	--	11,66	--	14,62	--	10,28	--	16,71	--	17,57	--	17,57
Silicio Disuelto	mg/l	--	--	44,59	--	49,84	--	37,68	--	29,21	--	24,55	--	21,95	--	24,74	--	27,59	--	27,59
Estadío Disuelto	mg/l	--	--	+0,00010	--	+0,00010	--	+0,00010	--	+0,00010	--	+0,00010	--	+0,00010	--	+0,00010	--	+0,00010	--	+0,00010
Estadío Disuelto	mg/l	--	--	0,8139	--	1,7943	--	0,8178	--	1,1856	--	0,3852	--	5,019	--	1,7534	--	0,8107	--	0,8107
Estadío Disuelto	mg/l	--	--	+0,0021	--	+0,0021	--	+0,0021	--	+0,0021	--	+0,0021	--	+0,0021	--	+0,0021	--	+0,0021	--	+0,0021
Talio Disuelto	mg/l	--	--	+0,00019	--	+0,00019	--	+0,00019	--	+0,00019	--	+0,00019	--	+0,00019	--	+0,00019	--	+0,00019	--	+0,00019
Tiarno Disuelto	mg/l	--	--	0,0042	--	0,0002	--	0,0002	--	0,0118	--	0,0003	--	0,0013	--	0,006	--	0,0009	--	0,0009
Tiarno Disuelto	mg/l	--	--	+0,00008	--	+0,00008	--	+0,00008	--	+0,00008	--	+0,00008	--	+0,00008	--	+0,00008	--	+0,00008	--	+0,00008
Uranio Disuelto	mg/l	--	--	0,001005	--	0,000184	--	0,000769	--	0,002866	--	0,000584	--	0,004873	--	0,00218	--	0,00029	--	0,00029
Vanadio Disuelto	mg/l	--	--	0,0008	--	+0,0003	--	0,0009	--	+0,0003	--	+0,0003	--	+0,0003	--	+0,0003	--	+0,0003	--	+0,0003
Vanadio Disuelto	mg/l	--	--	+0,0006	--	+0,0006	--	+0,0006	--	+0,0006	--	+0,0006	--	+0,0006	--	+0,0006	--	+0,0006	--	+0,0006
Vanadio Disuelto	mg/l	--	--	+0,00000	--	+0,00000	--	+0,00000	--	+0,00000	--	+0,00000	--	+0,00000	--	+0,00000	--	+0,00000	--	+0,00000
Zinc Disuelto	mg/l	--	--	0,0041	--	0,0128	--	0,0011	--	0,0101	--	+0,00026	--	0,0032	--	+0,00042	--	+0,00042	--	+0,00042
Zinc Disuelto	mg/l	--	--	+0,00040	--	+0,00040	--	+0,00040	--	+0,00040	--	+0,00040	--	+0,00040	--	+0,00040	--	+0,00040	--	+0,00040

* Suma de nitratos y nitritos.

Informes de ensayos con valor oficial del laboratorio SGS del Perú S.A.C. acreditado por el INACAL: MA2020076, MA2020190, MA2130664, MA2130665, MA2130668 y MA2130669.

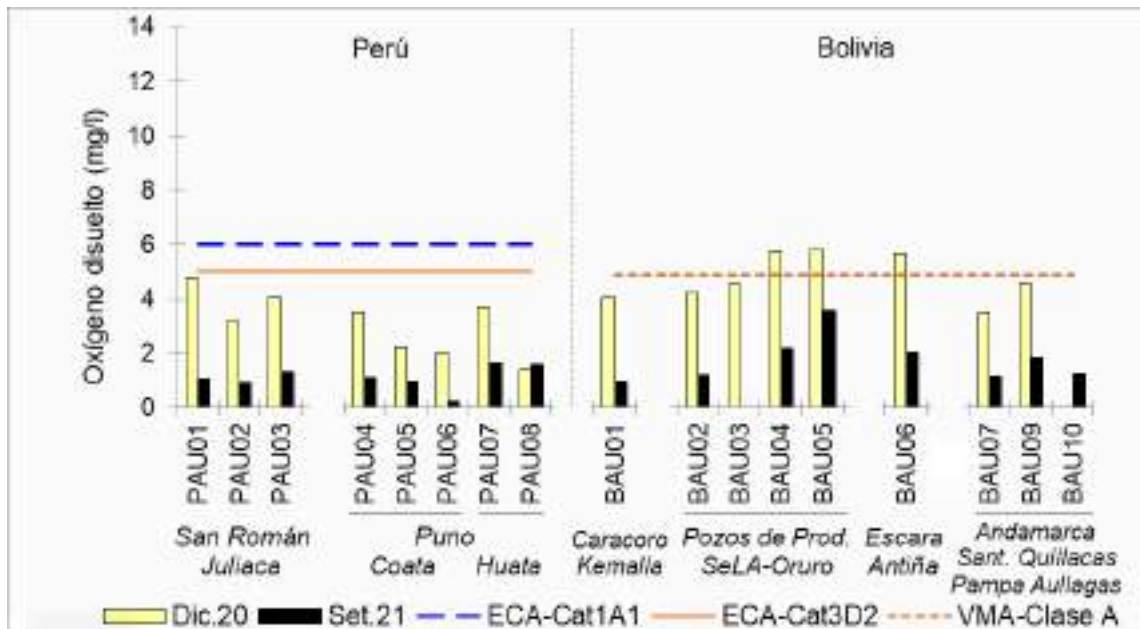
- Concentración menor al valor de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua en la Categoría 1 - Subcategoría A1: Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento primario y Categoría 3 - Subcategoría D2: bebida de animales.
- Concentración mayor al valor de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua en la Categoría 1 - Subcategoría A1: Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento primario.
- Concentración mayor al valor de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua en la Categoría 1 - Subcategoría A1: Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento primario y Categoría 3 - Subcategoría D2: bebida de animales.



Pozos de Prod.: Pozos de producción y Sant. Quillacas: Santuario de Quillacas.
Figura 5.20: Registro de pH en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.

Oxígeno disuelto

De acuerdo con la Figura 5.21, solo los pozos de producción BAU04 y BAU05 de SeLA-Oruro y el pozo de tajo abierto BAU06 (comunidad de Antiña - municipio de Escara) en diciembre 2020 registraron concentraciones de oxígeno disuelto mayores a los VMA-Clase A: aguas naturales de máxima calidad para Bolivia.



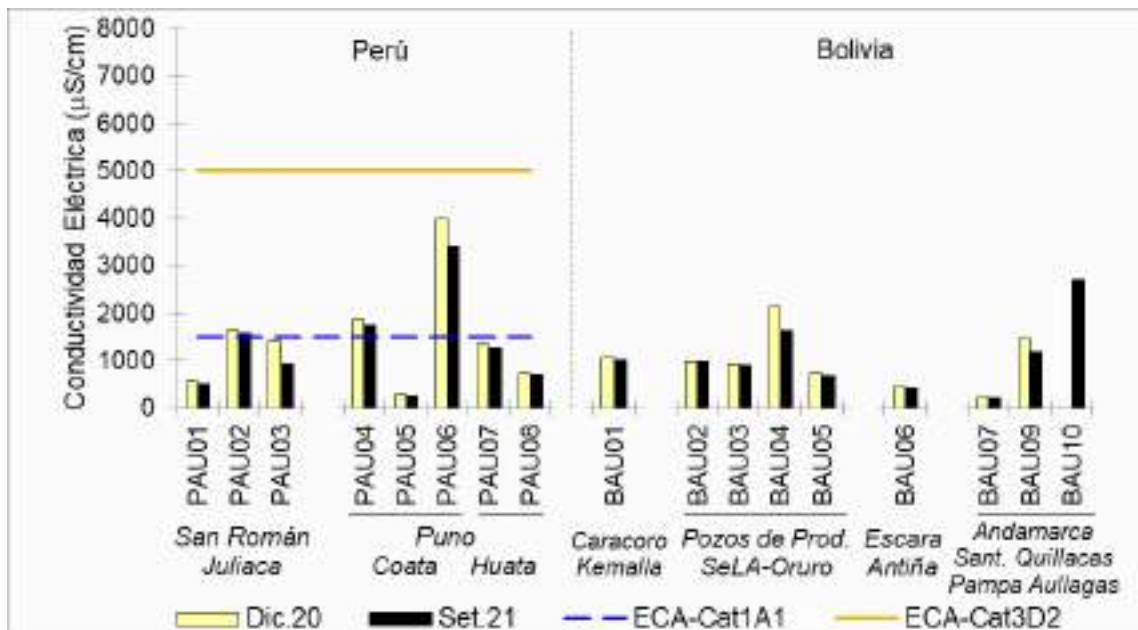
Pozos de Prod.: Pozos de producción y Sant. Quillacas: Santuario de Quillacas.
Figura 5.21: Concentraciones de oxígeno disuelto en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.

Cabe resaltar que, para ambos países, excepto en el pozo PAU08 (pozo de tajo abierto con electrobomba), se registraron menores valores de oxígeno disuelto en septiembre 2021 que diciembre 2020.

Conductividad Eléctrica (CE)

Con respecto a la Figura 5.22, los valores de conductividad eléctrica (diciembre 2020 y septiembre 2021) de los pozos de agua subterránea de tajo abierto de Coata-Puno: PAU04 y PAU06 y el pozo PAU02 (ciudad de Juliaca) fueron mayores al valor referencial para Perú de los ECA-Cat1A1: agua que puede ser potabilizada con desinfección, pero menor al valor a los ECA-Cat3D2: bebida de animales.

En el caso de Bolivia, no se reportó Valores Máximos Admisibles (VMA); no obstante, el valor del pozo de tajo abierto BAU10 de Pampa Aullagas y el pozo de producción BAU04 (SeLA-Oruro) registraron conductividad eléctrica mayores al valor de los ECA-Cat1A1 (1500 µS/cm) aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección.

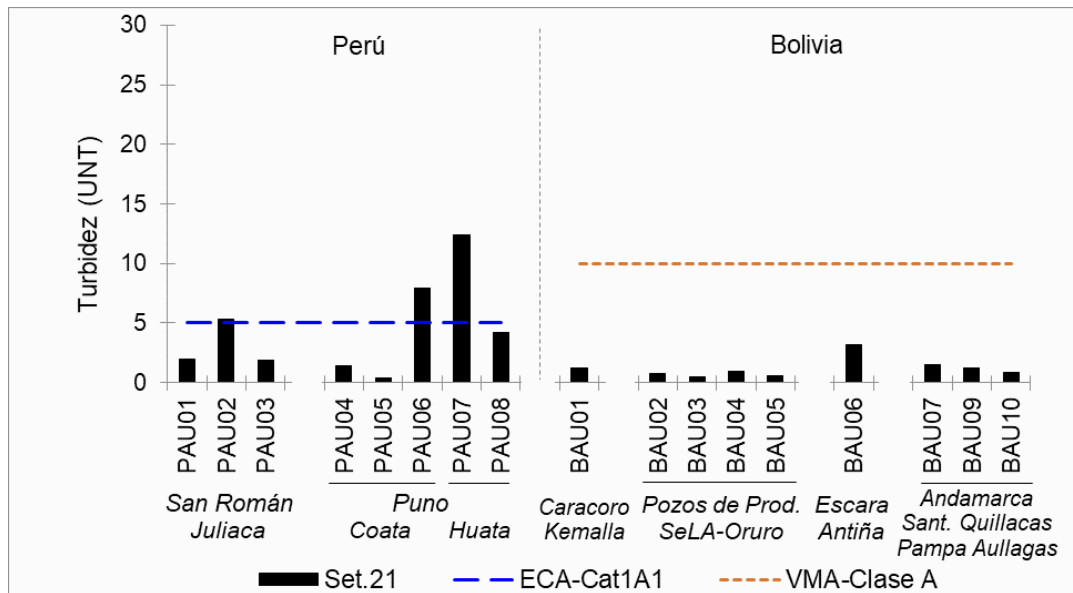


Pozos de Prod.: Pozos de producción y Sant. Quillacas: Santuario de Quillacas.

Figura 5.22: Valores de conductividad eléctrica (CE) en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.

Turbidez

De acuerdo con la Figura 5.23, los valores de turbidez evaluados en septiembre 2021 para Perú en los pozos de tajo abierto de Puno: PAU06 (Coata) y PAU07 (Huata) y el pozo PAU02 (ciudad de Juliaca) fueron mayores al valor establecido en los ECA-Cat1A1: agua que puede ser potabilizada con desinfección. En el caso de Bolivia, ningún pozo registró turbidez mayor a los VMA-Clase A: aguas naturales de máxima calidad.

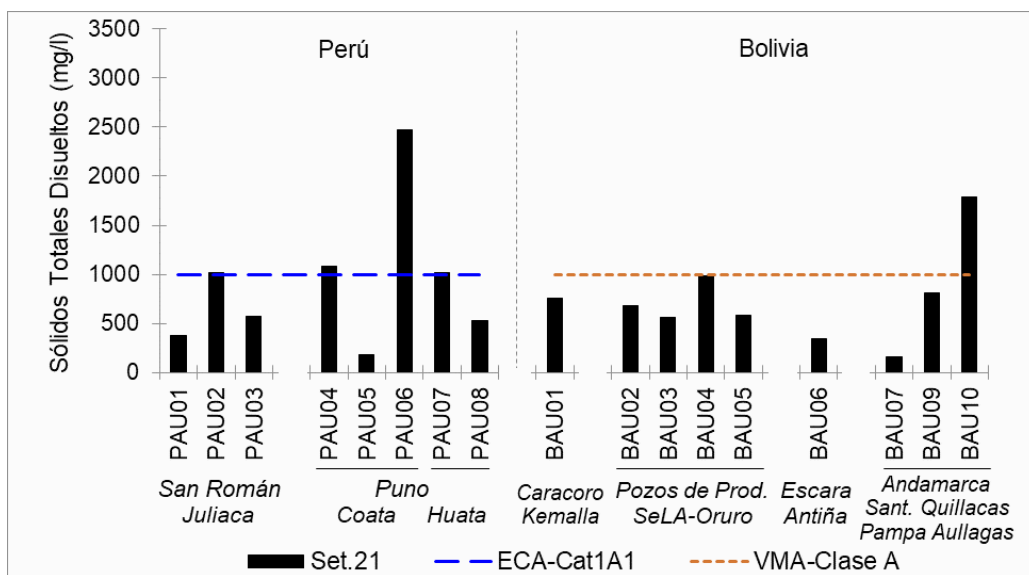


Pozos de Prod.: Pozos de producción y Sant. Quillacas: Santuario de Quillacas.

Figura 5.23: Valores de turbidez en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.

Sólidos Totales Disueltos (STD)

En la Figura 5.24, los STD evaluados en Bolivia, en septiembre 2021, el pozo de tajo abierto BAU10 de Pampa Aullagas registró una concentración mayor a los VMA-Clase A: aguas naturales de máxima calidad. Mientras que los demás pozos, registraron concentraciones menores a los VMA-Clase A. En Perú, los pozos de tajo abierto de Coata – Puno: PAU06 (máximo valor) y PAU04, el pozo PAU07 de Huata-Puno y el pozo PAU02 de la ciudad de Juliaca registraron STD mayores al valor de los ECA-Cat1A1: agua que puede ser potabilizada con desinfección.

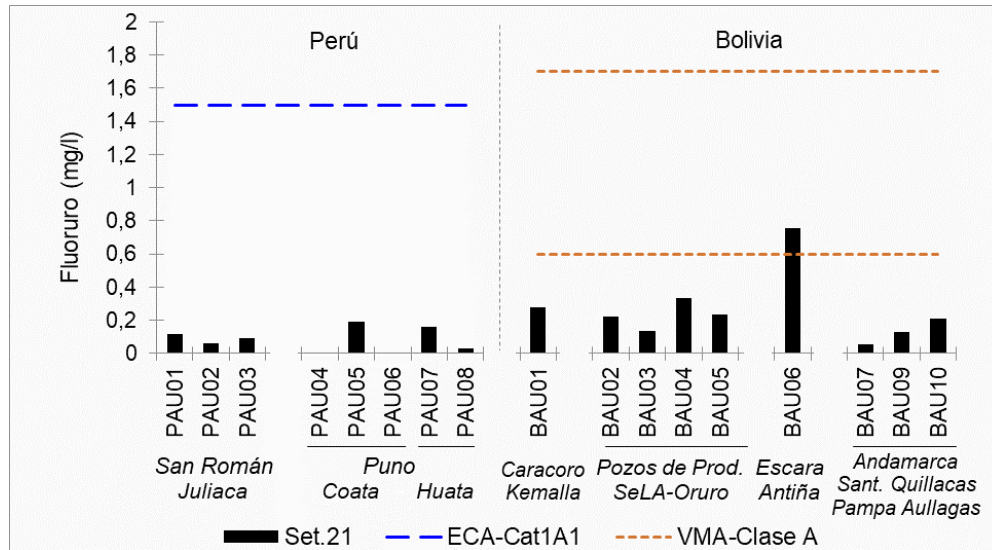


Pozos de Prod.: Pozos de producción y Sant. Quillacas: Santuario de Quillacas.

Figura 5.24: Concentraciones de sólidos totales disueltos (STD) en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.

Fluoruro

De acuerdo con la Figura 5.25, los registros de fluoruro en septiembre 2021, solamente el Pozo de tajo abierto BAU06 de la comunidad de Antiña - municipio de Escara en Bolivia registró concentración de este anión mayor a los VMA-Clase A: aguas naturales de máxima calidad.



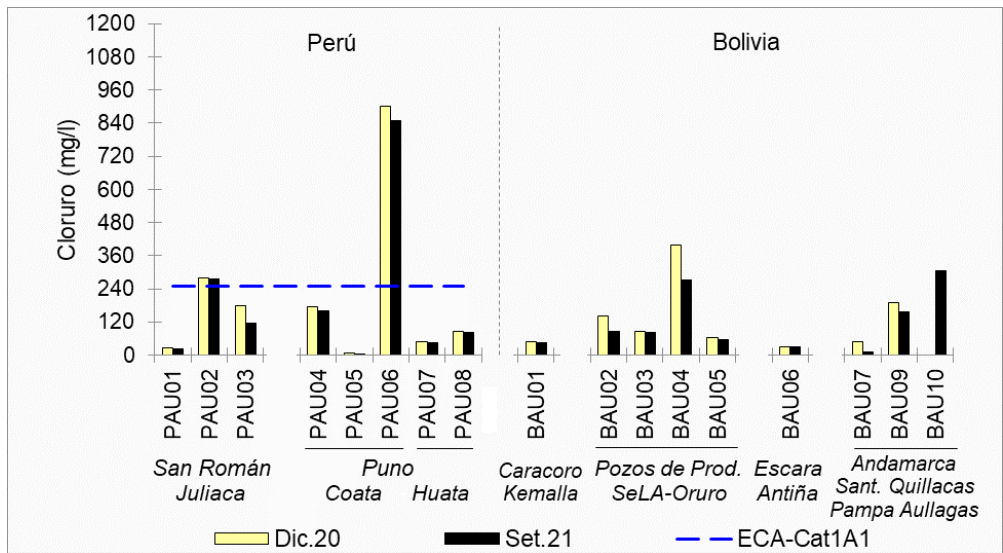
Pozos de Prod.: Pozos de producción y Sant. Quillacas: Santuario de Quillacas.

Figura 5.25: Concentraciones de fluoruro en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.

En Perú, en septiembre 2021, registraron concentraciones de fluoruro menores al valor de los ECA-Cat1A1: agua que puede ser potabilizada con desinfección.

Cloruro

Con relación a la Figura 5.26, los pozos de tajo abierto de Perú PAU06 (Coata-Puno con el máximo valor del sistema TDPS) y PAU02 (ciudad de Juliaca) en diciembre 2020 y septiembre 2021 registraron concentraciones de cloruro mayores a los ECA-Cat1A1: agua que puede ser potabilizada con desinfección.

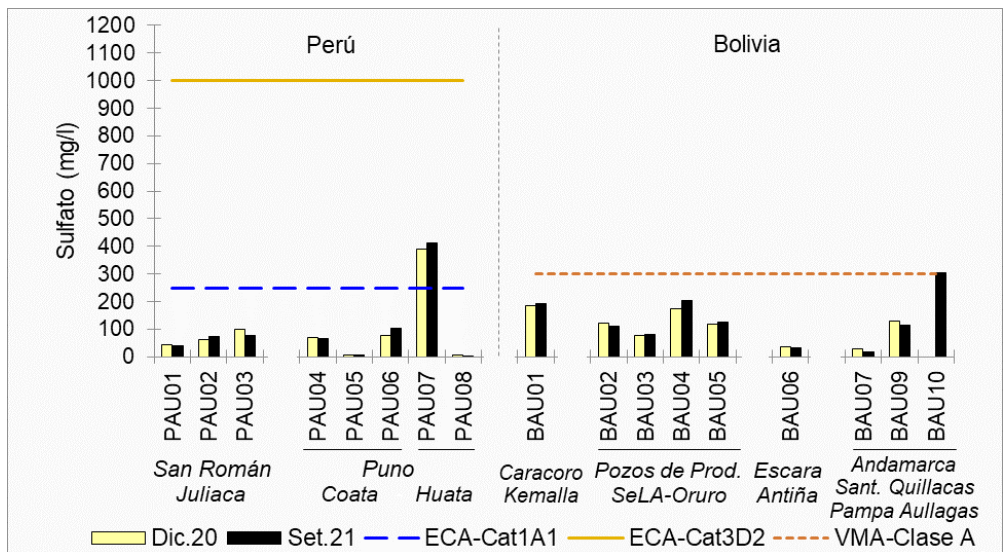


Pozos de Prod.: Pozos de producción y Sant. Quillacas: Santuario de Quillacas.
Figura 5.26: Concentraciones de cloruro en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.

En el caso de Bolivia, el pozo de tajo abierto BAU10 de Pampa Aullagas en septiembre 2021 y el pozo de producción BAU04 de SeLA-Oruro en ambos meses registraron niveles de cloruro mayores a los VMA-Clase A: aguas naturales de máxima calidad.

Sulfato

En la Figura 5.27 se observa que los pozos de tajo abierto PAU07 en Coata-Puno de Perú en diciembre 2020 y septiembre 2021 registraron sulfato mayor al valor de los ECA-Cat1A1: agua que puede ser potabilizada con desinfección. En el caso de Bolivia, el pozo BAU10 en Pampa Aullagas, en septiembre 2021 registró sulfato mayor al valor del VMA-Clase A: aguas naturales de máxima calidad, respectivamente.



Pozos de Prod.: Pozos de producción y Sant. Quillacas: Santuario de Quillacas.
Figura 5.27: Concentraciones de sulfato en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.

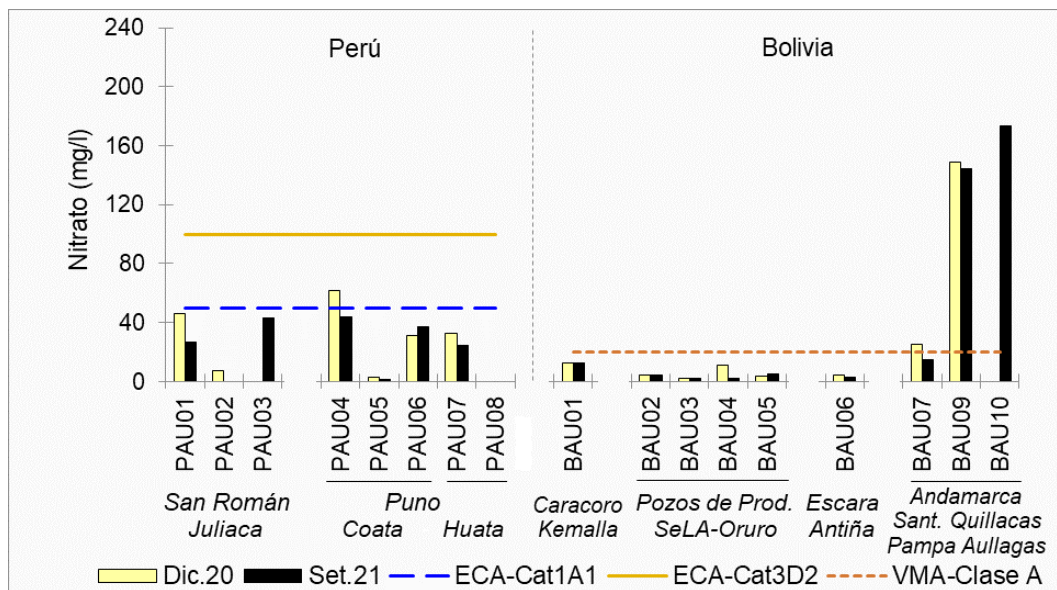
Nitrato

La Figura 5.28 muestra que los pozos de tajo abierto BAU09 en el Santuario de Quillacas en diciembre 2020 y septiembre 2021, y en el pozo BAU10 en Pampa Aullagas de Bolivia en septiembre 2021 registraron las más altas concentraciones de nitrato del sistema TDPS y los cuales fueron mayores a los VMA-Clase A: aguas naturales de máxima calidad, al igual que el pozo BAU07 (Maramara – distrito Andamarca) en diciembre 2020.

En el caso del Perú, el pozo de tajo abierto PAU04 (Coata-Puno) en diciembre de 2020 fue el único punto que registró nitrato mayor al valor de los ECA-Cat1A1: agua que puede ser potabilizada con desinfección.

Sodio

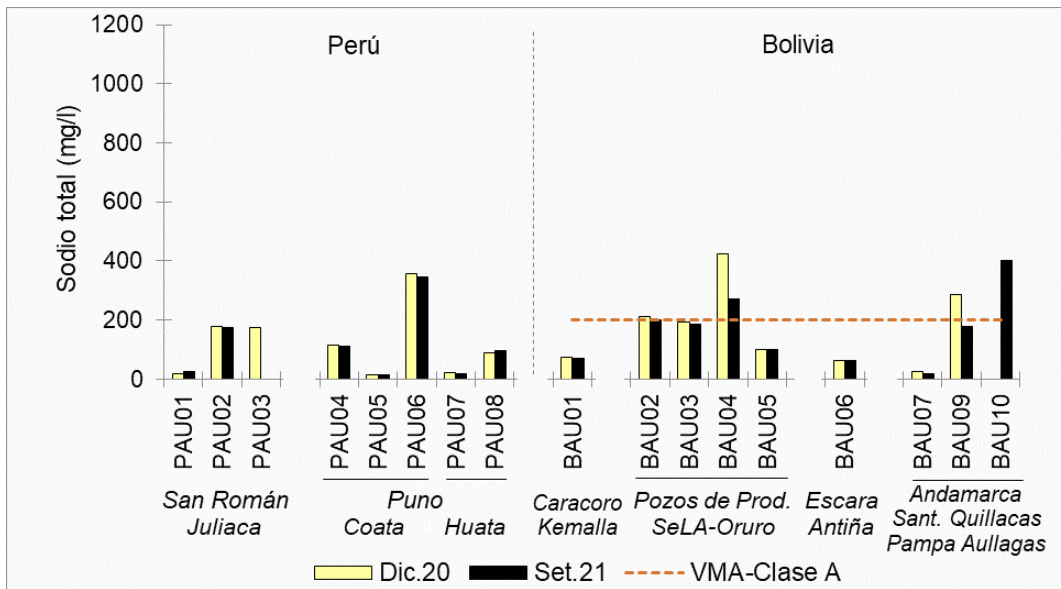
La Figura 5.29 muestra que las concentraciones de sodio de los pozos de tajo abierto BAU09 de Santuario de Quillacas en diciembre 2020, BAU10 de Pampa Aullagas en septiembre 2021, el pozo de producción BAU02 del pueblo Challapampa Chico en ambos meses y el pozo de producción de BAU04 en ambos meses fueron mayores a los VMA-Clase A: aguas naturales de máxima calidad.



Pozos de Prod.: Pozos de producción y Sant. Quillacas: Santuario de Quillacas.

Figura 5.28: Concentraciones de nitrato en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.

Mientras que, Perú no reportó Estándares de Calidad Ambiental (ECA); pero, el pozo PAU06 (Coata-Puno) registró sodio mayor a los VMA-Clase A (200 mg/l).



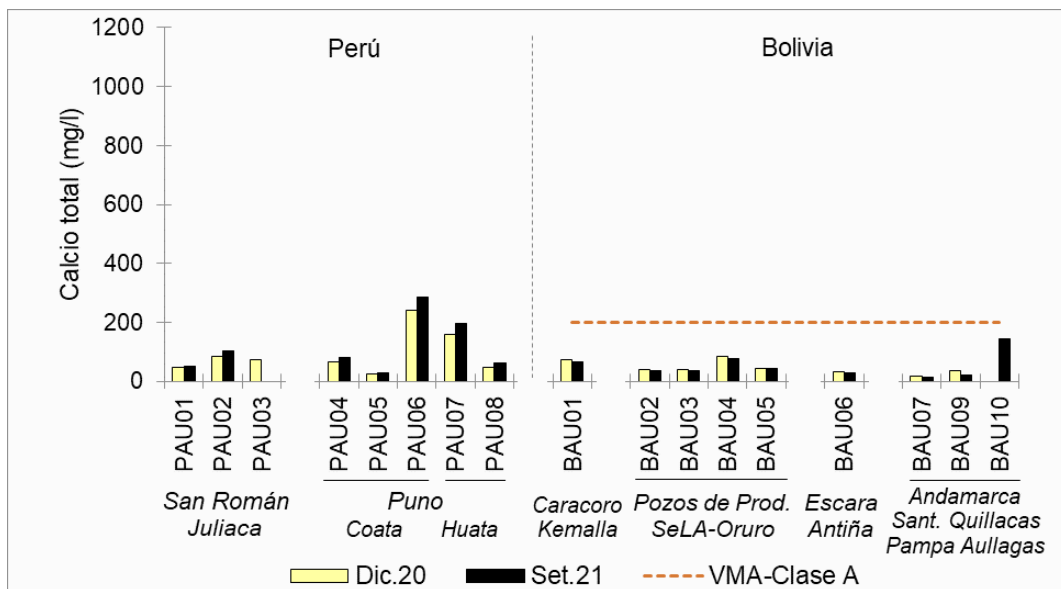
Pozos de Prod.: Pozos de producción y Sant. Quillacas: Santuario de Quillacas.

Figura 5.29: Concentraciones de sodio en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.

Calcio

Con relación a la Figura 5.30, todas las concentraciones de calcio de los pozos de agua subterránea evaluados en Bolivia fueron menores al valor de los VMA-Class A: aguas naturales de máxima calidad.

Con respecto al Perú, no se reportó Estándares de Calidad Ambiental (ECA); no obstante, el pozo de tajo abierto PAU06 (Coata-Puno) registró calcio en diciembre 2020 y septiembre 2021 mayor a los VMA-Class A (200 mg/l).

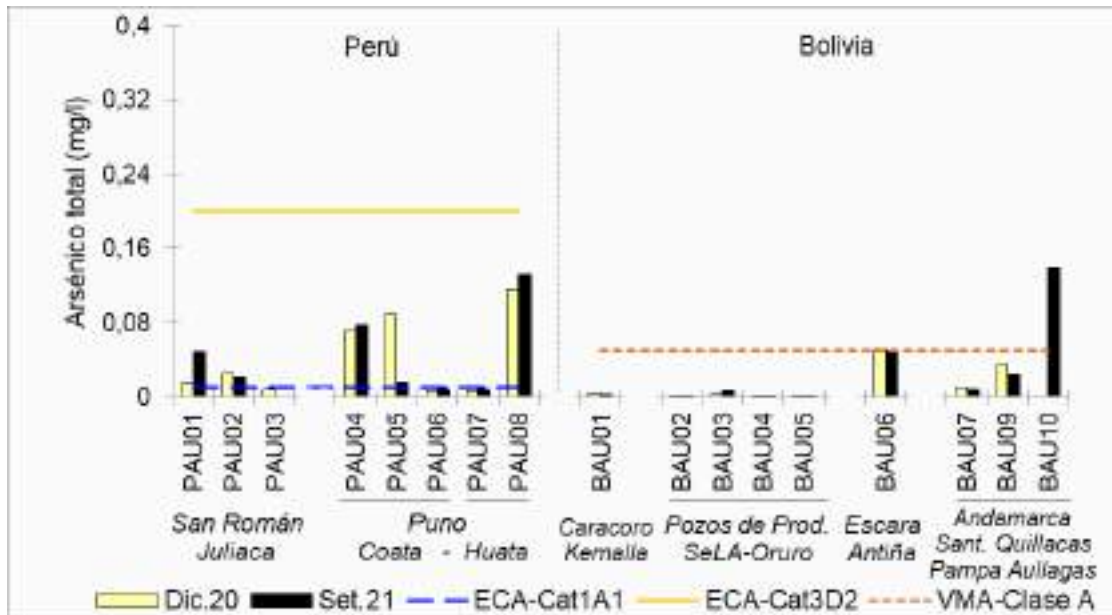


Pozos de Prod.: Pozos de producción y Sant. Quillacas: Santuario de Quillacas.

Figura 5.30: Concentraciones de calcio en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.

Arsénico

En la Figura 5.31, las concentraciones de arsénico de los pozos de tajo abierto BAU10 del Santuario de Quillacas (máximo valor) en septiembre 2021, y el pozo BAU06 de la comunidad de Antaña - municipio de Escara en diciembre 2020 y septiembre 2021 fueron mayores a los VMA-Clase A: aguas naturales de máxima calidad.



Pozos de Prod.: Pozos de producción y Sant. Quillacas: Santuario de Quillacas.

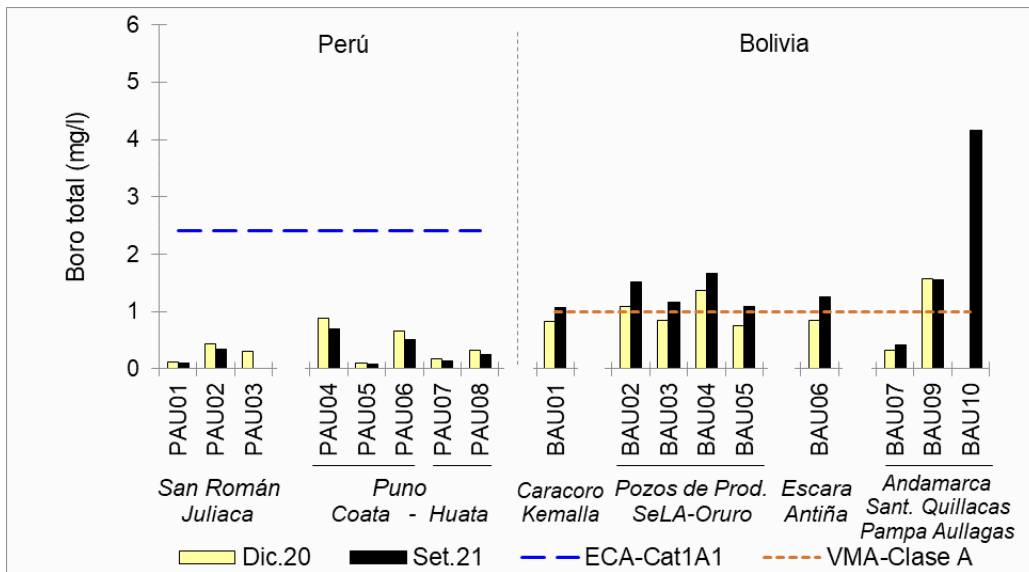
Figura 5.31: Concentraciones de arsénico en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.

Con respecto al Perú, solo los pozos de tajo abierto PAU03 (Juliaca) y los pozos PAU06 en Coata y PAU07 en Huata de Puno registraron concentraciones de arsénico menores al valor de los ECA-Cat1A1: agua que puede ser potabilizada con desinfección. Cabe resaltar que el mayor registro de arsénico en Perú fue Huata-Puno (PAU08).

Boro

De acuerdo con la Figura 5.32, en Perú las concentraciones de boro de los pozos de tajo abierto fueron menores al valor de los ECA-Cat1A1: agua que puede ser potabilizada con desinfección.

Para Bolivia, solo el pozo de tajo abierto BAU07 (Maramara – distrito Andamarca) para ambos meses registró valores de boro menor a los VMA-Clase A: aguas naturales de máxima calidad, mientras que en los pozos BAU02, BAU04 y BAU09 superaron los VMA-Clase A, en ambas campañas, y los pozos BAU01, BAU03, BAU05, BAU06 y BAU10 superaron los VMA-Clase A en el mes de septiembre 2021.



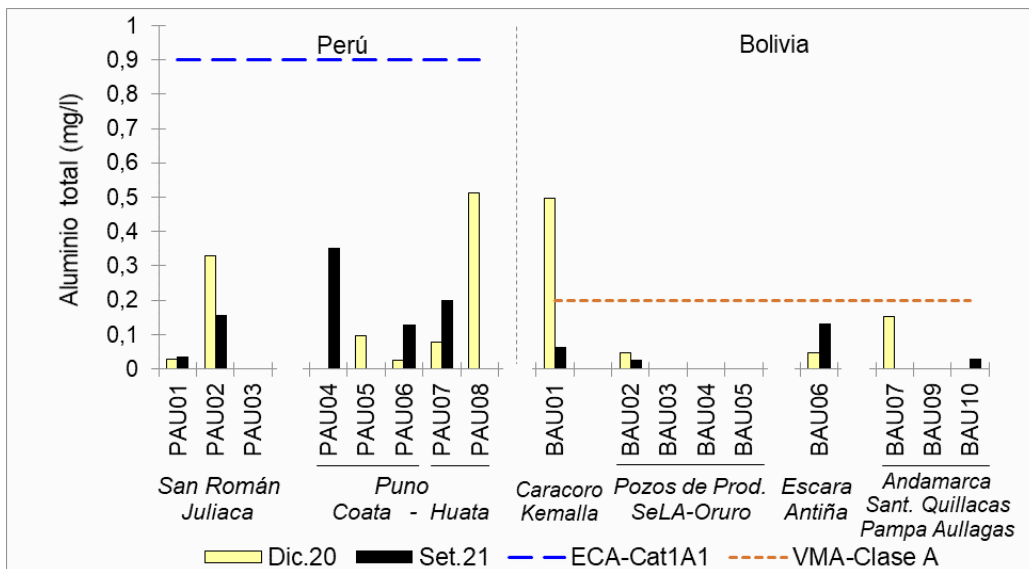
Pozos de Prod.: Pozos de producción y Sant. Quillacas: Santuario de Quillacas.

Figura 5.32: Concentraciones de boro en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.

Aluminio

La Figura 5.33 muestra que, en Bolivia solo el pozo de tajo abierto BAU01 en Kemalla – municipio de Caracollo (diciembre 2020) registró aluminio mayor a los VMA-Clase A: aguas naturales de máxima calidad.

Para Perú, los pozos de tajo abierto reportaron aluminio menor al valor de los ECA-Cat1A1: agua que puede ser potabilizada con desinfección; pero, el aluminio en los pozos PAU08, PAU04 y PAU02 presentó concentraciones mayores a los VMA-Clase A (0,2 mg/l).

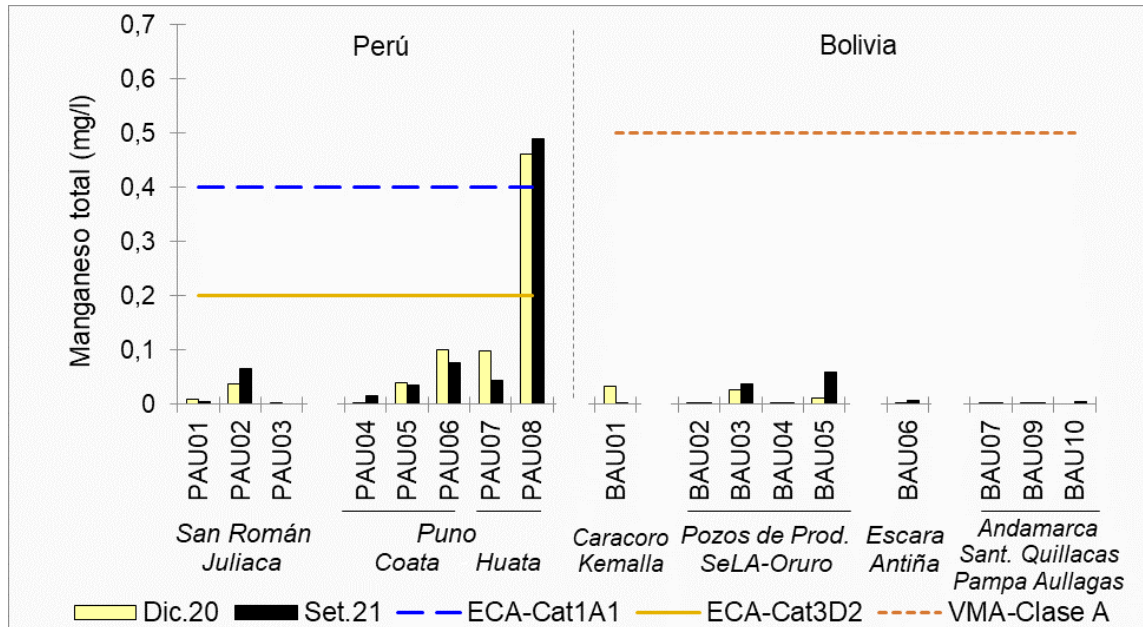


Pozos de Prod.: Pozos de producción y Sant. Quillacas: Santuario de Quillacas.

Figura 5.33: Concentraciones de aluminio en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.

Manganeso

Respecto a la Figura 5.34, para ambos países, solo el pozo PAU08 en Huata-Puno de Perú para ambos meses registró concentraciones de manganeso mayores al valor de los ECA-Cat1A1: agua que puede ser potabilizada con desinfección, y el ECA-Cat3D2: bebida de animales. Cabe resaltar que los valores de manganeso en los pozos evaluados de Bolivia fueron menores a los VMA-Clase A (0,5 mg/l) y menores a los registrados de Perú.



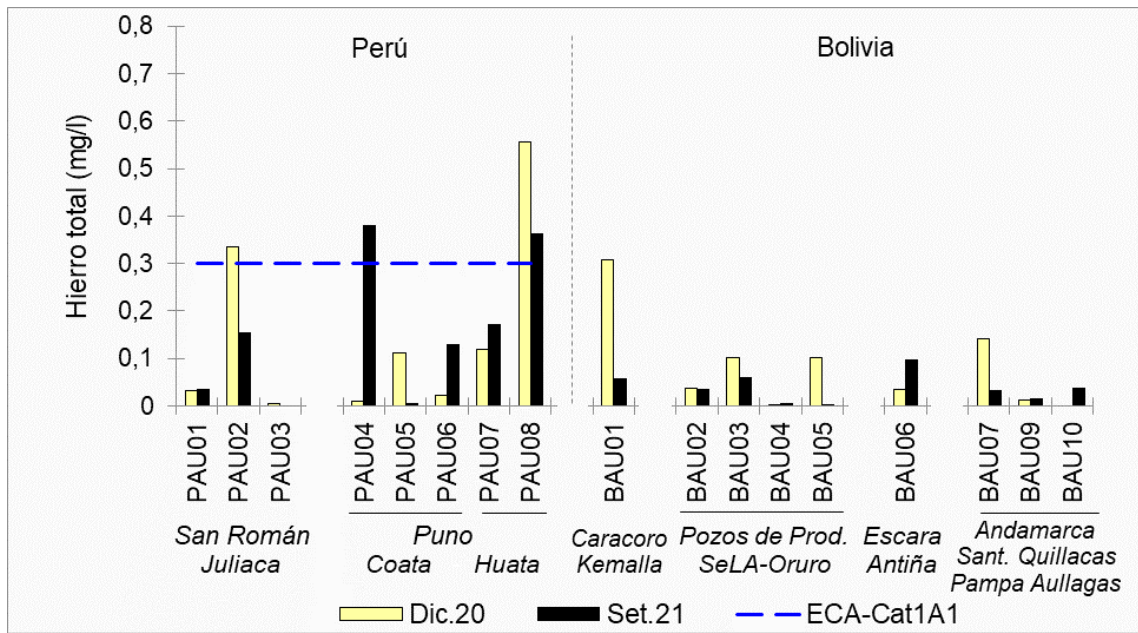
Pozos de Prod.: Pozos de producción y Sant. Quillacas: Santuario de Quillacas.

Figura 5.34: Concentraciones de manganeso en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.

Hierro

La Figura 5.35 muestra que para Bolivia no cuenta con Valores Máximos Admisibles (VMA); no obstante, los registros de hierro fueron menores al valor de los ECA-Cat1A1 (0,3 mg/l).

En tanto, para Perú las concentraciones de hierro de los pozos de tajo abierto PAU08 (Huata-Puno) en diciembre 2020 y septiembre 2021, PAU04 (Coata-Puno) en septiembre 2021 y PAU02 (ciudad de Juliaca) en diciembre 2020 fueron mayores al valor de los ECA-Cat1A1: agua que puede ser potabilizada con desinfección.

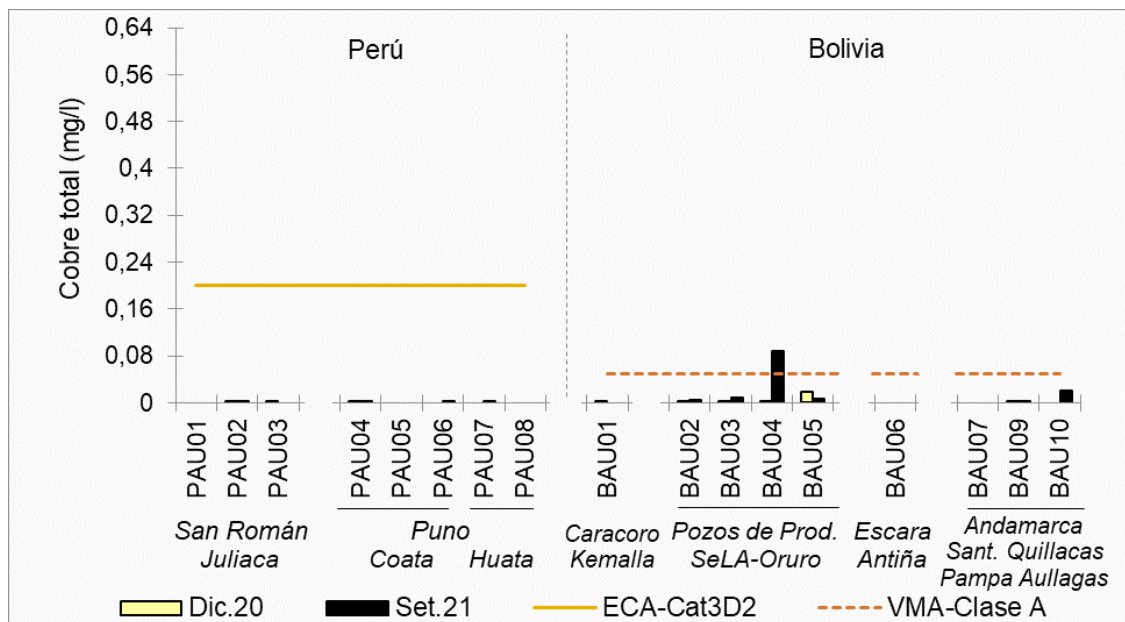


Pozos de Prod.: Pozos de producción y Sant. Quillacas: Santuario de Quillacas.

Figura 5.35: Concentraciones de hierro en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.

Cobre

Respecto a la Figura 5.36, para ambos países, solo el pozo BAU04 (SeLA-Oruro – Los Ángeles-CIO) registró concentración de cobre mayor a los VMA-Clase A: aguas naturales de máxima calidad. Cabe resaltar que los pozos SeLA de Oruro y el de Pampa Aullagas registraron mayores concentraciones de los pozos de agua subterránea evaluados del sistema TDPS.



Pozos de Prod.: Pozos de producción y Sant. Quillacas: Santuario de Quillacas

Figura 5.36. Concentraciones de cobre en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia

5.1.3 Calidad de agua con influencia antrópica (minera y residual municipal) y potable

En este tercer ítem se presenta los resultados de los principales parámetros fisicoquímicos que caracterizaron los cuerpos de agua superficial influenciados por las actividades antrópicas como la minería en el río San Juan de Sora Sora - Huanuni³¹, y las aguas residuales de la Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) de Oruro.

Además, el agua potable colectada de un caño de un sistema de abastecimiento comunal en el municipio de Pampa Aullagas. Para dicha comparación se utilizaron los Valores Máximos Admisibles en la clase B (VMA-Clase B): «Aguas de utilidad general, que para consumo humano requieren tratamiento físico y desinfección bacteriológica» para el río San Juan de Sora Sora - Huanuni.

Para el agua residual de la Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) de Oruro, se comparó con los Límites Permisibles para Descargas Líquidas (LDPL) de valor diario indicados en el Anexo A-2 del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (Anexo 4 de la reglamentación de la Ley de Medio Ambiente aprobada mediante Decreto Supremo N° 24176).

En caso del agua potable del distrito de Pampa Aullagas, se evaluó con el Valor Máximo Aceptable (VMAc) indicada en la Norma Boliviana NB 512 «Norma Técnica de Agua Potable – Requisitos», la cual está en el Anexo C de Resolución Ministerial N° 104.

En la Tabla 5.5 se presenta la comparación referencial de los resultados de agua residual de la PTAR Oruro y agua potable de Pampa Aullagas con la normativa de Bolivia.

31 Décadas de contaminación: ríos cargados de metales pesados recorren las comunidades de Oruro en Bolivia», Disponible en: <https://es.mongabay.com/2017/03/bolivia-oruro-rios-mineria/>. Consultado el 20 de diciembre de 2021.

Tabla 5.5: Comparación referencial de los resultados de agua residual de la PTAR Oruro y agua potable de Pampa Aullagas con la normativa de Bolivia

Parámetro	Fecha		26/12/2020	22/09/2021	26/12/2020	22/09/2021	VMAc Requisitos	23/12/2020
	Hora	LPDL Diario	14:00	17:30	14:50	17:55		12:15
	Unidades		BAS06		BAS08			BAU10
Parámetros <i>in situ</i>								
Temperatura	°C	---	19,6	---	14	---	---	21,5
pH	Unid. pH	6,9	8,17	---	8,73	---	6,5 - 9,0	6,72
Oxígeno disuelto	mg/l	---	0	---	3,71	---	---	4,54
Conductividad eléctrica	mS/cm	---	4230	---	5040	---	1500	747
Turbidez	UNT	---	---	---	---	---	5	---
Potencial óxido reducción ORP	mV	---	364	---	36	---	---	243
Fisicoquímicos								
Bicarbonatos	mg/l	---	---	920,1	---	933,2	370	---
Sólidos Totales Disueltos (STD)	mg/l	---	---	1980	---	3260	1000	---
Sólidos Totales en Suspensión (STS)	mg/l	60	---	340	---	113	---	---
Nitrógeno total	mg/l	---	90	---	21	---	---	< 3
Fosfato	mg/l	---	<0,038	---	<0,038	---	---	<0,038
Cloruro (Cl ⁻)	mg/l	---	654,784	479,395	961,93	1073,145	250	112,99
Fluoruros (F ⁻)	mg/l	---	---	<0,004	---	<0,004	1,5	---
Nitratos (NO ₃ -N)*	mg/l	---	<0,062	5,445	75,786	<0,062	45	1,735
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/l	---	20,68	122,35	247,24	159,74	400	17,01
Metales Totales								
Plata Total	mg/l	---	0,044272	0,000783	0,000451	<0,000010	---	<0,000010
Aluminio Total	mg/l	---	1,830	3,359	0,074	0,052	0,1	3,797
Arsénico Total	mg/l	1	0,03398	0,03798	0,06057	0,0327	0,01	0,00235
Arsénico III (Arsenito)	mg/l	1	0,04456	---	0,02210	---	0,01	0,00235
Boro Total	mg/l	---	2,290	2,614	3,812	3,443	0,3	0,532
Bario Total	mg/l	---	0,1570	0,1873	0,0247	0,0407	0,7	0,1671
Berilio Total	mg/l	---	0,00012	0,00098	<0,00006	<0,00006	---	<0,00006
Bismuto Total	mg/l	---	0,00282	<0,00003	<0,00003	<0,00003	---	<0,00003
Calcio Total	mg/l	---	84,620	68,967	107,694	91,826	200	57,161
Cadmio Total	mg/l	0,3	0,00247	0,00374	<0,00003	<0,00003	0,003	<0,00003
Cerio Total	mg/l	---	0,00137	0,00288	<0,00024	<0,00024	---	0,00025
Cobalto Total	mg/l	---	0,00358	0,00417	0,00171	0,00129	---	<0,00003
Cromo Total	mg/l	1	0,0053	0,0096	<0,0003	<0,0003	0,05	<0,0003
Cesio Total	mg/l	---	0,0143	0,0238	0,0174	0,0167	---	0,0008
Cobre Total	mg/l	1	0,03947	0,06367	0,00371	0,00478	1	0,00366
Hierro Total	mg/l	1	3,5875	5,561	0,3093	0,2021	0,3	0,0303
Gelio Total	mg/l	---	0,00077	0,00017	0,00019	<0,00012	---	0,00047
Germanio Total	mg/l	---	0,0008	<0,0006	<0,0006	<0,0006	---	<0,0006
Hafnio Total	mg/l	---	<0,00015	0,00262	<0,00015	<0,00015	---	<0,00015
Mercurio Total	mg/l	0,002	<0,00009	0,00014	<0,00009	<0,00009	0,001	<0,00009
Potasio Total	mg/l	---	51,79	47,30	74,59	59,85	---	8,62
Lantano Total	mg/l	---	<0,0015	0,0018	<0,0015	<0,0015	---	<0,0015

Parámetro	Fecha		LPDL Diario	26/12/2020	22/09/2021	26/12/2020	22/09/2021	VMAc Requisitos	23/12/2020
	Hora	14:00		17:30	14:50	17:55	12:15		
	Unidades	BAS06		BAS08		BAU10			
Litio Total	mg/l	---	1,6475	1,724	2,3658	2,383	---	0,0742	
Lutecio Total	mg/l	---	<0,00006	<0,00006	<0,00006	<0,00006	---	<0,00006	
Magnesio Total	mg/l	---	43,28	47,893	70,843	55,965	150	15,491	
Manganeso Total	mg/l	---	0,47586	0,48653	0,21869	0,2385	0,1	0,00892	
Molibdeno Total	mg/l	---	0,00606	0,01456	0,00313	0,00305	---	0,00022	
Sodio Total	mg/l	---	787,322	574,552	1248,504	920,753	200	75,456	
Niobio Total	mg/l	---	<0,0015	<0,0015	<0,0015	<0,0015	---	<0,0015	
Níquel Total	mg/l	---	0,0062	0,0109	0,0051	0,0046	0,05	0,001	
Fósforo Total	mg/l	---	15,332	19,353	7,035	6,515	---	<0,047	
Plomo Total	mg/l	0,6	0,0565	0,0463	0,0014	<0,0006	0,01	<0,0006	
Rubidio Total	mg/l	---	0,0415	0,0405	0,0484	0,0488	---	0,0091	
Antimonio Total	mg/l	1	0,01418	0,02823	0,00249	<0,00013	0,02	<0,00013	
Selenio Total	mg/l	---	0,0043	<0,0013	0,0054	<0,0013	---	<0,0013	
Silicio Total	mg/l	---	16,74	24,13	19,61	21,82	---	35,29	
Sílice Total	mg/l	---	35,8	51,63	41,95	46,69	---	75,49	
Estaño Total	mg/l	2	0,00927	0,02111	<0,00010	<0,00010	---	<0,00010	
Estroncio Total	mg/l	---	1,2862	1,1938	1,6705	1,6846	---	0,3754	
Tantalio Total	mg/l	---	<0,0021	<0,0021	<0,0021	<0,0021	---	<0,0021	
Teluro Total	mg/l	---	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	---	<0,003	
Thorio Total	mg/l	---	<0,00019	<0,00019	<0,00019	<0,00019	---	<0,00019	
Titanio Total	mg/l	---	0,0778	0,1202	0,0271	0,0236	---	0,0045	
Talio Total	mg/l	---	<0,00006	<0,00006	<0,00006	<0,00006	---	<0,00006	
Uranio Total	mg/l	---	0,007676	0,008115	0,006145	0,007609	---	<0,000010	
Vanadio Total	mg/l	---	0,0047	0,0075	<0,0003	<0,0003	---	0,0051	
Wolframio Total	mg/l	---	0,0049	0,0026	0,0054	0,0035	---	<0,0006	
Yterbio Total	mg/l	---	<0,00006	<0,00006	<0,00006	<0,00006	---	<0,00006	
Zinc Total	mg/l	3	0,4405	0,5528	0,0136	0,0045	5	0,0133	
Zirconio Total	mg/l	---	0,0026	0,00337	<0,00045	<0,00045	---	<0,00045	

* Suma de nitratos y nitritos.

En **rojo** concentraciones no consideradas en los análisis debido a que la matriz de agua no es residual.

Informes de ensayos con valor oficial del laboratorio SGS del Perú S.A.C. acreditado por el INACAL: MA2026076, MA2026100, MA2130228, MA2130229 y MA2130396.

 Concentración mayor al valor de los Límites Permisibles para Descargas Líquidas (LPDL) – Valor diario.

 Concentración mayor al valor de Valor máximo Aceptable (VMAc) – Requisitos.

Potencial de hidrógeno (pH)

De acuerdo con la Figura 5.37, los ríos San Juan de Sora Sora (BAS09) y Huanuni (BAS10) registraron valores de pH menores a 3,0 unid. pH, los cuales estuvieron por debajo del rango de los VMA-Clase B: agua de utilidad general que requieren tratamiento físico y desinfección. Con respecto a la entrada (BAS06) y salida (BAS08) del agua residual de la PTAR Oruro, sus valores de pH fueron mayores al valor establecido en los LPDL; mientras que el agua potable de Pampa Aullagas (BAU10) registro de pH estuvo en el rango establecido del VMAC.

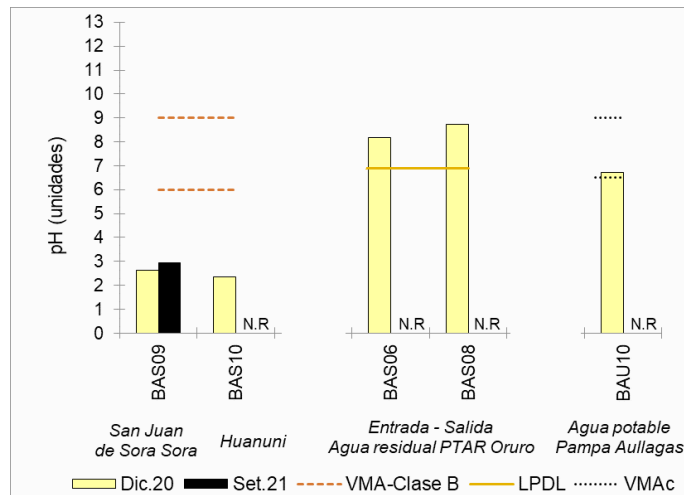


Figura 5.37: Valores de pH en agua de actividades antrópicas.

Sólidos totales en suspensión (STS)

La Figura 5.38 muestra que las concentraciones de STS en la entrada (BAS06) y salida (BAS08) del agua residual de la PTAR Oruro, fueron mayores al valor establecido en los LPDL; no obstante, este registro de STS es menor al obtenido en el río San Juan de Sora de Sora (BAS09). Cabe resaltar que los STS en el agua residual de la PTAR de Oruro disminuyen de 340 mg/l (BAS06) a 113 mg/l (BAS08).

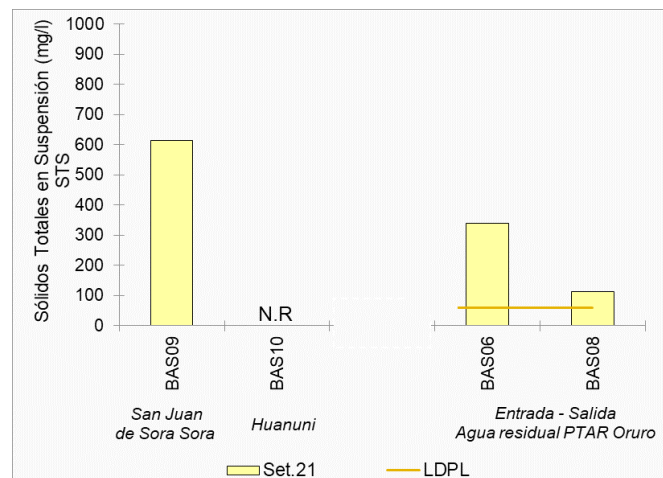


Figura 5.38: Concentraciones de sólidos totales en suspensión (STS) en agua de actividades antrópicas.

Cloruro, sodio, boro y litio

Las Figuras 5.39, 5.40, 5.41 y 5.42 muestran que el río San Juan de Sora Sora (BAS09) - Huanuni (BAS10) registraron concentraciones de cloruro, sodio, boro y litio menores a sus respectivos estándares en los VMA-Clase B: agua de utilidad general que requieren tratamiento físico y desinfección. Mientras que, en las Figuras 5.39 y 5.40 se observan que el agua potable de Pampa Aullagas (BAU10) registró concentraciones de cloruro y sodio menor a los VMAC: requisitos químicos para agua potable. En cambio, el boro reportó valor mayor a los VMAC (ver Figura 5.41), y el litio no registró valor en los VMAC para Bolivia (ver Figura 5.42). Cabe señalar que Bolivia no cuenta con Límites Permisibles para Descargas Líquidas (LDPL) para cloruro, sodio, boro y litio; no obstante, de acuerdo con las Figuras indicadas en el párrafo previo, se visualiza que la entrada (BAS06) y salida (BAS08) del agua residual de la PTAR de Oruro registraron concentraciones de dichos parámetros mayor a los ríos San Juan de Sora Sora y Huanuni y por ende a los VMA-Clase B.

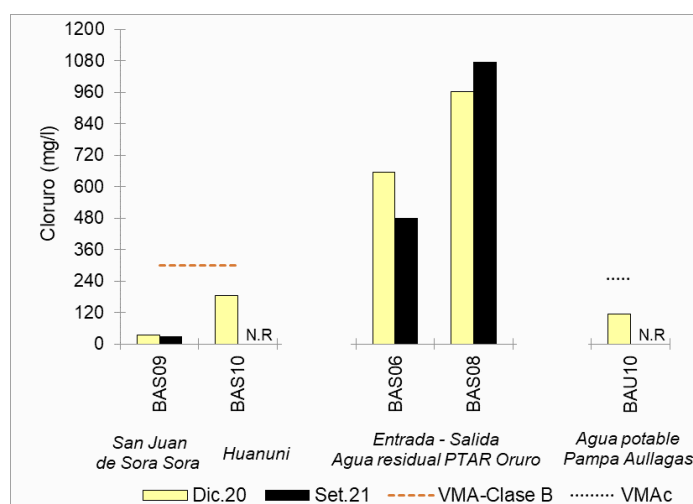


Figura 5.39: Concentración de cloruro en agua de actividades antrópicas.

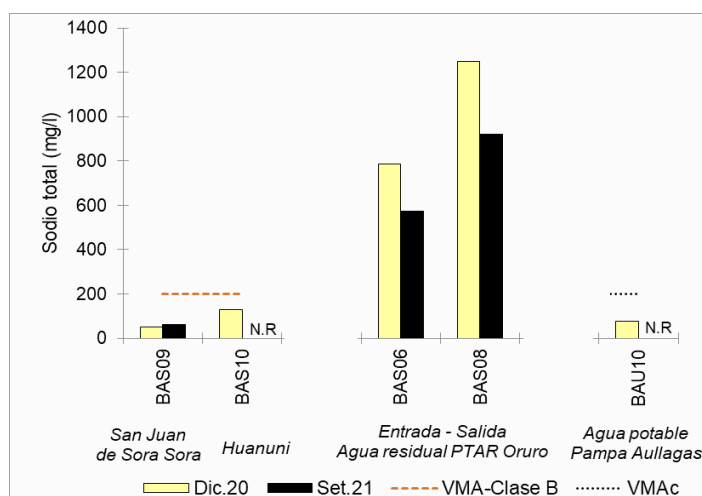


Figura 5.40: Concentraciones de sodio en agua de actividades antrópicas.

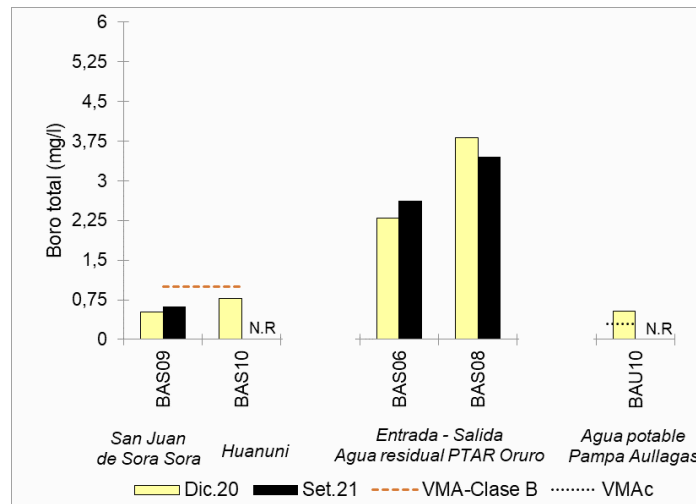


Figura 5.41: Concentraciones de boro en agua de actividades antrópicas.

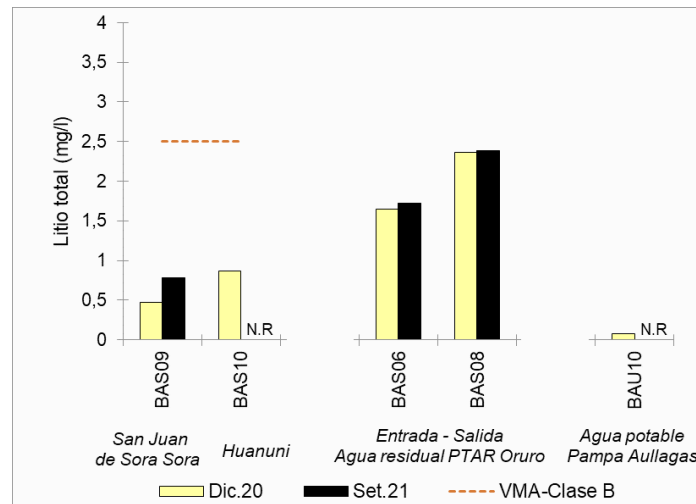


Figura 5.42: Concentraciones de litio en agua de actividades antrópicas.

Sulfato, arsénico, aluminio, manganeso y hierro

Las Figuras 5.43, 5.44, 5.45 y 5.46 muestran que el río San Juan de Sora Sora (BAS09) - Huanuni (BAS10) registraron concentraciones de sulfato, arsénico, aluminio y manganeso mayores a sus respectivos estándares en los VMA-Class B: agua de utilidad general que requieren tratamiento físico y desinfección. Asimismo, en las citadas figuras se observa que el agua potable de Pampa Aullagas (BAU10) registró concentraciones de sulfato, manganeso y hierro menores a los VMAc: requisitos químicos para agua potable. En cambio, el arsénico y aluminio registraron concentraciones mayores a los citados VMAc (ver Figuras 5.44 y 5.45).

En caso de la planta de tratamiento de agua residual (PTAR) de Oruro, la Figura 5.47 indica que la entrada de agua residual (BAS06) registró concentraciones de hierro mayores al valor establecido en los Límites Permisibles para Descargas Líquidas (LPDL), mientras que las concentraciones de arsénico (ver Figura 5.44) fueron menores a los LPDL. Cabe señalar que las concentraciones de sulfato, arsénico, aluminio, manganeso y hierro en los ríos San Juan de Sora Sora y Huanuni fueron mayores a los registrados en la PTAR Oruro.

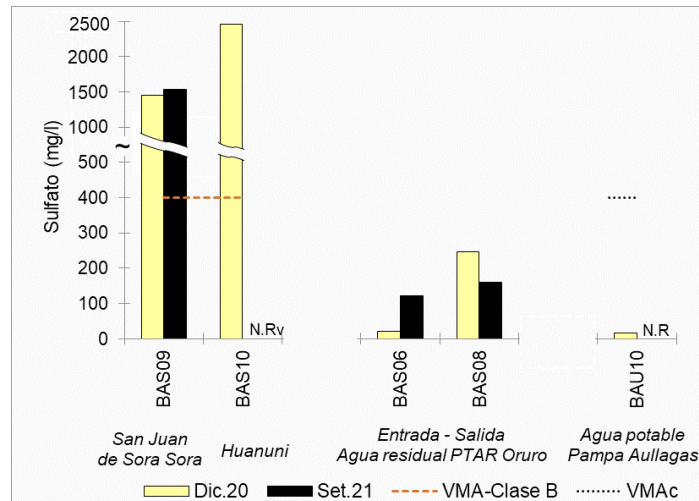


Figura 5.43: Concentraciones de sulfato en agua de actividades antrópicas.

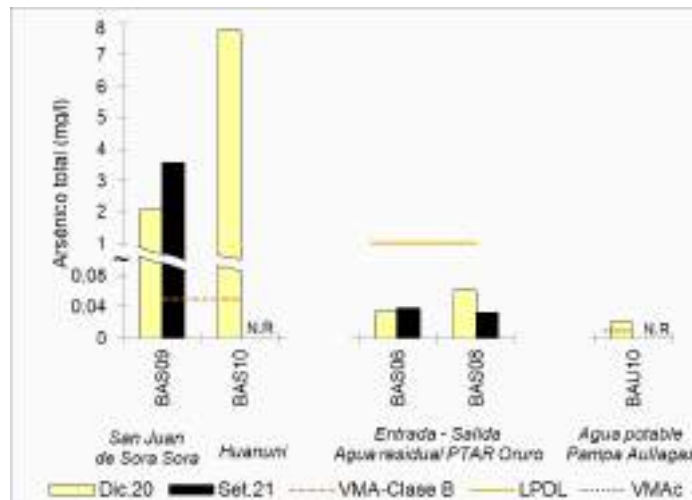


Figura 5.44: Concentraciones de arsénico en agua de actividades antrópicas.

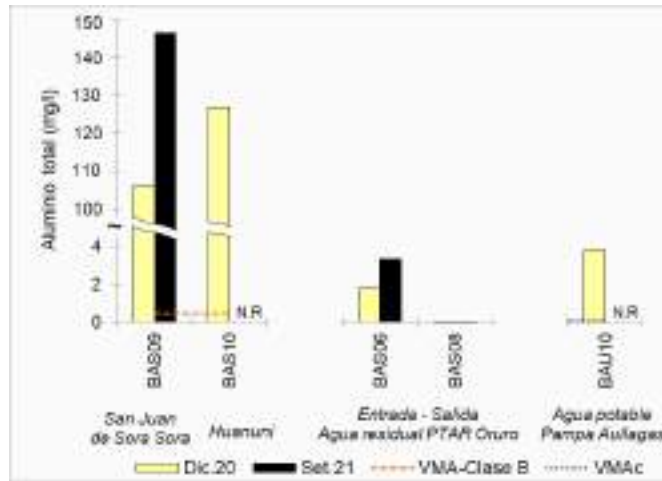


Figura 5.45: Concentraciones de aluminio en agua de actividades antrópicas.

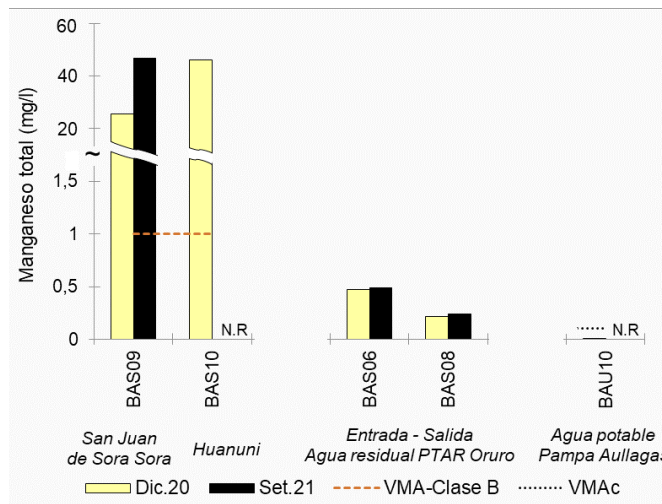


Figura 5.46: Concentraciones de manganeso en agua de actividades antrópicas.

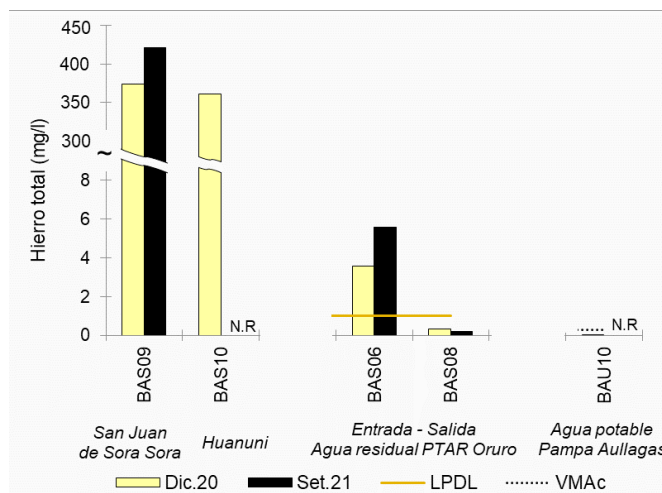


Figura 5.47: Concentraciones hierro en agua de actividades antrópicas.

Otros metales

De acuerdo con los resultados de laboratorio obtenidos en las dos salidas de campo, el río San Juan de Sora Sora (BAS09), en diciembre 2020 y septiembre 2021 registró para 10 metales concentraciones mayores a los VMA-Clase B: agua de utilidad general que requieren tratamiento físico y desinfección (véase Tabla 5.6). En adición a lo anterior, en septiembre 2021, el punto BAS09 registró concentraciones de hierro disuelto, magnesio y mercurio mayores a los VMA-Clase B. Con respecto al río Huanuni (BAS10), evaluado solo en diciembre 2020, registró en 12 metales concentraciones mayores a los VMA-Clase B: agua de utilidad general que requieren tratamiento físico y desinfección (véase Tabla 5.6).

Tabla 5.6: Resultados de comparación de los metales del río San Juan de Sora Sora-Huanuni con los VMA-Clase B

Metal	Mes evaluado	Río San Juan de Sora Sora	Río Huanuni
		BAS09	BAS10
Antimonio	Dic.20	✓	✓
	Set.21	✓	N.E
Berilio	Dic.20	✓	✓
	Set.21	✓	N.E
Cadmio	Dic.20	✓	✓
	Set.21	✓	N.E
Cobalto	Dic.20	✓	✓
	Set.21	✓	N.E
Cobre	Dic.20	✓	✓
	Set.21	✓	N.E
Hierro disuelto	Dic.20	--	--
	Set.21	✓	N.E
Magnesio	Dic.20	--	✓
	Set.21	✓	N.E
Mercurio	Dic.20	--	--
	Set.21	✓	N.E
Níquel	Dic.20	✓	✓
	Set.21	✓	N.E
Plata	Dic.20	--	✓
	Set.21	--	N.E
Selenio	Dic.20	✓	✓
	Set.21	✓	N.E
Plomo	Dic.20	✓	✓
	Set.21	✓	N.E
Uranio	Dic.20	✓	✓
	Set.21	✓	N.E
Zinc	Dic.20	✓	✓
	Set.21	✓	N.E

✓ Concentración mayor a los VMA – Clase B

N.E: No evaluado.

Fuente: Elaboración propia.

5.1.4 Análisis hidroquímico del agua superficial y subterránea

Se presenta inicialmente el comportamiento del agua superficial y subterránea mediante la evaluación de las réplicas de los metales disueltos³² y las interrelaciones en el ámbito disuelto que involucra a la conductividad eléctrica (CE), **sólidos** totales disueltos (STD) y los cationes (metales disueltos) y aniones (bicarbonatos, cloruro, nitrato, sulfato y fluoruro). Asimismo, en el **ámbito** suspendido relacionado con la turbidez y los **sólidos** totales en suspensión (STS) como control inicial del comportamiento acuoso. Posteriormente, la evaluación previa al comportamiento hidroquímico se inicia con el error de balance iónico (EBI), luego determinar la facie hidroquímica de cada punto de muestreo y los gráficos en dos dimensiones conocidos como diagramas hidroquímicos: triangular (Piper), líneas paralelas (Stiff), bumerán (Gibbs) y escala logarítmica (Mifflin).

Para complementar los antes mencionado, se realiza el grafico bidimensional de la relación rNa/Cl y rCa/rMg que junta las posibles fuentes de iones de disolución de minerales de Halita, silicatos, calcita y dolomita, y finalmente los índices cloro alcalinos (CAI) que evalúan el intercambio catiónico entre los principales cationes de alcalinos terreos: calcio y magnesio con los alcalinos: sodio y potasio.

Variación de las concentraciones de metales

El replicado evalúa las variaciones de las concentraciones de parámetros, principalmente los de carácter traza, propias en los cuerpos de agua por las interacciones con su entorno. En la Figura 5.48 se observa que el agua subterránea y superficial registraron valores de la diferencia porcentual relativa (DPR) mayores al 50% a concentraciones menores a 0,1 mg/l en metales disueltos como el zinc (Zn), titanio (Ti), manganeso y hierro (Fe) (máximo porcentaje con 165% en agua subterránea). Asimismo, vanadio (V) y molibdeno (Mo) para agua subterránea y cobalto (Co) para agua superficial.

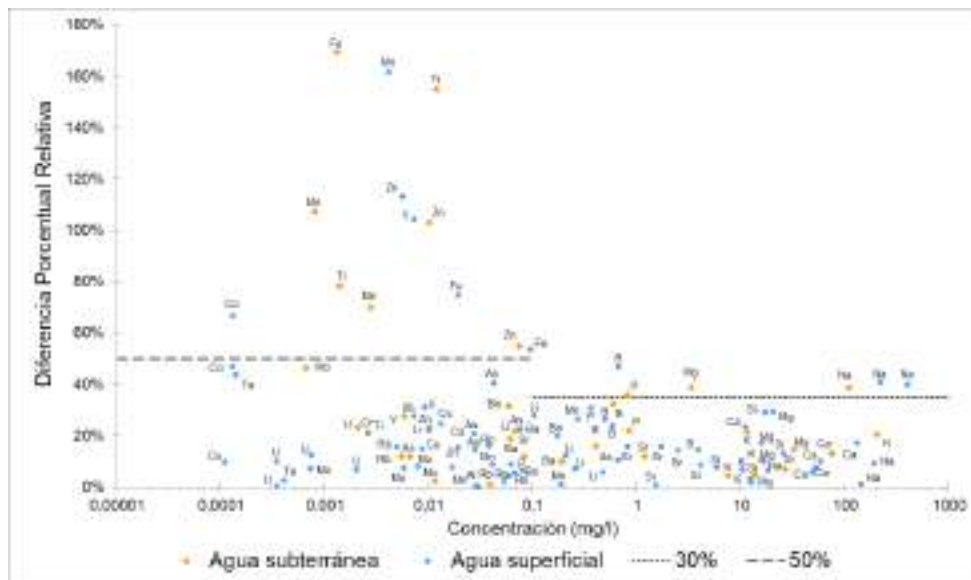


Figura 5.48: Variación de metales del agua subterránea y superficial - sistema TDPS.

32 Los metales disueltos forman parte de partículas cuyo diámetro es menor a 0,45 μm que corresponde al tamaño de poro del filtro hecho en base a una membrana hidrófila de acetato de celulosa.

Para concentraciones mayores a 0,1 mg/l, el metal con DPR mayor al 30% para agua subterránea y superficial fue el sodio (Na). De la misma manera, el boro (B) (máximo porcentaje con 60%) para agua superficial y el fósforo (P) y magnesio (Mg) para agua subterránea.

1) Relación entre parámetros

En esta sección, se presenta los gráficos de dispersión en los que se muestra la relación lineal de la conductividad eléctrica (CE) y la suma de aniones y cationes con los Sólidos Disueltos Totales (SDT) de todos los puntos de muestreo para ambas temporadas. Asimismo, se muestra la relación lineal entre la turbidez y los *sólidos* totales en suspensión (STS). El ajuste de correlación entre los citados parámetros se determina mediante el cuadrado del coeficiente de correlación de determinación (R^2), para lo cual se consideró un valor de R^2 mayor a 0,95 como un indicador de buena correlación entre los parámetros.

Conductividad eléctrica (CE) y Sólidos totales disueltos (STD)

Como se observa en la Figura 5.49, la relación lineal entre la CE y los STD de los puntos de agua subterránea y superficial de Perú y Bolivia registró un R^2 de 0.9714 y una pendiente (K) de 0,634, el cual está dentro del rango de 0,50 a 0,85 indicado por Walton (1989) entre los 100 y 10000 mg/l de STD.

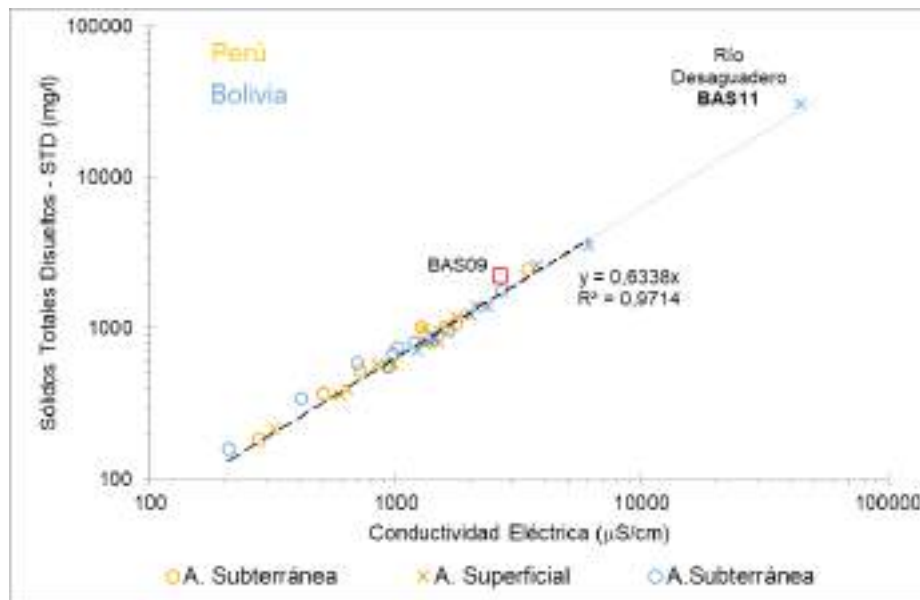


Figura 5.49: Relación entre la conductividad eléctrica (CE) y los sólidos totales disueltos (STD) del agua superficial y subterránea de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

Además, se observa que la extrapolación de dicha curva está en la misma dirección y cerca al punto de muestreo BAS11 del río Desaguadero. De otro lado, el punto de muestreo BAS09 del río San Juan de Sora de Sora no está considerado en la determinación de la curva lineal para la citada Figura 5.49.

Conductividad eléctrica (CE) y suma de aniones

Para el caso de la relación lineal entre la conductividad eléctrica y la suma de aniones para septiembre 2021, se obtuvo la Ecuación 5.1 de acuerdo con la relación línea indicada en la Figura 5.50, con un

coeficiente de determinación (R^2) de 0,9866.

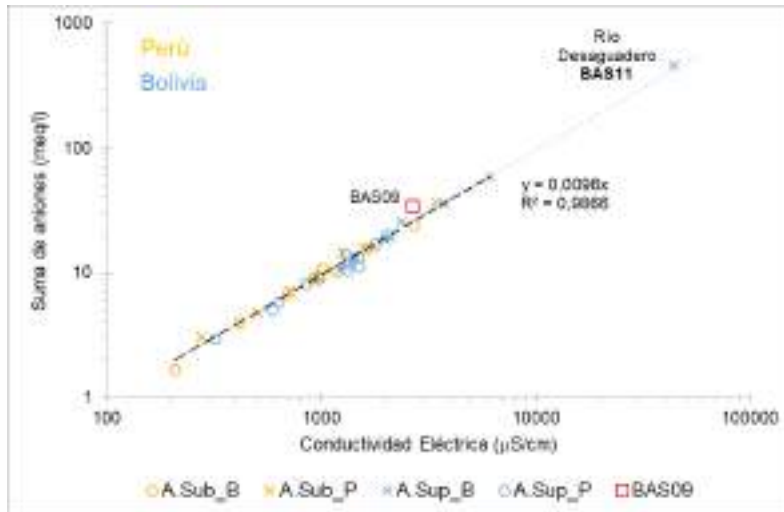


Figura 5.50: Relación entre la suma de aniones y la conductividad eléctrica del agua superficial y subterránea de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

Conductividad eléctrica y suma de cationes

Para el caso de la relación lineal entre la conductividad y la suma de cationes³³ para septiembre 2021, se obtuvo la Ecuación 5.2 de acuerdo con la relación línea indicada en la Figura 5.51, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,9728.

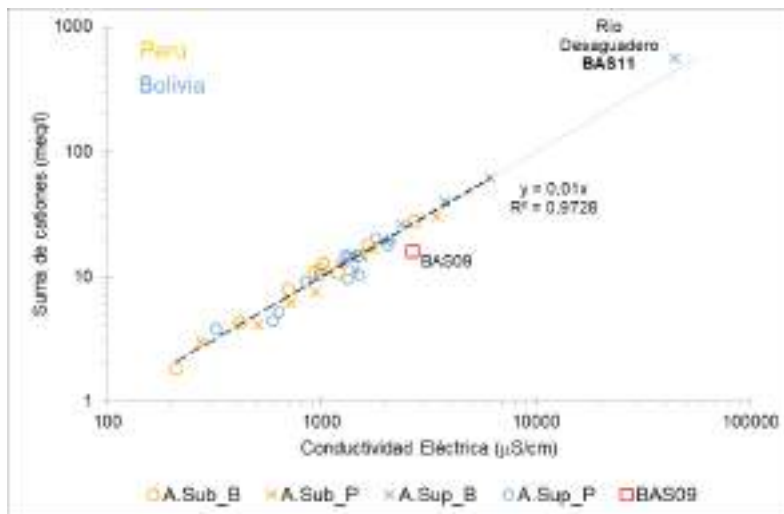


Figura 5.51: Relación entre la suma de cationes y la conductividad eléctrica del agua superficial y subterránea de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

33 Para la suma de cationes, en adición a los principales: calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+) y potasio (K^+), se consideraron los iones hidronio del pH (H_3O^+) y los metales disueltos: aluminio (Al^{3+}), hierro (Fe^{3+}), manganeso (Mn^{2+}), bario (Ba^{2+}), boro (B^{3+}), estroncio (Sr^{2+}) y litio (Li^+).

La pendiente de las relaciones de aniones (0,0096) y cationes (0,0100) con la conductividad eléctrica estuvieron en el rango de 0,0090 – 0,0110 de acuerdo con la ecuación 5.2 indicado por APHA et al. (2017) por lo que sugieren una buena relación entre dichos parámetros.

La extrapolación de las curvas lineales de las Figuras 5.50 y 5.51 está en la misma dirección y cerca al punto de muestreo BAS11 del río Desaguadero. De otro lado, el punto de muestreo BAS09 del río San Juan de Sora de Sora no está considerado en la determinación de la curva lineal para las citadas Figuras.

Relación entre la turbidez y Sólidos totales suspendidos (STS)

Con respecto a la Figura 5.52, la relación lineal en escala logarítmica entre la turbidez y los STS de los puntos de agua subterránea y superficial de Perú y Bolivia determinó un R² de 0,9848 y una pendiente de 0,4608. Dicha relación lineal comienza en valores de turbidez de 10 UNT y STS de 10 mg/l, siendo el límite de cuantificación (L.C) igual a 3.

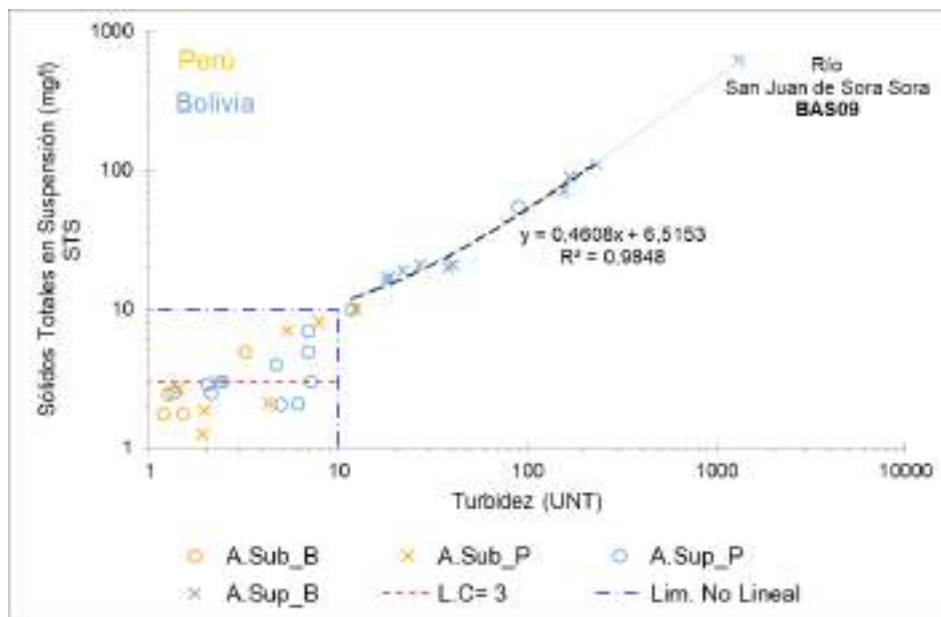


Figura 5.52: Relación entre la turbidez y los Sólidos totales en suspensión (STS) en escala potencial del agua superficial y subterránea de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

De otro lado, la extrapolación de dicha curva (ver Figura 5.53) determinó referencialmente el valor de turbidez en el punto BAS09 del río San Juan de Sora de Sora con 1320 UNT, puesto que el valor del turbidímetro HACH 2100Q fue mayor al límite superior (> 1000 UNT).

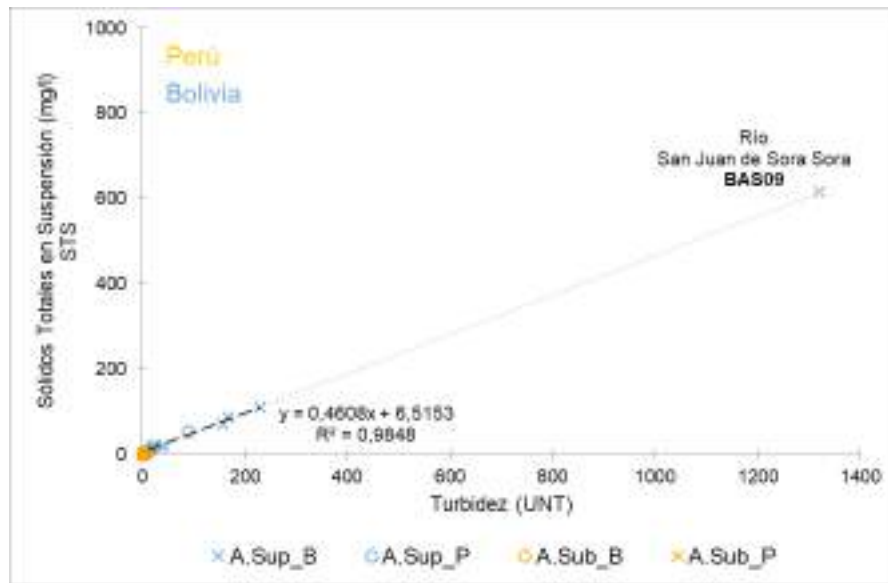


Figura 5.53: Relación entre la turbidez y los Sólidos totales en suspensión (STS) en escala lineal del agua superficial y subterránea de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

2) Error de balance iónico (EBI)

Previa a la evaluación hidroquímica mediante los diferentes diagramas hidroquímicos, se evaluó el error de balance iónico (EBI) del agua subterránea y superficial evaluado en septiembre 2021. En caso de que la concentración de un ión sea menor al límite de cuantificación, el valor considerado fue la mitad de dicho límite. La Figura 5.54 muestra los valores de EBI, los cuales fueron menores al 10%, a excepción del río Mauri – salida de la laguna Vilacota (PAS10) con 11,4% y río Lauca (BAS12) con 10,6%.

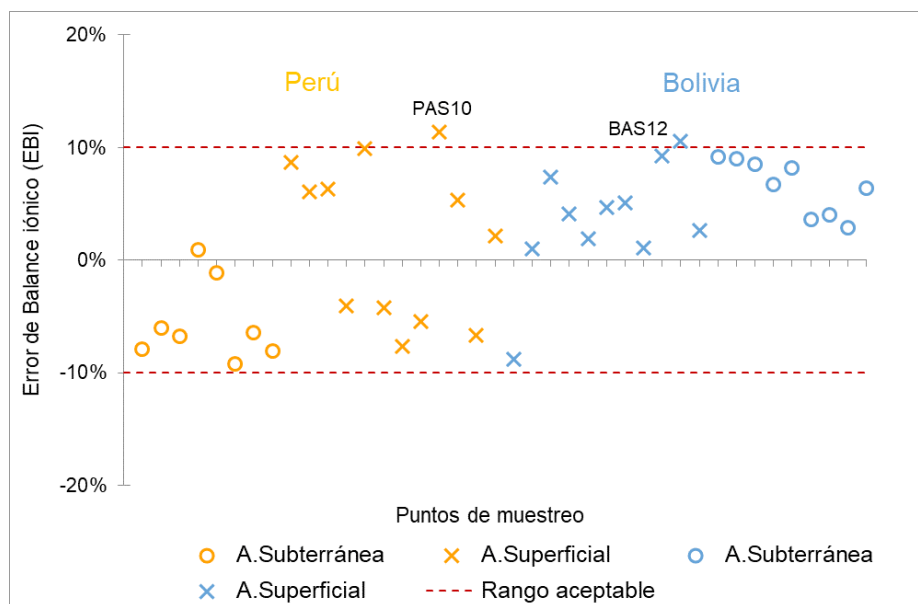


Figura 5.54: Error de balance iónico (EBI) del agua superficial y subterránea de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

3) Facie hidroquímica

De acuerdo con los porcentajes, calculado en base a las concentraciones (en meq/l) de los principales aniones y cationes, se determinó las facies hidroquímicas de los cuerpos de agua superficial y los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia en el sistema TDPS; los cuales se muestran en las Tablas 5.7 y 5.8, respectivamente.

Tabla 5.7: Facie hidroquímica de los cuerpos de agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS

Punto de muestreo	Cuerpo de agua (Río)	Facies	Anión			Cation			
			HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	Ca ⁺	Al ³⁺	Fe ³⁺
Perú									
PAS01	Huancané	Cl-Na							
PAS02	Ramis	SO ₄ -HCO ₃ -Na-Ca							
PAS03	Ramis	SO ₄ -Cl-Na							
PAS04	Coata	Cl-Na							
PAS05	Coata	Cl-Na							
PAS06	Coata	Cl-Na							
PAS07	Ilave	Cl-HCO ₃ -Na							
PAS08	Ilave	Cl-HCO ₃ -Na							
PAS10	Mauri	HCO ₃ -Na							
PAS11	Mauri	Cl-Na							
PAS12	Desaguadero	Cl-Na							
PAS13	Ilpa	Cl-Na							
Bolivia									
BAS01	Katari	HCO ₃ -Na							
BAS02	Desaguadero	Cl-Na							
BAS03	Mauri	Cl-Na							
BAS04	Desaguadero	Cl-Na							
BAS05	Maure	Cl-Na							
BAS07	Desaguadero	Cl-Na							
BAS09	San Juan de Sora Sora	SO ₄ -Al-Fe							
BAS10	Desaguadero	Cl-Na							
BAS11	Desaguadero	Cl-Na							
BAS12	Lauca	Cl-HCO ₃ -Na							
BAS13	Laka Jahuirá	Cl-Na							

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.8: Facie hidroquímica de los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia – sistema TDPS

Punto de muestreo	Ubicación del pozo	Facies	Anión			Cation			
			HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	Ca ⁺	Mg ⁺	K ⁺
Perú									
PAU01*	Urb. Nuevo Amanecer - Juliaca	HCO ₃ -Ca							
PAU02*	Sur de la PTAR y ex botadero Chilla - Juliaca	Cl-HCO ₃ -Na-Mg							
PAU03*	Noroeste estadio Guillermo Briceño - Juliaca	Cl-HCO ₃ -Na-Ca							
PAU04*	C.P Almozanche en Coata - Puno	HCO ₃ -K-Na							
PAU05*	Pozo con electrobomba en Coata - Puno	HCO ₃ -Ca							
PAU06*	Pozo con electrobomba en Coata - Puno	Cl-Ca-Na-Mg							
PAU07*	Pozo en Huata - Puno	SO ₄ -Ca							
PAU08*	Pozo con electrobomba en Huata - Puno	HCO ₃ -Na-Ca							
Bolivia									
BAU01*	Pozo en la localidad Kemalla – Distrito Caracoro	HCO ₃ -Mg							
BAU02**	Pozo SeLA-Oruro en el pueblo Challapampa Chico	HCO ₃ -Na							
BAU03**	Pozo PP-24 SeLA-Oruro en la Urb. Villa Esperanza	HCO ₃ -Na							
BAU04**	Pozo Los Ángeles-Cio de SeLA-Oruro	Cl-Na							
BAU05**	Pozo SeLA-Oruro en la plaza San Isidro	SO ₄ -HCO ₃ -Na							
BAU06*	Pozo en la comunidad Antiña – Distrito Escara	HCO ₃ -Na							
BAU07*	Pozo en la localidad Maramara – Distrito Andamarca	HCO ₃ -Na-Ca							
BAU09*	Pozo en Santuario de Quillacas	Cl-Na							
BAU10*	Poo en la U.E “María Sanchez de Fernandez” de Pampa Aullagas	Cl-HCO ₃ -Na							

* Pozo de tajo abierto.

** Pozo de producción.

Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a los resultados de la Tabla 5.7, el agua superficial en Perú fue clorurada – sódica (Cl-Na) en siete puntos de muestreo de los ríos Huancané (PAS01), Coata (PAS04, PAS05 y PAS06), Ilpa (PAS13), Mauri (PAS11) y Desaguadero (PAS12). Mientras que, en Bolivia solo tres puntos registraron facies hidroquímicas diferentes a la clorurada – sódica (Cl-Na), en los ríos Katari (BAS01), San Juan de Sora Sora (BAS09) y Lauca (BAS12).

Con relación al agua subterránea (Tabla 5.8), la facie hidroquímica es variada con mayor número de pozos que registraron el anión bicarbonato (HCO₃) y catión sodio (Na) como iones predominantes. Cabe señalar que solo dos pozos: BAU04 (SeLA-Oruro) y BAU09 (Santuario de Quillacas) tuvieron facie clorurada sódica (Cl-Na).

4) Diagrama hidroquímicos

Los diagramas hidroquímicos de pozos de agua subterránea y cuerpos de agua superficial de Perú y Bolivia del sistema TDPS son gráficos de diferentes formas geométricas: Piper, Stiff, Gibbs y Mifflin.

Diagrama de Piper

El diagrama de Piper³⁴ modificado se presenta en la Figura 5.55 para agua superficial y Figura 5.56 para agua subterránea, en donde se muestra la distribución en un plano rómbico de las facies hidroquímicas indicadas en las Tablas 5.7 y 5.8, respectivamente. Este plano se origina de la proyección de dos planos triangulares de cationes (izquierda) y aniones (derecha).

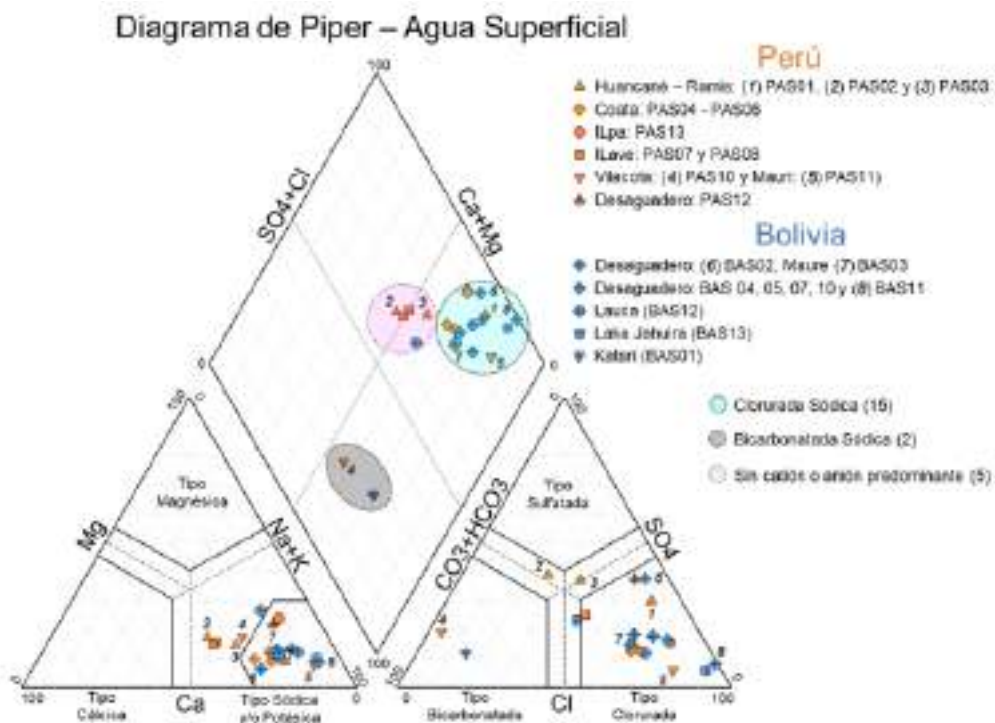


Figura 5.55: Diagrama de Piper de los pozos de agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

La Figura 5.55 muestra que 15 ríos (7 en Perú y 8 en Bolivia) tuvieron facie clorurada sódica ($ClNa$) y dos ríos (PAS10 – Mauri y BAS01 - Katari) registraron facie bicarbonatada sódica (HCO_3Na), mientras que los otros cinco ríos no reportaron anión y/o catión predominante.

En caso de la Figura 5.56, se observa que nueve pozos tuvieron cinco facies hidroquímicas con un anión y catión predominante, siendo los bicarbonatos los de mayor registro en seis pozos; en tanto, la misma cantidad de pozos (3) reportaron sodio, calcio y magnesio. Finalmente, ocho pozos no tuvieron un anión y/o catión predominante; tal como indica la Tabla 5.3.

34 El diagrama de Piper no consideró al nitrato debido a que sus concentraciones en meq/l no cambia las facies hidroquímicas y al río San Juan de Sora Sora (BAS09) porque sus principales cationes son el aluminio (Al) y hierro (Fe).

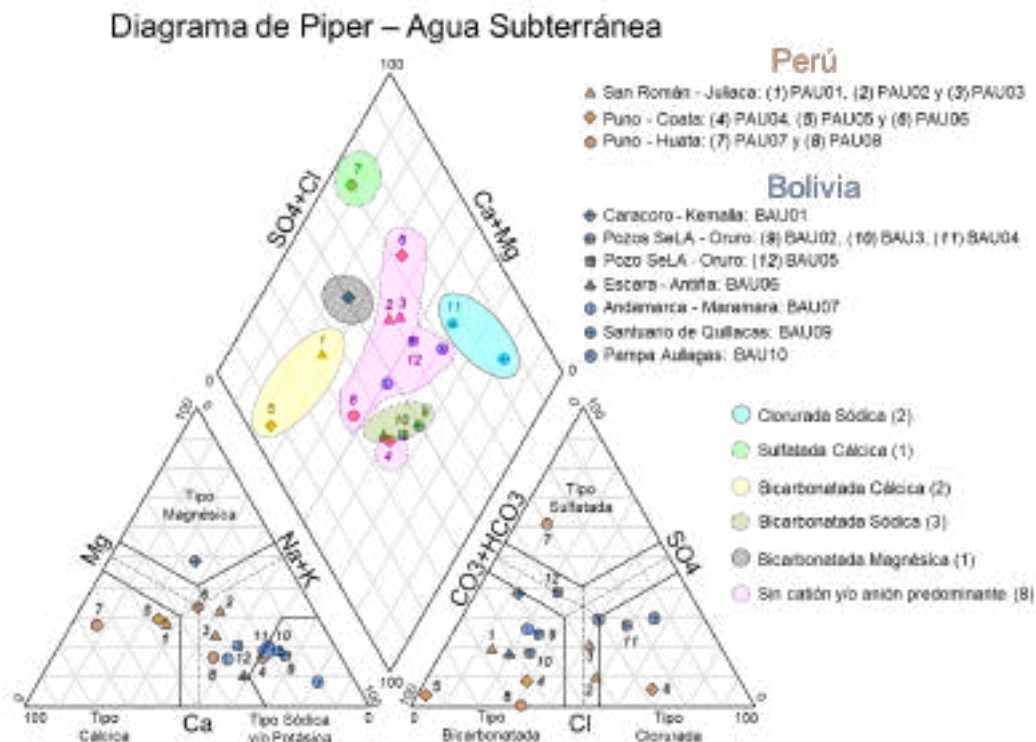


Figura 5.56: Diagrama de Piper de los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

La distribución espacial a escala de las facies hidroquímicas para el agua superficial y subterránea se pueden observar en las Figuras 5.57 y 5.58 que corresponden en el lado de Perú. Mientras que en las Figuras 5.59 y 5.60 se refieren a las que corresponden al lado de Bolivia.

Diagrama de Stiff

De acuerdo con los resultados del diagrama de Stiff³⁵ indicados en las Figuras 5.61 y 5.62 para agua subterránea y superficial respectivamente, los cuales se pueden visualizar espacialmente en los mapas hidroquímicos, hay diferentes tipos de agua de acuerdo con la estructura y tamaño de los polígonos formados; por lo que se hizo una clasificación de agrupamiento.

35 El diagrama de Stiff no consideró al río San Juan de Sora Sora (BAS09) porque sus principales cationes son el aluminio (Al) y hierro (Fe).

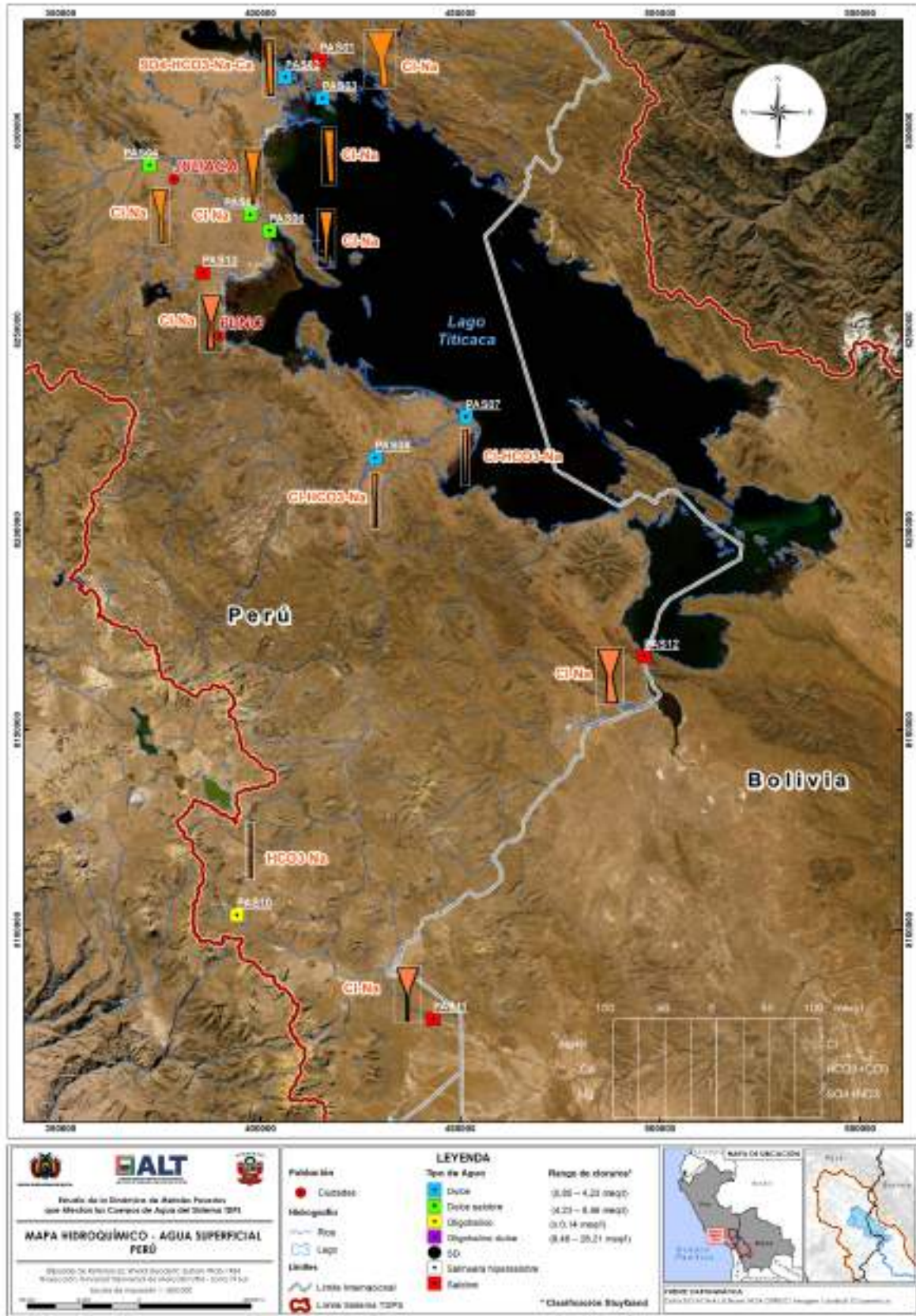


Figura 5.57: Mapa Hidroquímico de aguas superficiales (ríos) en el lado de Perú.
 Fuente: ALT, 2021.

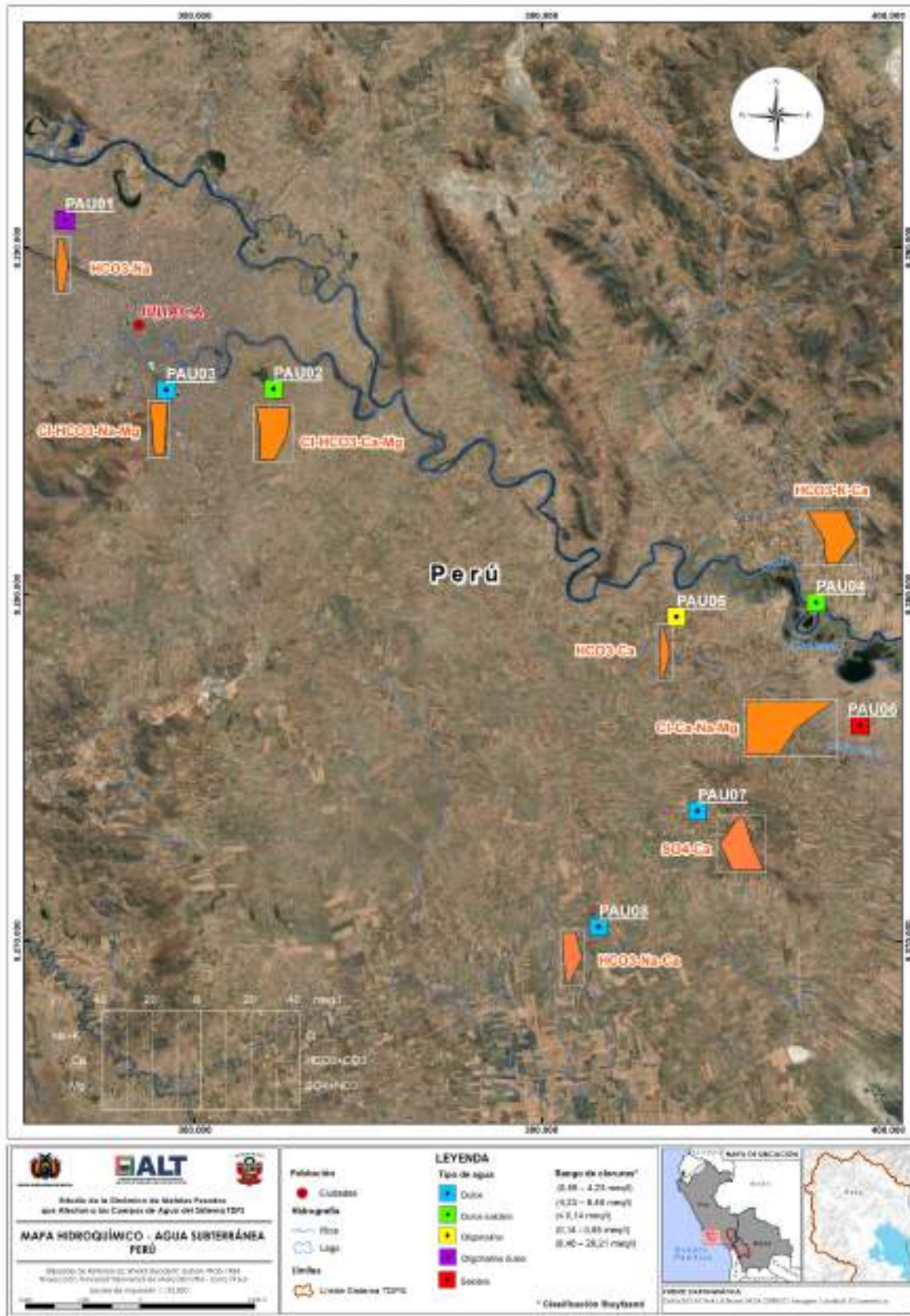


Figura 5.58: Mapa Hidroquímico de aguas subterráneas (pozos) en el lado de Perú.
 Fuente: ALT, 2021.



Figura 5.59: Mapa Hidroquímico de aguas superficiales (ríos) en el lado de Bolivia.
 Fuente: ALT, 2021.



Figura 5.60: Mapa Hidroquímico de aguas subterráneas (pozos) en el lado de Bolivia.
Fuente: ALT, 2021.

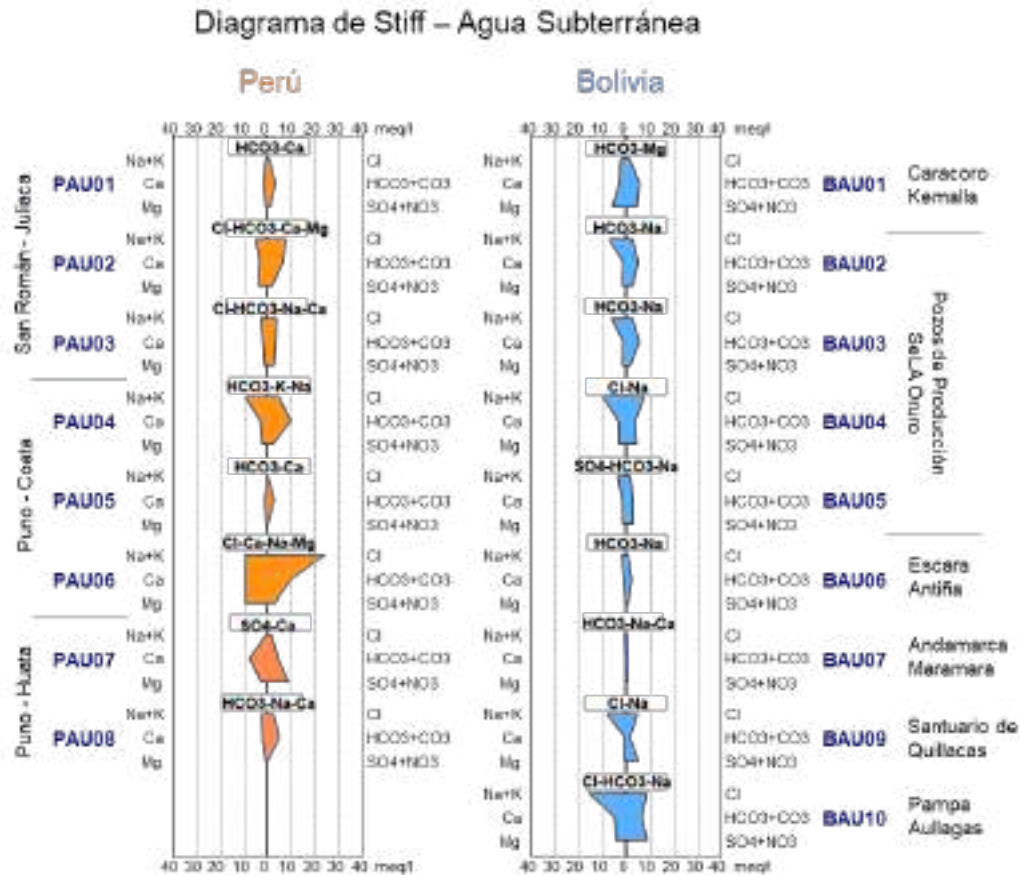


Figura 5.61: Diagrama de Stiff de de agua subterránea de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

El citado agrupamiento de los puntos de muestreo se realizó en base a la concentración de cloruro (Cl) conocido como clasificación de Stuyfzand (1993)³⁶. De esa manera, de los resultados de la Tabla 5.9 de tipo de agua superficial, se resalta que cuatro puntos de muestreo en los ríos de Perú: Huancané (PAS01), Mauri (PAS11), Desaguadero (PAS12) e Ilpa (PAS13) y en Bolivia: tres puntos Desaguadero (BAS02, BAS07 y BAS10) y uno en Mauri (BAS05) fueron del tipo salobres y facie clorurada sódica (Cl-Na).

De otro lado, el río Coata en sus tres puntos (PAS04, PAS05 y PAS06) de Perú y el río Mauri (BAS03) y Desaguadero (BAS04) de Bolivia fueron dulce – salobre con tendencia a salobre (cloruro > 230 mg/l); en cambio, el río Lauca (BAS12) fue dulce – salobre con tendencia a dulce (cloruro de 182 mg/l). El río Desaguadero - Puente Aroma (BAS11) es el único punto salino y Laka Jahuira – localidad de Maramara (BAS13) el único que fue salobre – salino con tendencia a salobre en el sistema TPPS (cloruro de 1853 mg/l).

36 Stuyfzand (1993) clasifica en 8 grupos los tipos de agua en base a la concentración de cloruro en mg/l (en meq/l):

Oligohalino	≤ 5 mg/l (0,14 meq/l)	Salobre	300–1000 mg/l (8,46–28,21 meq/l)
Oligohalino-Dulce	5 - 30 mg/l (0,14–0,85 meq/l)	Salobre-Salina	1000–10000 mg/l (28,21–282,1 meq/l)
Dulce	30 - 150 mg/l (0,85–4,23 meq/l)	Salina	10000–20000 mg/l (282,1–564,13 meq/l)
Dulce-Salobre	150 -300 mg/l (4,23–8,46 meq/l)	Salmuera o Hipersalina	> 20000 mg/l (> 564,13 meq/l)

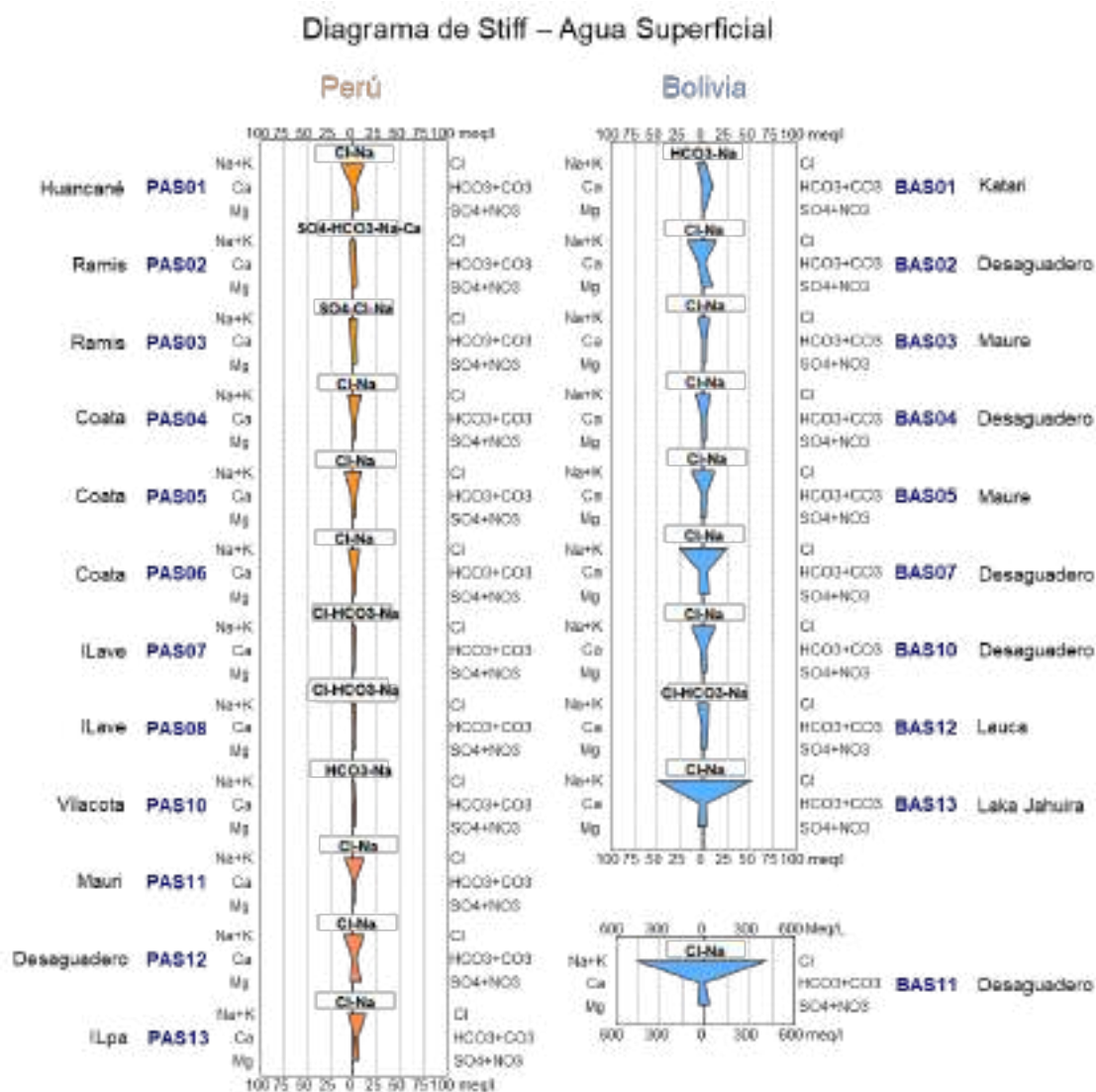


Figura 5.62: Diagrama de Stiff de agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

Tabla 5.9: Clasificación de Stuyfzand del agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS

Punto de muestreo	Cuerpo de agua - río (<i>Facie</i>)	Tipo de Agua (Cloruro, mg/l)							
		Oligohalino	Olig.-Dul.	Dulce (Dul.)	Dul.-Salo.	Salobre (Salo.)	Salo.-Sali.	Salina (Sali.)	Salmuera Hipersalina
		5	5-30	30-150	150-300	300-1000	1000-10000	10000-20000	> 20000
Perú									
PAS01	Huancané (Cl-Na)					370			
PAS02	Ramis (SO ₄ -HCO ₃ -Na-Ca)			74					
PAS03	Ramis (SO ₄ -Cl-Na)			118					
PAS04	Coata (Cl-Na)				252				
PAS05	Coata (Cl-Na)				261				
PAS06	Coata (Cl-Na)				247				
PAS07	Ilave (Cl-HCO ₃ -Na)			76					
PAS08	Ilave (Cl-HCO ₃ -Na)			87					
PAS10	Mauri (HCO ₃ -Na)	4							
PAS11	Mauri (Cl-Na)					376			
PAS12	Desaguadero (Cl-Na)					377			
PAS13	Ilpa (Cl-Na)					364			
Bolivia									
BAS01	Katari (HCO ₃ -Na)			69					
BAS02	Desaguadero (Cl-Na)					505			
BAS03	Mauri (Cl-Na)				234				
BAS04	Desaguadero (Cl-Na)				280				
BAS05	Mauri (Cl-Na)					444			
BAS07	Desaguadero (Cl-Na)					929			
BAS09	San Juan de Sora Sora (SO ₄ -Al-Fe)		27						
BAS10	Desaguadero (Cl-Na)					461			
BAS11	Desaguadero (Cl-Na)							14993	

Punto de muestreo	Cuerpo de agua - río (Facies)	Tipo de Agua (Cloruro, mg/l)							
		Oligohalino	Olig.-Dul.	Dulce (Dul.)	Dul.-Salo.	Salobre (Salo.)	Salo.-Sali.	Salina (Sali.)	Salmuera Hipersalina
		5	5-30	30-150	150-300	300-1000	1000-10000	10000-20000	> 20000
BAS12	Lauca (Cl-HCO ₃ -Na)				182				
BAS13	Laka Jahuirá (Cl-Na)						1853		

Olig.-Dul.: Oligohalino-Dulce, Dul.-Salo.: Dulce-Salobre y Salo.-Sali.: Salobre-Salino.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del tipo de agua subterránea se visualizan en la Tabla 5.10. Al respecto, en Perú solo un pozo de tajo abierto de Coata-Puno (PAU06) fue salobre con facie Cl-Ca-Na-Mg y así como el pozo de Pampa Aullagas (BAU10) en Bolivia con facie Cl-HCO₃-Na.

Tabla 5.10: Clasificación de Stuyfzand del agua subterránea de Perú y Bolivia – sistema TDPS

Punto de muestreo	Ubicación del pozo (Facies)	Tipo de Agua (Cloruro, mg/l)							
		Oligohalino	Olig.-Dul.	Dulce (Dul.)	Dul.-Salo.	Salobre (Salo.)	Salo.-Sali.	Salina (Sali.)	Salmuera Hipersalina
		5	5-30	30-150	150-300	300-1000	1000-10000	10000-20000	> 20000
Perú									
PAU01*	Urb. Nuevo Amanecer – Juliaca (HCO ₃ -Ca)		22						
PAU02*	Sur de la PTAR y ex botadero Chilla – Juliaca (Cl-HCO ₃ -Na-Mg)				277				
PAU03*	Noroeste estadio Guillermo Briceño – Juliaca (Cl-HCO ₃ -Na-Ca)			116					
PAU04*	C.P Almozanche en Coata – Puno (HCO ₃ -K-Na)				162				
PAU05*	Pozo con electrobomba en Coata – Puno (HCO ₃ -Ca)	3							
PAU06*	Pozo con electrobomba en Coata – Puno (Cl-Ca-Na-Mg)					850			
PAU07*	Pozo en Huata – Puno (SO ₄ -Ca)			45					
PAU08*	Pozo con electrobomba en Huata – Puno (HCO ₃ -Na-Ca)			81					
Bolivia									
BAU01*	Pozo en la localidad Kemalla – Distrito Caracoro (HCO ₃ -Mg)			46					

Punto de muestreo	Ubicación del pozo (Facies)	Tipo de Agua (Cloruro, mg/l)							
		Oligohalino	Olig.-Dul.	Dulce (Dul.)	Dul.-Salo.	Salobre (Salo.)	Salo.-Sali.	Salina (Sali.)	Salmuera Hipersalina
		5	5-30	30-150	150-300	300-1000	1000-10000	10000-20000	> 20000
BAU02**	Pozo SeLA-Oruro en el pueblo Challapampa Chico (HCO ₃ -Na)			84					
BAU03**	Pozo PP-24 SeLA-Oruro en la Urb. Villa Esperanza (HCO ₃ -Na)			83					
BAU04**	Pozo Los Angeles-Cio de SeLA-Oruro (Cl-Na)				273				
BAU05**	Pozo SeLA-Oruro en la plaza San Isidro (SO ₄ -HCO ₃ -Na)			55					
BAU06*	Pozo en la comunidad Antaña – Distrito Escara (HCO ₃ -Na)		28						
BAU07*	Pozo en la localidad Maramara – Distrito Andamarca (HCO ₃ -Na-Ca)		11						
BAU09*	Pozo en Santuario de Quillacas (Cl-Na)				157				
BAU10*	Pozo en la U.E “María Sánchez de Fernández” de Pampa Aullagas (Cl-HCO ₃ -Na)					305			

Olig.-Dul.: Oligohalino-Dulce, Dul.-Salo.: Dulce-Salobre y Salo.-Sali.: Salobre-Salino.

* Pozo de tajo abierto.

** Pozo de producción.

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, el pozo de tajo abierto PAU02 (Juliaca) de Perú y pozo de producción BAU04 (SeLA-Oruro) de Bolivia fueron dulce – salobre con tendencia a salobre (cloruro > 270 mg/l); por el contrario, el pozo PAU04 (Coata- Puno) de Perú y BAU09 (Santuario de Quillacas) de Bolivia fueron dulce – salobre con tendencia a dulce (cloruro < 165 mg/l).

Diagrama de Gibbs

Con respecto al diagrama de Gibbs, presentado en las Figuras 5.63 y 5.64, las aguas subterráneas de Perú y Bolivia se encuentran en el área del dominio de la meteorización (lavado de roca), a excepción de los pozos de Pampa Aullagas (BAU10) y Coata-Puno (PAU06) que están en los límites del dominio de la evaporación y meteorización para la relación Na/Na+Ca vs STD y Cl/Cl+HCO₃ vs STD respectivamente.

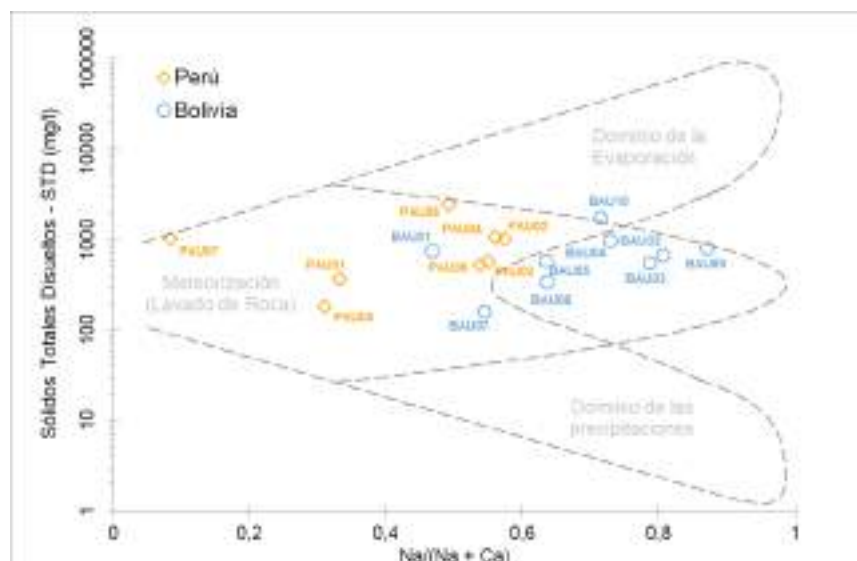


Figura 5.63: Diagrama de Gibbs ($Na/(Na+Ca)$ vs STD) de los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.

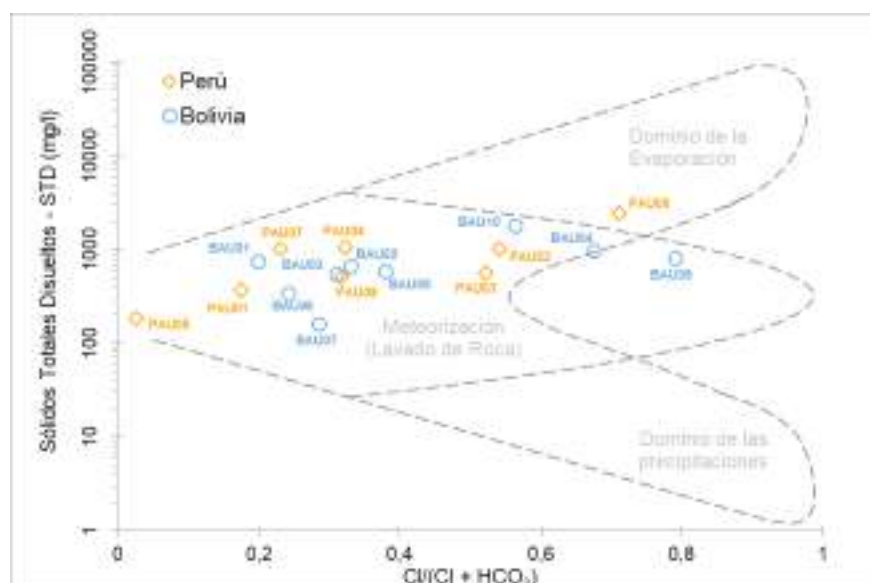


Figura 5.64: Diagrama de Gibbs ($Cl/(Cl+HCO_3)$ vs STD) de los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.

Diagrama de Mifflin

La predominancia química de las aguas subterráneas de Perú y Bolivia fue relacionada con la evolución de los flujos subterráneos mediante el diagrama de Mifflin (ver Figura 5.65). Los flujos se caracterizan principalmente por ser del tipo intermedio en ocho pozos, luego seis pozos por ser de flujo local y tres pozos por ser de flujo regional.

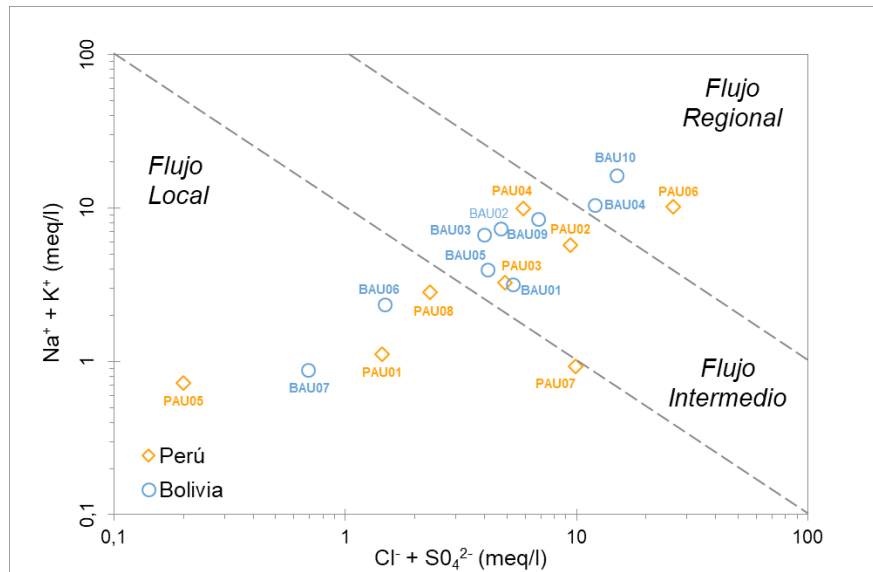


Figura 5.65: Diagrama de Mifflin de los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.

5) Relación rNa/Cl y rCa/rMg

Esta relación constituye un indicio para determinar tanto la fuente de iones a través de la disolución de minerales de silicatos, calcita y dolomita (rCa/rMg), y el intercambio iónico de sodio por calcio y magnesio con disolución de la halita (rNa/rCl) del agua de origen subterráneo. La Figura 5.66 indica que hay diferencia en la fuente de iones en los pozos de tajo abierto en el Perú. Así, el pozo PAU05 de Coata-Puno no está en el contexto del intercambio iónico por disolución de la Halita (NaCl) como los demás pozos en Perú principalmente el pozo PAU06.

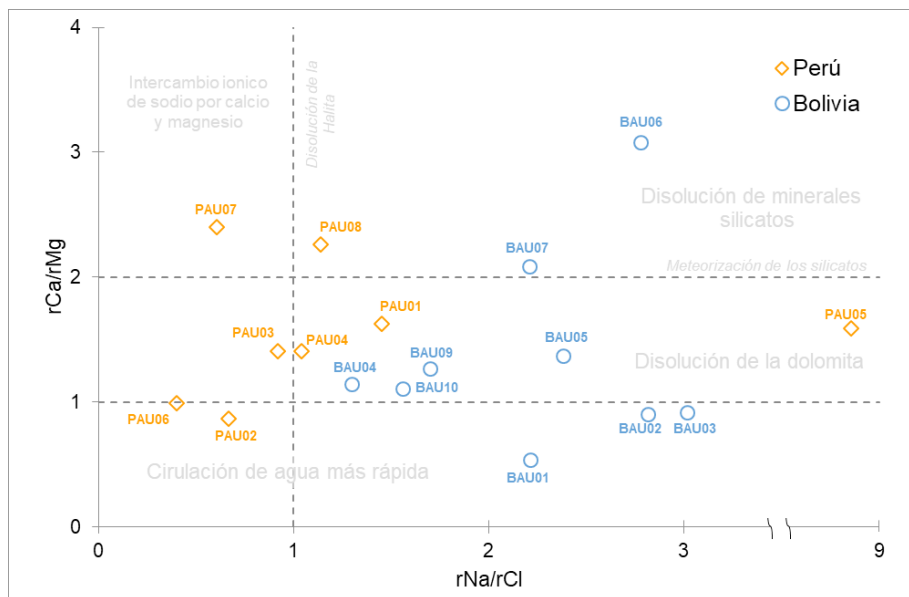


Figura 5.66: Relación rNa/Cl y rCa/rMg de los pozos de aguas subterránea de Perú y Bolivia.

Con respecto a la relación rCa/rMg , se tiene que PAU07 y PAU08 de Huata-Puno están en el ámbito de disolución de minerales silicatos, los pozos PAU01 y PAU03 de la ciudad de Juliaca, así como PAU04 y PAU05 de Huata-Puno están en el rango de la disolución de la dolomita. Finalmente, los pozos PAU06 de Coata-Puno y PAU02 de la ciudad de Juliaca están en el límite de la disolución de la dolomita y circulación de agua más rápida.

Para el caso de los pozos de Bolivia, la fuente de los iones esta de poco a nada relacionado a la disolución de la Halita debido al valor de $rNa/rCl > 1$, con diferencias en puntos cercanos como los pozos SeLA-Oruro BAU02, BAU03 y BAU05 del otro pozo BAU04.

Con respecto a la relación rCa/rMg , el pozo de tajo abierto de la comunidad de Antaña – municipio de Escara (BAU06) está en el ámbito de la disolución de los silicatos, los pozos SeLA (BAU05 y BAU04), Santuario de Quillacas (BAU09) y Pampa Aullagas (BAU10) en el contexto de la disolución de la dolomita, los pozos SeLA (BAU02 y BAU03) en el límite de la disolución de la dolomita y circulación de agua más rápida; y finalmente y el pozo de la localidad de Caracoro del municipio de Kemalla (BAU01) relacionado a la circulación de agua más rápida.

6 Índices cloro alcalino (CAI)

De acuerdo con la Figura 5.67, los valores de CAI1 y CAI2 sobre los efectos de intercambio catiónico en la evolución de la calidad del agua subterránea, fueron negativos para los pozos de Bolivia (pozos SeLA-Oruro y tajo abierto), al igual que los pozos de Juliaca (PAU01), Coata-Puno (PAU04 y PAU06) y Huata-Puno (PAU07) de Perú por lo que hay un reemplazo de los iones calcio y magnesio de la solución con el sodio y potasio de las rocas. Caso contrario (intercambio iónico inverso) que ocurre en los pozos de Juliaca (PAU02 y PAU03), Coata-Puno (PAU05) y Huata-Puno (PAU08).

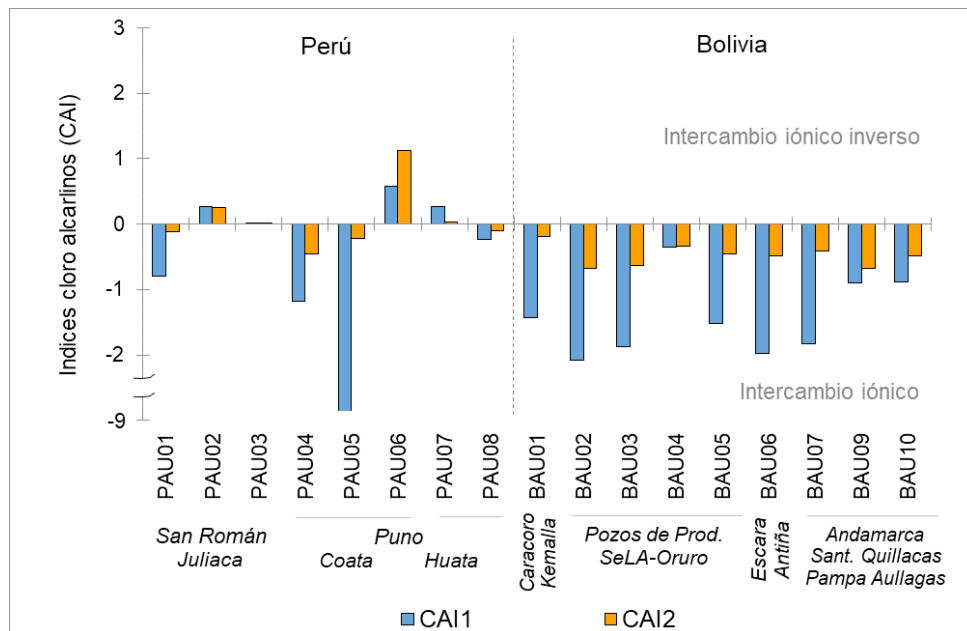


Figura 5.67: Índices cloro alcalinos (CAI) de los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia.

5.1.5 Especiación química del arsénico en el agua superficial y subterránea

Los resultados del arsenito (As III) en relación con el arsénico total se visualiza en la Figura 5.68 para diciembre 2020, en el cual la especie de As III está en forma disuelta y no disuelta, mientras que la Figura 5.69 se muestra el arsenito disuelto o soluble para septiembre 2021. Los resultados de las especies de arsénico de agua superficial y subterránea están en las Tablas 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4.

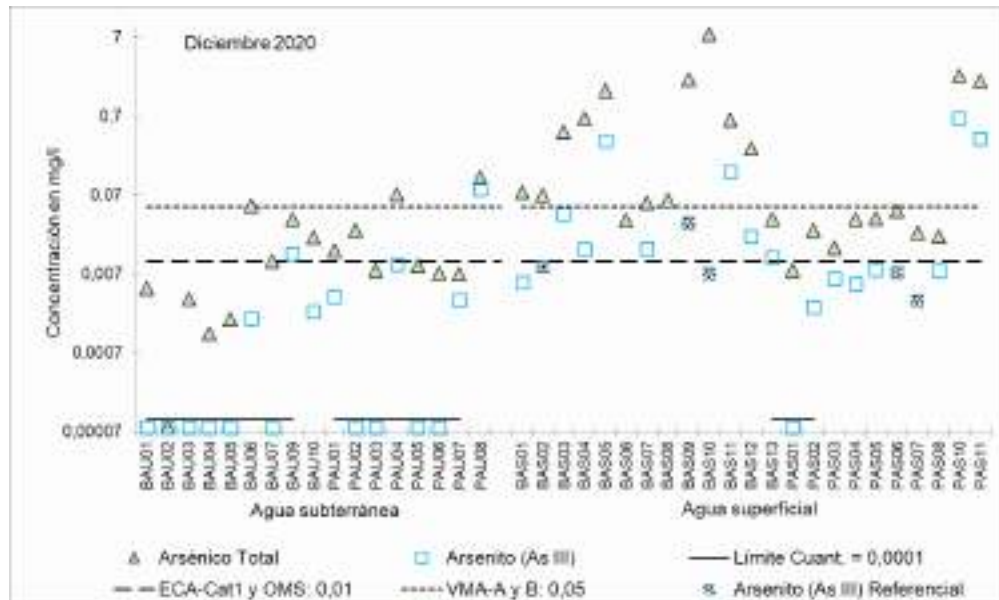


Figura 5.68: Concentraciones de arsénico total y arsenito (As III) en diciembre 2020 del agua subterránea y superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

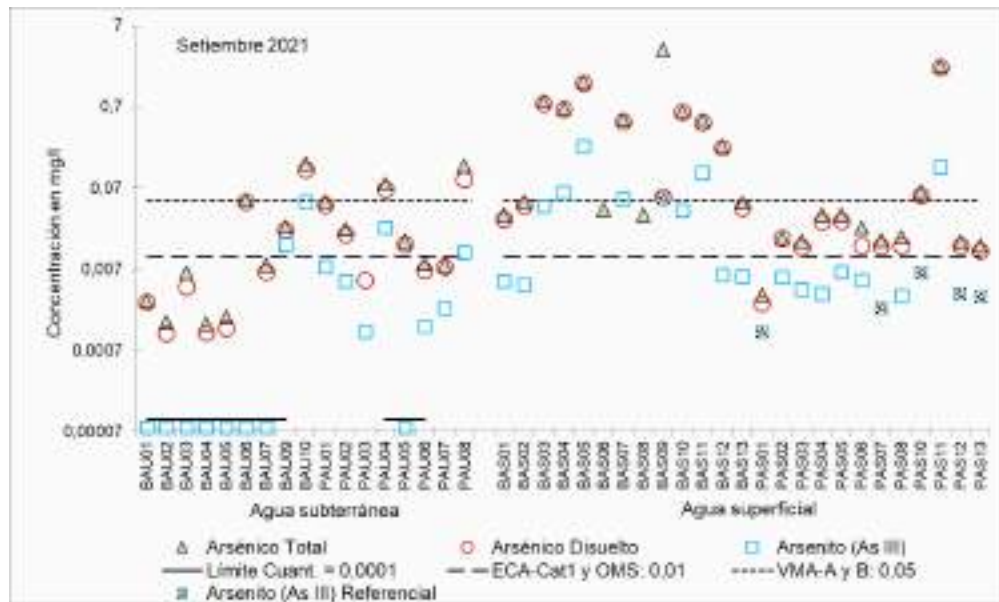


Figura 5.69: Concentraciones de arsénico total y arsenito (As III) en septiembre 2021 del agua subterránea y superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

En la citada Figura 5.68 muestra que el arsenito (As III) disuelto y no disuelto en los pozos de agua subterránea en diciembre de 2020 fueron menores al límite de cuantificación del laboratorio en seis pozos de Bolivia y cuatro pozos de Perú; mientras que, la Figura 5.69 señala que siete pozos de Bolivia y un pozo de Perú fueron menores al citado límite.

Los porcentajes de las concentraciones de arsenito (As III) en diciembre 2020 se visualizan en la Figura 5.70, en donde las concentraciones de 12 pozos de agua subterránea superaron el valor de 0,01 mg/l de la OMS, con un 73% de predominancia en el pozo de Huata (PAU08), mientras que los demás estuvieron menor al 50%. Para el caso de septiembre 2021 (ver Figura 5.71), 12 pozos registraron concentraciones de arsenito (As III) mayores al valor de la OMS de 0,01 mg/l, de los cuales solamente el pozo de Santuario de Quillacas (BAU09) registró predominancia con un 59%.

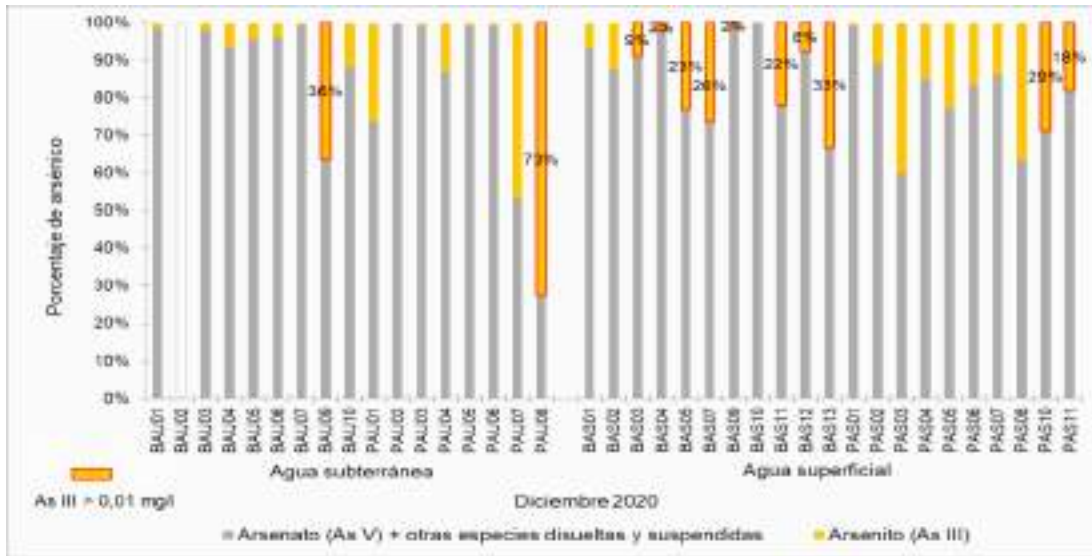


Figura 5.70: Porcentajes de las especies de arsénico en diciembre 2020 del agua subterránea y superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

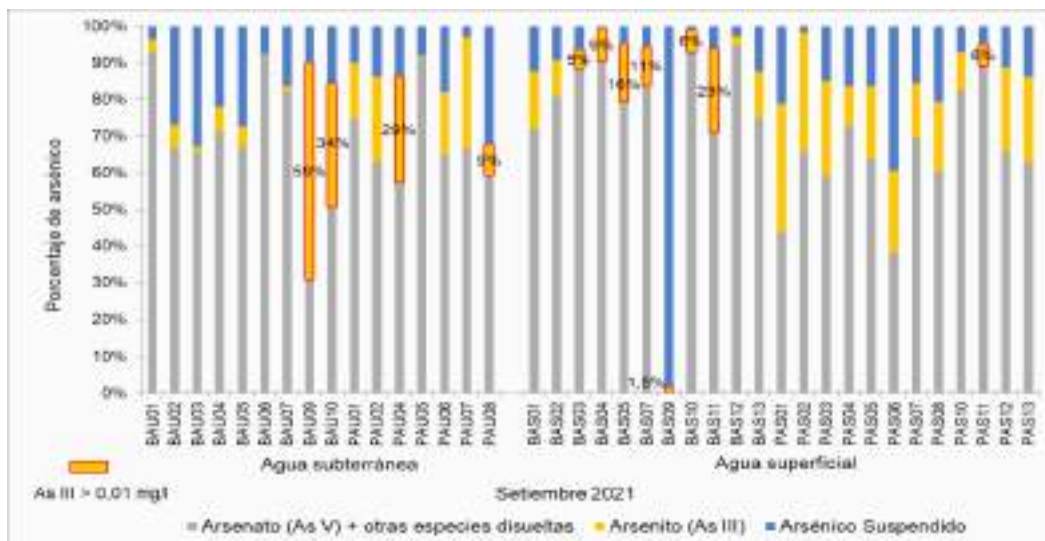


Figura 5.71: Porcentajes de las especies de arsénico en septiembre 2021 del agua subterránea y superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

No obstante, excepto en los pozos de agua subterránea cuyas concentraciones de arsenato (AS V) y otras especies disueltas y suspendidas menores al límite de cuantificación del laboratorio acreditado (< 0,0001 mg/l) y con más del 90% de porcentaje, no pudo ser modelado con el programa PHREEQC que ajusta la concentración de las especies de un metal en relación con su entorno fisicoquímico como los cationes metálicos para obtener el equilibrio, el índice de saturación específico y el equilibrio de carga (Parkhurst y Appelo, 2013).

Según los resultados obtenidos, se observa que, tanto en las aguas subterráneas como superficiales, en el ámbito de estudio predomina el As V.

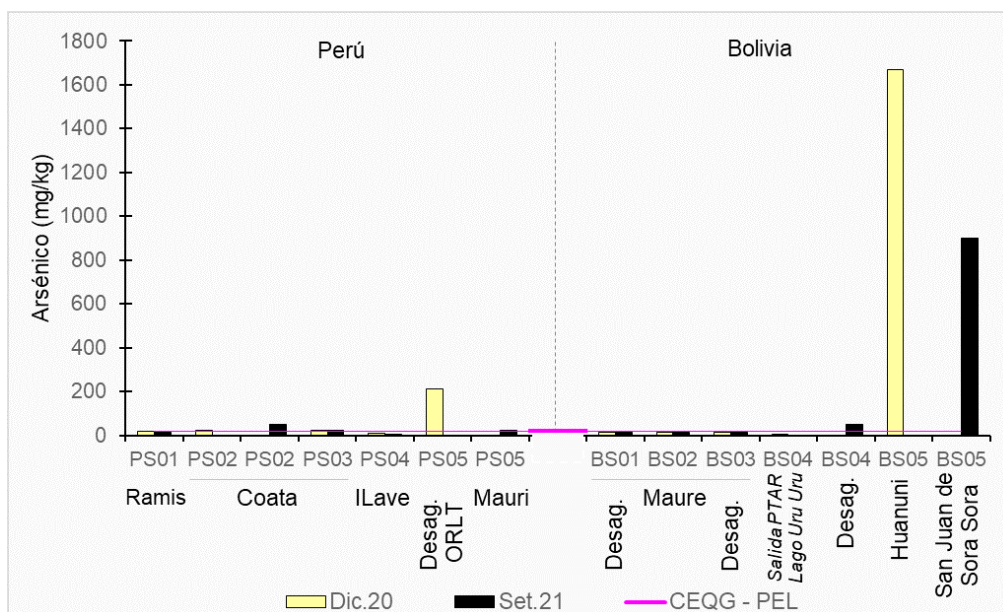
5.2 CALIDAD DE LOS SEDIMENTOS EN RELACIÓN A LOS METALES PESADOS

En este ítem se presenta los metales cuyas concentraciones fueron mayores a los valores referenciales ISQG y con énfasis en el valor del Nivel de Efecto Probable (*PEL - Probable Effect Level*), establecidos en las CEQG-SQG: *Canadian Environmental Quality Guidelines. Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life – Fresh water*. La comparación con el estándar internacional se debe a que en el Perú y Bolivia no se cuenta con normativa nacional que establezca los valores de comparación para determinar la calidad de los sedimentos. Dichas comparaciones de los puntos de muestreo se visualizan en las Tablas 5.11 y 5.12.

Cabe resaltar que, cuatro puntos de muestreo cambiaron de ubicación en diciembre 2020 y septiembre 2021 de la siguiente manera: PS02 en el río Coata en Puente Unocolla y en la zona de mezcla con el lago Titicaca; PS05 en el río Desaguadero – compuerta de la ORLT y Mauri – salida de laguna Vilacota, BS04 en la salida de la PTAR – Oruro al lago Uru Uru y el río Desaguadero – Puente Español y BS05 en el río Huanuni y el río San Juan de Sora Sora. La comparación de resultados de sedimentos (Bolivia y Perú) con la normativa canadiense se presenta en las Tablas 5.11 y 5.12.

Arsénico y plomo

De acuerdo con las Figuras 5.72 y 5.73, la más alta concentración de arsénico y plomo fue registrada en el río Huanuni (BS05) en diciembre 2020, seguido del punto de muestreo aguas arriba en el río San Juan de Sora Sora (BS05) en septiembre 2021. Los citados resultados fueron mayores a los valores respectivos de cada metal establecidos en el Nivel de Efecto Probable (*PEL - Probable Effect Level*) de las CEQG-SQG.



Desag.: Desaguadero y Desag. ORLT: Desaguadero en las compuertas de la obra de regulación Lago Titicaca.

Figura 5.72: Concentración de arsénico en los sedimentos de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

Tabla 5.11: Comparación referencial de los resultados de sedimentos de los ríos de Perú con la normativa canadiense

Metal	Fecha	CEDG		28/09/2021		19/12/2020		29/09/2021		19/12/2020		28/09/2021		20/12/2020		28/09/2021	
	Hora	ISQG	PEL	PS01		PS02		PS02		PS02		PS03		PS04		PS05	
	Unidad																
Plata Total	mg/kg	--	--	<0,268	<0,268	0,270	0,547	<0,268	<0,268	<0,268	<0,268	<0,268	<0,268	<0,268	<0,268	<0,268	<0,268
Aluminio Total	mg/kg	--	--	5032,376	3830,363	7627,443	9314,296	4821,229	3483,930	6803,157	3671,769	3054,183	6025,862	3054,183	6025,862	3054,183	6025,862
Arsénico Total	mg/kg	5,9	17	19,365	14,331	24,075	48,388	22,947	21,748	9,861	5,111	211,063	24,760	211,063	24,760	211,063	24,760
Boro Total	mg/kg	--	--	<17,195	<17,195	<17,195	28,172	<17,195	<17,195	<17,195	<17,195	<17,195	46,107	<17,195	<17,195	<17,195	<17,195
Bario Total	mg/kg	--	--	134,706	128,875	159,799	218,923	73,244	69,658	116,228	57,544	75,685	105,898	75,685	105,898	75,685	105,898
Berilio Total	mg/kg	--	--	0,685	0,527	0,826	0,878	0,407	0,388	0,355	0,205	<0,173	0,214	<0,173	0,214	<0,173	0,214
Bismuto Total	mg/kg	--	--	<0,103	0,204	0,103	0,352	<0,103	0,157	<0,103	0,182	<0,103	0,363	<0,103	0,182	<0,103	0,363
Calcio Total	mg/kg	--	--	8619,157	5643,066	6905,597	97755,765	3379,491	2619,339	4414,157	2347,663	2034,687	27136,442	2034,687	27136,442	2034,687	27136,442
Cadmio Total	mg/kg	0,6	3,5	0,176	0,208	1,254	1,925	0,402	0,303	0,217	0,223	<0,144	0,154	<0,144	0,154	<0,144	0,154
Cobalto Total	mg/kg	--	--	5,771	4,955	8,031	8,625	7,372	5,550	6,382	4,745	6,423	4,005	6,423	4,005	6,423	4,005
Cromo Total	mg/kg	37,3	90	9,538	8,310	19,323	11,541	13,213	6,065	13,094	6,721	21,577	4,826	21,577	4,826	21,577	4,826
Cobre Total	mg/kg	35,7	197	11,257	8,831	29,432	55,842	10,154	9,503	10,841	7,784	10,103	15,091	10,103	15,091	10,103	15,091
Hierro Total	mg/kg	--	--	14771,619	12361,031	16989,026	15905,990	14929,51	9410,311	15046,412	9574,951	18071,906	9826,113	18071,906	9826,113	18071,906	9826,113
Mercurio Total	mg/kg	0,170	0,486	<0,262	<0,262	<0,262	0,639	<0,262	<0,262	<0,262	<0,262	<0,262	<0,262	<0,262	<0,262	<0,262	<0,262
Potasio Total	mg/kg	--	--	853,79	721,462	1452,489	1576,391	837,487	716,535	1017,68	499,265	740,557	1593,341	740,557	1593,341	740,557	1593,341
Lantano Total	mg/kg	--	--	9,009	8,592	18,105	16,013	18,125	16,902	12,238	10,190	9,160	5,964	9,160	5,964	9,160	5,964
Litio Total	mg/kg	--	--	15,5	13,5	12,2	23,3	8,9	7,5	10,1	6,0	11,8	19,1	11,8	19,1	11,8	19,1
Magnesio Total	mg/kg	--	--	2670,621	2374,663	3562,63	4795,447	2474,739	1874,522	2692,305	1460,241	1106,172	13511,261	1106,172	13511,261	1106,172	13511,261
Manganeso Total	mg/kg	--	--	242,825	186,942	471,801	747,620	377,088	320,388	237,038	381,871	333,549	287,007	333,549	287,007	333,549	287,007
Molibdeno Total	mg/kg	--	--	0,300	0,193	0,386	0,440	0,300	<0,182	0,353	0,197	0,525	0,566	0,525	0,566	0,525	0,566
Sodio Total	mg/kg	--	--	84,937	131,224	516,028	956,726	418,696	415,700	399,363	322,119	317,615	879,781	317,615	879,781	317,615	879,781

Metal	Fecha		CEQG	19/12/2020		29/09/2021		19/12/2020		29/09/2021		28/09/2021		20/12/2020		27/09/2021		20/12/2020		29/09/2021	
	Hora	Unidad		10:40:00	13:40	12:44:00	10:30	18:26:00	15:10	12:44:00	16:40	17:00:00	15:10	12:44:00	16:40	17:00:00	16:40	17:00:00	16:40	17:00:00	
	ISQG	PEL	PS01		PS02		PS03		PS04		PS05		PS05		PS05		PS05		PS05		
Níquel Total	—	—	9,152	7,832	14,259	15,879	9,553	7,923	6,802	4,405	5,775	4,721	4,721	5,775	4,721	4,721	5,775	4,721	4,721	4,721	4,721
Fósforo Total	—	—	411,282	509,17	896,529	903,745	771,814	759,718	450,994	508,665	466,962	685,000	685,000	466,962	685,000	685,000	466,962	685,000	685,000	685,000	685,000
Plomo Total	35,0	81,3	13,661	10,786	38,730	65,296	40,179	36,186	13,160	8,280	7,717	5,169	5,169	7,717	5,169	5,169	7,717	5,169	5,169	5,169	5,169
Arqueamiento Total	—	—	0,266	0,657	0,275	0,193	0,232	<0,131	0,227	0,348	6,124	0,361	0,361	6,124	0,361	0,361	6,124	0,361	0,361	0,361	0,361
Escandio Total	—	—	1,218	1,730	2,229	3,928	1,965	1,444	1,711	1,544	0,874	1,773	1,773	0,874	1,773	1,773	0,874	1,773	1,773	1,773	1,773
Selenio Total	—	—	<3,605	<3,605	<3,605	<3,605	<3,605	<3,605	<3,605	<3,605	<3,605	<3,605	<3,605	<3,605	<3,605	<3,605	<3,605	<3,605	<3,605	<3,605	<3,605
Estaño Total	—	—	<0,940	<0,940	1,011	<0,940	<0,940	<0,940	<0,940	<0,940	<0,940	0,896	0,896	<0,940	0,896	0,896	<0,940	0,896	0,896	0,896	0,896
Estroncio Total	—	—	42,210	33,282	110,854	1040,741	59,871	56,559	65,404	30,269	27,961	141,248	141,248	27,961	141,248	141,248	27,961	141,248	141,248	141,248	141,248
torio Total	—	—	1,711	2,495	3,809	4,668	3,816	3,476	3,106	2,222	2,064	1,822	1,822	2,064	1,822	1,822	2,064	1,822	1,822	1,822	1,822
Tiitavio Total	—	—	90,691	180,249	364,157	180,305	365,611	182,703	550,953	381,505	760,819	486,783	486,783	760,819	486,783	486,783	760,819	486,783	486,783	486,783	486,783
Talio Total	—	—	0,143	<0,093	0,723	2,746	0,340	0,338	0,291	0,125	0,347	<0,093	<0,093	0,347	<0,093	<0,093	0,347	<0,093	<0,093	<0,093	<0,093
Uranio Total	—	—	0,406	0,451	0,610	0,799	0,531	0,402	0,429	0,295	0,317	0,301	0,301	0,317	0,301	0,301	0,317	0,301	0,301	0,301	0,301
Vanadio Total	—	—	14,977	17,402	46,044	25,413	37,250	18,484	43,279	29,985	68,860	28,129	28,129	68,860	28,129	28,129	68,860	28,129	28,129	28,129	28,129
Wolframio Total	—	—	<0,231	<0,231	<0,231	<0,231	<0,231	<0,231	<0,231	<0,231	<0,231	<0,231	<0,231	<0,231	<0,231	<0,231	<0,231	<0,231	<0,231	<0,231	<0,231
Ytrio Total	—	—	5,182	4,568	8,253	9,545	6,999	6,153	5,399	4,834	3,169	2,849	2,849	3,169	2,849	2,849	3,169	2,849	2,849	2,849	2,849
Zinc Total	123	315	74,721	51,489	208,271	312,796	238,483	189,001	79,504	43,314	58,262	27,24	27,24	58,262	27,24	27,24	58,262	27,24	27,24	27,24	27,24
Circonio Total	—	—	2,061	3,243	9,238	15,515	5,745	4,559	7,878	4,712	6,710	9,593	9,593	6,710	9,593	9,593	6,710	9,593	9,593	9,593	9,593

Guía de Calidad Ambiental de Canadá – CEQG (Canadian Environmental Quality Guidelines – Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life – Fresh water).
 Informes de ensayos con valor oficial del laboratorio SGS del Perú S.A.C. acreditado por el INACAL: MA2026080 y MA2130870.

 Mayor al Nivel de Efecto Probable (PEL – Probable Effect Level).


 Mayor a la Guía de calidad de Sedimento Interino (ISQG - Interim Sediment Quality Guideline).


Tabla 5.12: Comparación referencial de los resultados de sedimentos de los ríos de Bolivia con la normativa canadiense

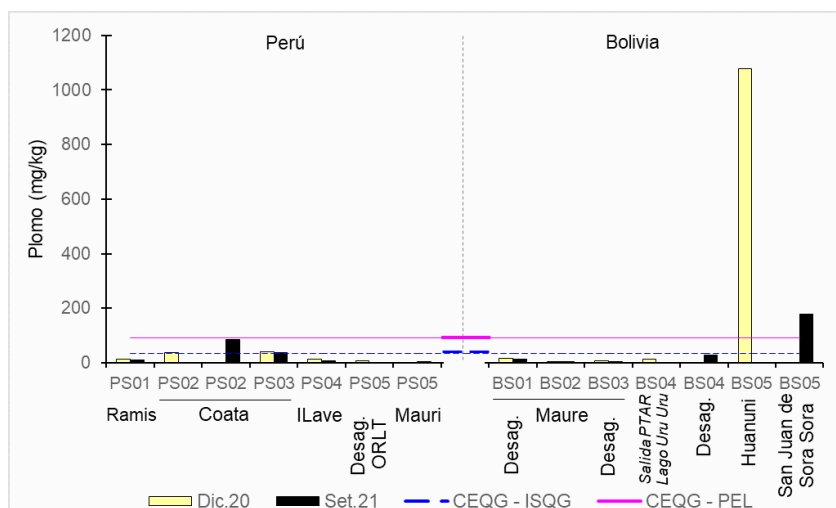
Metal	Fecha	CEQG	25/09/2021		21/12/2020		25/09/2021		21/12/2020		25/09/2021		23/08/2021		24/09/2021	
			ISOQ	PEL	14:40	BS02*		10:00	15:40	BS03		13:30	BS04	13:20	BS05	16:40
						BS01*				BS04						
	Unidad															
Plata Total	mg/kg	--	--	<0,268	<0,268	<0,268	<0,268	<0,268	<0,268	<0,268	<0,268	<0,268	<0,268	7,304	7,651	
Aluminio Total	mg/kg	--	--	13358,863	6586,968	6521,936	4500,328	3658,568	3243,72	2294,441	15223,377	1444,733	3453,794			
Arsénico Total	mg/kg	5,9	17	15,928	12,528	16,087	15,201	15,444	15,426	7,029	48,211	1667,361	901,761			
Boro Total	mg/kg	--	--	33,004	<17,195	<17,195	<17,195	<17,195	<17,195	<17,195	55,240	<17,195	<17,195			
Bario Total	mg/kg	--	--	209,978	191,813	89,694	87,676	87,44	86,464	32,035	189,772	120,182	44,280			
Berilio Total	mg/kg	--	--	0,995	0,550	0,302	0,289	0,242	0,194	<0,173	1,278	0,505	0,447			
Bismuto Total	mg/kg	--	--	0,208	0,179	<0,103	0,369	<0,103	0,220	<0,103	0,742	48,683	181,199			
Calcio Total	mg/kg	--	--	11025,816	5906,875	4289,044	2981,65	3136,249	2106,037	1337,98	6934,792	293,189	450,465			
Cadmio Total	mg/kg	0,6	3,5	0,304	0,273	<0,144	0,191	<0,144	0,169	<0,144	0,461	1,856	13,712			
Cobalto Total	mg/kg	--	--	10,107	5,993	7,743	4,026	5,467	3,155	2,035	11,045	2,320	6,330			
Cromo Total	mg/kg	37,3	90	14,373	8,724	24,323	7,133	15,355	4,553	3,204	15,773	9,448	23,341			
Cobre Total	mg/kg	35,7	197	27,702	16,258	11,824	10,857	26,500	15,760	306,054	45,145	128,876	881,016			
Hierro Total	mg/kg	--	--	24647,979	15144,597	20959,275	8906,656	13128,281	6045,796	6198,763	26309,700	97045,079	44962,915			
Mercurio Total	mg/kg	0,170	0,486	<0,262	<0,262	<0,262	<0,262	<0,262	<0,262	<0,262	<0,262	0,300	0,503			
Potasio Total	mg/kg	--	--	3881,93	1627,378	903,618	799,501	678,579	656,978	585,588	5051,775	2254,89	1377,79			
Lantano Total	mg/kg	--	--	11,237	6,568	10,922	10,659	8,678	6,420	3,548	10,434	4,551	7,526			
Litio Total	mg/kg	--	--	46,7	22,8	6,9	6,6	6,6	6,6	6,0	69,8	<3,0	9,1			
Magnesio Total	mg/kg	--	--	5677,275	3048,902	2683,143	2231,162	1832,503	1340,041	1396,455	7571,489	233,856	715,571			
Manganeso Total	mg/kg	--	--	418,618	330,127	247,986	168,494	371,809	264,375	68,375	427,646	98,618	118,137			
Molibdeno Total	mg/kg	--	--	0,939	0,578	0,327	0,201	0,286	0,196	<0,182	0,626	1,454	1,949			
Sodio Total	mg/kg	--	--	1473,806	1133,895	497,268	663,357	392,681	435,569	187,079	1516,211	387,424	257,713			

Metal	Fecha		CEQG	21/12/2020		25/09/2021		21/12/2020		25/09/2021		22/12/2020		23/09/2021		23/12/2020		24/09/2021	
	Hora	Unidad		ISQG	PEL	10:00	15:40	15:40	15:05:00	14:30:00	13:30	14:30:00	BS04	BS04	BS05	BS05	BS05	BS05	
	BS01*				BS02*				BS03				BS04				BS05		
Niquel Total	mg/kg	--	--	--	17,740	11,387	8,573	5,210	6,179	3,039	2,097	21,164	5,638	10,674					
Fosforo Total	mg/kg	--	--	--	526,515	357,28	588,457	564,226	434,66	302,966	31,528	571,365	890,838	434,435					
Piomo Total	mg/kg	35,0	91,3	17,538	15,007	5,727	5,146	6,550	5,173	12,736	29,144	1077,657	177,102						
Antimonio Total	mg/kg	--	--	--	0,231	0,264	0,194	0,636	0,165	0,328	<0,131	1,167	266,636	26,36					
Escandio Total	mg/kg	--	--	--	3,411	2,219	1,883	1,800	1,164	1,195	0,539	4,503	1,588	1,836					
Selenio Total	mg/kg	--	--	--	<3,605	<3,605	<3,605	<3,605	<3,605	<3,605	<3,605	<3,605	8,856	3,701					
Estanho Total	mg/kg	--	--	--	<0,940	2,047	<0,940	1,081	<0,940	4,074	1,022	1,931	330,572	539,503					
Estroncio Total	mg/kg	--	--	--	141,777	55,714	70,287	59,377	45,742	53,46	15,229	87,201	32,809	16,877					
Torio Total	mg/kg	--	--	--	5,010	3,245	2,041	2,150	1,728	1,350	0,838	5,125	4,029	5,891					
Titanio Total	mg/kg	--	--	--	111,103	111,748	931,765	370,089	573,794	250,369	128,037	75,004	45,478	29,721					
Talio Total	mg/kg	--	--	--	0,328	0,149	<0,093	<0,093	<0,093	<0,093	<0,093	0,336	2,613	4,901					
Uranio Total	mg/kg	--	--	--	0,811	0,502	0,282	0,225	0,230	0,185	0,156	0,938	1,105	4,139					
Vanadio Total	mg/kg	--	--	--	28,826	17,67	81,599	26,061	47,159	15,214	9,958	26,556	27,927	5,51					
Wolframio Total	mg/kg	--	--	--	<0,231	<0,231	<0,231	<0,231	<0,231	0,486	<0,231	<0,231	6,787	18,177					
Ytrio Total	mg/kg	--	--	--	8,686	4,881	5,408	5,436	4,180	2,954	1,838	8,258	1,662	2,456					
Zinc Total	mg/kg	123	315	77,826	49,399	53,315	26,509	37,247	19,503	38,197	92,87	648,281	851,132						
Circonio Total	mg/kg	--	--	--	14,019	5,716	8,362	6,666	5,896	3,139	5,730	12,546	1,805	1,514					

* El punto de muestreo BAS01 tiene código BAS02 y viceversa en el Informe de ensayo MA2130870 de setiembre 2021. Guía de Calidad Ambiental de Canadá – CEQG (Canadian Environmental Quality Guidelines – Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life – Fresh water). Informes de ensayos con valor oficial del laboratorio SGS del Perú S.A.C. acreditado por el INACAL: MA2026060 y MA2130870.

 Mayor al Nivel de Efecto Probable (PEL – Probable Effect Level).

 Mayor a la Guía de calidad de Sedimento interno (ISQG - Interim Sediment Quality Guideline).



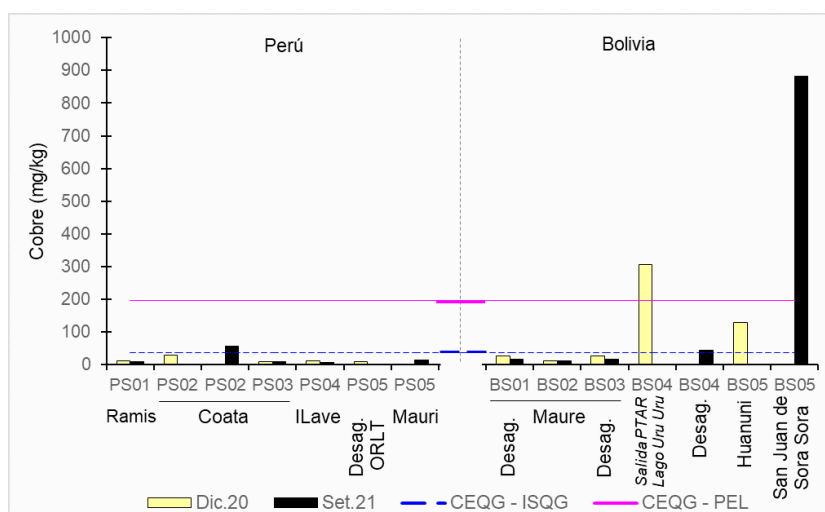
Desag.: Desaguadero y Desag. ORLT: Desaguadero en las compuertas de la obra de regulación Lago Titicaca.

Figura 5.73: Concentraciones de plomo en los sedimentos de Perú y Bolivia–sistema TDPS.

En tanto, otros metales a destacar fue el arsénico en el río Desaguadero en el Puente Internacional - compuertas de la ORLT (PS05) en diciembre 2020 con valor mayor al PEL de las CEQG-SQG y el plomo en el río Coata en la zona de mezcla con el Lago Titicaca (PS02) en septiembre 2021 con valor cercano al valor del PEL.

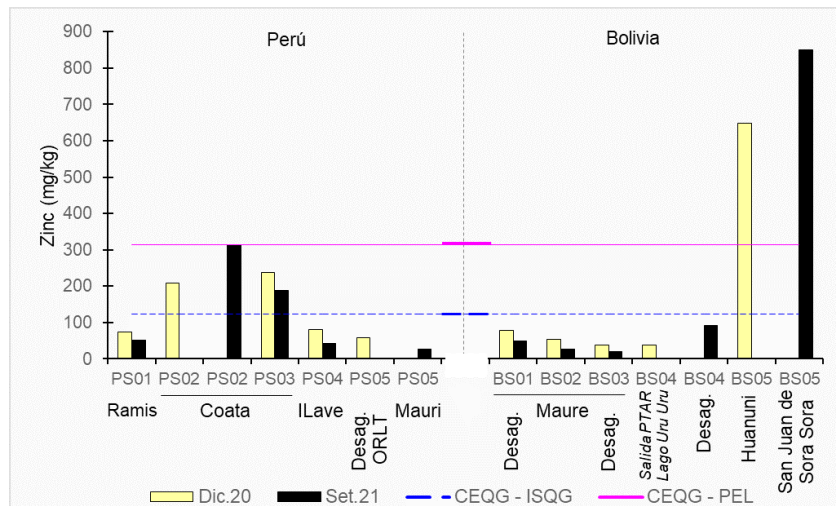
Cadmio, cobre y zinc

De acuerdo con las Figuras 5.74, 5.75 y 5.76, la más alta concentración de cadmio, cobre y zinc fue registrada en el río San Juan de Sora Sora (BS05) en septiembre 2021. Dichos resultados fueron mayores al valor establecido en el Nivel de Efecto Probable (PEL - Probable Effect Level) de las CEQG-SQG.

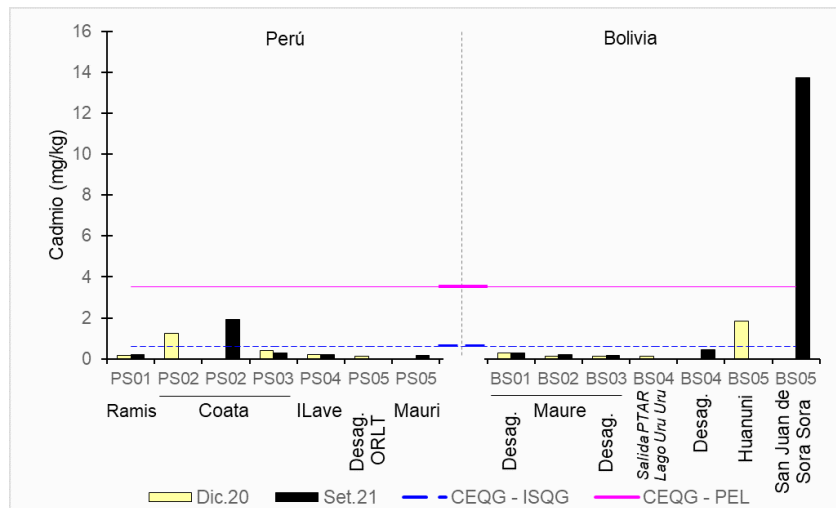


Desag.: Desaguadero y Desag. ORLT: Desaguadero en las compuertas de la obra de regulación Lago Titicaca.

Figura 5.74: Concentraciones de cobre en los sedimentos de Perú y Bolivia–sistema TDPS.



Desag.: Desaguadero y Desag. ORLT: Desaguadero en las compuertas de la obra de regulación Lago Titicaca. **Figura 5.75:** Concentraciones de zinc en los sedimentos de Perú y Bolivia – sistema TDPS.



Desag.: Desaguadero y Desag. ORLT: Desaguadero en las compuertas de la obra de regulación Lago Titicaca. **Figura 5.76:** Concentraciones de cadmio en los sedimentos de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

De otro lado, el cobre en la salida de la PTAR de Oruro al Lago Uru Uru (BS04) y zinc en el río Huanuni, aguas abajo del punto en el río San Juan de Sora Sora (BS05), fueron mayores a los valores respectivos de cada metal establecido en el Nivel de Efecto Probable (*PEL - Probable Effect Level*) de las CEQG-SQG.

Asimismo, las concentraciones en el río Huanuni (BS05) de cobre y cadmio en diciembre 2020, río Coata en la zona de mezcla con el Lago Titicaca (PS02) de cobre, zinc y cadmio en septiembre 2021 fueron mayores a los valores respectivos de cada metal establecidos en el valor guía interino (*ISQG - Interim Sediment Quality Guideline*) de las CEQG-SQG.

En adición a lo anterior, las concentraciones de zinc en los otros dos puntos del río Coata en el Puente Unocolla (PS02) en diciembre 2020 y Puente Coata (PS03) en diciembre 2020 y septiembre 2021, así como la concentración de cobre en el río Desaguadero – Puente Español (BS04), también fueron mayores en el valor guía interino (ISQG) de las CEQG-SQG.

Mercurio

El río Huanuni (BS05) en diciembre 2020 con 0,3 mg/kg y los ríos Coata en la zona de mezcla con el Lago Titicaca (PS02) con 0,639 mg/kg y San Juan de Sora Sora con 0,503 mg/kg en septiembre 2021 registraron concentraciones de mercurio mayores al valor establecido en el Nivel de Efecto Probable (*PEL - Probable Effect Level*) de las CEQG-SQG.

CAPÍTULO VI: DISCUSIONES, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 DISCUSIONES

El agua en el ambiente se encuentra en la atmosfera - fase captada como niebla, subterránea - aguas que emanan a la superficie mediante afloramientos y captada por pozos de tajo abierto, producción u otros, y superficial como los ríos, quebradas, lagos y lagunas. Estas tres fases del agua contienen partículas en las formas: disuelta, suspendida y gaseosa. En la presente discusión no se considera los compuestos o elementos gaseosos de los metales, por lo que los metales totales corresponden a la suma de las concentraciones de la forma en suspensión o suspendidos y disuelta.

La distribución de los porcentajes del metal suspendido de los principales metales de agua superficial y subterránea para los puntos de muestreo evaluados en Bolivia y Perú en septiembre 2021 se visualizan en los mapas de color (ver Figuras 6.1 y 6.2 respectivamente) elaborados con el programa PAST vers. 4.09 del *Natural History Museum – University of Oslo* de 2022 (Hammer et al., 2001). Cabe resaltar que los análisis de metales totales y disueltos son acreditados por el laboratorio de ensayo SGS del Perú S.A.C. de acuerdo con la NTP-ISO/IEC 17025:2017 de Perú.

Con respecto a los metales para agua superficial, la Figura 6.1 señala que el grupo alcalino: sodio, y los metaloides: boro (B) con arsénico (As), cuyas formas disueltas son predominantes, registraron concentraciones mayores a los VMA (Bolivia) y ECA (Perú), excepto para el río San Juan de Sora Sora (BAS09) cuya concentración de As tiene predominancia de sus formas suspendidas con 99%.

Asimismo, los metales con predominancia disuelta y concentraciones mayores a las normativas de calidad (VMA y ECA) son los alcalinos terrosos: calcio y magnesio, el alcalino: litio y el no metal: selenio en dos puntos de muestreo: BAS11 – Río Desaguadero para los cuatro elementos químicos y BAS09 - Río San Juan de Sora Sora para magnesio. Otros de los metales cuyas formas disueltas son predominantes y mayores a los VMA y ECA es el manganeso en ocho puntos de muestreo (cinco de Bolivia y tres de Perú), el antimonio en BAS05-2021 (río Mauri – aguas abajo de la afluencia del río Caquena) y el mercurio en PAS11 (río Maure – Centro Poblado Maure Pucuyo).

Para los metales con predominancia suspendida en el agua superficial y cuyas concentraciones son mayores a los VMA y ECA para ambos países, se registraron al aluminio en siete puntos de muestreo, excepto en el río San Juan de Sora Sora (BAS09) con 60% de predominancia disuelta; y el hierro en siete puntos de muestreo con el menor porcentaje de suspendido en BAS09 con 63%.

En caso del agua subterránea (ver Figura 6.2), similar al agua superficial, los metales en donde no predomina la materia en suspensión son los alcalinos: sodio, litio y potasio, alcalinos terrosos: calcio, magnesio, estroncio y bario. Asimismo, los metaloides: boro, arsénico y silicio, y en la mayoría de los puntos de muestreo para el zinc, uranio, molibdeno y manganeso. De los citados metales, las concentraciones de sodio en cuatro puntos de muestreo, calcio en uno, y los metaloides boro y arsénico en ocho son mayores a las referencias de calidad de agua subterránea de ambos países (VMA y ECA).

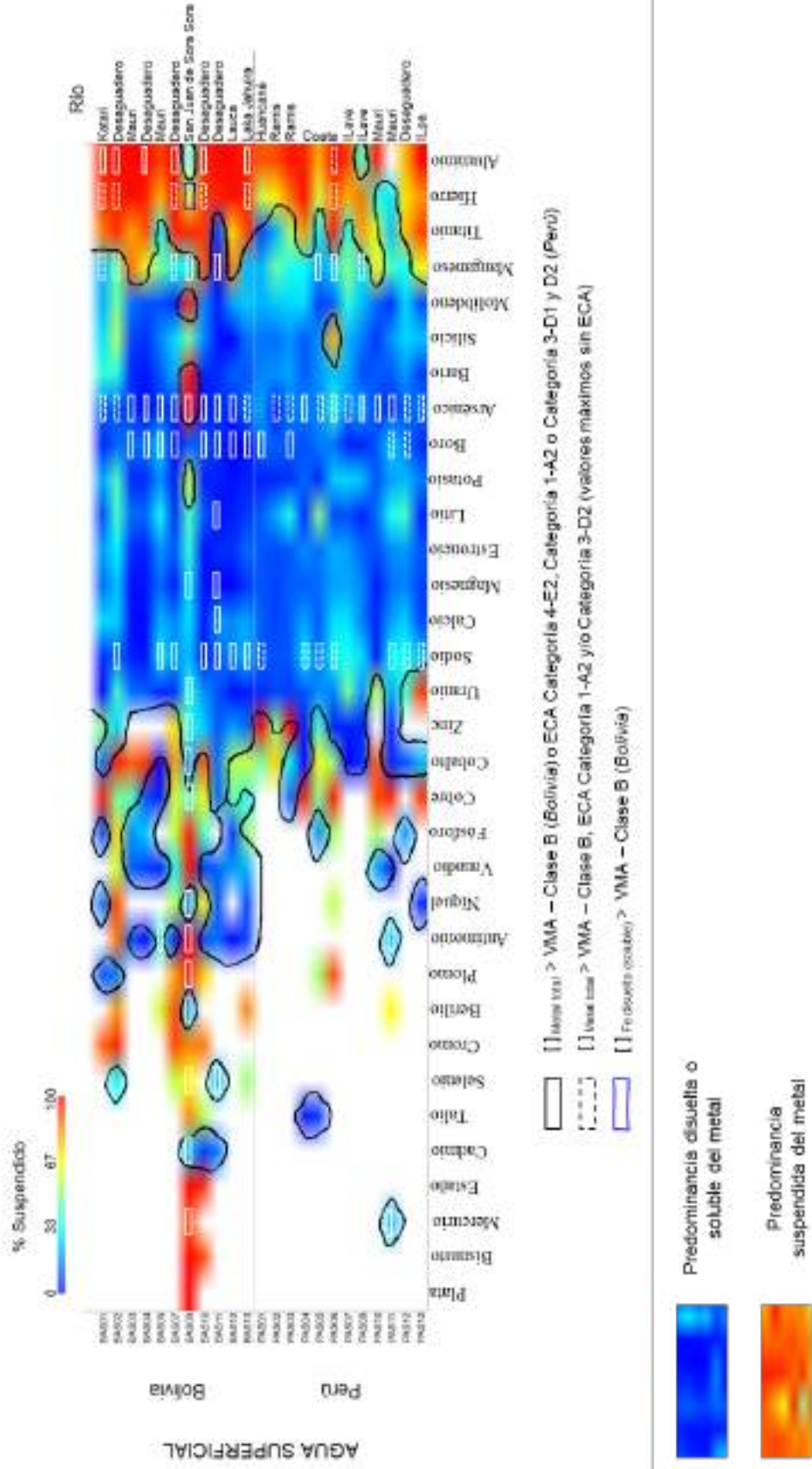


Figura 6.1: Mapa de color de los porcentajes de metales suspendidos de septiembre 2021 en el agua superficial de Perú y Bolivia – Sistema TDPS.

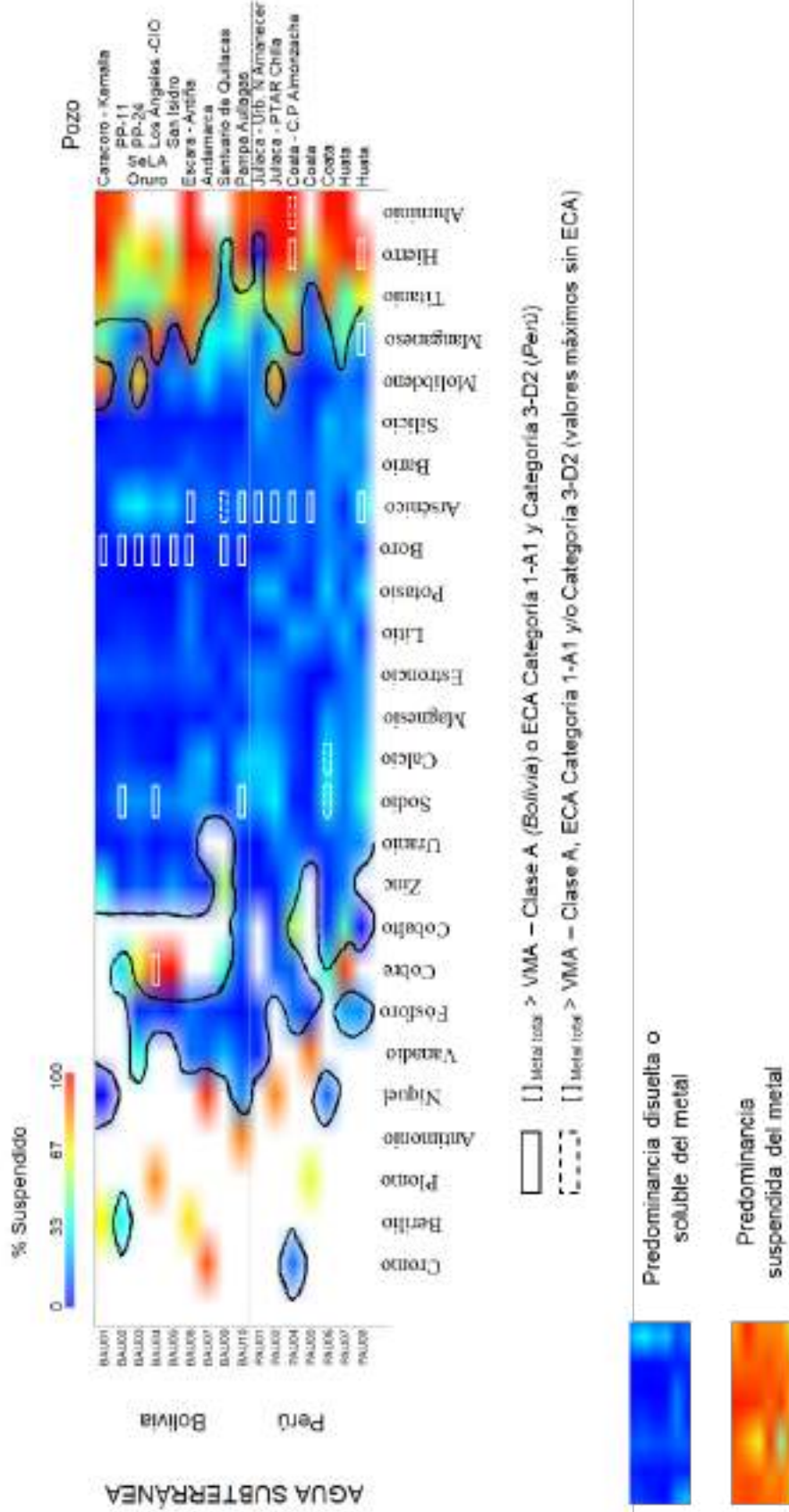


Figura 6.2: Mapa de color de los porcentajes de metales suspendidos de septiembre 2021 en el agua subterránea de Perú y Bolivia – Sistema TDPS.

En contraste con lo anterior, el hierro tiene predominancia en su forma suspendida, excepto para los pozos de Santuario de Quillacas (BAU09) con 40% y de Juliaca - Urb. Nuevo Amanecer (PAU01) con 3%. De igual forma, el aluminio en los puntos de muestreo cuantificables (valores mayores al límite de cuantificación) predominaron su forma suspendida, y el titanio en la mayoría de los puntos de muestreo.

Es preciso señalar que, para el hierro y aluminio, los pozos de agua subterránea, cuyas concentraciones fueron mayores a las normativas de ambos países (VMA de Bolivia y ECA de Perú), están el pozo de Coata del Centro Poblado de Almonzanche (PAU04) para ambos metales con predominancia suspendida de 98% para hierro y 99% para aluminio y PAU08 en Huata – Puno para hierro con la forma en suspensión de 97%.

El registro de manganeso mayor a los estándares de comparación de calidad de agua subterránea es para el pozo de Huata - Puno (PAU08) con 20% de la forma suspendida, mientras que solo tres puntos de muestreo (dos en Bolivia en BAU04 y BAU06 y uno en Perú en PAU04), la forma suspendida fue predominante mayor al 50%. Otro de los metales que registró valor puntual mayor a los VMA-Clase A de Bolivia fue el cobre en el pozo de producción BAU04 (SeLA-Oruro de los Los Ángeles-CIO) con 95% del metal en forma suspendida.

De la evaluación de la predominancia de las formas suspendidas en los puntos de agua superficial y subterránea del sistema TDPS, el cuerpo de agua a resaltar es el río San Juan de Sora Sora (BAS09) en Oruro - Bolivia, al tener 16 metales cuyas concentraciones totales (fase suspendida + disuelta) son mayores a los VMA (Bolivia) y ECA (Perú) y con porcentajes de la fase suspendida de otros metales variables como: mercurio (91%), cadmio (26%), plomo (98%), antimonio (100), níquel (20%), cobre (42%) y otros, con la única concentración de hierro disuelto o soluble del sistema hídrico TDPS mayor a los VMA-Clase B de Bolivia (Figura 6.2).

En resumen, la Figura 6.1 muestra que 14 metales en el agua superficial (ríos) del sistema hídrico TDPS tienen predominancia disuelta o soluble en todos o la mayoría de los puntos de muestreo, con arsénico y boro como los principales elementos de mayor interés. De la misma manera, el sodio como metal alcalino y calcio como alcalino terreo son los otros metales que predominaron en forma disuelta y cuyas concentraciones son mayores a los estándares de ambos países. En caso de metales con predominancia en forma suspendida, se cuenta con el titanio, aluminio y hierro, con estos dos últimos metales en mayores concentraciones en los ríos Desaguadero, Laka Jahuira y Katari de todo el sistema TDPS, siendo mayores al estándar de Bolivia (VMA – Clase B), y de manera referencial el río Coata en PAS06 (zona de mezcla con el Lago Titicaca).

En relación con el comportamiento fisicoquímico de los pozos de agua subterránea, similar al agua superficial (Figura 6.2), 15 metales tienen predominancia disuelta o soluble, entre los cuales están los metaloides: arsénico y boro de mayor interés en el sistema TDPS. Asimismo, están los metales alcalinos como el sodio y alcalino terreos como el calcio. Con relación a los metales que tienen predominancia en la fase suspendida; están el titanio, hierro y aluminio, siendo los dos últimos metales de concentraciones mayores a los estándares de Perú y Bolivia en los pozos ubicados en Coata (Centro Poblado Almonzanche) - PAU04, y Huata en Perú - PAU08.

Cabe resalta que en el río San Juan de Sora Sora (BAS09) en Oruro-Bolivia, es el único cuerpo de agua superficial cuyas concentraciones de arsénico tienen predominancia suspendida (99%); mientras que el 63% en forma disuelta del hierro supera la norma de Bolivia (VMA), y que en total registraron 16 metales totales (en diferentes porcentajes de predominancia) superaron ambas normativas nacionales de Perú y Bolivia.

Lo antes mencionado permite tener la visión panorámica espacial y temporal del comportamiento de los metales de sus predominancias de las formas suspendidas y disueltas o solubles. Por esto, se asumirá que los resultados de diciembre 2020 tienen la misma predominancia de la forma suspendida en porcentajes de los metales que septiembre 2021.

Por consiguiente, los resultados de las Figuras 6.3 y 6.4 muestran el comportamiento espaciotemporal del agua superficial y las Figuras 6.5 y 6.6 al comportamiento espaciotemporal del agua subterránea, con énfasis en los parámetros que registran las mayores concentraciones y a los estándares de calidad de agua de Perú (ECA) y Bolivia (VMA). Estos serán discutidos junto con los resultados hidroquímicos, especiación del arsénico (metal de importancia para el presente estudio) y otros análisis fisicoquímicos (turbidez, STS y aniones como el cloruro).

La Figura 6.3 muestra los parámetros relacionados al efecto de la erosión pluvial producto de la precipitación o lluvia sobre los ríos del sistema TDPS, el cual ocurre con mayor intensidad en Bolivia que Perú. Los ríos de Bolivia donde se da en mayor intensidad el efecto de la erosión en función de la cantidad de los sólidos totales en suspensión (STS) y turbidez (evaluados en el 2021) son el río Desaguadero en BAS02 (Puente colgante Concordia), BAS10-2021 (Puente La Joya) y BAS07 (Puente Español – brazo izquierdo), los cuales también registran las mayores concentraciones de aluminio y hierro. Igualmente, los efectos de la precipitación del 2020 en el río Desaguadero en BAS11-2020 (Aguas abajo del puente Aroma) y Katari (puente de conexión Cohana – Lacaya) en BAS01.

El efecto de las escorrentías que provocaron la erosión de los suelos ribereños y remoción de los sedimentos de fondo ocurrido en diciembre 2020 y septiembre 2021 se dio en el río Desaguadero en BAS02 (Puente Colgante Concordia), por lo que este punto es sensible a cualquier influencia de la precipitación debido a que los sedimentos de fondo y de los márgenes de dicho punto de muestreo que contienen material fino (arcilla y limo) son fácilmente erosionables.

En relación con el río Katari (BAS01), sumado los efectos de la precipitación, sobre este cuerpo de agua se descarga las aguas residuales domésticas e industrial de la ciudad de El Alto y otros poblados aledaños, por lo que esos dos factores de manera temporal incrementan los metales aluminio y hierro con la materia en suspensión detectado en los análisis de STS y turbidez.

En cambio, en el río San Juan de Sora Sora – Huanuni (BAS09 y BAS10) se registra una mayor cantidad de metales en un ambiente acuático con las más altas concentraciones de materia suspendida (STS) y turbidez del sistema TDPS con el pH más ácido (< 3 unid. pH), lo que conlleva a que tenga mayor número de metales mayores a los VMA-Clase B como el hierro, selenio y plomo para ambos monitoreos (2020 y 2021) y mercurio en el 2021 con predominancia en su forma suspendida; no obstante, el aluminio cambia de predominancia a disueltos, porque el pH ácido cambia su comportamiento fisicoquímico y eleva la concentración de hierro disuelto o soluble hasta ser mayor a los VMA-Clase B.

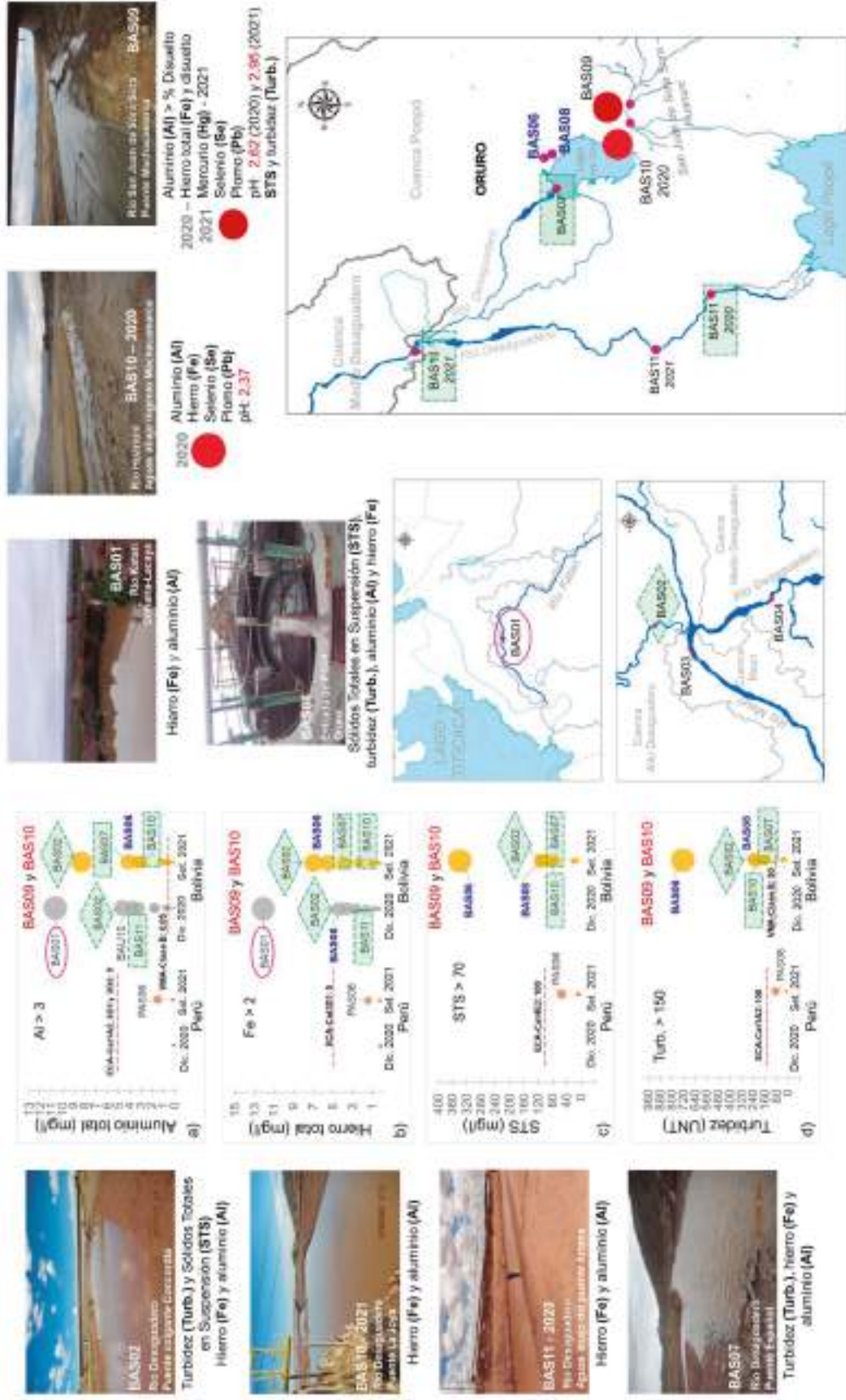
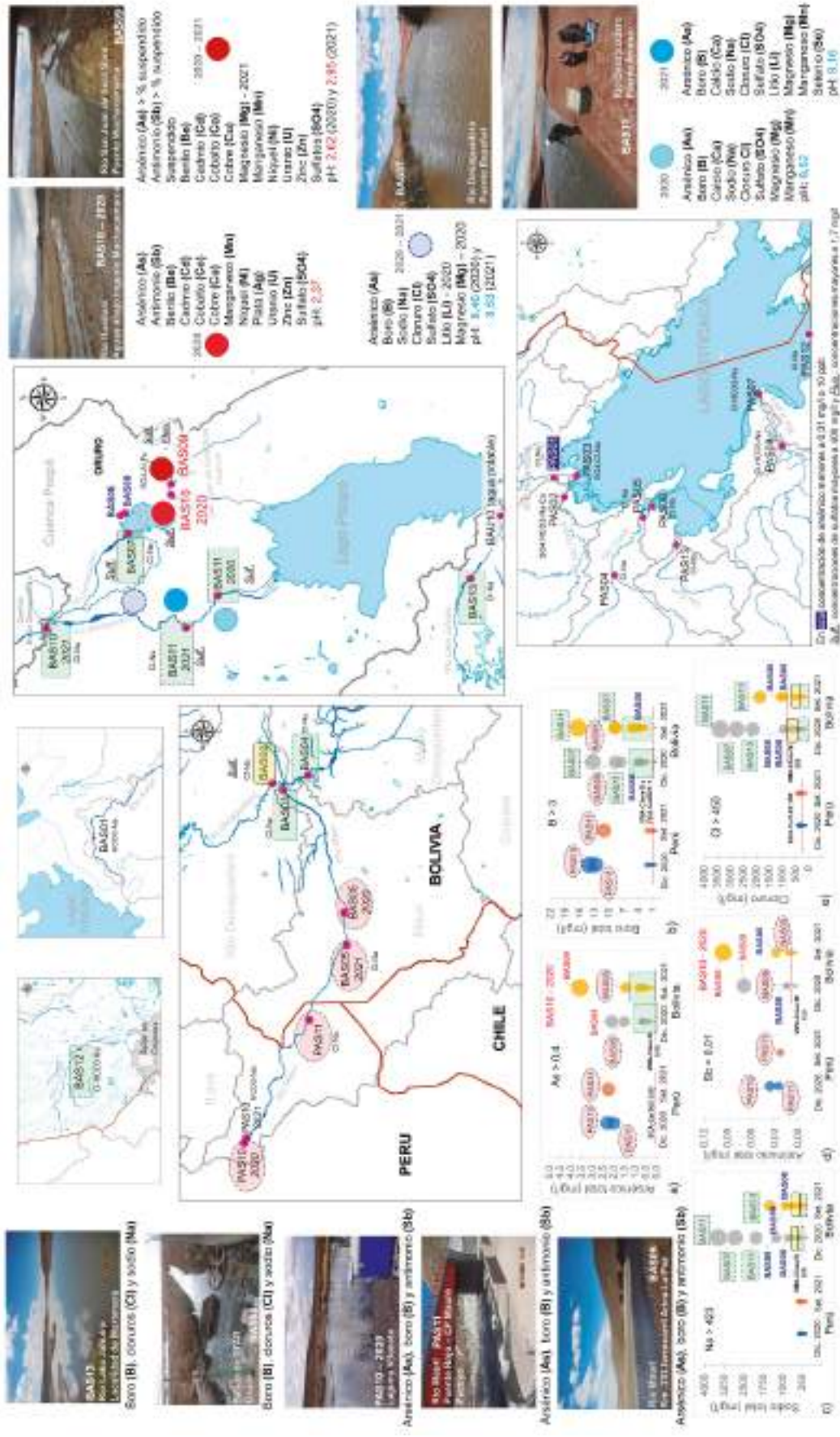


Figura 6.3: Concentraciones de a) aluminio total, b) hierro total, c) sólidos totales en suspensión (STS), d) turbidez y otros metales en los cuerpos de agua superficial de Perú y Bolivia – sistema TDPS.



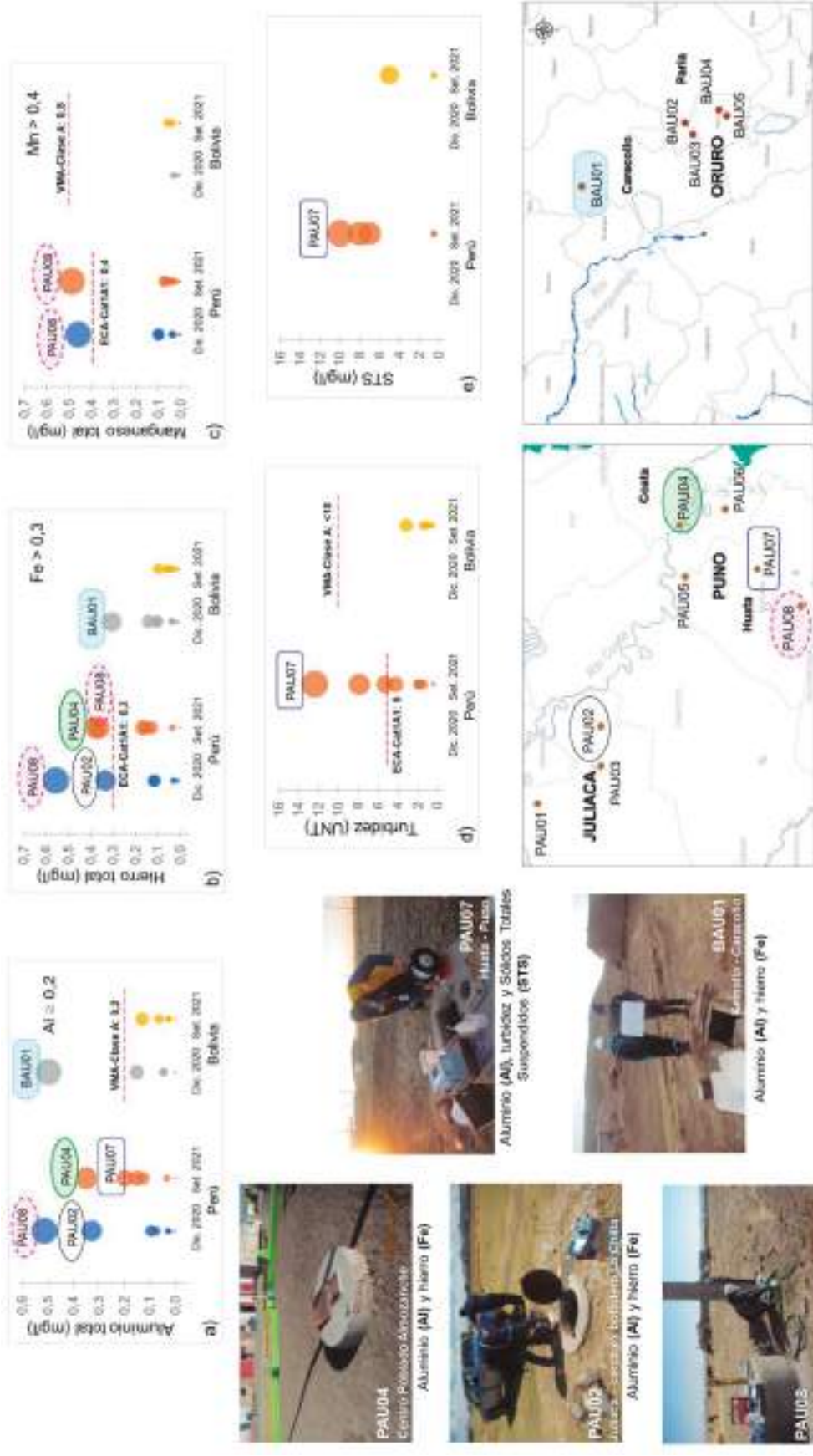


Figura 6.5: Concentraciones de a) aluminio total, b) hierro total, c) manganeso total, d) turbidez y e) sólidos totales en suspensión (STS) en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

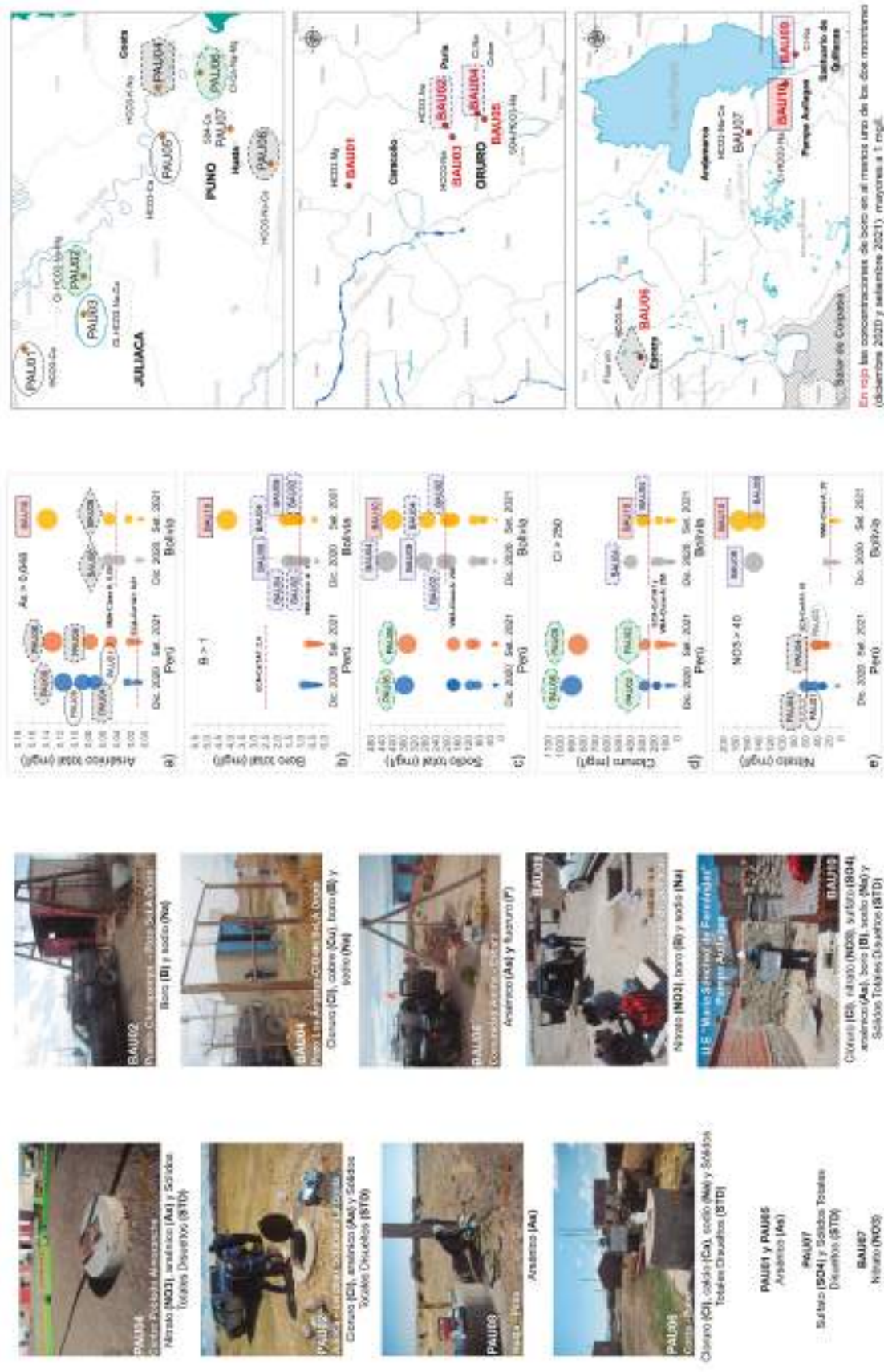


Figura 6.6: Concentraciones de a) arsénico total, b) boro total, c) sulfato total, d) cloruro y e) nitrato en los pozos de agua subterránea de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

Otro de los puntos a resaltar es la disminución de los sólidos totales en suspensión (STS), turbidez y los metales aluminio y hierro de las aguas residuales de Oruro al tratamiento usado por la PTAR; no obstante, si bien las concentraciones de hierro llegan a bajar a valores menores al valor diario respectivo de los Límites Permisibles para Descargas Líquidas (LPDL), la concentración de STS con 113 mg/l aún es mayor al respectivo valor de los LPDL (60 mg/l).

Con relación a los parámetros relacionados al ámbito disuelto del agua superficial cuyas concentraciones fueron mayores a los VMA – Clase B y ECA de Perú (Figura 6.4), la dinámica es espacial a diferencia del ámbito suspendido que tiene dinámica temporal en algunos cuerpos de agua superficial como los ríos Desaguadero y Katari, junto con las actividades antropogénicas.

Una principal fuente de metales es el río Maure (en Perú) desde su nacimiento en la laguna Vilacota (PAS10) hasta BAS05 (río Mauri – aguas abajo de la confluencia con el río Caquena) que aporta al río Desaguadero altas concentraciones de arsénico, boro y antimonio, con incremento de dichos metaloides hasta su desembocadura al río Desaguadero; en donde los valores de arsénico y boro son mayores a los VMA-Clase B.

La concentración de los citados metales se debe a la existencia de manantiales hidrotermales en la parte alta de la cuenca Maure-Mauri con presencia de yacimientos de boratos, donde se registran altas concentraciones de estos tres metales (arsénico, boro y antimonio). Las aguas geotermales de Borateras se caracterizan por presentar elevada concentración de boro debido a los procesos termales e interacción con las rocas marinas sedimentarias a niveles profundos del basamento mesozoico (Vargas et al., 2012).

Otros de los metales con predominancia disueltos es el sodio de similar comportamiento que el cloruro y boro (ver Figura 6.4) debido a las altas concentraciones, así como otros metales como litio, manganeso, magnesio y selenio en la parte baja del río desaguadero. El río Desaguadero recorre ambientes evaporíticos en su parte media (aguas abajo de la confluencia del río Mauri) y baja (luego de su bifurcación, principalmente en el brazo derecho donde cruza el puente Aroma en BAS11 – 2021).

Los resultados concuerdan con lo indicado por la Organización de los Estados Americanos y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (OEA y PNUMA, 1996), en el cual la salinidad del río Desaguadero crece desde su nacimiento hasta el lago Poopó, puesto que aguas arriba de La Joya alcanza valores entre 1 y 2 g/l (1000 a 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), pero aguas abajo puede llegar a más de 2 g/l (2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Quintanilla et al. (s. f.) manifiesta que la salinización natural del sistema TDPS desde Calacoto (río Desaguadero) hasta los lagos Uru Uru y Poopó se debe a la aceleración del proceso natural de formación de salares en los años secos como el período de sequía de 1983 a 1996, y donde se presentan arenales, salitrales y vetas salinas (Pouilly et al., 2014). La región ha experimentado una repetida y prolongada sequía durante los últimos treinta años.

El boro en ambientes evaporíticos puede elevar apreciablemente su concentración hasta superar la concentración media del agua de mar (Vargas et al., 2012) como se aprecia en el río Desaguadero luego de su bifurcación en ambos brazos (BAS11 y BAS07).

En el altiplano, la salinidad tiene su origen hace 40 millones de años cuando se formaron las cordilleras Oriental y Occidental separadas por una plataforma más o menos plana. Al quedar encerrado entre dos cordilleras, el altiplano formó una cuenca endorreica (sin salida al mar) cuyas aguas de ríos y lagos se evaporan dejando como única huella de su anterior existencia los mares de sal, por lo que de esa manera se formó el salar de Uyuni y el lago Poopó.

En relación con otros metales disueltos registrados en el río San Juan de Sora Sora-Huanuni, se indica que la vecindad del lago Uru Uru se encontraron significativas recargas de minerales pesados por la actividad minera, como ocurre en el municipio de Machacamarca en la desembocadura del río tributario en el lago Uru Uru que aun contiene material de colas de ingenio en sus riberas. En la Figura 6.4 se indica la cantidad de metales en fase disuelta, a excepción del arsénico y antimonio que predominan en fase suspendida a diferencia de los otros ríos que están en fase disuelta.

Con respecto a la Figura 6.5 de los resultados de agua subterránea, cuatro pozos de tajo abierto en Perú de Juliaca (PAU02), Coata (PAU04) y Huata (PAU07 y PAU08) son los que registran las mayores concentraciones de aluminio y hierro con predominancia en forma suspendida mayor al 95%. Estos compuestos vienen de erosiones con el suelo del entorno, lo que sugiere que las paredes de los citados pozos permiten el paso de partículas suspendidas asociados a compuestos insolubles.

No obstante, esta fuente de aporte de metales suspendidos es temporal, a excepción del pozo PAU08 de Huata – Puno para hierro y manganeso con forma suspendida en un 20%. Este pozo usa electrobomba (ver foto respectiva de la Figura 6.5) por donde se colecto la muestra, por lo que el sistema de bombeo origina cambios en el comportamiento de hierro, aluminio (ambos temporales) y manganeso que implica tener altas concentraciones mayores a los ECA-Cat1A1 que no pueden ser relacionados indirectamente mediante la turbidez o los sólidos totales en suspensión (STS), tal como ocurre con el pozo PAU07 de Huata, con una mayor concentración de aluminio, turbidez y STS cercano referencialmente al valor de los VMA-Clase A.

El incremento temporal de metales también se da en el pozo BAU01 de Kemalla - municipio de Caracollo para el aluminio y hierro, con mayor concentración de los citados metales en diciembre 2020 que septiembre 2021. Como se puede ver en la foto de la Figura 6.5, este pozo es artesanal y sin paredes de recubrimiento que permite interactuar con el suelo y genere concentraciones mayores al valor de los VMA-Clase A para aluminio y ECA-Cat1A1 para hierro.

En contraste, los cuatros pozos SeLA-Oruro registran concentraciones de metales menores a los VMA y ECA y valores de los sólidos totales en suspensión (STS) menores al límite de cuantificación (< 3 mg/l) con turbidez menores a 1 UNT debido a la poca o nula interacción del agua con los suelos alrededor de las paredes, puesto que son pozos de producción con mejor infraestructura con cementación y revestimiento que aísla el agua del suelo. Cabe resaltar que los pozos de tajo abierto de Bolivia están en mejores condiciones que los de tajo abierto en Perú, lo que se puede determinar mediante los menores registros de hierro, aluminio, STS y turbidez.

En cuanto al comportamiento de los metales con predominancia en la fase disuelta en los pozos de agua subterránea indicado en la Figura 6.6, las altas concentraciones de arsénico (mayor o cercano a 0,05 mg/l) se ubican en Juliaca (PAU01), Huata (PAU08), Coata (PAU05) y Coata – C.P Almonzanche

(PAU04 en ambos monitoreos) en Perú y al sur del lago Poopó en Pampa Aullagas (BAU10) y oeste de la referida laguna en la comunidad de Antiña – municipio de Escara (BAU06 en ambos monitoreos) en Bolivia.

En cambio, el boro tiene comportamiento diferente al arsénico, en donde los más altos valores se reportan en los pozos de agua subterránea de Bolivia, dos pozos SeLA en la ciudad de Oruro (BAU02 – PP11 y BAU04 – Los Ángeles CIO) y dos al sur del lago Poopó (BAU10 – Pampa Aullagas y BAU09 – Santuario de Quillacas). Estos pozos de Bolivia junto con los pozos SeLA BAU02 y BAU04, y el pozo PAU06 (Coata – Puno) con las más altas concentraciones de sodio.

En caso de los aniones, el cloruro, nitrato, fluoruro y sulfato también tienen otro comportamiento fisicoquímico. El primer anión está en altas concentraciones -junto con el calcio- en el pozo PAU06 (Coata – Puno), el segundo anión en los pozos al sur del lago Poopó (BAU10 en Pampa Aullagas y BAU09 en Santuario de Quillacas), el tercer ión en la comunidad de Antiña – municipio de Escara (BAU06) y el cuarto ión en Huata – Puno (PAU07). La composición del agua subterránea es diferente en cada país (Perú y Bolivia) y dentro de cada una referido al entorno hidrogeológico de cada pozo de agua subterránea, por lo que tiene comportamiento espacial.

Esta afirmación se verifica en los distintos resultados hidroquímicos del capítulo 5.1.4 en relación con el tipo o facie hidroquímica en donde predominan los aniones: bicarbonatos, cloruro, o ambos, y el anión sodio, tipo de agua con relación al cloruro (Oligohalino en el pozo PAU05 a salobre en el Pozo PAU06), tipo de flujo (de regional en BAU010 a local en PAU05), disolución e intercambio (relación $r_{Na/Cl}$ y $r_{Ca/rMg}$) e intercambio iónico (mayoría de puntos de muestreo tienen reemplazo de los iones Ca^{2+} y Mg^{2+} por Na^+ y K^+).

Dichas diferencias se pueden notar en el pozo BAU10, el cual no es usado regularmente ya que al momento de la evaluación se encontró vegetación flotante (hojas y ramas). Según Ormachea et al. (2013), el agua subterránea de movimiento lento y la gran superficie de los sedimentos de grano fino facilitan la liberación de arsénico (As). En tierras bajas como la que se ubica el pozo de Pampa Aullagas (BAU10), el As intercambiable podría movilizarse al agua subterránea debido al aumento de la salinidad por el clima árido y otros procesos evaporativos por el cinturón Pack o franja de arsénico (Figura 3.4) de acuerdo con el estudio de Quino et al. (2021).

Por otra parte, el pozo BAU09, a pesar de estar próximo al BAU10 e igual índice cloro alcalinos (CAI) negativo por la sustitución de los cationes Ca^{2+} y Mg^{2+} de la solución por Na^+ y K^+ del suelo, tiene diferente dirección de flujo (ver Figura 3.4). El BAU09 registra la misma facie hidroquímica clorurada sódica (Na-Cl) que el 2009, lo que indica que el flujo y el tiempo de retención es la misma.

Otro punto para detallar en estos dos pozos es la alta concentración de nitrato en Pampa Aullagas (BAU10) y Santuario de Quillacas (BAU09). De acuerdo con los resultados previos, estas aguas son sódicas en fase combinada de cloruro y bicarbonatos de característica salobre con el dominio de la evaporación (diagrama de Gibbs) y flujo regional o intermedio (diagrama de Mifflin) que confirma lo indicado por Ormachea et al. (2013) con relación al flujo lento del agua. Estas características indican que la acumulación de iones se debe al traslado lento del agua subterránea por acuífero que cubre el municipio de Pampa Aullagas y Santuario de Quillacas.

De lo antes mencionado, se resalta el comportamiento fisicoquímico de los metales en el río San Juan de Sora Sora de la cuenca Huanuni. Este río tiene 16 metales que registran concentraciones mayores a los VMA – Clase B, con seis metales que predominan en la fase suspendida y 10 que predominan en la fase disuelta (ver Figura 6.7).

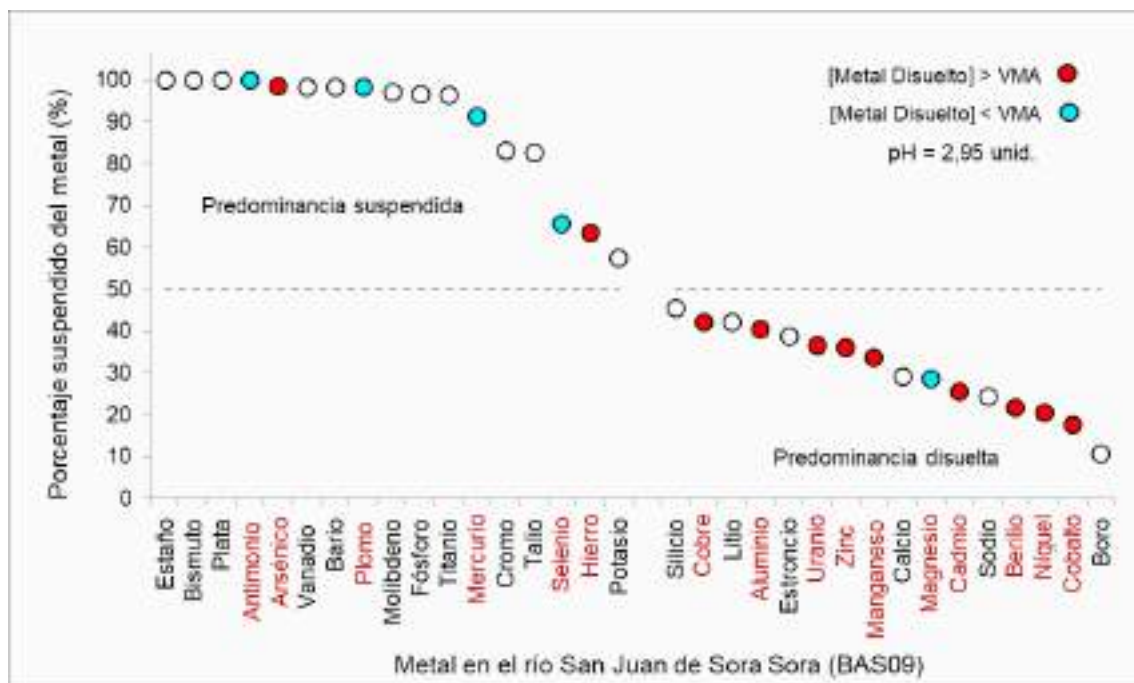


Figura 6.7: Porcentajes suspendido de los metales en el río San Juan de Sora Sora (BAS09).

La fase disuelta del agua superficial y subterránea contiene partículas con diámetro menores a 0,45 µm (micras) ó 0,00045 mm. La Figura 6.7 muestra que luego de la filtración del agua del río San Juan de Sora Sora, la concentración de 11 metales: arsénico, hierro, cobre, aluminio, uranio, zinc, manganeso, cadmio, berilio, níquel y cobalto son mayores a los VMA y que cinco metales: antimonio, plomo, mercurio, selenio y magnesio son menores a los citados VMA.

Cabe señalar que las concentraciones de metales en el río San Juan de Sora Sora-Huanuni se han incrementado en el 2020 y 2021 con relación al estudio realizado por la Sociedad Geológica Boliviana (SGAB) en 1992, el cual es indicado por OEA y PNUMA (1996), que reportó concentraciones de zinc (15 - 105 mg/l), cobre (1,2 - 2 mg/l), plomo (<0,1 – 1,0 mg/l) y manganeso (3,6 – 12,0 mg/l), pero no arsénico (As) en la red hídrica Huanuni-San Juan de Sora Sora, puesto que solo se reportó As con 0,7 mg/l en el canal de descarga de la planta o ingenio Machacamarca.

En la Figura 6.8 se visualiza el comportamiento de 11 metales en los demás puntos de muestreo de agua superficial que registran valores mayores a los ECA de Perú y VMA de Bolivia, en el cual solamente el hierro y aluminio tienen predominancia en su forma suspendida.

De las concentraciones de la fase disuelta de los 11 metales, en todos los puntos el aluminio y hierro registraron valores en dicha fase menores a los VMA y ECA; no obstante, los valores de las concentraciones totales fueron mayores. Mientras que los demás metales tienen registros puntuales, en donde su fase disuelta reporta concentraciones menores a los citados estándares de ambos países;

tal como sucede con el sodio en cuatro puntos (pozo BAU02, el río desaguadero BAS12 y el río Coata PAS04 y PAS06), calcio en el pozo de Huata - Puno PAU06, antimonio en el río Mauri BAS05, boro en el río Ilave PAS03 y manganeso en el río Coata PAS05. Estos resultados muestran que, si el agua se filtra a 0,45 micras de tamaño de partícula principalmente de los metales alcalinos, alcalinos terreos y los metaloides arsénico y boro, las concentraciones seguirán siendo mayores a los valores de comparación de acuerdo con el uso que tienen las normativas de ambos países.

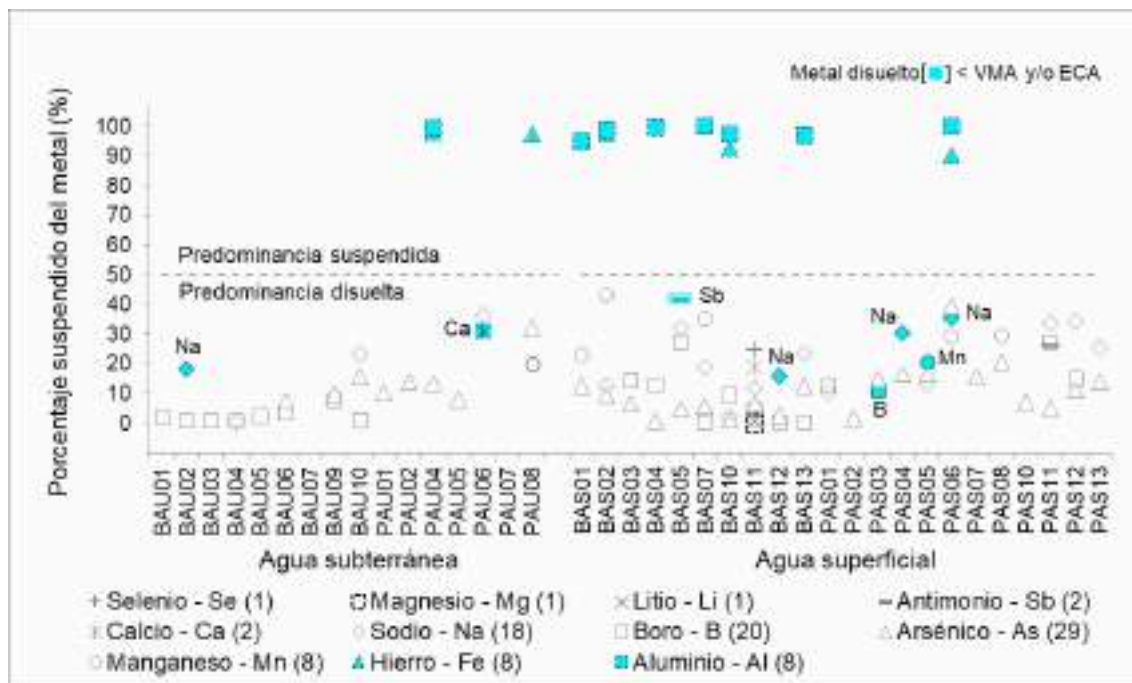


Figura 6.8: Porcentajes suspendidos de los metales en el agua subterránea y superficial de Perú y Bolivia-sistema TDPS.

De otro lado, el comportamiento de las especies de arsénico en el agua superficial se muestra en la Figura 6.9, en donde a mayores concentraciones de arsénico total, mayor valor de arsenito (As III), excepto en el río Desaguadero PAS11-2021, y con mayor repercusión en el río Mauri-Maure. En el caso de agua subterránea se resalta la parte baja de la cuenca del río Coata con similar rango de concentraciones que los pozos ubicados al sur del lago Poopó (Pampa Aullagas y Santuario de Quillacas).

Los resultados de la concentración de arsenito con el uso de los cartuchos descartables de MetalSoft no están en relación con la determinación de las especies de arsénico (As III y As V) mediante el modelo termodinámico PHREEQC con el código WATEQ4F. El citado modelo indica que las **especies de arsenato (As V) están en más de un 90%**, el cual solo cumple en algunos puntos de muestreo - principalmente en Bolivia, cuyas concentraciones de As III en ambas temporadas fueron menores al límite de cuantificación del laboratorio (<0,0001 mg/l), ver ítem 5.1.4, lo que asegura que la predominancia en más del 90% del arsenato (As V).

Los citados cuerpos de agua son los pozos de producción SeLA de Oruro (BAU02 a BAU05), pozo de la localidad de Kemalla – municipio de Caracollo (BAU01), pozo de la localidad Maramara – municipio de Andamarca (BAU07) y en Perú en el pozo de tajo abierto tapado y con electrobomba de Huata – Puno (PAU05) y cuya principal característica es que las concentraciones de los sólidos totales

en suspensión (STS) fueron menores o iguales a 5 mg/l, lo que indica la baja cantidad de sólidos de origen orgánico e inorgánico del entorno del pozo.³⁷

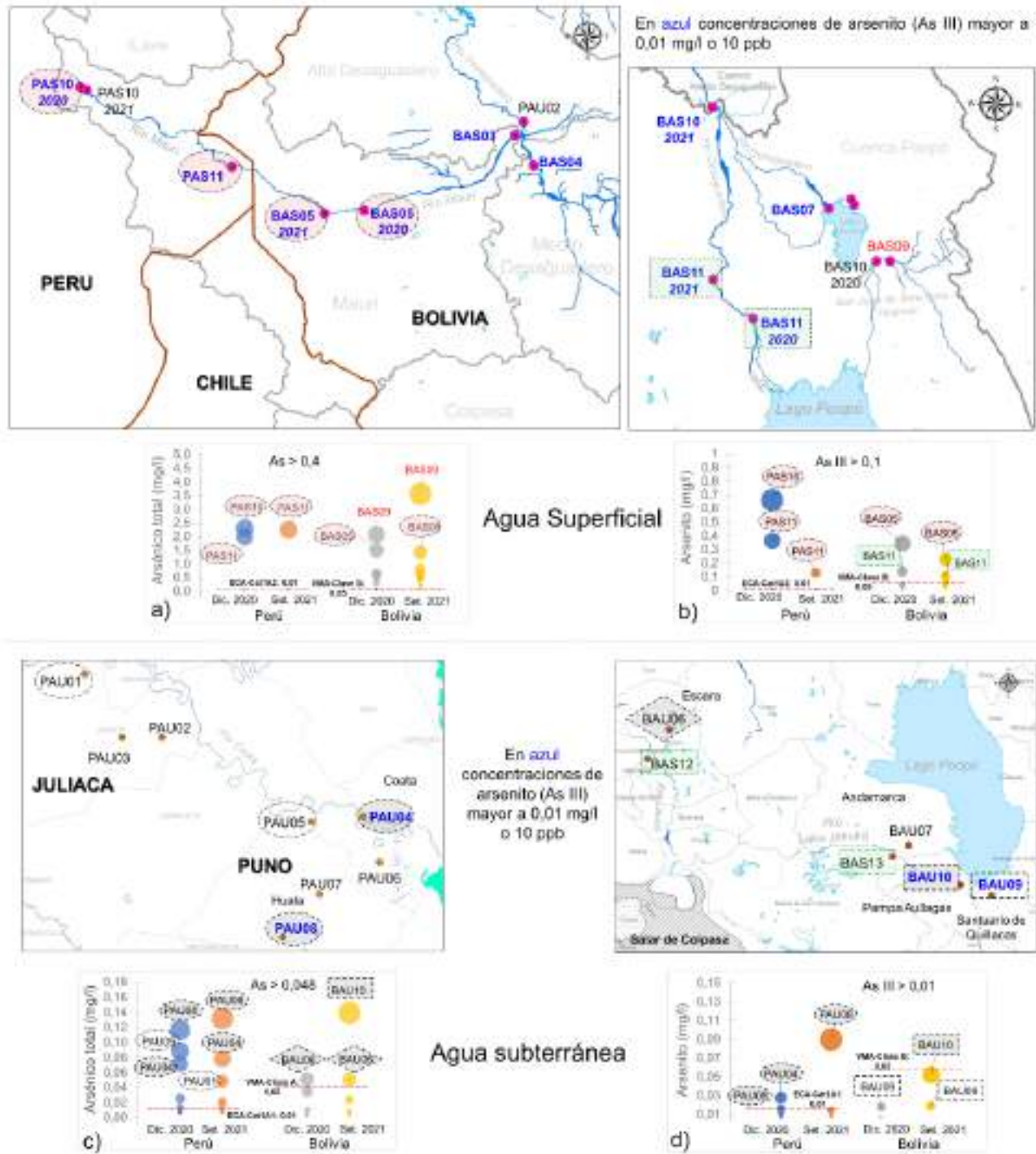


Figura 6.9: Concentración de arsénico total (a) y arsenito (b) del agua superficial, y concentración de arsénico total (c) y arsenito (d) del agua subterránea - sistema TDPS.

37 Otros pozos de agua subterránea registraron As III menor al límite de cuantificación en una sola temporada, tal como el pozo de la comunidad de Antiña – distrito de Escara (BAU06) en septiembre 2021, los pozos de Juliaca PAU02 y PAU03 y el único punto de agua superficial en el río Huancane en diciembre de 2020.

Si bien es cierto, las condiciones redox moderadamente oxidantes son suficientes para mantener el As en su estado de oxidación más alto; es decir, como especies de arsenato As(V) (Ramos et al., 2012), las condiciones redox medidas en campo con el ORP para calcular el Eh y el potencial electrónico (pe) de acuerdo con la ecuación 4.6 y ecuación 4.7 respectivamente; no es el único parámetro para tener cuenta, sino que existen otras condiciones para la oxidación y estabilidad del arsénico analizadas por Reynosa Martínez (2019) mediante la recopilación de estudios indicados en la referencia.

Al respecto, la autora concluye que la oxidación de As III a As V no es espontánea, y que dicho proceso requiere de varios días a diferentes temperaturas y pH dependiendo del tipo de agua³⁸. También es determinante la concentración del arsénico para su estabilidad, puesto que, a mayor concentración la velocidad de oxidación del As III es menor; en tanto, la reducción del As V es rápida cuando está en concentraciones bajas. Otros factores que son relevantes para la estabilidad del arsénico son la radiación ultravioleta - UV (exposición a dichos rayos incrementa la velocidad de oxidación y en oscuridad a temperatura de 4°C **disminuye**).

Por lo que se refiere a los sedimentos, la retención de metales que causa altas concentraciones depende de la composición granulométrica, materia orgánica y otros parámetros biológicos y fisicoquímicos. Las Figuras 6.10 y 6.11 ejemplifican las diferencias fisicoquímicas con las altas y bajas concentraciones de metales con relación a la estructura física visual reportada.

La Figura 6.10 muestra los sedimentos con bajas concentraciones en diferentes cuencas hidrográficas de Perú y Bolivia como el río Ilave (PAS04), Desaguadero (BS01 y BS03) y Mauri (BS02), que en su composición tienen principalmente arena y gravas como el PS04 y BS02, arena como BS03 y limo en BS01. Esta característica fisicoquímica permite que no se retenga los metales pesados al ser fácilmente lavados por las escorrentías. De otro lado, la Figura 6.11 muestra los sedimentos con altas concentraciones de los principales metales pesados. Por lo que respecta al río Coata en su zona de mezcla con el Lago Titicaca (PS02), este punto de muestreo registró la más alta concentración de cadmio, zinc y cobre en Perú.

La característica del sedimento en PS02 (río Coata) es que ha sido colectado a más de 2 metros de profundidad, con poca movilidad al contener materia orgánica en descomposición, siendo por eso un sumidero de materia en suspensión trasladado por el río. En tanto que, los mayores registros de metales pesados en Bolivia y todo el sistema TDPS se registraron en el río San Juan de Sora Sora - Huanuni, siendo el sedimento distinto en su estructura ya que son lodos derivados de relaves o colas producto de la alteración por las actividades mineras.

Otro punto importante de resaltar es el registro en los sedimentos de cobre de concentración mayor al PEL del CEQG en la zona de descarga de las aguas residuales de la PTAR en el lago Uru Uru (BAS04), donde antes se descargaban metales pesados por la actividad minera, tal como Quintanilla et al. (s. f.) refiere con la presencia de cobre y otros metales como manganeso, mercurio y plomo en el lago Uru Uru producto de la disposición de las colas y desmontes que realizaban las actividades industriales principalmente las mineras como la de San José.

38 Como ejemplo se tiene que el agua superficial requiere de 30 días a temperatura ambiente y pH neutro, mientras que el agua de mar le toma la mitad de tiempo en las mismas condiciones. En el agua subterránea solo es estable 24 horas debido a la presencia del Fe (II) en altas concentraciones y que la velocidad es lenta en ausencia de dicho ión metálico.

Perreault (2013) manifiesta que la mina Huanuni se considera como la fuente de contaminación por metales pesados, productos químicos y escurrimiento ácido más importante en la región. Esta influencia minera - junto con otros centros mineros en la parte alta de la subcuenca de Sora Sora (Moeller et al., 2002) - se refleja en las altas concentraciones de sus metales de producción como el estaño y/o plata con contenido de antimonio (metal no deseado) en el agua superficial (Figura 6.12) y sedimentos (Figura 6.13) del río San Juan de Sora Sora-Huanuni.

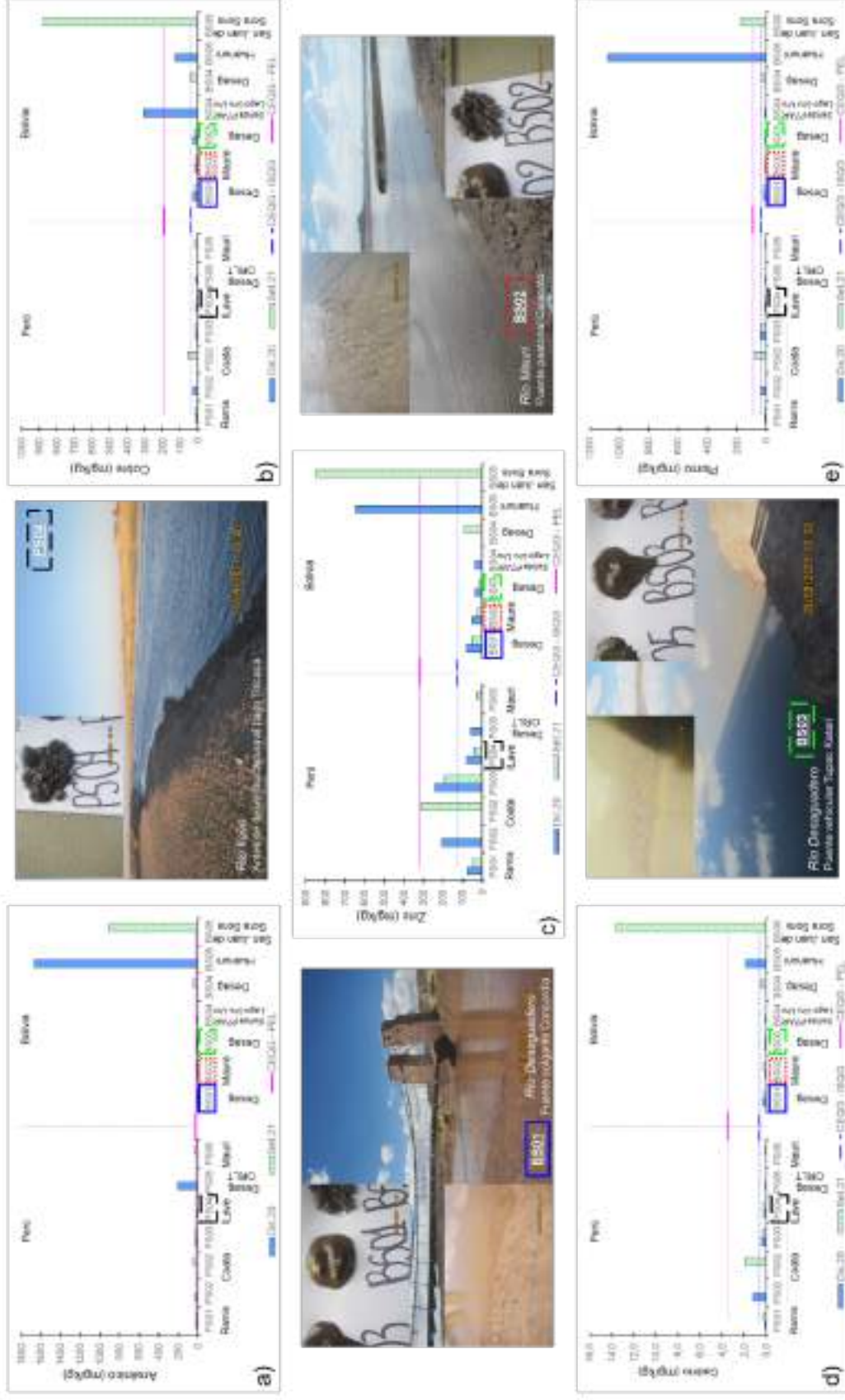


Figura 6.10: Ríos con bajas concentraciones en sedimentos de a) arsénico, b) cobre, z) zinc, d) cadmio y e) plomo de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

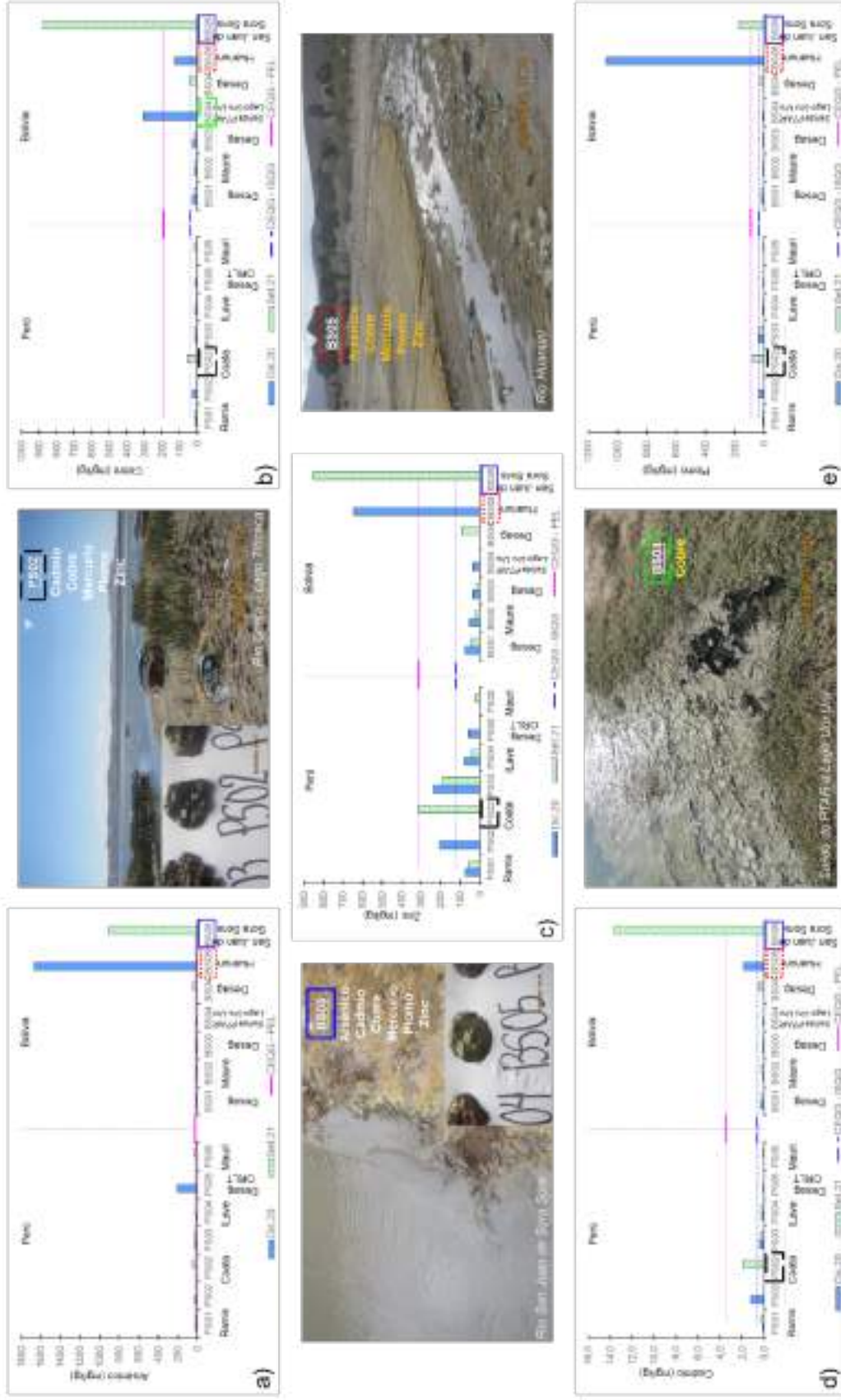


Figura 6.11: Ríos con altas concentraciones en sedimentos de a) arsénico, b) cobre, z) zinc, d) cadmio y e) plomo de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

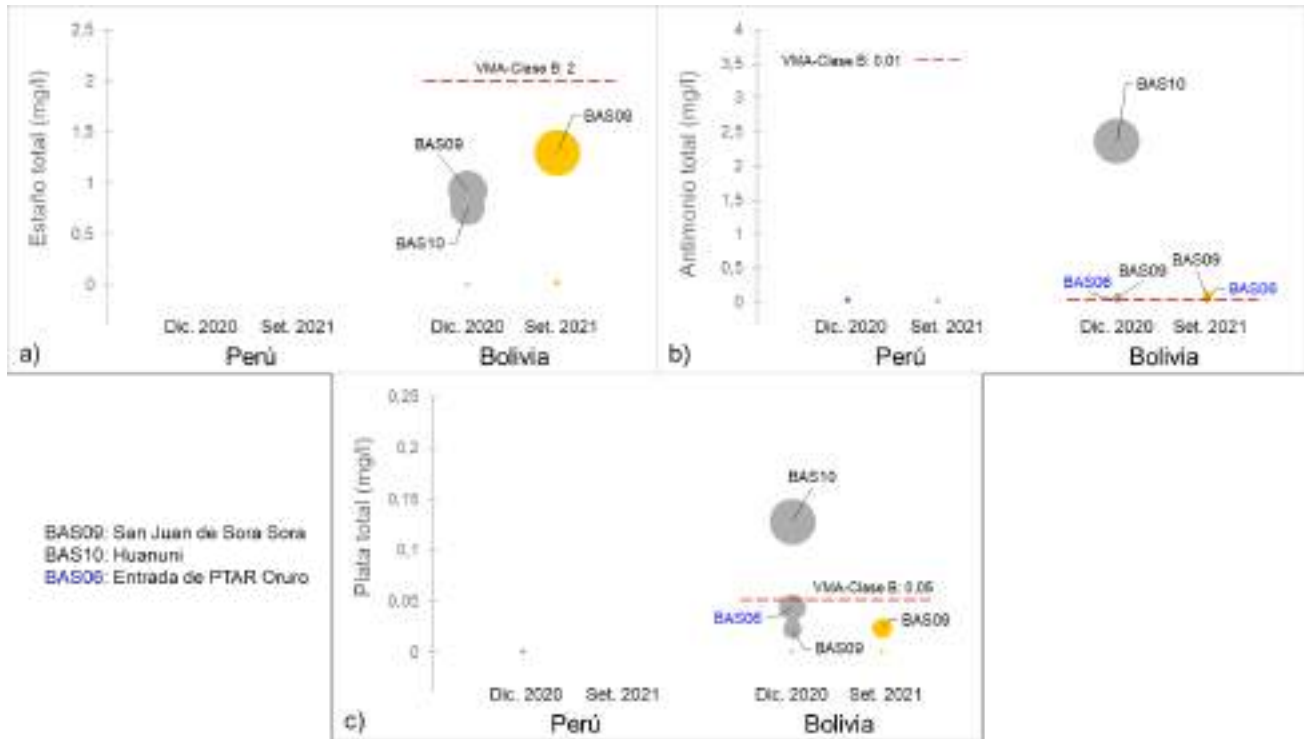


Figura 6.12: Concentraciones en los cuerpos de agua superficial de a) estaño, b) antimonio y c) plata de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

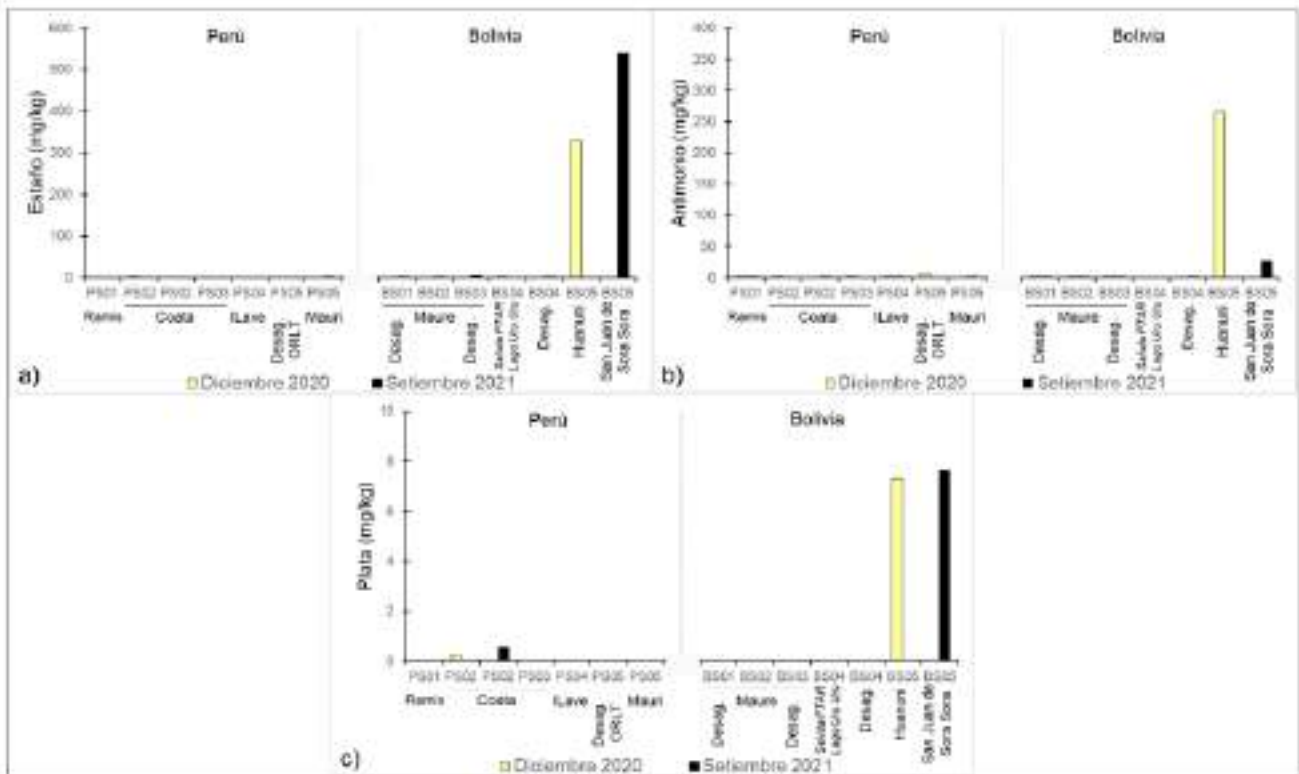


Figura 6.13: Concentraciones en los sedimentos de a) estaño, b) antimonio y c) plata de Perú y Bolivia – sistema TDPS.

En las Figuras 6.12 y 6.13 se observan que las concentraciones de antimonio del río Huanuni en agua superficial (BAS10) y sedimentos (BS05) son mucho mayores que las concentraciones respectivas aguas arriba del Ingenio Machacamarca en el río San Juan de Sora Sora (BAS09 y BS05)³⁹. Caso contrario que el estaño, en donde las concentraciones en el río San Juan de Sora Sora en ambas matrices ambientales son mayores que aguas abajo en el río Huanuni, mientras que los valores de plata son similares en sedimentos (Figura 6.13).

Es importante señalar que dichos sedimentos con metales y otros contaminantes se acumulan en las riberas y llanuras de inundación durante la temporada de lluvias, volviendo las tierras infértiles o no aptas para las actividades agropecuarias (Perreault, 2013), lo que causa la migración de la población en las comunidades afectadas.

Hasta hace 5 años, la Empresa Minera Huanuni descargó aguas y colas (materiales de desechos mineros) directamente a los cuerpos de agua⁴⁰, puesto que las plantas de procesamiento del mineral (ingenio), como la de Santa Elena y Machacamarca no contaban con un dique de contención para retener los residuos minerales y planta de tratamiento de efluentes mineros ácidos. Otros centros mineros que han descargado contaminantes a los ríos en la subcuenca Santa Fe - Huanuni son: Japo, Santa Fe y Morococala (Moeller et al., 2002).

La acumulación de los citados metales en los sedimentos propicia que los relaveros -generalmente cooperativistas mineros- aguas abajo del ingenio de Machacamarca trabajen los depósitos de las orillas para obtener metales como el estaño⁴¹. Hay que resaltar que, desde septiembre 2021 se ha puesto en marcha el tratamiento de las colas de ingenio de Machacamarca⁴², luego de 12 años de declararse la emergencia ambiental en la subcuenca.

-
- 39 La alta concentración de antimonio (**Sb**), junto con el plomo (**Pb**), en agua y sedimentos en el río Huanuni es un indicio de la disposición por parte del Ingenio Machacamarca de los residuos mineros que contienen dichos metales proveniente de la Frankeita. La localidad tipo de este mineral [(**Pb**, Sn)₆FeSn₂Sb₂S₁₄] es San José, Oruro, Bolivia (Sidki, 2017).
- 40 La falta de tratamiento de las colas que causan la contaminación de los ríos Huanuni, San Juan de Sora y Machacamarca, fue uno de los sustentos para declarar en Emergencia la subcuenca Huanuni mediante el Decreto Supremo N° 335 el 21 de octubre del 2009. Disponible en: <https://www.lexivox.org/norms/BO-DS-N335.html>. Consultado el 3 de enero de 2022.
- 41 La acumulación de estaño y otros metales como la plata en los sedimentos se debe además a la poca efectividad de su producción en décadas pasadas; tal como lo cita el Aguirre (1975) en que la recuperación para el estaño fue del 41,1 % y plata del 25,9 %, luego de mediados de los 50s, en el ingenio de Machacamarca proveniente de la mina San Jose de Oruro que explotó minerales de estaño, plomo y plata hasta 1990.
- 42 «Ingenio de Machacamarca se reactiva». Rehabilitación de la planta concentradora para tratar residuos de estaño (colas) en el mismo Ingenio luego de obtener resultados óptimos a nivel piloto en las pruebas metalúrgicas que verificaron el grado de recuperación; con una ley promedio de 0,53 % de las colas para su reprocesamiento. Disponible en <http://www.mineria.gob.bo/documentos/noticias.php?pvnoticia=1538&codigo=eyJzdWliOiIxMjM0NTY3ODkwIiwibmFtZSI6IkpvaG4gRG9lIiwiaWF0IjoxNTE2MjM5M-DIyfq>. Consultado el 4 de enero de 2022.

6.2 CONCLUSIONES

- De todos los parámetros evaluados en las aguas superficiales y subterráneas del sistema hídrico TDPS, se evidencia que los metaloides arsénico y boro y el metal alcalino sodio excedieron los valores de las normativas de Perú (ECA-Agua) y Bolivia (VMA) en la mayor cantidad de puntos de muestreo de acuerdo con el uso de la ley vigente. Estos tres elementos además predominan en su forma disuelta (partículas de diámetro menores a 0,45 micras) junto con otros metales como el calcio, magnesio, estroncio, litio, potasio, bario, entre otros en ámbitos de naturaleza básica (mayor a 7 unid. pH), influenciada por la geología como las formaciones evaporíticas en la llanura o parte central de la cuenca del río Desaguadero.
- El aluminio y hierro predominan en su fase suspendida. La concentración de estos metales además excede las normativas de Perú (ECA-Agua) y Bolivia (VMA) en los ríos Desaguadero y Katari, un pozo de agua subterránea en Juliaca y otro en Oruro (Caracoro – Kemalla) y dos pozos de Puno (Coata y Huata). La misma predominancia de la forma suspendida se evidencia en el titanio que no cuenta con normativa en ambos países.
- La dinámica espacial está relacionado a cabeceras o tramos de cuencas que son fuente de metales o que genera cambios de las concentraciones de metales, tal como ocurre con el arsénico, boro y antimonio en el río Mauri-Maure como principal origen de dichos metaloides debido a las características naturales de los sistemas volcánicos dentro del Campo Geotermal de Borateras, el cual influye al río Desaguadero hasta su desembocadura al lago Poopó, y que en su recorrido hacia el lago se vuelve más salino con alta concentración de sulfato, cloruro y sodio, así como el incremento de otros metales como boro, litio y selenio debido al entorno de salares con depósitos evaporíticos.
- La dinámica temporal ocurre en los ríos con respecto a los metales hierro y aluminio debido a las precipitaciones de corta duración que causan que las concentraciones de dichos metales y la materia en suspensión, registrados en los sólidos suspendidos totales y turbidez, se incrementen. El efecto de las escorrentías se da con mayor influencia en los ríos Katari y Desaguadero (principalmente desde su bifurcación) en Bolivia, cuyas concentraciones de aluminio superaron el estándar de Bolivia (VMA – Clase B).
- El río San Juan de Sora Sora-Huanuni es un cuerpo de agua alterado por los residuos (colas o materiales de desecho) de la minera Huanuni, del Ingenio de Machacamarcá, entre otros, al registrar 16 metales que incumple la normativa de Bolivia (VMA-Clase B) en el ambiente acuático más ácido del sistema TDPS (menor a 3 unid. pH) y con alta carga de sólidos totales en suspensión (STS) mayor a lo reportado en las aguas residuales que ingresan a la PTAR de Oruro. Dichas condiciones modifican las características fisicoquímicas de los metales en el agua, entre las cuales se encuentra al arsénico con predominancia de la forma suspendida, aluminio disuelto en mayor porcentaje (60%) que suspendido (40%), y la única concentración de la fase soluble o disuelta del hierro mayor a los VMA – Clase B.
- El agua subterránea del sistema TDPS tiene diferente composición fisicoquímica determinada por su entorno hidrogeológico como las aguas más salobres al sur de lago Poopó en Pampa Aullagas

y en Coata-Puno, lo que se manifiesta en las diferentes interrelaciones iónicas y la diferencia en la concentración de metales como el boro de mayor registro en Bolivia que supera los VMA – Clase A. Otro factor de cambio en el contenido principalmente de minerales del agua subterránea es la condición estructural del pozo donde se colecta la muestra y que está relacionado con la cantidad de materia suspendida y metales asociados como el hierro y aluminio, como lo que ocurre en Juliaca y Huata-Puno con valores de STS mayores a los otros pozos de Perú y Bolivia.

- El agua subterránea de los pozos ubicados al sur del lago Poopó en los municipios de Pampa Aullagas y Santuario de Quillacas registraron las más altas concentraciones de nitratos de todo el sistema TDPS que superaron los VMA – Clase A, debido a que el agua subterránea es de flujo lento de escala intermedia y regional, por lo que logra acumular dichos aniones junto con otros iones como el cloruro y sodio. Con respecto al fluoruro, está solo en mayor concentración que los VMA-Clase A en pozos de mayor profundidad como el ubicado en la comunidad de Antiña - municipio de Escara con de 8,92 metros.
- La separación de las principales especies de arsénico en el agua mediante el uso de los cartuchos descartables de MetalSoft indica que en general el arsenato (As V), especie menos tóxica que el arsenito (As III), es predominante para ambas épocas (creciente y estiaje); sin embargo, la concentración de As III fue mayor al valor indicado por la OMS de 0,01 mg/l en los cuerpos de agua superficial de Bolivia (ríos Maure-Mauri y Desaguadero), los pozos al sur del lago Poopó (Pampa Aullagas y Santuario de Quillacas) y dos pozos de agua subterránea en Huata y Coata en Puno respectivamente.
- Las especies de arsénico separadas por la retención del arsenato (As V) se da en condiciones restringidas de pH de acuerdo con el método de filtración (4 – 9 unid. pH), por lo que no es aplicable a todos los cuerpos de agua del sistema hídrico TDPS, por lo que se complementa con el uso del modelo termodinámico PHREEQC (condiciones de soluciones en equilibrio); no obstante, los resultados son diferentes en relación al porcentaje de las especies de arsenito (As III), excepto en aquellos puntos de agua con bajas cantidades de materia en suspensión (STS menor o igual a 5 mg/l) como ocurre con los pozos SeLA de Oruro, lo que indica que existen otras condiciones no termodinámicas como la velocidad de oxidación, la concentración de hierro (Fe II), temperatura y pH que inducen a la estabilidad del As III.
- Respecto a la procedencia de arsénico, no se ha determinado la fuente de origen local o puntual; sin embargo, a una mayor escala se vio cambios en su concentración inducida por la geoquímica de origen volcánica de la Cordillera Occidental de los Andes. El arsénico está presente en diferentes especies de minerales, que al ser meteorizadas y lixiviadas son transportadas por flujos de agua superficial y subterráneas tanto en condiciones anóxicas y/o oxidantes. En dichos sectores de origen volcánico se descarta posibilidades de una contaminación inducida por fuentes industriales debido a la ausencia de actividad minera local o próxima en las zonas de estudio y características fisicoquímicas del arsénico diferente a los cuerpos de agua alterados como el río San Juan de Sora Sora-Huanuni.
- En caso de la calidad de los sedimentos, aquellos cuerpos de agua superficial que contienen metales que no superaron la normativa internacional de Canadá (CEQG) están compuestos principalmente

de material gruesa como gravas y arenas como los ríos Mauri e Ilave; así como arena en su totalidad o con limo en el río Desaguadero. No obstante, los sedimentos alterados por la minería como ocurre en el río San Juan de Sora Sora-Huanuni determinan que se modifique la composición granulométrica (textura) al contener relaves mineros; y por ende tengan los registros más altos de metales relacionados a la actividad minera local como la plata, estaño y antimonio, junto con los metales que superaron los valores respectivos de la CEQG como arsénico, zinc, cadmio y plomo.

- La escala de toxicidad de los compuestos de arsénico (As) decrece en el siguiente orden: arsina (H₃As) > arsenito (As III) > arsenato (As V) > compuestos arsenicales > arsénico elemental, en ese sentido con los resultados encontrados nos encontraríamos con una de las formas menos tóxicas del arsénico; sin embargo, según la bibliografía revisada, se establece que el arsénico, es causante de diversos efectos negativos en la salud de las poblaciones expuestas, como defectos neurológicos y neoplasias de la piel, hígado, riñones y vejiga, etc., generadas por la intoxicación por este elemento conocida como arsenicosis; no obstante, no se ha encontrado referencias bibliográficas respecto a estadísticas de población afectada por el As, ni mucho menos de la zona de estudio, situación que debe llevar a una reflexión sobre la importancia de realizar investigaciones científicas en materia de salud relacionadas con el arsénico, ello teniendo en cuenta la exposición de la población a este metaloide, tanto en el ámbito del sistema hídrico TDPS, como en otras regiones, fuera del TDPS, como es el caso de las poblaciones asentadas en la cuenca del río Tambo, y en la región Tacna en la costa sur del Perú.

6.3 RECOMENDACIONES

- Las aguas de los ríos Desaguadero y Katari tuvieron cambios significativos de la calidad debido a la erosión pluvial a causa de las lluvias de corta duración; sin que involucre el incremento de caudal, por lo que se debe realizar el monitoreo en una temporada de máximas precipitaciones (enero a marzo) para ver los efectos de dicha erosión en todos los cuerpos de agua superficial que incluya el ámbito del Perú como los ríos Ramis, Huancané, Coata, Ilave, Ilpa y el río transfronterizo Maure-Mauri.
- En adición a la temporada lluviosa, los monitoreos se deben realizar en el marco de la vigilancia ambiental de manera multisectorial, ligada principalmente al área de ambiente y salud, que involucre también las temporadas secas (junio a septiembre). Dentro de los parámetros a evaluar, se debe considerar en los parámetros de campo a la turbidez y de laboratorio como los sólidos totales en suspensión (STS) relacionados con los metales de predominancia suspendida y los sólidos totales disueltos (STD) con los metales en fase disuelta predominante. Asimismo, tomar en cuenta la validación del uso de los cartuchos descartables MetalSoft mediante el análisis de especiación del arsénico en el laboratorio de todos los tipos de agua superficial y subterránea en el sistema hídrico TDPS que cumplan con las condiciones de uso y buscar otra metodología de análisis para aquellos que no cumplan dichas condiciones como aquellos fuera del rango de pH de 4 a 9.
- Se debe comprender la distribución y características fisicoquímicas de los metales en el agua superficial y subterránea que ayude a entender su comportamiento espacial y temporal desde el origen, la interacción con diversas fuentes en su recorrido, tomando en cuenta los factores hidrometeorológicos como las lluvias, sequías, etc. (parte de los objetivos del presente estudio), la distribución en la cadena alimenticia, el origen de las enfermedades. En adición a lo anterior,

considerar la adaptación de la población local en ambientes con fuentes naturales de elementos químicos como el arsénico, sodio y cloruro debido a que durante miles de años los seres humanos habitaron el sistema hídrico TDPS, y que incluya además los cuerpos de agua superficial y subterránea influenciados por las actividades antrópicas como sucede con los ríos San Juan de Sora Sora-Huanuni y Katari.

- Debido a la preocupación mundial actual del arsénico (As), y en vista que dicho metaloide predomina en su fase disuelta dentro del sistema TDPS, es importante elaborar estudios que enlacen la problemática ambiental (contaminación natural y antropogénica) con la salud de la población en diferentes entornos (con énfasis en los lugares que son fuentes de origen e incrementan el citado elemento), puesto que todos los cuerpos de agua superficial, excepto el río Huancané y varios pozos de agua subterránea registraron concentraciones mayores al valor indicado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) con 0,01 mg/l con su forma disuelta en mayor porcentaje; por lo que es difícil la retención por filtración desde las 0,45 micras del tamaño o diámetro de las partículas.
- Considerar el estudio de salud ambiental de otros parámetros que puedan incidir en la salud de la población como los nitratos en los pozos de tajo abierto evaluados de los municipios de Pampa Aullagas y Santuario de Quillacas, cuyas concentraciones en ambas temporadas evaluadas (diciembre 2020 y septiembre 2021) son las más altas del sistema hídrico TDPS (mayores a 140 mg/l), siendo dichos registros mayores a los VMA-Clase A de 20 mg/l.
- Con la finalidad de conocer la cantidad de metales, y en especial de arsénico, tanto total como de sus especies, es recomendable estudiar la carga contaminante que acarrea el río Maure-Mauri desde las nacientes hasta los lagos Uru Uru y Poopó (sur del TDPS). Así mismo determinar la cantidad de población que realiza el uso primario, como el uso de agua para riego de vegetales y bebida de animales.
- Con la finalidad de determinar el grado de afectación de la salud de la población del TDPS y de otras regiones expuestas al consumo de agua con concentraciones de arsénico superiores a los LMP establecidos en las correspondientes normas de agua potable de Perú y Bolivia, se recomienda realizar un estudio epidemiológico. Para ello será necesario, determinar el número de población que consume agua “contaminada” con arsénico.

BIBLIOGRAFÍA

- Aghazadeh, N., Chitsazan, M., y Golestan, Y. (2017). Hydrochemistry and quality assessment of groundwater in the Ardabil area, Iran. *Applied Water Science*, 7(7), 3599-3616. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0498-9>.
- Aguirre, J. (1975). Monografía minera del departamento de Oruro. En La Paz BO Unidas (Ed.). *Monografía de Bolivia; Oruro – Santa Cruz* (Tomo 3). Biblioteca del Sesquicentenario de la República. <http://koha.musef.org.bo/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=6766>.
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. La Toxicidad del arsénico (Internet). CDC. (2009). (Cited 2019 Jun 4). Available from:<https://www.atsdr-cdc.gov/es/csem/arsenic/>
- Ali, H., y Khan, E. (2018). What are heavy metals? Long-standing controversy over the scientific use of the term ‘heavy metals’—proposal of a comprehensive definition. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 100(1), 6-19. <https://doi.org/10.1080/02772248.2017.1413652>.
- Al-Makishah, N. H., Taleb, M. A., y Barakat, M. A. (2020). Arsenic bioaccumulation in arsenic-contaminated soil: A review. *Chemical Papers*, 74, 2743–2757. <https://doi.org/10.1007/s11696-020-01122-4>.
- ANA - Autoridad Nacional del Agua. (2016). Resolución Jefatural N° 010-2016-ANA. *Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales* Repositorio de la Autoridad Nacional del Agua. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/209>.
- ANA - Autoridad Nacional del Agua. (2018). Resolución Jefatural N° 0-2016-ANA. *Clasificación de Cuerpos de Agua Continentales Superficiales* Resoluciones Jefaturales de la Autoridad Nacional del Agua. https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/clasificacion_de_cuerpos_de_agua_continental_parte_1.pdf.
- Anawar, H. M., Akai, J., Komaki, K., Terao, H., Yoshioka, T., Ishizuka, T., Safiullah, S., Kato, K. (2003). Geochemical occurrence of arsenic in groundwater of Bangladesh: sources and mobilization processes. *Journal of Geochemical Exploration*, 77(2-3), 109-131. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(02\)00273-X](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(02)00273-X).
- Apaza, R., y Calcina, M.E. (2014). Contaminación natural de aguas subterráneas por Arsénico en la zona de Carancas y Huata, Puno. *Revista Investigación Altoandina*, 16(1), 51–58. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5893904>.
- APHA - American Public Health Association, AWWA - American Water Works Association, y WEF - Water Environment Federation. (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater (23a ed.). American Public Health Association. <https://www.awwa.org/Publications/Standard-Methods>.

- Appelo, C., y Postma, D. (2005). *Geochemistry, Groundwater and Pollution* (2a ed.). A.A. Balkema. <https://doi.org/10.1201/9781439833544>.
- Ball, J. W, y Nordstrom, D. K. (2001). User's manual for WATEQ4F, with revised thermodynamic data base and test cases for calculating speciation of minor, trace and redox elements in natural waters (revisado y reimpresso). United States Geological Survey (USGS). https://www.wr.usgs.gov/projects/GWC_chemtherm/software.htm.
- Basu, A., Saha, D., Saha, R., Ghosh, T., y Saha, B. (2014). A review on sources, toxicity, and remediation technologies for removing arsenic from drinking water. *Research on Chemical Intermediates*, 40(2), 447-485. <https://doi.org/10.1007/s11164-012-1000-4>.
- Bhattacharya, P., Welch, A. H., Stollenwerk, K. G., McLaughlin, M. J., Bundschuh, J., y Panaullah, G. (2007). Arsenic in the environment: biology and chemistry. *Science of the total environment*, 379(2-3), 109-120. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.02.037>.
- Brown, R.H., Konoplyantsev, A. A., y Kovalevsky, V. S. (1975). *Groundwater Studies: an-International Guide for Research and Practice* (1a ed. Suplemento 2). The UNESCO Press. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000002190>.
- Bucio, J. (2004). Intoxicación por arsina. Información y presentación de un caso. *Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social*, 43(1), 57-60. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=457745540008>.
- Bundschuh, J., Pérez, C., y Litter, M. (2008). Distribución del Arsénico en las Regiones Ibéricas e Iberoamericana. Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED). http://limza.uta.cl/jdownloads/Libros/distribucion_del_arsnico_en_las_regiones_ibrica_e_iberamericana.pdf.
- Bundschuh, J., Litter, M. I., Parvez, F., Román-Ross, G., Nicolli, H. B., Jean, J. S., Liu, C. W., López, D., Armienta, M. A. Guilherme, L. R. G., Cuevas, A., Cornejo, L., Cumbal, L., y Toujaguez, R. (2012) One century of arsenic exposure in Latin America: A review of history and occurrence from 14 countries. *Science of the Total Environment*, 429, 2–35. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.06.024>.
- Bundschuh, J., Schneider, J., Alam, M. A., Niazi, N. K., Herath, I., Parvez, F., Tomaszewska, B., Guilherme, L. R. G., Maity, J. P., López, D. L., Cirelli, A. F., Pérez-Carrera, A., Morales-Simfors, N., Alarcón-Herrera, M. T., Baisch, P., Mohan, D., y Mukherjee, A. (2021). Seven potential sources of arsenic pollution in Latin America and their environmental and health impacts. *Science of the Total Environment*, 780, 146274. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146274>.
- Calcina, M. E. (2017). *Evaluación geoquímica del arsénico en aguas subterráneas de la Subcuenca del Río Callacame, Desaguadero Puno* [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio Institucional. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/9616>.
- Chen S.J., Yan X.J., y Chen Z. (2013). Arsenic in Nature. In: Kretsinger R.H., Uversky V.N., Permyakov E.A. (eds.) *Encyclopedia of Metalloproteins*. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1533-6_489.
- Choong, T. S., Chuah, T. G., Robiah, Y., Koay, F. G., y Azni, I. (2007). Arsenic toxicity, health hazards and removal techniques from water: an overview. *Desalination*, 217(1-3), 139-166. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.015>.

- Custodio, E., y Llamas, M. R. (1976). *Hidrología Subterránea* (2a ed. Tomo I). Editorial Omega. https://www.academia.edu/41067940/Custodio_Llamas_Tomo.
- Denzoin, L. A., Soraci, A. L., y Tapia, M. O. (2013). Homeostasis del glutatión. *Acta bioquím. Clín. latinoam.*, 47(3), 529-539. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53529349007>.
- DGA - Dirección General de Aguas. (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del río Imperial. Ministerio de Obras Públicas de Chile. <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/Lauca.pdf>.
- Dinka, M. O., Loiskandl, W., y Ndambuki, J. M. (2015). Hydrochemical characterization of various surface water and groundwater resources available in Matahara areas, Fantalle Woreda of Oromiya region. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 3, 444-456. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.02.007>.
- Drahota, P., y Filippi, M. (2009). Secondary arsenic minerals in the environment: a review. *Environment international*, 35(8), 1243-1255. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2009.07.004>.
- Dzombak, D. A., y Morel, F. M. (1990). *Surface complexation modeling: hydrous ferric oxide*. John Wiley & Sons. Disponible en línea: <https://books.google.com.pe/books?id=LGBtoHNUbWwC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>.
- EPA - Environmental Protection Agency. (2006). *Edition of the drinking water standards and health advisories*, (EPA/822/R-06/013). https://hero.epa.gov/hero/index.cfm/reference/details/reference_id/91193.
- Escalera, R., y Ormachea, M. (2017). Hidroquímica de la presencia natural de arsénico en aguas subterráneas de áreas suburbanas de Cochabamba-Bolivia y evaluación de la viabilidad técnica de procesos de remoción. *Investigación & Desarrollo*, 1(17), 27-41. <http://dx.doi.org/10.23881/idupbo.017.1-3i>.
- Escalera, R., Ormachea, O., Ormachea, M., García, J. L., Suso, J., García, M. E., Pérez, F., Hornero, J., Fernandez, O., Zelaya, A., y Huallpara, L. (2020). Diseño e implementación de un sistema de tratamiento para la remoción de arsénico del agua de consumo en el altiplano y valles de Bolivia. *Investigación & Desarrollo*, 20(1), 23-39. <https://doi.org/10.23881/idupbo.020.1>.
- Fagundo-Castillo, J. R., Alconada-Magliano, M. M., Carrillo-Rivera, J. J., y González-Hernández, P. (2014). Caracterización de los flujos de agua subterránea a partir de su salinidad. *Tecnología y ciencias del agua*, 5(3), 63-80. <http://www.revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/428>.
- Fano, D (2021). “Exposición a Arsénico en agua potable, metabolismo, y sus efectos sobre los resultados perinatales en Tacna, Perú”. Tesis para optar el grado de Maestro en Fiología. Universidad Peruana Cayetano Heredia. Lima-Perú.
- Ferguson, J. F., y Gavis, J. (1972). A review of the arsenic cycle in natural waters. *Water research*, 6(11), 1259-1274. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(72\)90052-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(72)90052-8).
- García, M. E., y Bundschuh, J. (2006). Control mechanisms of seasonal variation of dissolved arsenic and heavy metal concentrations in surface waters of Lake Poopo Basin, Bolivia. Geological Society of America Annual Meeting, Philadelphia [Abstract], 22-25 October 2006, *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 38, 7, p. 320. <https://gsa.confex.com/gsa/2006AM/>

webprogram/Paper115735.html.

- George, C. M., Sima, L., Arias, M., Mihalic, J., Cabrera, L. Z., Danz, D., Checkley, W., y Gilman, R. H. (2014). Arsenic exposure in drinking water: An unrecognized health threat in Peru. *Bulletin of the World Health Organization*, 92(8), 565–572. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4147402/>.
- Gibbs, R. J. (1970). Mechanisms Controlling Ground Water Chemistry. *Science*, 170(3962), 1088-1090. <https://doi.org/10.1126/science.170.3962.1088>.
- Gillispie, E. C., Sowers, T. D., Duckworth, O. W., y Polizzotto, M. L. (2015). Soil pollution due to irrigation with arsenic-contaminated groundwater: Current state of science. *Current Pollution Reports*, 1(1), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s40726-015-0001-5>.
- Gupta, S., Saravanan, B., Agarwal, M., Yadav, G. S., y Kumar, P. (2016). Hydrogeochemical Constraints of Uranium Solubility and Groundwater Quality in Aquifers of Central and Western Parts of Singhbhum Shear Zone, Jharkhand, India. *Journal of Groundwater Resources*, 5/2, 16-36. <https://www.researchgate.net/publication/313526737>.
- Hammer, Ø., Harper D.A.T., y Ryan, P.D. (2001). *PAST: Paleontological Statistics software package for education and data analysis* (version 4.09) [software de computador]. Natural History Museum – University of Oslo. <https://www.nhm.uio.no/english/research/infrastructure/past/>.
- Han, D., Liang, X., Jin, M., Currell, M. J., Han, Y., y Song, X. (2009). Hydrogeochemical indicators of groundwater flow systems in the Yangwu River alluvial fan, Xinzhou Basin, Shanxi, China. *Environmental management*, 44(2), 243-255. <https://doi.org/10.1007/s00267-009-9301-0>.
- Hem, J. D. (1985). *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water* (3a ed. WSP 2254). Department of the Interior, US Geological Survey.: <https://pubs.usgs.gov/wsp/wsp2254/>.
- Henke, K. (2009). Arsenic: environmental chemistry, health threats and waste treatment. John Wiley & Sons. <https://vdoc.pub/download/arsenic-environmental-chemistry-health-threats-and-waste-treatment-7rvc4plp18s0>.
- Holm, T. R., y Curtiss, C. D. (1989). A comparison of oxidation-reduction potentials calculated from the arsenic (V)/arsenic (III) and iron (III)/iron (II) couples with measured platinum electrode potentials in groundwater. *J. Contam. Hydrol*, 5(1), 67-81. [https://doi.org/10.1016/0169-7722\(89\)90006-5](https://doi.org/10.1016/0169-7722(89)90006-5).
- James, C. N., Copeland, R. C., y Lytle, D. A. (2004). *Relationship between Oxidation-Reduction Potential, Oxidant, and pH in Drinking Water*. [Paper de Presentación]. Water Quality Technology Conference, San Antonio, Estados Unidos. https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NRMRL&dirEntryId=125092.
- Kanagaraj, G., Elango, L., Sridhar, S. G. D., y Gowrisankar, G. (2018). Hydrogeochemical processes and influence of seawater intrusion in coastal aquifers south of Chennai, Tamil Nadu, India. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(9), 8989-9011. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0910-5>.
- Kawo, N. S., y Karuppanan, S. (2018). Groundwater quality assessment using water quality index and GIS technique in Modjo River Basin, central Ethiopia. *Journal of African Earth Sciences*,

- 147, 300-311. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.06.034>.
- Kumaresan, M., y Riyazuddin, P. (2001). Overview of speciation chemistry of arsenic. *Current science*, 80(7), 837-846. <https://www.jstor.org/stable/24105734>.
- Litter, M. I., Ingallinella, A. M., Olmos, V., Savio, M., Difeo, G., Botto, L., Farfán, E. M., Taylor, S., Frangie, S., Herkovits, J., Schalamuk, I., González, M. J., Berardozi, E., García, F. S., Bhattacharya, P., y Ahmad, A. (2019). Arsenic in Argentina: Occurrence, human health, legislation, and determination. *Science of the total environment*, 676, 756-766. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.262>.
- Londoño, L. F., Londoño, P. T., y Muñoz, F. G. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Bioteología en el sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145-153. <https://revistas.unicauca.edu.co/index.php/bioteologia/article/view/489/630>.
- Long, H., y Nelson, L. S. (2016). Metals and metalloids. En Tintinalli, J. E., Stapczynski J., Ma, O., Yealy, D.M., Meckler, G. D., y Cline, D. M. (Eds.), *Tintinalli's Emergency Medicine: A Comprehensive Study Guide, 8e*. McGraw Hill. <https://accessmedicine.mhmedical.com/content.aspx?bookid=1658§ionid=109416111>.
- López, C. C. (2018). Análisis de las características fisicoquímicas del agua subterránea de la cuenca del río Chicú, Colombia, usando indicadores hidroquímicos y estadística multivariante. *Ingeniería y Ciencia*, 14(28), 35-68. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.14.28.2>.
- Mandal, B. K., y Suzuki, K. T. (2002). Arsenic round the world: a review. *Talanta*, 58(1), 201-235. [https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(02\)00268-0](https://doi.org/10.1016/S0039-9140(02)00268-0).
- Marandi, A., y Shand, P. (2018). Groundwater chemistry and the Gibbs Diagram. *Applied Geochemistry*, 97, 209-212. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.07.009>.
- Mayo, A. L., y Loucks, M. D. (1995). Solute and isotopic geochemistry and ground water flow in the central Wasatch Range, Utah. *Journal of Hydrology*, 172(1-4), 31-59. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02748-E](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02748-E).
- Meng, X., y Wang, W. (Julio 12-15, 1998). Speciation of arsenic by disposable cartridges. In Book of posters of the third international conference on arsenic exposure and health effects. Society of Environmental Geochemistry and Health, University of Colorado at Denver Denver, CO. Descargado de: <https://www.researchgate.net/>.
- Mifflin, M. D. (1968). *Delineation of ground-water flow systems in Nevada* [Tesis de doctorado, University of Nevada, Reno]. ScholarWorks - Theses & Dissertations. <http://hdl.handle.net/11714/1519>.
- Moeller, H., Trujillo, E., Soria, N., y Soria, Y., Choque, E., Jacinto, F. (2002). El sistema productivo de las cooperativas. En *Dinamitas y contaminantes. Cooperativas mineras y su incidencia en la problemática ambiental* (1a ed., pp. 51-80). Fundación PIEB http://www.pieb.com.bo/2016/BPIEB/BPIEB_10_37_Dinamitas.pdf.
- Morales-Simfors, N., Bundschuh, J., Herath, I., Inguaggiato, C., Caselli, A. T., Tapia, J., Apaza, F. E., Armienta, M. A., Ormachea M., Joseph, E., y López, D. L. (2020). Arsenic in Latin America: A critical overview on the geochemistry of arsenic originating from geothermal features and

- volcanic emissions for solving its environmental consequences. *Science of the Total Environment*, 716, 135564. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135564>.
- Murcott, S. (2012). Arsenic contamination in the world. IWA publishing. <https://doi.org/10.2166/9781780400396>.
- Naujokas, M. F., Anderson, B., Ahsan, H., Aposhian, H. V., Graziano, J. H., Thompson, C., y Suk, W. A. (2013). The broad scope of health effects from chronic arsenic exposure: update on a worldwide public health problem. *Environmental health perspectives*, 121(3), 295-302. <https://doi.org/10.1289/ehp.1205875>.
- Ng, J.C., Wang J., y Shraim, A. (2003). A global health problem caused by arsenic from natural source. *Chemosphere*, 52(9), 1353-1359. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(03\)00470-3](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00470-3).
- Nriagu, J. O., Bhattacharya, P., Mukherjee, A. B., Bundschuh, J., Zevenhoven, R., y Loeppert, R. H. (2007). Arsenic in soil and groundwater: an overview. *Trace Metals and other Contaminant in the Environment*, 9, 3-60. [https://doi.org/10.1016/S1875-1121\(06\)09001-8](https://doi.org/10.1016/S1875-1121(06)09001-8).
- Ocola, J. (2015). Arsénico en las cuencas de los ríos Caplina y Locumba. En Bernex, N. y Novoa, Z. (Eds.). *Aguas y Arsénico Natural en Perú* (pp 178). Jornada de la Academia Nacional de Ciencias (1a edición). <https://catalogobiam.minam.gob.pe/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=9174>.
- OEA - Organización de los Estados Americanos y PNUMA - Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (1996). *Diagnóstico Ambiental del Sistema Titicaca-Desaguadero-Poopo-Salar de Coipasa (Sistema TDPS) Bolivia – Perú*. (pp. 223). Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente de la OEA y División de Aguas Continentales del PNUMA. <https://www.oas.org/dsd/publications/Unit/oea31s/oea31s.pdf>.
- OEFA - Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. (2017). Evaluación ambiental temprana en el área de influencia del proyecto minero Tía María y zonas aledañas, en los distritos de Cocachacra, Deán Valdivia, Punta de Bombón y Mejía, provincia de Islay, departamento de Arequipa, durante el año 2017. Informe N.º 0078-2017-OEFA/DE-SDCA-CMVA. <https://repositorio.oefa.gob.pe/handle/123456789/100>.
- Ormachea, M., Wern, H., Johnsson, F., Bhattacharya, P., Sracek, O., Thunvik, R., Quintanilla, J., y Bundschuh, J. (2013). Geogenic arsenic and other trace elements in the shallow hydrogeologic system of Southern Poopó Basin, Bolivian Altiplano. *Journal of Hazardous Materials*, 262, 924–940. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.06.078>.
- Ormachea, M. R., Garcia, J. L., Bhattacharya, P., Sracek, O., Garcia, M. E., Kohfahl, C., Quintanilla, J., Hornero, J., y Bundschuh, J. (2016). Geochemistry of naturally occurring arsenic in groundwater and surface-water in the southern part of the Poopó Lake basin, Bolivian Altiplano. *Journal of Groundwater for Sustainable Development*. 2–3, 104-116. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2016.04.002>.
- Parkhurst, D. L., y Appelo, C. A. J. (2013). *Description of input and examples for PHREEQC version 3—a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations* (6, A43). U.S. Geological Survey. U.S. Geological Survey Techniques and Methods. <https://doi.org/10.3133/tm6A43>.

- Peralta, Y., Cabassi, J., Tassi, F., Caffè, P. J., y Vaselli, O. (2017). Fluid geochemistry of a deep-seated geothermal resource in the Puna plateau (Jujuy Province, Argentina). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 338, 121-134. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.03.030>
- Perreault, T. (2013). ¿DESPOJO POR ACUMULACIÓN? Minería, agua y justicia social en el Altiplano boliviano. En Arroyo, A., y Rutgerd, N. (Eds.), *Aguas robadas: Despojo hídrico y movilización social* (1a ed., pp. 187-205). Justicia Hídrica; Abya -Yala; Instituto de Estudios Peruanos (IEP). <https://fondoeditorial.iep.org.pe/producto/aguas-robadas-despojo-hidrico-y-movilizacion-social/>
- Piper, A. M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 25(6), 914-928. <https://doi.org/10.1029/TR025i006p00914>.
- Pouilly, M., Lazzaro, X., Point, D., y Aguirre, M. (2014). *Línea base de conocimientos sobre los recursos hidrológicos e hidrobiológicos en el sistema TDPS con enfoque en la cuenca del Lago Titicaca*. IUCN Library Sistem. <https://portals.iucn.org/library/node/44673>.
- Quino, I., Ormachea, M., Ramos, O. E., Quintanilla, J., Prakash, J., Ahmad, A., y Bhattacharya, P. (2021). Hydrogeochemical contrasts in the shallow aquifer systems of the Lower Katari Basin and Southern Poopó Basin, Bolivian Altiplano. *Journal of South American Earth Sciences*, 105, 102914. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102914>.
- Quintanilla, J., y Quino, I. (s. f.). Hidroquímica de la Cuenca Endorreica del Altiplano (Sistema TDPS). En Pouilly, M., Lazzaro, X., Poin, D., Aguirre. (2014). *Línea base de conocimientos sobre los recursos hidrobiológicos en el sistema TDPS con enfoque en la cuenca del Lago Titicaca*. (pp. 320). Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y de los Recursos Naturales (IUCN). <https://portals.iucn.org/library/node/44673>.
- Raffa, C. M., Chiampo, F., y Shanthakumar, S. (2021). Remediation of metal/metalloid-polluted soils: a short review. *Applied Sciences*, 11(9), 4134. <https://doi.org/10.3390/app11094134>.
- Ramos, O. E., Cáceres, L. F., Ormachea, M. R., Bhattacharya, P., Quino, I., Quintanilla, J., Sracek, O., Thunvik, R., Bundschuh, J., y García, M. E. (2012). Sources and behavior of arsenic and trace elements in groundwater and surface water in the Poopó Lake Basin, Bolivian Altiplano. *Environmental Earth Sciences*, 66, 793–807. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1288-1>.
- Rangel, E. A., Montañez, L. E., Luévanos, M. P., y Balagurusamy, N. (2015). Impacto del arsénico en el ambiente y su transformación por microorganismos. *Terra Latinoamericana*, 33(2), 103-118. <https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/51/55>.
- Ravikumar, P., Somashekar, R. K., y Prakash, K. L. (2015). A comparative study on usage of Durov and Piper diagrams to interpret hydrochemical processes in groundwater from SRLIS river basin, Karnataka, India. *Elixir International Journal – Earth Science*, 80, 31073-31077. <http://eprints-bangaloreuniversity.in/id/eprint/4932>.
- Rekha, V. B. (2013). *A comparative study of the hydrological scenario of Peruvanthanam sub watershed and Valiyathodu sub watershed of Manimala River basin, Kerala, South India, Chapter 6: Ion Chemistry (pp. 75-83)* [Tesis de doctorado en Ciencias Ambientales, Mahatma Gandhi University]. Shodhganga: a reservoir of Indian theses. <http://hdl.handle.net/10603/25955>.

- Reynosa Martínez, A. C. (Enero 19, 2019). Estabilidad del arsénico en el agua. Los Arguenderos de la Ciencia – Laboratorio de Investigación en Energía y Agua (GrlnAer-LAB). <https://grinaerlab.wordpress.com/2019/01/29/estabilidad-del-arsenico-en-el-agua/>.
- Rossmann, T. G. (2003). Mechanism of arsenic carcinogenesis: an integrated approach. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 533(1-2), 37-65. <https://doi.org/10.1016/j.mrfmmm.2003.07.009>.
- Rodríguez, V. M., Jiménez-Capdeville, M. E., y Giordano, M. (2003). The effects of arsenic exposure on the nervous system. *Toxicology letters*, 145(1), 1-18. [https://doi.org/10.1016/S0378-4274\(03\)00262-5](https://doi.org/10.1016/S0378-4274(03)00262-5).
- Rusydi, A. F. (2018). Correlation between conductivity and total dissolved solid in various type of water: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 118, 012019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/118/1/012019>.
- Schoeller, H. (1977). Geochemistry of ground water. En Brown, R. H., Konoplyantsev, A. A., Ineson, J., y Kovalevsky, V. S. *Groundwater Studies—An International Guide for Research and Practice* (1a edición – suplemento 2, pp. 15.2, 9-10). The Unesco Press Paris. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000002190>.
- Shaji, E., Santosh, M., Sarath, K. V., Prakash, P., Deepchand, V., y Divya, B. V. (2021). Arsenic contamination of groundwater: A global synopsis with focus on the Indian Peninsula. *Geoscience Frontiers*, 12(3), 101079. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.08.015>.
- Schlebusch, C. M., Gattepaille, L. M., Engstrom, K., Vahter, M., Jakobsson, M., Broberg, K. (2015). Human Adaptation to Arsenic-Rich Environments. *Molecular Biology and Evolution* 32, 1544-1555.
- Sharma, V. K., y Sohn, M. (2009). Aquatic arsenic: toxicity, speciation, transformations, and remediation. *Environment international*, 35(4), 743-759. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2009.01.005>.
- Sidki, N. (2017). *Metalogénesis del yacimiento San José, Oruro, Bolivia* [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica de Catalunya]. Portal de acceso abierto al conocimiento de la UPC <http://hdl.handle.net/2117/108188>.
- Simler, R. (2021). *DIAGRAMMES: Logiciel d'hydrochimie multilingue en distribution libre* (versión 6.75) [software de computador]. Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon. <http://www.lha.univ-avignon.fr/LHA-Logiciels.htm>.
- Singh, S., Raju, N. J., y Ramakrishna, C. (2015). Evaluation of Groundwater Quality and Its Suitability for Domestic and Irrigation Use in Parts of the Chandauli-Varanasi Region, Uttar Pradesh, India. *Journal of Water Resource and Protection*, 7(7), 572-587. <http://dx.doi.org/10.4236/jwarpp.2015.77046>.
- Smedley, P., y Kinniburgh, D. (2002). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 17(5), 517-568. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00018-5).
- Smith, A. H., Marshall, G., Roh, T., Ferreccio, C., Liaw, J., y Steinmaus, C. (2018). Lung, bladder, and kidney cancer mortality 40 years after arsenic exposure reduction. *Journal of the National Cancer Institute*, 110(3), 241–249. <https://doi.org/10.1093/jnci/djx201>.

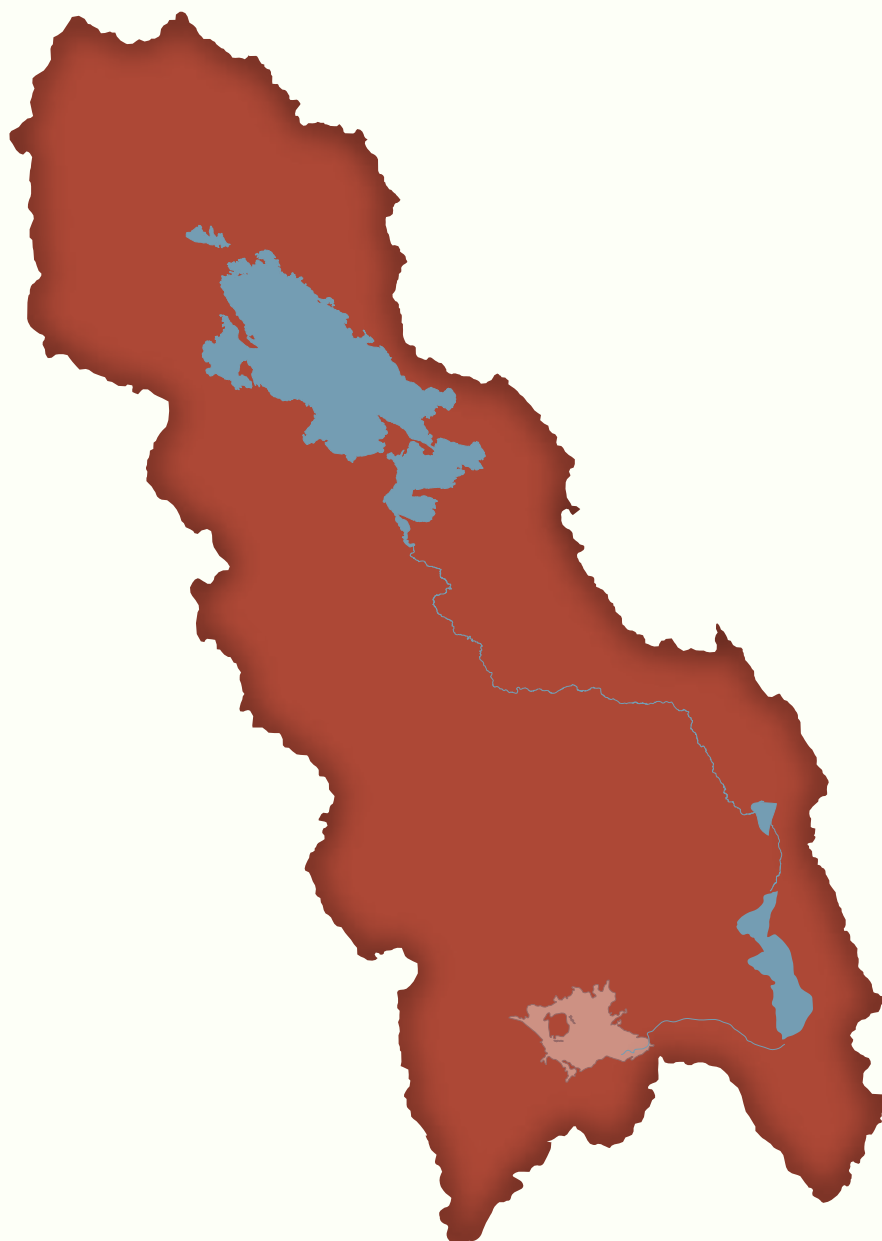
- Spotorno, A (2017). Evolución de la especie humana: ¿odisea o tragedia? Programa de Genética Humana, ICB, Facultad de Medicina, Universidad de Chile.
- Stiff Jr, H. A. (1951). The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. *Journal of Petroleum Technology*, 192, 376-379. <https://doi.org/10.2118/951376-G>.
- Stolz, J., Basu, P., y Oremland, R. (2002). Microbial transformation of elements: the case of arsenic and selenium. *International Microbiology*, 5(4), 201-207. <https://doi.org/10.1007/s10123-002-0091-y>.
- Striggow, B. (2017). *Field Measurement of Oxidation-Reduction Potential (ORP)* (SESDPROC-113-R2). <https://www.epa.gov/quality/field-measurement-oxidation-reduction-potential>.
- Stuyfzand, P. J. (1993). *Hydrochemistry and hydrology of the coastal dune area of the Western Netherlands* [Tesis de Doctorado, Vrije Universiteit Amsterdam]. VU Research Portal. <https://research.vu.nl/en/publications/hydrochemistry-and-hydrology-of-the-coastal-dune-area-of-the-west>.
- Thirunavukkarasu, O. S., Viraraghavan, T., Subramanian, K. S., y Tanjore, S. (2002). Organic arsenic removal from drinking water. *Urban water*, 4(4), 415-421. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(02\)00029-8](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(02)00029-8).
- Torres-Rivera, S., Ramos-Leal, J.A., Moran-Ramírez, J., Torres-Hernández, J. R., Padilla-Sánchez, L., Carranco-Lozada, S. E., y García-Arreola, M. E. (2019). Hydrogeochemical characterization and quantification of the groundwater mixture in a hydrogeological basin of the middle zone of San Luis Potosí. *Geofísica Internacional*, 58(4), 247-258. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2019.58.4.2056>.
- Tsai, S. L., Singh, S., y Chen, W. (2009). Arsenic metabolism by microbes in nature and the impact on arsenic remediation. *Current Opinion in Biotechnology*, 20(6), 659-667. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2009.09.013>.
- Tseng, C. H. (2009). A review on environmental factors regulating arsenic methylation in humans. *Toxicology and applied pharmacology*, 235(3), 338-350. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2008.12.016>.
- Van Halem, D., Bakker, S. A., Amy, G. L., y Van Dijk, J. C. (2009). Arsenic in drinking water: a worldwide water quality concern for water supply companies. *Drinking Water Engineering and Science*, 2(1), 29-34. <https://doi.org/10.5194/dwes-2-29-2009>.
- Vahter, M. (1999). Methylation of inorganic arsenic in different mammalian species and population groups. *Science progress*, 82(1), 69-88. <https://doi.org/10.1177/003685049908200104>.
- Vargas, V., Cruz, V., Antayhua, Y., Rivera, M., Chirif, H. y West, J. (2012). Estudio geotérmico del campo Borateras [Boletín C 47]: Geodinámica e Ingeniería Geológica. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET). Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/287>.
- Vega, L., Styblo, M., Patterson, R., Cullen, W., Wang, C., y Germolec, D. (2001). Differential effects of trivalent and pentavalent arsenicals on cell proliferation and cytokine secretion in normal human epidermal keratinocytes. *Toxicology and applied pharmacology*, 172(3), 225-232. <https://doi.org/10.1006/taap.2001.9152>.

- Wang, S., y Mulligan, C. N. (2006). Occurrence of arsenic contamination in Canada: sources, behavior and distribution. *Science of the total Environment*, 366(2-3), 701-721. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.09.005>.
- Walton, N. (1989). Electrical Conductivity and total dissolved solids - what is their precise relationship? *Desalination*, 72(3), 275-292. [https://doi.org/10.1016/0011-9164\(89\)80012-8](https://doi.org/10.1016/0011-9164(89)80012-8)
- Welch, A. H., Lico, M. S., y Hughes, J. L. (1988). Arsenic in ground water of the western United States. *Groundwater*, 26(3), 333-347. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1988.tb00397.x>
- WHO - World Health Organization. (2003). *Arsenic in drinking-water: background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality*, (WHO/SDE/WSH/03.04/75). <https://apps.who.int/iris/handle/10665/75375>.
- Yan, X., P., Kerrich, R., y Hendry, M. J. (2000). Distribution of arsenic (III), arsenic (V) and total inorganic arsenic in porewaters from a thick till and clay-rich aquitard sequence, Saskatchewan, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(15), 2637 -2648. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(00\)00380-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(00)00380-X).



¡SÍGUENOS!

ISBN: 978-612-49062-0-6



Av. Sánchez Bustamante esquina Calle 14
Calacoto - Piso 2 Edificio Metrobol II N° 7995
La Paz - Bolivia

Tel. (+591-2) 2128393 - 2112336


Av. Costanera, Manzana D Lote 26
Puno - Perú

Tel. (+5151) 601588

Calle Presidente Montes, entre Bolívar y Adolfo Mier
Edificio Consistorial del Gobierno Autónomo
Departamental de Oruro, Tercer Piso
Oruro - Bolivia
Tel: (+591) 78986243



 contacto@alt-perubolivia.org

 www.alt-perubolivia.org

 www.fb.com/altsedepuno/