



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

ESCUELA DE POSGRADO

DOCTORADO EN CIENCIA TECNOLOGÍA Y MEDIO

AMBIENTE



TESIS

**EVALUACIÓN DEL DRENAJE ÁCIDO DE ROCA SOBRE LA
VARIABILIDAD FÍSICO-QUÍMICA DEL AGUA Y SEDIMENTOS DE
QUEBRADA EN LOS AFLUENTES AL EMBALSE PASTO GRANDE DE LA
REGIÓN PUNO**

PRESENTADA POR:

ROGER GONZALES ALIAGA

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

DOCTOR EN CIENCIA TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE

PUNO, PERÚ

2023

Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

**EVALUACIÓN DEL DRENAJE ÁCIDO DE R
OCA SOBRE LA VARIABILIDAD FÍSICO-Q
UÍMICA DEL AGUA Y SEDIMENTOS DE Q**

AUTOR

ROGER GONZALES ALIAGA

RECuento de palabras

31941 Words

RECuento de caracteres

162417 Characters

RECuento de páginas

134 Pages

Tamaño del archivo

11.2MB

Fecha de entrega

Nov 13, 2023 11:43 AM GMT-5

Fecha del informe

Nov 13, 2023 11:45 AM GMT-5

● **10% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos

- 8% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 7% Base de datos de trabajos entregados
- 4% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 8 palabras)




Dr. VLADIMIRO BANEZ QUISPE
DOCENTE PRINCIPAL - UNA - P
CIP. 47043

Resumen



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN CIENCIA TECNOLOGÍA Y MEDIO
AMBIENTE

TESIS

EVALUACIÓN DEL DRENAJE ÁCIDO DE ROCA SOBRE LA
VARIABILIDAD FÍSICO-QUÍMICA DEL AGUA Y SEDIMENTOS DE
QUEBRADA EN LOS AFLUENTES AL EMBALSE PASTO GRANDE DE LA
REGIÓN PUNO



PRESENTADA POR:

ROGER GONZALES ALIAGA

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

DOCTOR EN CIENCIA TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE

APROBADA POR EL JURADO SIGUIENTE:

PRESIDENTE

.....
Dr. JUAN WALTER TUDELA MAMANI

PRIMER MIEMBRO

.....
Dr. NICANOR MIGUEL BRAVO CHOQUE

SEGUNDO MIEMBRO

.....
Dr. ÁNGEL CANALES GUTIÉRREZ

ASESOR DE TESIS

.....
Dr. VLADIMIRO IBÁÑEZ QUISPE

Puno, 07 de julio del 2023

ÁREA: Ciencias de la Ingeniería.

TEMA: Evaluación del drenaje ácido de roca sobre la variabilidad físico-química.

LÍNEA: Recursos Naturales y Medio Ambiente.



DEDICATORIA

A Delia, mi esposa.

A Kgori y Piero, mis hijos.

A Martina y Félix, mis padres.

A Jacqueline y Sonia, mis hermanas

A todos mis sobrinos y sobrinas.

Espero que esto sirva de ejemplo, perseverancia y mucho cariño.



AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Vladimiro Ibañez Quispe, por su apoyo incondicional en la elaboración de esta investigación, desde el primer curso que nos dictó en este doctorado.

A los docentes del doctorado en Ciencia Tecnología y Medio Ambiente, por los conocimientos entregados.

Al Dr. Andrés Olivera Chura, por la obtención de las muestras en la zona de estudio y la entrega que mostro cuando fue autoridad de mi escuela profesional.

A todos mis compañeros del doctorado con quienes compartimos conocimientos, los cuales muchos de ellos fueron plasmados en esta tesis.

A mis docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica, quienes me facilitaron la utilización de los laboratorios de Ciencias Básicas (Petrología y Mineralogía) y MEGALABORATORIO (Litogeoquímica e Hidrogeoquímica) para la etapa de caracterización mineral y experimentación.



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE ANEXOS	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1. Marco teórico	2
1.2. Antecedentes	5

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Identificación del problema	9
2.2. Enunciados del problema	10
2.3. Justificación del proyecto	10
2.4. Objetivos	11
2.4.1. Objetivo general	11
2.4.2. Objetivos específicos	11
2.5. Hipótesis	11
2.5.1. Hipótesis general	11
2.5.2. Hipótesis específicas	11

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de estudio	13
3.1.1. Clima y vegetación	13
3.2. Población	15
3.3. Muestra	15
3.4. Método de investigación	15
3.5. Descripción detallada de métodos por objetivos específicos	16
3.5.1. Evaluar la concentración e interrelación de elementos químicos y parámetros fisicoquímicos en muestras de agua y sedimentos de quebrada en los afluentes al embalse Pasto Grande.	16
3.5.2. Evaluar la utilización de tres tipos de minerales carbonatados para neutralizar el drenaje ácido de roca.	18
3.5.3. Evaluar que granulometría de los tres tipos de minerales pueden neutralizar el drenaje ácido de roca de manera eficaz.	20

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Evaluación de los parámetros fisicoquímicos del agua e interrelación de las concentraciones de elementos químicos en muestras de agua y sedimentos de quebrada en los afluentes al embalse.	23
4.1.1. Valores de parámetros fisicoquímicos de agua.	23
4.1.2. Distribución espacial, parámetros fisicoquímicos en agua.	25
4.1.3. Correlación y ACP, parámetros fisicoquímicos en agua	31
4.1.4. Concentración de elementos químicos en agua.	34
4.1.5. Distribución espacial de elementos químicos en agua.	36
4.1.6. Correlación y ACP de elementos químicos en agua.	51
4.1.7. Concentración de elementos químicos en sedimentos.	56
4.1.8. Distribución espacial de elementos químicos en sedimentos	57



4.1.9. Correlación y ACP de elementos químicos en sedimentos.	75
4.1.10. Interrelación, muestras de agua, parámetros fisicoquímicos y sedimentos en los afluentes con DAR.	82
4.2. Evaluación de minerales carbonatados para neutralizar el DAR.	91
4.2.1. Caliza (calcita)	91
4.2.2. Travertino (aragonito)	93
4.2.3. Dolomía (dolomita)	95
4.3. Evaluación granulométrica carbonatada para neutralizar el DAR.	98
4.3.1. Caliza (1½", 1", 1/2")	98
4.3.2. Travertino (1½", 1", 1/2")	100
4.3.3. Dolomía (1½", 1", 1/2")	102
CONCLUSIONES	107
RECOMENDACIONES	108
BIBLIOGRAFÍA	109
ANEXOS	118



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
1. Límites de detección de equipo multiparámetro	23
2. Valores de parámetros fisicoquímicos en los 19 afluentes al embalse	24
3. Matriz de correlación de Pearson, parámetros fisicoquímicos	31
4. Proporción de varianza explicada por cada componente	31
5. Componentes principales, explicación por variables e individuos	32
6. Límites de detección en muestras de agua, para metales totales y disueltos	34
7. Estadística descriptiva de muestras de agua (metales totales)	35
8. Matriz de correlación de Pearson, concentraciones en muestras de agua.	51
9. Proporción de varianza explicada por cada componente	53
10. Componentes principales, explicación por variables e individuos	54
11. Límites de detección en muestras de sedimentos	56
12. Estadística descriptiva de las muestras de sedimentos de quebrada	57
13. Matriz de correlación de Pearson, muestras de sedimento	75
14. Proporción de varianza explicada por cada componente de sedimentos	77
15. Componentes principales, explicación por variables e individuos	78
16. Parámetros fisicoquímicos, después de la experimentación con caliza	98
17. Parámetros fisicoquímicos, después de la experimentación con Travertino	100
18. Parámetros fisicoquímicos, después de la experimentación con dolomía	102
19. Masa antes y después de la experimentación en los tipos de roca	104
20. Calidad de los sedimentos (ISQG) y niveles de efecto probable (PEL)	105

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
1. Ubicación de la zona de estudio	14
2. Montaña de conos volcánicos, lado sur del embalse.	15
3. Valores de pH en los afluentes al embalse.	25
4. Valores de oxígeno disuelto en los afluentes al embalse.	26
5. Valores de conductividad en los afluentes al embalse.	27
6. Valores de solidos totales disueltos en los afluentes al embalse.	28
7. Valores de turbiedad en los afluentes al embalse.	29
8. Valores de temperatura en los afluentes al embalse.	30
9. Gráfico circular y de individuos, parámetros fisicoquímicos de ACP.	33
10. Concentraciones de Al (mg/L) en los afluentes al embalse.	36
11. Concentraciones de As (mg/L) en los afluentes al embalse.	37
12. Concentraciones de Ba (mg/L) en los afluentes al embalse.	38
13. Concentraciones de Be (mg/L), en afluentes al embalse.	39
14. Concentraciones de B (mg/L) en los afluentes al embalse.	40
15. Concentraciones de Cd (mg/L), en afluentes al embalse.	41
16. Concentraciones de Cu (mg/L), en afluentes al embalse.	42
17. Concentraciones de Cr (mg/L), en afluentes al embalse.	43
18. Concentraciones de Fe (mg/L), en afluentes al embalse.	44
19. Concentraciones del Mn (mg/L), en afluentes al embalse.	45
20. Concentraciones del Ni (mg/L), en afluentes al embalse.	46
21. Concentraciones del Pb (mg/L), en afluentes al embalse.	47
22. Concentraciones del Sb (mg/L), en afluentes al embalse.	48
23. Concentraciones del U (mg/L), en afluentes al embalse.	49
24. Concentraciones del Zn (mg/L), en afluentes al embalse.	50
25. Gráfico circular y de individuos, muestras de agua de ACP.	55
26. Concentraciones del Al (%), en afluentes al embalse.	58
27. Concentraciones del Sb (ppm), en afluentes al embalse.	59
28. Concentraciones del As (ppm), en afluentes al embalse.	60
29. Concentraciones del B (ppm), en afluentes al embalse.	61
30. Concentraciones del Ba (ppm), en afluentes al embalse.	62
31. Concentraciones del Be (ppm), en afluentes al embalse.	63
32. Concentraciones del Cd (ppm), en afluentes al embalse.	64



33. Concentraciones del Cr (ppm), en afluentes al embalse.	65
34. Concentraciones del Cu (ppm), en afluentes al embalse.	66
35. Concentraciones del Fe (%), en afluentes al embalse.	67
36. Concentraciones del Mn (ppm), en afluentes al embalse.	68
37. Concentraciones del Hg (ppm), en afluentes al embalse.	69
38. Concentraciones del Mo (ppm), en afluentes al embalse.	70
39. Concentraciones del Ni (ppm), en afluentes al embalse.	71
40. Concentraciones del Pb (ppm), en afluentes al embalse.	72
41. Concentraciones del V (ppm), en afluentes al embalse.	73
42. Concentraciones del Zn (mg/L), en afluentes al embalse.	74
43. Gráfico circular y de individuos, muestras de sedimentos de ACP (a).	79
44. Gráfico circular y de individuos, muestras de sedimentos de ACP (b).	80
45. Diagrama barras de muestras de agua y sedimentos (muestra EPG-22).	82
46. Diagrama barras de muestras de agua y sedimentos (muestra EPG-05).	83
47. Diagrama barras de muestras de agua y sedimentos (muestra EPG-15).	84
48. Diagrama barras de muestras de agua y sedimentos (muestra EPG-04).	85
49. Diagrama barras de muestras de agua y sedimentos (muestra EPG-02).	86
50. Diagrama barras de muestras de agua y sedimentos (muestra EPG-21).	87
51. Diagrama barras de muestras de agua y sedimentos (muestra EPG-25).	88
52. Diagrama barras de muestras de agua y sedimentos (muestra EPG-24).	89
53. Diagrama barras de muestras de agua y sedimentos (muestra EPG-12).	90
54. Muestra de caliza.	92
55. Muestra de travertino	94
56. Muestra de dolomía	96
57. Muestra de tipos litológicos y mejor resultado para atenuar el DAR.	97
58. Parámetros fisicoquímicos, luego del tratamiento con caliza/calcita.	99
59. Parámetros fisicoquímicos, luego del tratamiento con travertino/aragonito.	101
60. Parámetros fisicoquímicos, luego del tratamiento con dolomía/dolomita.	103



ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
1. Mapa litoestratigráfico del embalse Pasto Grande.	118
2. Mapa geomorfológico del embalse Pasto Grande.	119

RESUMEN

El embalse Pasto Grande contiene rocas alteradas por hidrotermalismo, este provee agua para consumo humano a las ciudades de Moquegua e Ilo, pero esta agua no fue estudiada como producto del Drenaje Ácido de Roca (DAR). La conjunción del cambio climático, exposición del tipo de roca y su mineralogía, hace que los afluentes al embalse sufran modificación en sus características físicoquímicas, lo cual afecta a los seres vivos. Los objetivos de investigación fueron: determinar, valores de parámetros físicoquímicos, concentración de elementos químicos en muestras de agua y sedimentos de quebrada, y plantear un mineral para mitigar el DAR. La metodología de investigación fue cuantitativa experimental: primero se hizo la caracterización física de la zona de estudio, luego se experimentó con tres tipos de rocas carbonatadas a diferente granulometría. Los resultados muestran, los siguientes intervalos de parámetros físicoquímicos: potencial hidrógeno (2.85-8.53 pH), oxígeno disuelto (90.30-58.0 ppm), conductividad (2576-14.37 $\mu\text{s}/\text{cm}$), sólidos totales disueltos (7219-28.0 mg/L) y turbidez (115.8-0.0 FNU). Así, nueve afluentes presentan DAR, de ellos, siete tienen influencia directa de rocas alteradas por hidrotermalismo y dos están relacionados a fuentes termales. Las siguientes concentraciones sobrepasan los ECA, en agua: As (10.69355 mg/L), Cd (0.05731 mg/L), Fe (16.2926 mg/L), Mn (5.66734 mg/L), Ni (0.1034 mg/L), Pb (0.023 mg/L); en sedimentos de quebrada: As (9898 ppm), Cd (5.2 ppm), Cr (62 ppm), Pb (681 ppm), Hg (1280 ppm). La experimentación hecha con calcita, dolomita y aragonito; muestran que el travertino (aragonito) con granulometría de 1/2" presenta mayor efectividad para reducir el DAR.

Palabras clave: Agua, embalse, Pasto Grande, calidad ambiental, parámetros físicoquímicos.

ABSTRACT

The Pasto Grande reservoir contains rocks altered by hydrothermalism, it provides water for human consumption to the cities of Moquegua and Ilo, but this water was not studied as a product of Acid Rock Drainage (DAR). The combination of climate change, exposure of the type of rock and its mineralogy, causes the tributaries to the reservoir to undergo modifications in their physicochemical characteristics, which affects living beings. The research objectives were: to determine values of physicochemical parameters, concentration of chemical elements in water samples and stream sediments, and propose a mineral to mitigate DAR. The research methodology was quantitative experimental: first the physical characterization of the study area was carried out, then experimentation was carried out with three types of carbonate rocks at different granulometry. The results show the following ranges of physicochemical parameters: potential hydrogen (2.85-8.53 pH), dissolved oxygen (90.30-58.0 ppm), conductivity (2576-14.37 $\mu\text{s}/\text{cm}$), total dissolved solids (7219-28.0 mg/L) and turbidity (115.8-0.0 FNU). Thus, nine tributaries present ARD, of them, seven have direct influence of rocks altered by hydrothermalism and two are related to thermal springs. The following concentrations exceed the ECA, in water: As (10.69355 mg/L), Cd (0.05731 mg/L), Fe (16.2926 mg/L), Mn (5.66734 mg/L), Ni (0.1034 mg/L), Pb (0.023 mg/L); in stream sediments: As (9898 ppm), Cd (5.2 ppm), Cr (62 ppm), Pb (681 ppm), Hg (1280 ppm). The experimentation done with calcite, dolomite and aragonite; show that travertine (aragonite) with a grain size of 1/2" is more effective in reducing DAR..

Key words: Environmental quality, Pasto Grande, physicochemical parameters, water, reservoir.

INTRODUCCIÓN

Los problemas ambientales generados por la humanidad, pueden también ocurrir por la acción de la propia naturaleza, como es el caso del Embalse Pasto Grande, el cual se origina por la meteorización de minerales sulfurados que se encuentran diseminados en las rocas que circunscriben gran parte de la cuenca de influencia; a esto se denomina Drenaje Ácido de Roca (DAR). El DAR deja cambios drásticos en los parámetros fisicoquímicos del agua, el cual se puede reconocer por la precipitación de minerales secundarios (hidróxidos, sulfatos hidratados y óxidos) y coloraciones rojizas a amarillas producto del lavado de rocas con minerales que contienen Fe, As, Pb y Sb. Este embalse provee de agua a las ciudades de Moquegua e Ilo mediante un canal, pero sus características fisicoquímicas, concentraciones de elementos químicos de agua y sedimentos, no son conocidas y peor aún los planes de mitigación son ambiguos y costosos. Esta investigación pertenece al área de medio ambiente, línea de investigación de recursos naturales y medio ambiente; y el tema de investigación es monitoreo y evaluación del impacto ambiental en minería. Para lograr los objetivos se evaluó las características fisicoquímicas de los afluentes al embalse y se determinó cuales tenían pH ácido; luego se planteó para su mitigación, la utilización de tres tipos de minerales carbonatados (calcita, dolomita y aragonito) a diferente granulometría y cuyas canteras sean accesibles para su posible uso.

Esta investigación consta de cuatro capítulos, de los cuales: el primero muestra la revisión de la bibliografía utilizada y los antecedentes; cabe decir que la información existente es muy reducida y en su mayoría corresponden al Drenaje Ácido de Mina (DAM). El segundo capítulo contiene el planteamiento del problema y su relevancia ambiental, además contiene los objetivos y las hipótesis del trabajo, porque el agua del embalse se utiliza para consumo humano en dos ciudades. El tercer capítulo presenta los materiales y métodos seguidos, en donde primero se hizo la caracterización de la zona de estudio y luego se planteó una fase de experimentación para mitigar el DAR, en especial el pH. En el cuarto capítulo se muestra los resultados obtenidos en esta investigación, esto se logró luego de cuatro fases de trabajo: recopilación de información, fase de campo, laboratorio y gabinete. Los datos obtenidos en las fases constan de parámetros fisicoquímicos del agua, análisis químico multielemental de agua y sedimentos de quebrada; junto a su experimentación con minerales carbonatados para la mitigación del DAR en el embalse.

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1. Marco teórico

Hidrotermalismo, alteración de rocas y formación de sulfuros

El hidrotermalismo, se genera por la subducción de la Placa Nazca debajo de la Placa Sudamericana y el ascenso de magmas; esto origina flujos térmicos de agua en la corteza, los cuales conveccionan y dan resultado a la actividad hidrotermal, mediante: manantiales, géiser y fumarolas (Steinmuller & Zavala, 1997); durante el proceso hidrotermal, ocurre un reemplazamiento químico de los minerales por otros nuevos en una roca, donde el fluido hidrotermal aporta reactivos químicos y remueve los productos a través de reacciones acuosas (Marfil & Maiz, 2012); los reemplazamientos hidrotermales se caracterizan por enlaces de minerales, cuyo origen se da por la composición del fluido hidrotermal, composición de la roca huésped, temperatura, pH, Eh, razón agua/roca y tiempo de interacción (Townley, 2006). La formación de minerales en el proceso hidrotermal ocurre por la precipitación de componentes solubles a partir de: cambios de temperatura, cambios de presión, ebullición, interacciones entre roca - solución y cambios químicos debido a la mezcla de fluidos (Pirajno, 2009); la precipitación de minerales que se da cerca de la superficie, ocurre en espacios abiertos formando vetas, y en profundidad el reemplazamiento de minerales se logra de manera eficiente al cambiar las propiedades y composición química del fluido hidrotermal, en un medio poroso (Robb, 2005), la formación de sulfuros divalentes de origen hidrotermal (ZnS, CdS, HgS, PbS, MnS, FeS, Fe₃S₄, NiS, CoS y CuS) ocurre después de los silicatos y óxidos, su cristalización tiene un amplio rango de pH, especialmente ácido (Byrappa *et al.*, 2001); la alteración hidrotermal se caracteriza por la destrucción prácticamente total de la textura y mineralogía original, y por la adición de cuarzo en venillas (Echavarría, 2004).

Cambio climático y meteorización

Uno de los fenómenos globales, es el cambio climático ocasionado por la contaminación en el planeta; esto hace que se aceleren los procesos de meteorización sobre las rocas. El cambio climático antropogénico, provoca disminución de la criosfera, en volumen y extensión espacial; los casquetes polares, los glaciares alpinos, los glaciares tropicales, el hielo marino y el permafrost están experimentando una rápida erosión, derretimiento, degradación y retroceso (Arendt *et al.*, 2021); el principal factor del calentamiento global es la periodicidad natural de los procesos en la Tierra, como el calentamiento y glaciación del Holoceno, este fenómeno ocasiona la degradación de glaciares árticos y de montaña, se incluye también la crucial influencia humana (Kotlyakov, 2015). La meteorización química implica la reacción de los minerales conformantes de la roca, produciendo sustancias químicas; en este proceso, el agua reacciona con los minerales y transforma las rocas en un proceso gradual y continuo en superficie (Macheyeki *et al.*, 2020), cuando las rocas se exponen a condiciones físicoquímicas diferentes a las condiciones en las que se formaron muchos minerales primarios son inestables en las condiciones de la superficie y, por consiguiente, son susceptibles de sufrir transformación química (Jesús & Pérez, 2014), esto explica que la calidad química del agua corresponde a la geología de la cuenca que alimenta al embalse y está determinado por procesos de lavado de la roca, sin registrar diferencias estadísticamente significativas entre los períodos seco y húmedo, ni comportamiento estacional (Betancourt & Suarez, 2010).

Drenaje Ácido de Roca (DAR) y mitigación

Según la definición MINEM (1995) el DAR resulta de la oxidación de minerales sulfurados y lixiviación de metales asociados que derivan de rocas con sulfuros cuando se exponen a la meteorización, en un proceso natural; esto plantea preocupaciones ambientales con respecto al agua ácida, rica en metales disueltos. El DAR y Drenaje Ácido de Mina (DAM) generan contaminación y diferenciarlas es una tarea compleja que desgasta muchos recursos en las instituciones de fiscalización ambiental (Alvarez & Ari, 2021) la pirita es el mineral sulfurado más abundante en las rocas, cuya oxidación puede ocurrir cuando sus cristales se someten a un sistema oxidante o sin oxígeno, similarmente ocurre con calcopirita, calcita y bornita (Misra, 2012), así mismo, los eventos pluviales causan aumentos y disminuciones en las concentraciones de ácidos y metales en las corrientes receptoras; los aumentos graduales en las

concentraciones ocurren prolongadamente en períodos de sequía y se observan grandes aumentos repentinos en épocas de descarga después de períodos secos (Nordstrom, 2009), entonces los minerales y sus propiedades físicas y fisicoquímicas, se comportan de acuerdo a las condiciones ambientales a las que pueden ser expuestos; de esta forma la estabilidad mineral dependerá no solo de su naturaleza sino también del ambiente que lo engloba (Carretero & Pozo, 2007), uno de los fenómenos que ocurre con los sulfuros es la oxidación que libera metales de la fase sólida a la solución y produce acidez en el agua, y la mayoría de los metales, como Fe, Cu y Ni, precipitan de la solución para formar minerales secundarios (Peterson, 2014), ahora los minerales silicatados de alta temperatura reaccionan químicamente y precipitan para formar minerales arcillosos (hidróxidos), que son formas estables de silicatos; estas reacciones generan iones insolubles de Fe^{3+} , Al^{3+} y solubles como Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} (Albaréde, 2009). El potencial de generación de DAR se puede predecir mediante ensayos geoquímicos estáticos y dinámicos, cuya evaluación de resultados puede determinar el manejo ambiental adecuado de los residuos de minado (Zamora & Benzaazoua, 2003), así uno de los tratamientos del DAR en humedales ácidos indica a la fitorremediación como una herramienta, en donde algunas especies de plantas se adaptan mejor, son más abundantes y bioacumulan a elementos químicos nocivos (Aliaga *et al.*, 2019), también se puede utilizar la caliza u otro carbonato, que reaccione en un medio ácido, el cual al disolverse libera Ca^{2+} y bicarbonatos (HCO_3), así el pH del medio sube hasta llegar a valores neutros y quedan metales disponibles como: Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} , los cuales pasan a la fase sólida por precipitación y/o sorción (Uria *et al.*, 2020).

La contaminación del agua y el geólogo

Las fuentes de contaminación son estudiadas por la geoquímica ambiental, que evalúa los efectos de los procesos químicos naturales o antrópicos sobre el medioambiente (Oyarzun *et al.*, 2010), así cuando la calidad de las aguas superficiales son afectadas por el vertido de residuos domésticos e industriales alteran sus propiedades físicas, químicas y orgánicas haciéndolas no aptas para consumo, esto por la interacción química entre minerales de las rocas y oxígeno (Fernández & Guardado, 2021), el entendimiento de la circunscripción geológica refuerza los métodos para el control ambiental y dirigir técnicamente la planificación del desarrollo en una determinada zona (Xi *et al.*, 2021), entonces, las aguas superficiales del área receptora deben ser tratadas y estudiadas adecuadamente antes de que sean utilizadas, lo que es un llamado

a los gestores del agua y establecer mecanismos reguladores para monitorear el agua (Oseke *et al.*, 2021), de lo mencionado se desprende que, una de las tareas principales de un geólogo es identificar los procesos físicos y químicos que transforman rocas, agua y suelos; luego recomendar medidas correctivas apropiadas y resolver problemas o al menos reducir estas influencias negativas (Ruiz-Cubillo *et al.*, 2015).

Marco normativo sobre la calidad ambiental del agua

- Protocolo de Monitoreo de la Calidad Sanitaria de los Recursos Hídricos Superficiales y sus Anexos I, II, III y IV, aprobado mediante Resolución Directoral N° 2254/2007/DIGESA/SA de fecha 11 de setiembre de 2007 por la Dirección General de Salud Ambiental del Ministerio de Salud teniendo como base legal D.L. 17752 “Ley General de Aguas” que fue derogada el 31 de marzo de 2010.
- Proyecto de “Protocolo de Monitoreo de Aguas Superficiales Continentales del Perú” de la Dirección General de Calidad Ambiental del Ministerio del Ambiente, que fue remitido a la Autoridad Nacional del Agua mediante Oficio N° 506-2010-DGCAVMGA/MINAM de fecha 11 de noviembre de 2010.
- Protocolo de Monitoreo de Calidad de Agua, sub sector minería; Dirección General de Asuntos Ambientales-proyecto EMTAL del Ministerio de Energía y Minas, publicada en internet.

1.2. Antecedentes

Las pérdidas de volumen de casquetes glaciares a nivel mundial de acuerdo al estudio hecho por *Global Glacier Mass Changes and Their Contributions to Sea-level Rise From 1961 to 2016* llevado a cabo por un equipo internacional de científicos liderado por la Universidad de Zurich indica que, 9.625 gigatoneladas de hielo se han perdido en menos de 50 años (Zemp *et al.*, 2020), la pérdida de superficie glaciar genera los DAR que causan problemas de contaminación ambiental, y para su mitigación se puede evaluar el uso de compuestos alcalinos, como: CaO (cal viva), Ca(OH)₂ (hidratadocal), NaOH (sosa cáustica) o Na₂CO₃ (carbonato de sodio) y CaCO₃ (Carbonato de calcio) (Shokes & Möller, 1999), el DAM genera residuos finales de sulfuros del tamaño de la arena y limo, estas características generan condiciones ácidas y movilización de metales de manera rápida (Sracek *et al.*, 2004), para emular condiciones naturales de DAM, se hacen pruebas de corta duración, el cual proporciona información relevante

sobre la poca reactividad de las fases de formación potencial de acidez y su posible neutralización (Stewart *et al.*, 2006), los tratamientos activos de DAM requieren atención regular, que resulta en un aumento de costos; por lo cual se recurre al tratamiento bacteriológico reductor (Sheoran *et al.*, 2010). La mineralogía del DAM lo conforman un grupo diverso de sulfatos secundarios, principalmente ferrosos, que forman eflorescencias o precipitados de oxihidróxidos e hidroxisulfatos (Gallo, 2010), los compuestos mineralógicos secundarios se encuentran en zonas cercanas a las fuentes de contaminación y tienen concentraciones altas de metales (Barrero, 2014). El DAR es un problema ambiental cuya reducción de costos de remediación, requiere la evaluación del riesgo en varias fases de la actividad minera (Betrie *et al.*, 2015), los sólidos en suspensión producto del DAR contienen sulfatos y metales (Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Pb, Hg, Cd, Ni) en donde sus concentraciones que son nocivas para la actividad biológica (Aduvire, 2006).

En América Latina, todos los estudios predicen cambios en las precipitaciones y la paulatina desaparición de los glaciares, lo que afectará en gran medida el suministro de agua para consumo humano, agricultura y generación de electricidad (Paz & Montecinos, 2011), la formación de aguas naturalmente ácidas ocurre en las cabeceras de cuenca y disminuyen aún más aumentan cuando cruzan afloramientos de monzonitas cuarzosas alteradas por hidrotermalismo (Feige *et al.*, 2015), estos cambios de pH puede ser explicado también con los sedimentos de los lechos de río, los cuales pueden brindar información sobre contaminación de origen antropogénico y natural, en áreas urbanas y rurales (Simmonds *et al.*, 2017). Una de las herramientas para la predicción de DAR, es la geometalurgia, la cual emula las condiciones fisicoquímicas de los sectores afectados (Dold, 2017), conociendo las tasas de meteorización de las rocas y minerales se puede predecir la calidad del agua, ya que la reactividad de los minerales se ve afectada no solo por su composición química, sino también por su textura, disposición y asociación mineralógica (St-Arnault *et al.*, 2019).

En América del sur y en el Perú, se determinó que los glaciares andinos disminuyen 1 m de espesor por año, desde 2000, este rápido retroceso amenaza el suministro de agua en la región, cuyos efectos se acentúan en el sur de los Andes (Alonso, 2020), la pérdida de superficie glaciaria muestra una reducción de 43%, lo cual afectará el abastecimiento de agua, en términos de cantidad y calidad; este retroceso expone rocas mineralizadas y ricas en sulfuros a la intemperie (Zimmer *et al.*, 2018). El Nevado Pastoruri

actualmente sufre un retroceso glaciar, lo cual da como resultado la disolución oxidativa de lutitas y areniscas ricas en pirita (sulfuros), esto ocasiona un cambio en las propiedades fisicoquímicas del agua cuyo control es estrictamente geológico (Santofimia *et al.*, 2017), lo mismo ocurre en la subcuenca Quillcay del departamento de Ancash en donde el pH es variable, las mediciones puntuales demostraron un fuerte control de las formaciones geológicas en especial de minerales generadores de DAR (Martel *et al.*, 2018). En la mina Yauli (centro del Perú), las aguas tienen altas concentraciones de hierro (produce acides en las aguas) y baja concentración de cobre; en ambos casos las concentraciones son perjudiciales a la salud de las personas y animales (Núñez *et al.*, 2014),

El informe sobre prospecciones geoelectricas y geosísmicas del Tunel Chilota-Humajalzo y Vaso, del ANA (1980), menciona, que “el área de estudio se ubica en la unidad geomorfológica denominada Altiplano y las condiciones hidrogeológicas en general son favorables en los aspectos de circulación superficial y subterránea de agua”. El boletín 6 del INGEMMET sobre la litogeoquímica sub cuenca Ichuña – cuenca río Tambo, indica zonas con presencia de sulfuros que están relacionadas a mineralizaciones de alta y baja sulfuración producto del hidrotermalismo, cuyas reacciones de oxidación de los sulfuros controlan el pH en el agua (Cereceda *et al.*, 2016), de forma similar ocurre en las microcuencas de Cacachara y Patara, en donde la conductividad eléctrica oscila entre 21 hasta los 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, esto permitió definir poblaciones con anomalías geoquímicas de: As, Co, Cu, Cr, Hg, Ni, Au, Ag, Pb y Zn (Vargas *et al.*, 2017). El Embalse Pasto Grande fue ejecutado aprovechando las condiciones geográficas y topográficas de zona, cuya capacidad de almacenamiento es de 194 MMC, tiene una presa de tierra de 80 m de coronamiento y 10.30 m de altura, su extensión superficial es de 45 km^2 , se constituye en el tercer embalse de mayor tamaño en el país (Sucapuca *et al.*, 2017), dentro de la cuenca de influencia del embalse, los valores bajos de pH se dan en la fuente termal de Occoruni, el valor más alto de conductividad se la en la fuente termal de Huacamañana y el valor más bajo de TDS se da en la fuente termal de Occoruni, a estos campos termales se asocian precipitación de sales de color blanco que forman costras en una extensión superficial de más o menos 2.22 Km^2 (Carpio & Peña, 2020).

Los estudios de drenaje ácido de roca (DAR) y drenaje ácido de mina (DAM) hasta antes de la década del 90 no fueron bien diferenciados, pues se suponía que ambos



tenían un origen antrópico, dejando de lado el origen natural del DAR. Los trabajos de investigación hechos en centros de actividad minera, ayudaron a entender la generación de aguas ácidas producto de la oxidación de sulfuros, el cual tiene origen antrópico y natural. Desde entonces diferentes tipos de estudios en especial aquellos que utilizan organismos (tratamiento activo) para reducir el DAR, tomaron énfasis, esto sin dejar de lado los tratamientos con barreras reactivas (tratamiento pasivo); en ambos casos, esto conlleva a la toma de tiempo y presupuesto económico elevado. En la actualidad son muy pocos los estudios en donde se integran la evaluación de la zona de estudio y su posible mitigación en lo que respecta al DAR, en este trabajo los datos de parámetros fisicoquímicos de agua, concentraciones de elementos químicos en agua y sedimentos, tratan de explicar el comportamiento geoquímico en ambos tipos de muestras; así mismo la parte experimental muestra la utilización de tres tipos de carbonatos con diferente granulometría para atenuar el DAR.

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Identificación del problema

La contaminación del agua originada por los humanos es uno de los problemas más importantes del mundo, esto, como producto de sus actividades industriales y de su propia vivencia. Los problemas de contaminación a veces ocurren de manera natural, como por ejemplo la actividad volcánica produce gases nocivos y son perjudiciales para los seres vivientes, otro fenómeno de tipo geológico vendría a ser a causa de la meteorización de las rocas con contenidos de minerales perjudiciales para la salud, los cuales cambian las propiedades fisicoquímicas del agua, a lo que se denomina Drenaje Ácido de Roca (DAR).

Hay dos factores que incrementan el DAR, el factor humano o antrópico y el de tipo natural; el antrópico está relacionado más a la extracción de metales que generan desmontes con minerales, los cuales reaccionan con la presencia de agua y oxígeno. Otro fenómeno que también tiene la participación del hombre es el cambio climático por la alteración de la capa de ozono; el cual acelera la pérdida de volumen de los casquetes glaciares; dejando descubierto extensas áreas de rocas propensas a la meteorización.

Este fenómeno se incrementa aún más cuando las rocas descubiertas contienen minerales que se oxidan rápidamente con la presencia de agua. En la Cordillera del Barroso que es donde se ubica este trabajo de investigación, el cambio climático hizo desaparecer el 90% de los casquetes glaciares, es más, en gran parte de esta cordillera existen rocas alteradas por hidrotermalismo que estuvieron cubiertas por glaciares, en este momento estos afloramientos rocosos se encuentran en serio estado de meteorización química, lo cual genera cambios drásticos en las propiedades fisicoquímicas del agua, pero de manera natural.

Al fenómeno de cambio climático se debe agregar otro factor también esencial para que ocurra el DAR, el cual implica el tipo de minerales con que están compuestas las rocas y su abundancia porcentual dentro de ella; los minerales que generan DAR son los sulfuros como: Pirita, Calcopirita, Galena, Arsenopirita, entre otros. El Embalse Pasto Grande, tiene un 35% de su superficie con ocurrencia de rocas alteradas por hidrotermalismo, estos afloramientos ahora están descubiertos.

2.2. Enunciados del problema

La conjunción del cambio climático, exposición del tipo de roca y su mineralogía hace que los afluentes al embalse sufran una modificación en las características físicoquímicas del agua y sedimentos, el cual va afectar seriamente a los seres vivos que lo consumen. Algo que se debe mencionar también, es que los DAR pueden afectar las construcciones, por el grado de acidez del agua, este tema en el Perú no es muy conocido. Como la información sobre la construcción del embalse no es pública, al parecer no se consideró los temas de influencia de la litología en temas de la calidad de agua.

2.3. Justificación del proyecto

Conocer las características físicoquímicas del agua, sus concentraciones en agua y sedimento, y su posible mitigación es de vital importancia para el consumo humano; el embalse Pasto Grande tiene 16 afluentes entre principales y secundarios, de los cuales seis drenan agua al reservorio todo el año, y los otros 10 son quebradas estacionales. Del total de afluentes, 11 cortan en sus nacientes afloramientos de rocas con alteración hidrotermal, los cuales muestran en varios casos indicios de lixiviación y oxidación de minerales por la coloración rojiza del agua en el lecho; de los 11 dos tienen influencia de fuentes termales. La calidad de agua del embalse Pasto Grande fue poco estudiada, pero los usos van desde el consumo humano, ampliación de oferta de agua para riego, uso industrial y minero; pero por la escasez de agua en las ciudades Moquegua e Ilo, en la actualidad el uso principal es para consumo humano, por lo cual se plantea este trabajo utilizando la geoquímica como herramienta principal para su caracterización, evaluación y posible mitigación. Este trabajo de investigación, muestra las concentraciones de elementos químicos y parámetros físicoquímicos de agua y sedimentos de quebrada; para que la población entienda que la contaminación ambiental producto del DAR en determinados sectores se genera de manera natural.

Cabe indicar que existen dos remanentes de actividad minera dentro del área de influencia del embalse (uno remediado y otro con plan de cierre). Los resultados obtenidos sirven en la sensibilización de autoridades y población sobre el uso racional del agua, esto para prever problemas de la salud en áreas circundantes y ciudades de Ilo y Moquegua.

2.4. Objetivos

2.4.1. Objetivo general

Evaluar el drenaje ácido de roca sobre la variabilidad físico-química del agua y sedimentos de quebrada y su mitigación con tres tipos de minerales carbonatados, en el embalse Pasto Grande, distrito Acora, provincia y departamento de Puno.

2.4.2. Objetivos específicos

1. Evaluar la concentración e interrelación que existe en las concentraciones de elementos químicos y parámetros fisicoquímicos en muestras de agua y sedimentos de quebrada en los afluentes al embalse Pasto Grande.
2. Evaluar la utilización de tres tipos de minerales carbonatados para neutralizar el drenaje ácido de roca, en los afluentes al embalse Pasto Grande.
3. Evaluar que granulometría de los tipos de minerales pueden neutralizar el drenaje ácido de roca eficientemente, en los afluentes al embalse Pasto Grande.

2.5. Hipótesis

2.5.1. Hipótesis general

La evaluación de las variables físico-químicas del agua y sedimentos de quebrada determinan la calidad de agua y el uso de minerales carbonatados ayudan a neutralizar el DAR en el embalse Pasto Grande.

2.5.2. Hipótesis específicas

1. Las concentraciones de elementos químicos y los valores de los parámetros físicoquímicos de las muestras de agua y sedimentos de quebrada, determinan la calidad de agua que está ingresando al embalse según ECA y la interrelación indican la afinidad de los elementos químicos en ambos tipos de muestras.



2. Existen tres minerales abundantes en la naturaleza que conforman parte de las especies carbonatadas; calcita, aragonito y dolomita, que pueden neutralizar el drenaje ácido de roca de manera eficiente.
3. El tamaño de partícula mineral es muy importante para la neutralización del DAR, porque muestra la superficie exposición para que esta pueda reaccionar químicamente con fluidos ácidos y luego neutralizarlos.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de estudio

El embalse Pasto Grande se encuentra en la Cordillera del Barroso al Sur Este del Perú, está circunscrito en el centro poblado de Pasto Grande del distrito de Acora, provincia y departamento de Puno (Figura 1). Este se encuentra a una altitud promedio de 4520 m.s.n.m. y la cumbre más alta se localiza en el Cerro Corini que tiene una altitud de 5400 m.s.n.m. el cual está ubicado en el lado Norte de la cuenca de influencia.

La superficie de agua que ocupa el embalse es de 43.9 Km² y la cuenca de influencia incluyendo los sectores que contienen rocas alteradas tiene una extensión de 483.8 Km². El embalse presenta afluentes como ríos y quebradas, y dentro de ellas algunas son estacionales, su superficie nival es cíclica y aun se puede ver 12.19 Km² de nieve (imagen satelital LAND SAT – 2016); estas se ubican en los cerros: Quenamichini, Jatipadja, Huilacota, Señorani, Antajarani, Quinaquinani, Maruma, Jachacucho, Curahuara y Pacsiauqui; la mayoría de ellos ubicados en lado Norte de la zona de estudio (Figura 2). Los afluentes principales son los ríos: Cacachara, Antajarani y Patara; le siguen las quebradas: Huiscacollo, Millojahuira, Chapocco, Queñuani, Huilcani, Vizcachuni, Tiji, Caironi, Palleutani, Cinejojo, Asnuni, Incacachi y Chullumpiri. Dentro de la cuenca existen también lagunas estacionales de poca extensión, como: Ajoyani, Ichujasi y otras tres sin denominación que en conjunto hacen un área de 0.3 Km²; el substrato donde se emplazan las lagunas son suelos de origen glaciar con contenido de arcillas.

3.1.1. Clima y vegetación

El clima en la zona de estudio es conocido como clima de Puna; comprende sectores altoandinos donde ocurren montañas, colinas y altiplanicies.

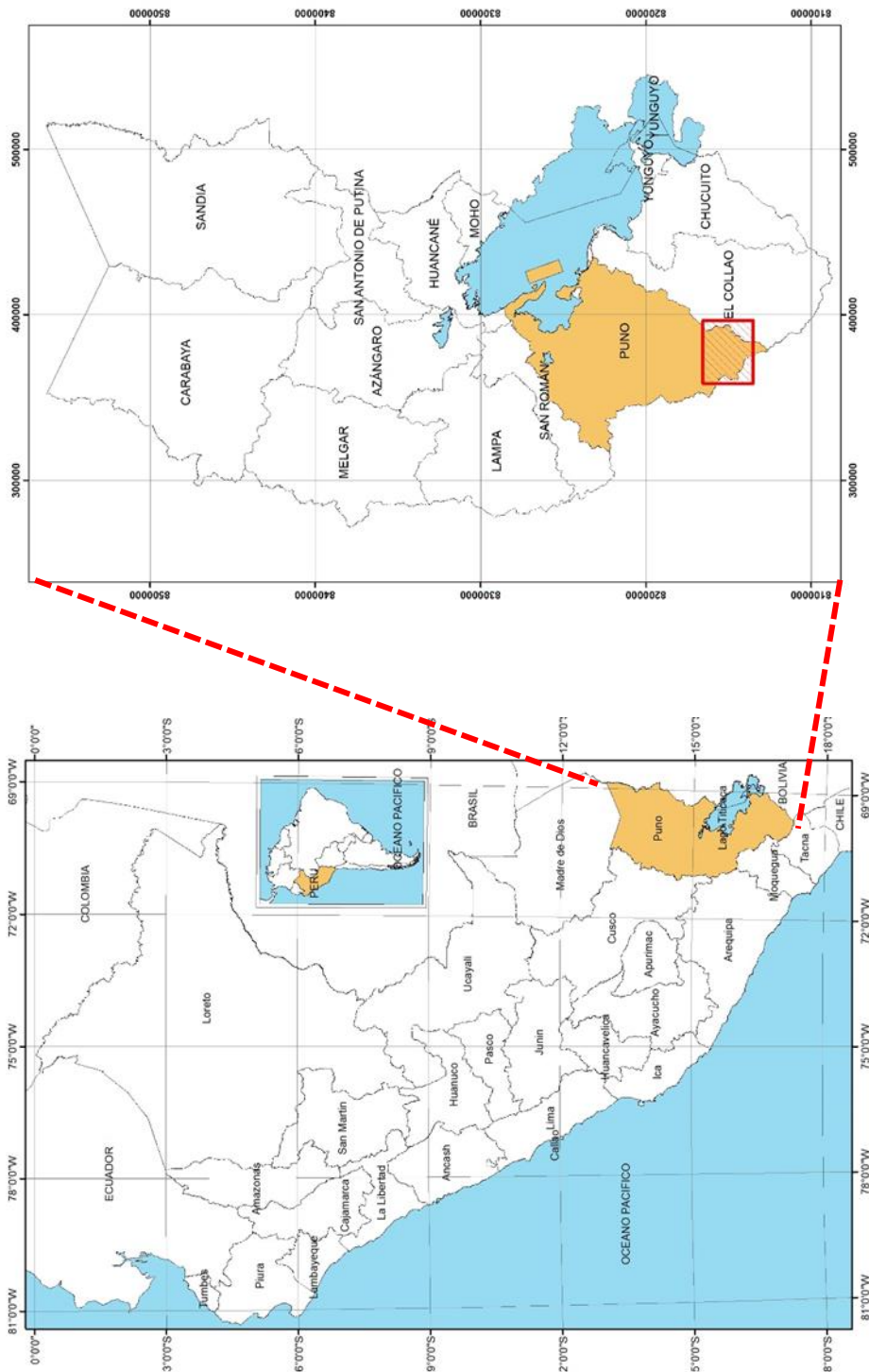


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio



Figura 2. Montaña de conos volcánicos, lado sur del embalse

Se caracteriza por presentar precipitaciones promedio anual que llega a los 541.5 mm. Según los informes del SENAMHI y ANA, las precipitaciones son erráticas, con picos de lluvia que comienzan en octubre y terminan en abril, siendo julio el mes más seco. La temperatura más baja se da en agosto, cuyos valores oscilan entre -12 y 12 °C; las temperaturas altas ocurren entre febrero y marzo, estos tienen valores de -1 a 31 °C, siendo marzo el mes con valores máximos de 13 a 31 °C.

Los meses de diciembre hasta fines de marzo, la zona estudiada tiene una fuerte caída de nieve, precipitaciones pluviales y ocasionalmente tormentas con granizo; la caída de nevadas y la baja de la temperatura (heladas) hace que la capa de granizos y nevada lleguen a congelarse hasta 1.1 m (esto según las formas del terreno), las tormentas con descarga eléctrica son muy frecuentes, estas llegan a caer siempre en las partes altas de los cerros.

Entre los meses de abril y finales de noviembre ocurre una larga sequía, el cual tiene bruscas caídas de temperatura y presencia esporádica de fuertes vientos con dirección Suroeste a Noreste. Los meses de mayo hasta junio tienen temperaturas que descienden bruscamente en horas de la noche, las cuales logran alcanzar valores negativos (hasta de -12°C), creando así el fenómeno de gelivación que afecta a las rocas y la soliflucción para suelos con bastante contenido de arcillas (cuaternario fluvio glacial y sectores descubiertos de bofedales). El mes de agosto se caracteriza por la fuerte presencia de vientos que tienen dirección Noreste generalmente.

La vegetación existente en la zona estudiada depende de la época de lluvias, los arbustos, gramíneas y bofedales subsisten en las partes bajas (valles glaciares y altiplanicies) o en quebradas donde la presencia de agua y suelos son favorables para el desarrollo de organismos vegetales. Se observó que la presencia de entes tanto vegetal como animal, en las zonas con alteración hidrotermal es casi nula.

Los bofedales son extensiones de vegetación para pastoreo de ganado auquénido, estos siempre están dentro de las quebradas o valles de origen glacial y son lugares donde el nivel freático aflora a superficie. La mayoría de las veces los bofedales están relacionados espacialmente a los lechos de los ríos y quebradas, en donde estos actúan como filtros de aguas ácidas provenientes de las rocas que generan el DAR. También se observó un tipo de algas que se desarrollan en las fuentes termales.

3.2. Población

La población muestral, que se tiene en la zona de estudio corresponde a 19 puntos de muestreo entre afluentes y sectores de importancia para esta investigación, cabe decir que el embalse se ubica a 97 km al Sur de la ciudad de Puno. Las coordenadas geográficas del punto medio del embalse son 16°45'08.19" latitud Sur y 70°12'48.51" longitud Oeste, su altitud promedio es de 4542 m.s.n.m.

3.3. Muestra

Las muestras de agua con sus parámetros fisicoquímicos y sedimentos de quebrada, fueron extraídas de manera no probabilística, por el método sistemático no alineado (en ríos, quebradas, fuente termal, manantial, embalse y represa); estas muestras fueron obtenidas con criterios técnicos, siguiendo protocolos establecidos por (Ministerio de Salud, 2013), (MINAM, 2017) y (ANA, 2018) para aguas superficiales. En estos protocolos indican cuatro parámetros básicos para ser medidos en campo (pH, Temperatura, Conductividad, Oxígeno Disuelto) y análisis químico se hizo por los siguientes metales: Ba, Cd, Cr, Pb, Zn, Mn, Fe, Cu Hg y As. Las variables que se obtuvieron son cuantitativas en donde se calcularon promedios de acuerdo al tamaño muestral.

3.4. Método de investigación

El método de investigación que se siguió en esta tesis fue, con enfoque cuantitativo, en el cual se planificó un muestreo sistemático no alineado para la obtención de datos de concentraciones de elementos químicos en muestras de agua y sedimentos de quebrada, además de parámetros fisicoquímicos por punto de muestreo. El diseño de investigación fue experimental por que se utilizó tres tipos de rocas (minerales) a diferente granulometría para neutralizar la acidez del fluido a causa de la oxidación de sulfuros. Tubo un alcance descriptivo, por la influencia de las características geológicas sobre los afluentes que dan hacia el embalse y finalmente se correlaciono los valores obtenidos por cada muestra para explicar los fenómenos hidrogeoquímicos que ocurren en la zona de estudio.

3.5. Descripción detallada de métodos por objetivos específicos

3.5.1. Evaluar la concentración e interrelación de elementos químicos y parámetros fisicoquímicos en muestras de agua y sedimentos de quebrada en los afluentes al embalse Pasto Grande.

Muestreo de agua para metales totales, metales disueltos y parámetros fisicoquímicos.

Las muestras de agua que se obtuvieron en los afluentes al embalse, fueron dos por cada punto de muestreo (total de 38 muestras), esto en pomos esterilizados que entrego el laboratorio de SGS del Perú; cada pomo puede contener 100 ml de agua. Los protocolos seguidos fueron de acuerdo a los ECA (MINAM, 2017) para la categoría 1A de aguas superficiales.

Una vez obtenidas las muestras de agua, estas fueron analizadas por metales totales (preservado con ácido nítrico) y metales disueltos; los resultados del análisis químico mostraron 49 elementos cuya unidad de medida fue en mg/L. El método de análisis que utilizo el laboratorio fue por Inducción de Plasma Acoplado por Espectrometría de Masa (ICP MS) para análisis ambiental de aguas superficiales, según EPA, 1999 seguido por SGS del Perú.

Parámetros fisicoquímicos de agua

Los valores de parámetros fisicoquímicos de agua se tomaron in situ con un equipo multiparámetro HANNA HI 9829, estos tuvieron las siguientes unidades de medida: pH (1-14), oxígeno disuelto (ppm), conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), sólidos totales disueltos (mg/L), turbidez (FNU) y temperatura ($^{\circ}\text{C}$). La evaluación de parámetros fisicoquímicos se hizo de acuerdo al protocolo de los ECA (MINAM, 2017) con 6 parámetros.

a) Descripción de variables a ser analizadas

Variable independiente.

X₁: Índice de la calidad de agua en 19 afluentes al embalse Pasto Grande.

Variable dependiente

Parámetros fisicoquímicos:

Y₁: pH; Y₂: Temperatura; Y₃: Conductividad; Y₄: Sólidos totales disueltos; Y₅: Oxígeno disuelto; Y₆: Turbidez.

Concentración de elementos químicos en muestras de agua (mg/L):

Z₁: Al; Z₂: As; Z₃: B; Z₄: Ba; Z₅: Be; Z₆: Cd; Z₇: Cr; Z₈: Cu; Z₉: Fe; Z₁₀: Hg; Z₁₀: Mn; Z₁₂: Mo; Z₁₃: Ni; Z₁₄: Pb; Z₁₅: Sb; Z₁₆: Se; Z₁₇: U; Z₁₈: Zn.

Concentración de elementos químicos en muestras de sedimentos (ppm y %):

T₁: Al; T₂: As; T₃: B; T₄: Ba; T₅: Be; T₆: Cd; T₇: Cr; T₈: Cu; T₉: Fe; T₁₀: Hg; T₁₀: Mn; T₁₂: Mo; T₁₃: Ni; T₁₄: Pb; T₁₅: Sb; T₁₆: Se; T₁₇: U; T₁₈: Zn.

b) Aplicación de prueba estadística inferencial

La prueba estadística que se utilizó, es el análisis de correlación de Pearson seguido de Análisis de Componentes Principales (ACP), considerando la variable independiente al índice calidad del agua en función a las variables: parámetros fisicoquímicos y concentraciones de elementos químicos en muestras de agua. El análisis estadístico y espacial se hizo con los softwares EXCEL, RSTUDIO y ARCGIS, respectivamente.

Muestreo de sedimentos de quebrada

Las muestras de sedimentos de quebrada se obtuvieron en los mismos puntos de muestreo agua, siguiendo protocolos seguidos por el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) que fueron basados de la *Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life*. La metodología para hallar las concentraciones de elementos químicos se hizo mediante ICP-AES multielemental (34 elementos), con digestión de agua regia y ensayo al fuego, en SGS del Perú. En el lugar de muestreo, los sedimentos fueron tamizados en malla -#35 y depositados en bolsas microporosas con un peso aproximado de 1 a 3Kg; en laboratorio los sedimentos se tamizaron nuevamente a malla -#200 para obtener las concentraciones químicas en partículas menores a 0.074 mm. Cabe decir que la digestión de agua regia lixivia mejor los sulfuros y otros minerales presentes en los sedimentos.

c) Descripción de variables a ser analizadas

Variable independiente.

X₁: Índice de la calidad de sedimentos de quebrada en 19 afluentes al embalse Pasto Grande.

Variable dependiente

Concentración de elementos químicos en muestras de sedimentos (ppm y %):

T₁: Al; T₂: As; T₃: B; T₄: Ba; T₅: Be; T₆: Cd; T₇: Cr; T₈: Cu; T₉: Fe; T₁₀: Hg; T₁₀: Mn; T₁₂: Mo; T₁₃: Ni; T₁₄: Pb; T₁₅: Sb; T₁₆: Se; T₁₇: U; T₁₈: Zn.

d) Aplicación de prueba estadística inferencial

La prueba estadística utilizada, es el análisis de correlación de Pearson y ACP, considerando la variable independiente al índice calidad del sedimento en función a las variables, concentración de elementos químicos en muestras sedimentos de quebrada. El análisis estadístico y espacial se hizo con los programas EXCEL, RSTUDIO y ARCGIS, respectivamente.

Las concentraciones de muestras de agua y sedimentos de quebrada que estuvieron por debajo del límite de detección inferior del equipo, fueron eliminados o divididos; cuando los resultados de concentraciones químicas por elementos tenían más del 70% de datos por debajo del límite de detección inferior, se eliminaban y cuando no sobrepasaban el 70%, los datos de concentraciones químicas fueron divididos en la mitad de su valor, para luego volverlos positivos; esto para que los datos puedan ser tratados estadísticamente; la metodología empleada fue de, Caceres (2008). Esta metodología no afecta el tratamiento estadístico.

3.5.2. Evaluar la utilización de tres tipos de minerales carbonatados para neutralizar el drenaje ácido de roca.

a) Descripción detallada del uso de materiales, equipos, insumos y otros.

Muestreo de rocas para experimentación

Para desarrollar el experimento, este, se dividió en dos etapas una de campo y otro de laboratorio. En la etapa de campo se buscó canteras que contengan aragonito,

calcita y dolomita que estén cerca de la zona con DAR; se encontraron dos canteras, una de ellas contenía travertino y otra contenía caliza; no se encontró cantera para dolomía pese a que las descripciones de las entidades relacionadas a la investigación geológica mencionan la existencia de dicha litología en rocas sedimentarias de manera regional. Las muestras de dolomita se obtuvieron en la mina San Vicente de Chanchamayo en donde se explota esfalerita (sulfuro de zinc).

La cantera de travertino, el cual corresponden a los alrededores del centro poblado de Titire ubicado a 25 Km al Noroeste de la zona de estudio; esta roca es origen hidrotermal y está circunscrita en la facie sedimentaria de la formación Maure. La zona presenta estructuras remanentes de actividad hidrotermal, en estratos mayores a 20 cm de espesor, la mineralogía mayoritaria es de aragonito con cristalización de forma tabular alargada, producto de precipitación química por cambio brusco de temperatura. La composición de su mineralogía en muestra de mano indica 95% de aragonito y 5% de fragmentos de roca, calcita y óxidos.

La cantera de caliza, se ubica cerca del centro poblado de Huacochullo, a uno 34 Km en línea recta del embalse. La característica de estos afloramientos que pertenecen a la formación Maure, indica la presencia de estratos con espesores similares de 30 cm, los cuales se intercalan con niveles de lutitas verdes a blancas con patinas de manganeso (pirolusita). Estos afloramientos se encuentran afectados por plegamientos e hidrotermalismo insipiente, en donde se pueden observar cherts sedimentarios. La composición mineralógica en muestra de mano indica 85% de calcita y 15% de arcillas y silicificación, los estratos se muestran muy compactos.

La cantera de dolomía se ubica en la mina San Vicente de Chanchamayo (región Junín); la secuencia estratigráfica corresponde al grupo Pucara y los espesores de dolomía superan los 30 cm, su composición mineralógica esencialmente es de dolomía 90% y 10% esfalerita y materia orgánica. La cantera, aunque alejada de la zona de estudio puede también ser utilizada para neutralización de aguas ácidas, pues la mayor parte de la explotación del yacimiento deja grandes cantidades de dolomita como ganga.

Muestreo de aguas para la experimentación

Las muestras de agua con DAR fueron recolectadas del afluente más ácido (quebrada Huilcani); aquí se tomaron tres muestras en tres contenedores herméticos de 18 L cada uno, estos fueron transportados hasta el laboratorio de Ciencias Básicas de Ingeniería Geológica la UNA PUNO. Los contenedores esterilizados fueron preservados a temperatura de 5°C hasta el momento de la experimentación en el MEGALABORATORIO (laboratorios, Litogeoquímica e Hidrogeoquímica); al momento de extracción el agua tenía un pH de 3.1. esto debido a época de lluvia.

b) Descripción de variables a ser analizadas

Variable independiente

X₁: Caliza, X₂: Travertino, X₃: Dolomía

Variable dependiente.

Y₁: pH; Y₂: Temperatura; Y₃: Conductividad; Y₄: Sólidos totales disueltos; Y₅: Oxígeno disuelto; Y₆: Turbidez.

c) Aplicación de prueba estadística inferencial

La prueba estadística utilizada, es el análisis de correlación de Pearson considerando las variables parámetros fisicoquímicos, tomando énfasis en el pH en función a las variables caliza, travertino y dolomía. El análisis estadístico se hizo con los programas EXCEL y RSTUDIO.

3.5.3. Evaluar que granulometría de los tres tipos de minerales pueden neutralizar el drenaje ácido de roca de manera eficaz.

a) Descripción detallada del uso de materiales, equipos, insumos y otros.

Muestras de roca y agua con DAR para experimentación

La caliza, travertino y la dolomía fueron chancadas manualmente hasta que las partículas lleguen al tamaño de la granulometría grava (75 a 4.75 mm). Luego de ser chancadas las partículas tuvieron que ser tamizadas según la norma ASTM con las malla N^o 6 para tamaños de partícula de 1½", malla N^o 8 para tamaños de partícula 1", malla N^o 14 para tamaños de partícula ½".

El trabajo se hizo por separado para cada tipo de granulometría y se utilizaron los tamices del laboratorio de Ciencias Básicas de UNA PUNO. Una vez tamizadas las muestras tuvieron que ser pesadas hasta alcanzar una masa aproximada de 1 Kg, esto para ver la variabilidad de masa luego de la experimentación. Las muestras se embolsaron en bolsas de plástico herméticas; con su respectiva codificación por tipo de roca y granulometría.

El pesado de las muestras se hizo dos veces; es decir uno al inicio del experimento y luego al final del experimento. Las muestras de diferente litología y granulometría tuvieron un proceso de secado natural durante 15 días, esto con el objetivo de conocer cuánto de mineral reacciono durante la experimentación, para esto se utilizó una balanza de precisión en gramos, de 2 decimales de precisión marca HIGHLAND, modelo HCB2202.

Proceso de experimentación

Se construyó tres columnas de experimentación para cada granulometría con material de plástico reciclado (6 pomos de suero intravenoso); estos tenían en la parte superior, el contenedor de DAR de 1000 ml, contenedores de roca triturada de 1000 mg y vaso de precipitados de 250 ml; estos se conectaron por mangueras y llaves de cierre para controlar el flujo de DAR.

Antes de la experimentación se utilizó una muestra estándar de carbonatos y sulfatos con una granulometría de ½ pulgada, para obtener el flujo óptimo de DAR. El flujo óptimo de DAR fue de 4 mL/s.

En la parte inferior de la columna de experimentación se puso vasos de precipitados de 250 mL para que estos reciban el DAR tratado (luego de la experimentación) y se mida nuevamente los parámetros fisicoquímicos de salida. El equipo utilizado fue un multiparámetro HANNA HI 9829. El proceso de experimentación se hizo en cuatro días, en el laboratorio de Ciencias Básicas de la UNA PUNO (Laboratorios de Petrología y Mineralogía).

b) Descripción de variables a ser analizadas

Variable independiente

X₁: Partículas de caliza (1½"); X₂: Partículas de caliza (1"); X₃: Partículas de caliza (½").

X₁: Partículas de travertino (1½"); X₂: Partículas de travertino (1"); X₃: Partículas de travertino (½").

X₁: Partículas de dolomía (1½"); X₂: Partículas de dolomía (1"); X₃: Partículas de dolomía (½").

Z₁: Caudal, Z₂: Masa inicial de roca triturada antes de reacción química.

Variable dependiente.

Y₁: pH; Y₂: Temperatura; Y₃: Conductividad; Y₄: Sólidos totales disueltos; Y₅: Oxígeno disuelto; Y₆: Turbidez; Y₇: Masa de roca triturada luego de reacción química.

c) Aplicación de prueba estadística inferencial

La prueba estadística utilizada, es el análisis de correlación de Pearson considerando las variables dependientes al pH, temperatura, conductividad, solidos totales disueltos y masa de roca triturada luego reacción química, esto en función a las variables caliza, travertino y dolomía con diferente granulometría. El análisis estadístico se hizo con los programas EXCEL y RSTUDIO.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Evaluación de los parámetros fisicoquímicos del agua e interrelación de las concentraciones de elementos químicos en muestras de agua y sedimentos de quebrada en los afluentes al embalse.

4.1.1. Valores de parámetros fisicoquímicos de agua.

Los límites de detección superior e inferior del equipo utilizado, son mostrados en la Tabla 1, en donde los valores resultantes, indican las siguientes unidades: temperatura en °C, el oxígeno disuelto en ppm, conductividad en $\mu\text{s}/\text{cm}$, sólidos totales disueltos en mg/L y turbidez en FNU.

Tabla 1
Límites de detección de equipo multiparámetro

Parámetro fisicoquímico	Límite Inferior	Limite Superior	Unidad
Potencial de hidrógeno	0	14	pH
Temperatura	-5	55	°C
Oxígeno Disuelto	0	50	ppm
Conductividad	0	1	$\mu\text{s}/\text{cm}$
Solidos Totales Disueltos (TDS)	0	400000	mg/L
Turbidez	0	99.9	FNU

MINAM (2017) y ANA (2018) indican 6 principales parámetros fisicoquímicos y unidades que deben ser tomados en sistemas lóticos y lenticos, esto para; la categoría 1: poblacional - recreacional y subcategoría A: aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable.

Los valores promedios que se observan en la tabla 2, en 19 afluentes al embalse, son: pH (5.44), temperatura (12.43 °C), oxígeno disuelto (73.09 ppm), conductividad (871.61 $\mu\text{s}/\text{cm}$), sólidos totales disueltos (762.64 mg/L) y turbidez (14.36 FNU).

Tabla 2
Valores de parámetros fisicoquímicos en los 19 afluentes al embalse

Parámetro	Nº de muestras	Máximo	Mínimo	Suma	Media	Desviación estándar
Potencial de hidrogeno	19	8.53	2.85	119.76	5.44	1.97
Temperatura	19	20.70	3.40	273.44	12.43	4.02
Oxígeno Disuelto	19	90.30	58.00	1607.90	73.09	9.97
Conductividad	19	2576.00	14.37	19175.37	871.61	850.29
Solidos Totales Disueltos	19	7219.00	28.00	16778.00	762.64	1499.91
Turbidez	19	115.80	0.00	315.90	14.36	29.54

Los protocolos que indica MINAM (2017), en la zona de estudio determinan a 9 afluentes con pH ácido, lo que demuestra la existencia de DAR, provenientes de rocas alteradas y fuentes termales. A continuación, se describen aspectos importantes sobre los valores promedio de los parámetros fisicoquímicos encontrados.

El valor promedio de pH ácido (5.44), indica que los fluentes al embalse sufren cambios en sus propiedades fisicoquímicas, producto de la oxidación de minerales sulfurosos diseminados en la cuenca de influencia.

El valor promedio del oxígeno disuelto (73.9 ppm) indica rangos aceptables para la vida de flora y fauna en los afluentes, pero los valores mínimos (58 ppm) en las aguas embalsadas y represa generan alerta para la supervivencia de organismos.

El valor promedio de solidos totales disueltos (762.64 mgL) se encuentra dentro de los estándares nacionales, pero los valores que exceden los 1000 ppm (ECA nacional) son cinco, estos puntos de muestreo tienen influencia directa de sectores donde emanan las fuentes termales y ambientes rocosos alterados. Este ultimo posiblemente por la meteorización física de rocas arcillosas.

La conductividad con su valor promedio (871 $\mu\text{s}/\text{cm}$) se encuentra por debajo de los ECA nacionales, pero son cinco los valores que sobrepasan los 1500 $\mu\text{s}/\text{cm}$, estos están relacionados a afloramientos rocosos alterados, fuentes termales y sectores de actividad antropogénica.

El valor promedio de turbidez esta por debajo de los ECA nacionales, pero el valor máximo obtenido (115.80 FNU) lo sobrepasa, este ocurre en las fuentes termales.

4.1.2. Distribución espacial, parámetros fisicoquímicos en agua.

Potencial de hidrógeno (pH)

El pH tiene un valor medio de 5.44, un máximo de 8.34 y un mínimo de 2.85 (Tabla 2); los pH ácidos (2.85 – 4.10) están en las quebradas Huilcani, Millojahuirá, río Cacachara, afluyente de fuentes termales del río Patara, agua embalsada, represa Pasto Grande y fuente termal del río Patara. Los valores moderados (4.11 - 7.23) ocurren en las quebradas Palleutani, Chapocco, Vizcachuni, Asnuni, río Patara principal, confluencia de los ríos Cacachara y Patara y manantial. Los valores altos (7.24 – 8.34) ocurren en las quebradas Chullumpiri, Caironi, confluencias quebradas Amani y Jachacuhojahuirá (Figura 3).

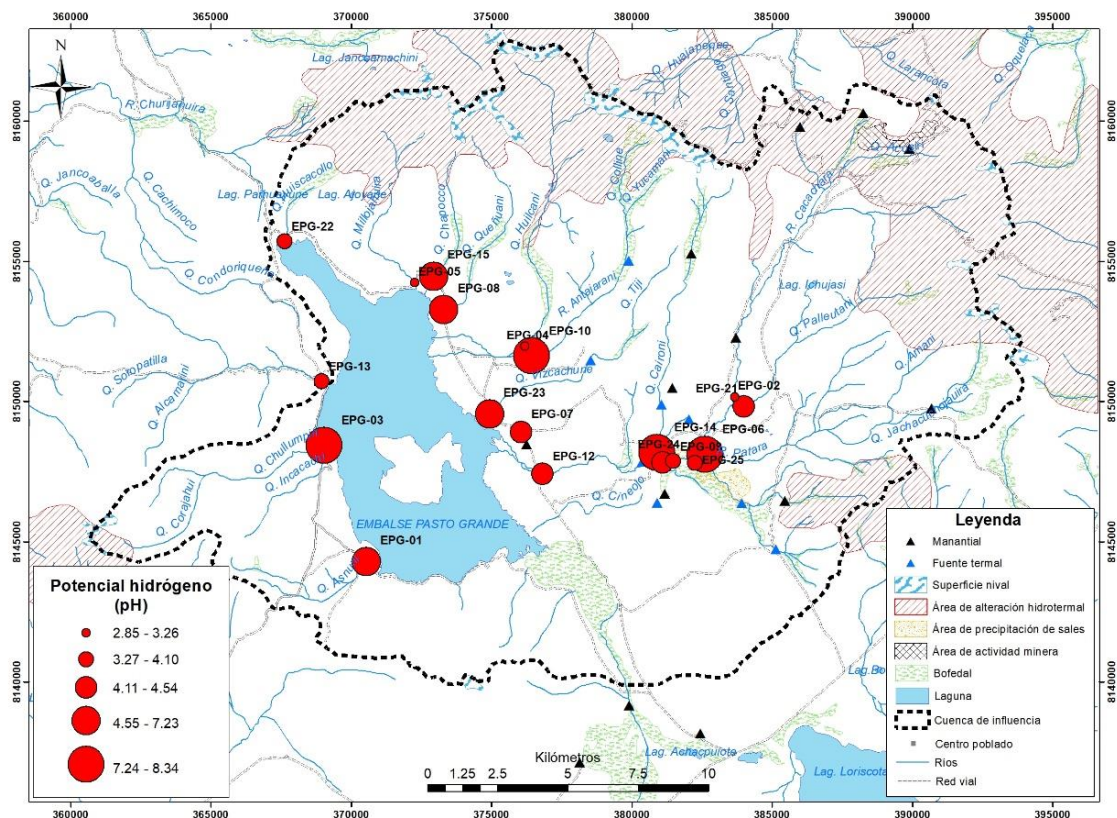


Figura 3. Valores de pH en los afluentes al embalse

El valor más bajo con pH (2.85) se encuentra en la quebrada Huilcani (EPG-04), el cual está relacionado a la meteorización de rocas con diseminaciones de sulfuros, producto de la alteración hidrotermal. De acuerdo a MINAM (2017), el cual indica valores de 5.5 – 9 para pH en aguas superficiales (ECA); el embalse tiene nueve de los afluentes que están por debajo de los estándares permitidos.

Oxígeno disuelto (OD_ppm)

Este parámetro fisicoquímico tiene un valor medio de 72.6 ppm, un máximo de 90.3 ppm y un mínimo de 58.0 ppm (Tabla 2). Los valores mínimos (58.0 – 67.3 ppm) se obtuvieron en aguas embalsadas, represa Pasto Grande, quebradas Chapocco, Vizcachuni y Queñuani; los valores moderados (67.4 – 80.7 ppm) están en las quebradas Millojahuira, Palleutani, Huilcani, Asnuni, Chullumpiri, Palleutani, confluencia de las quebradas Caironi y Patara, río Cacachara, confluencia de los ríos Cacachara y Patara, manantial y fuente termal del río Patara. Los valores altos (80.3 – 90.3 ppm) se encuentran en el río Antajarani, quebrada Caironi y afluentes de fuentes termales del río Patara (Figura 4).

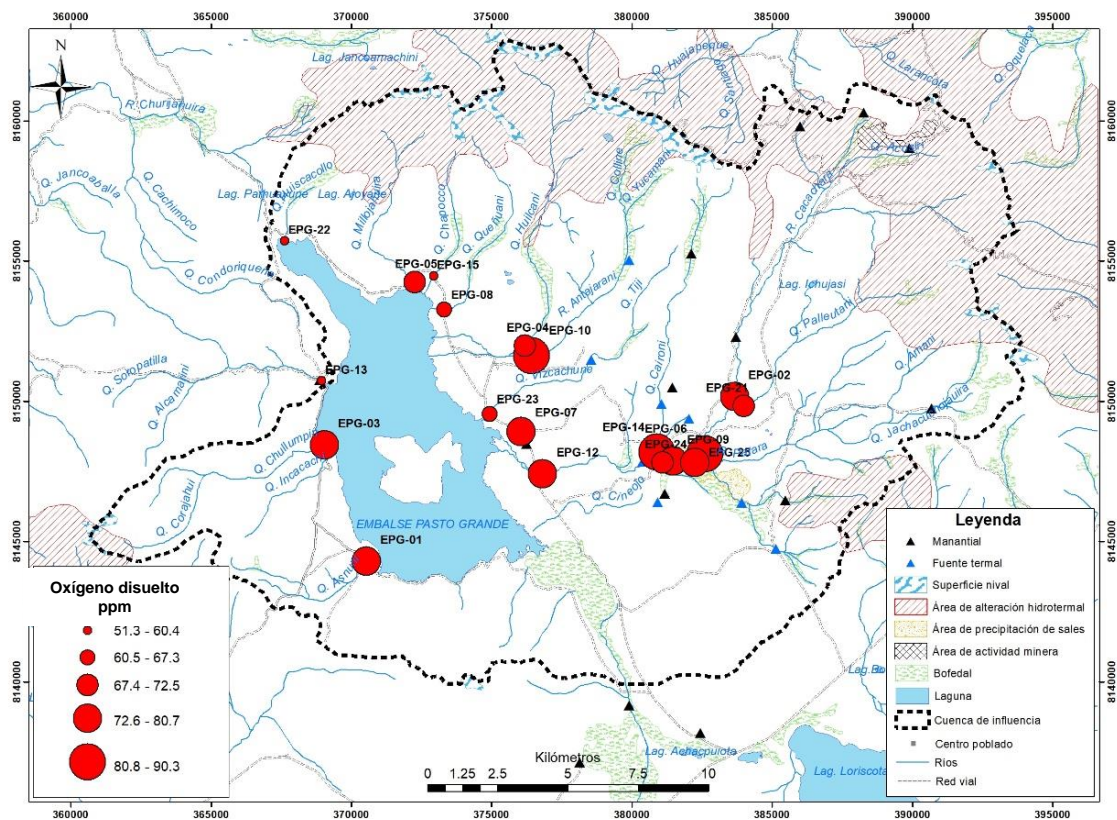


Figura 4. Valores de oxígeno disuelto en los afluentes al embalse

El valor más alto de oxígeno disuelto se encuentra en la muestra EPG-25, este proviene de un afluente con fuentes termales, el valor más bajo esta en las aguas embalsadas (EPG-22). Todos los valores de oxígeno disuelto en el embalse están por encima de los ECA (6 mg/L), según ECA de MINAM (2017).

Conductividad ($C_{\mu\text{s}/\text{cm}}$)

La conductividad tiene un valor medio de $832.02 \mu\text{s}/\text{cm}$, un máximo de $2576 \mu\text{s}/\text{cm}$ y un mínimo de $14.37 \mu\text{s}/\text{cm}$ (Tabla 2). Los valores bajos ($14.37 - 352 \mu\text{s}/\text{cm}$) ocurren en las quebradas Caironi, Asnuni, Chullumpiri, Vizcachuni, Chapocco, Queñuani y río Antajarani. Los valores moderados ($352.01 - 1675.00 \mu\text{s}/\text{cm}$) están en las quebradas Huilcani, Millojahuira, río Cacachara, aguas embalsadas, represa Pasto Grande, confluencia de las quebradas Amani y Jachacuhujahuira, afluyente de fuentes termales del río Patara y fuente termal del río Patara. Los valores altos ($1675.01 - 2576 \mu\text{s}/\text{cm}$) corresponden al río Patara principal, manantial, confluencia de los ríos Cacachara y Patara y quebrada Palleutani (Figura 5).

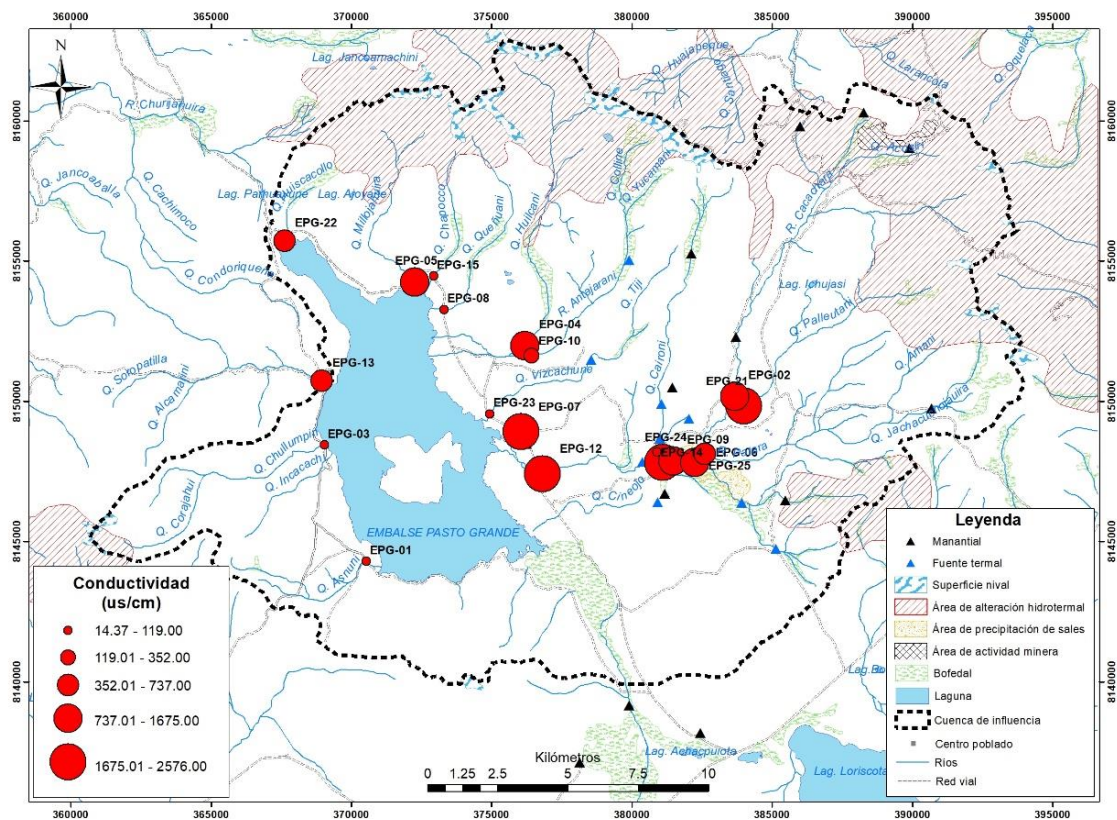


Figura 5. Valores de conductividad en los afluentes al embalse

Hay una relación entre la conductividad y el pH. Cuando los valores de pH son altos la conductividad es baja y en los valores bajos de pH la conductividad es alta. Cinco valores están por encima de los ECA ($1500 \mu\text{s}/\text{cm}$), de acuerdo a MINAM (2017); de los cuales todos están relacionados con afloramientos alterados y fuentes termales.

Sólidos Totales Disueltos (TDS_{mg/L})

Este parámetro tiene un valor medio de 769 mg/L, un máximo de 7219 mg/L y un mínimo de 28 mg/L (Tabla 2). Los valores mínimos (28–369 mg/L) ocurren en las quebradas Asnuni, Chullumpiri, Vizcachuni, Chacpocco, Queñuani, confluencia de las quebradas Amani y Jachacuhujaira, río Antajarani, represa Pasto Grande y agua embalsada. Los valores moderados (369.1 – 1288 mg/L) ocurren en el afluente de fuentes termales del río Patara, fuente termal río Patara, río Cacachara, confluencia de los ríos Cacachara y Patara y manantial. Los valores más altos (1288 – 7219 mg/L) ocurren en la quebrada Caironi y río Patara principal (Figura 6).

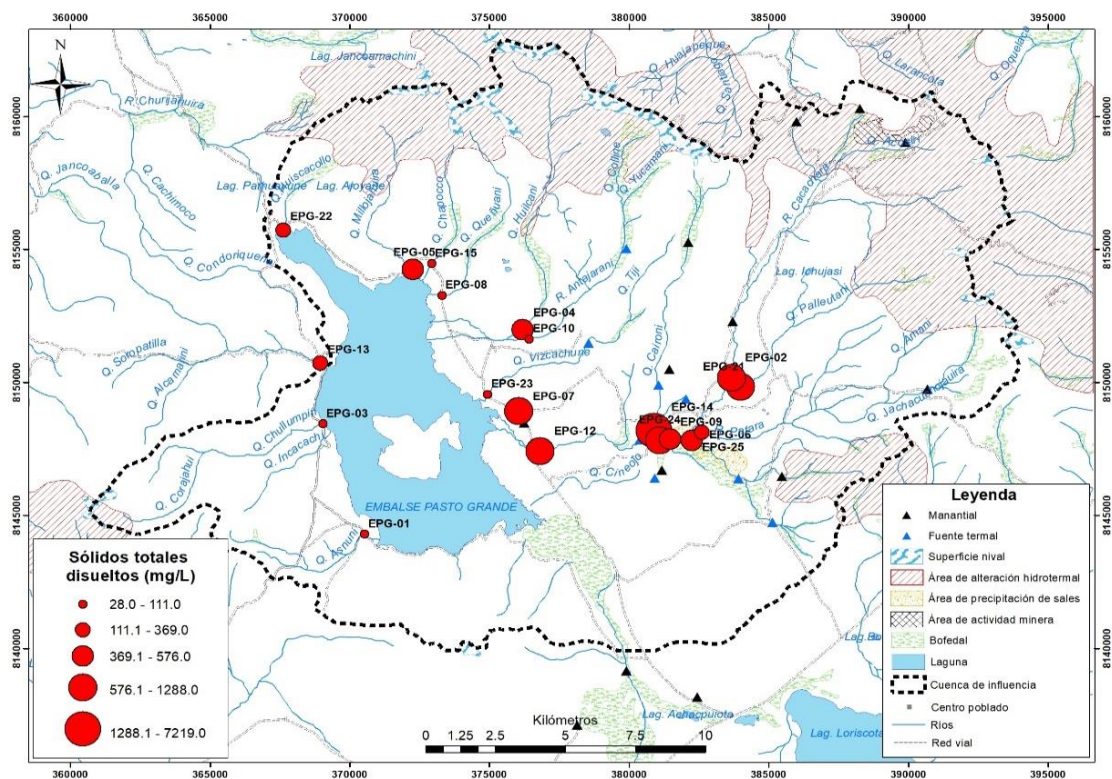


Figura 6. Valores de sólidos totales disueltos en los afluentes al embalse

El valor más bajo está en la muestra EPG-01, el cual no tiene sectores de rocas alteradas; el valor más alto 7219 mg/L se ubica en la quebrada Caironi (EPG-14) la cual tiene influencia de las fuentes geotermales Vizcachuni. Los valores bajos de TDS coinciden con los de la conductividad. El valor más alto contiene precipitados químicos blancos en su lecho y de todos los afluentes, cinco de ellos están por encima de los ECA (1000 mg/L), esto de acuerdo a MINAM (2017).

Turbidez (Turb_FNU)

La turbidez muestra valores medios de 14.364 FNU, máximos que llegan a 115.8 FNU y los mínimos de 1.2 FNU (Tabla 2). Los valores bajos (0 – 3.5 FNU) se relacionan a las quebradas Millojahuir, Chullumpiri, Asnuni, Huilcani, Queñuani, confluencia de las quebradas Amani y Jachacuchajhuira, ríos Antajarani y Cacachara, afluyente de fuentes termales del río Patara, fuente termal del río Patara, manantial y represa Pasto Grande. Los valores moderados (3.51 – 35.20 FNU) corresponden a las quebradas Palleutani, Vizcachuni, Chapocco, Caironi, río Patara principal y agua embalsada. El valor más alto está en la confluencia de los ríos Cacachara y Patara; esta última encausa aguas de fuentes termales y presenta colares blancos (Figura 7).

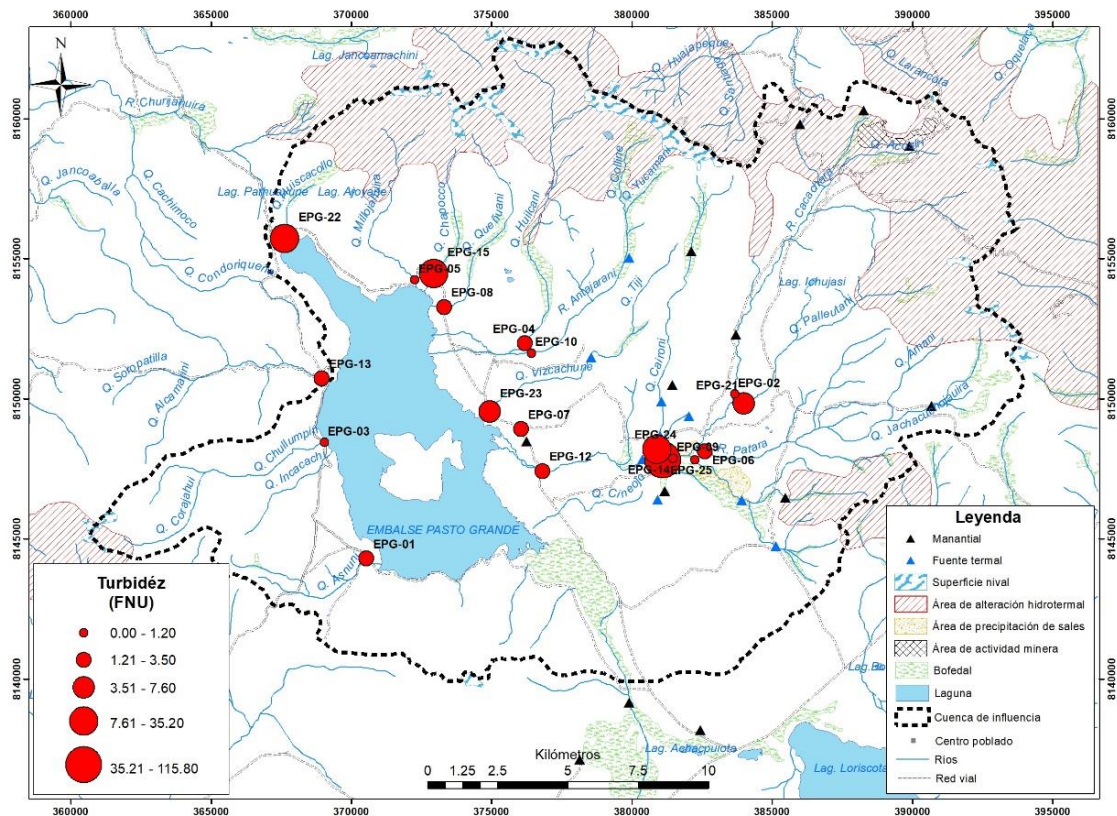


Figura 7. Valores de turbiedad en los afluentes al embalse

El valor más bajo corresponde a la quebrada Millojahuir (EPG-05), el cual tiene un pH bajo, los valores altos de turbidez se encuentra en la confluencia del río Cacachara y Patara (EPG-24), presentan precipitación iónica de Fe^{+3} . Según MINAM (2017) y ECA (100 FNU) se tiene un valor por encima de los ECA (EPG-25).

Temperatura (°C)

La temperatura muestra valores medios de 12.43 °C, valores máximos que llegan a 18.25 °C y mínimos que están en los 6.35 °C (Tabla 2). Los valores más bajos (6.35 – 10.55) de temperatura se dan en las quebradas Asnuni, Chullumpiri, Vizcachuni, confluencia de las quebradas Amani y Jachacuchojahuira, río Cacachara, afluente de fuentes termales del río Patara, río Patara principal y fuente termal del río Patara. Los valores moderados (10.51 – 15.40 °C), esto corresponde a la quebrada Caironi, Millojahuira, Palleutani, represa Pasto Grande, río Antajarani, confluencia de los ríos Cacachara y Patara y mantial. Los valores más altos (15.41 – 18.25 °C) están en las quebradas Chapocco, Queñuani, Huilcani y aguas embalsadas (Figura 8).

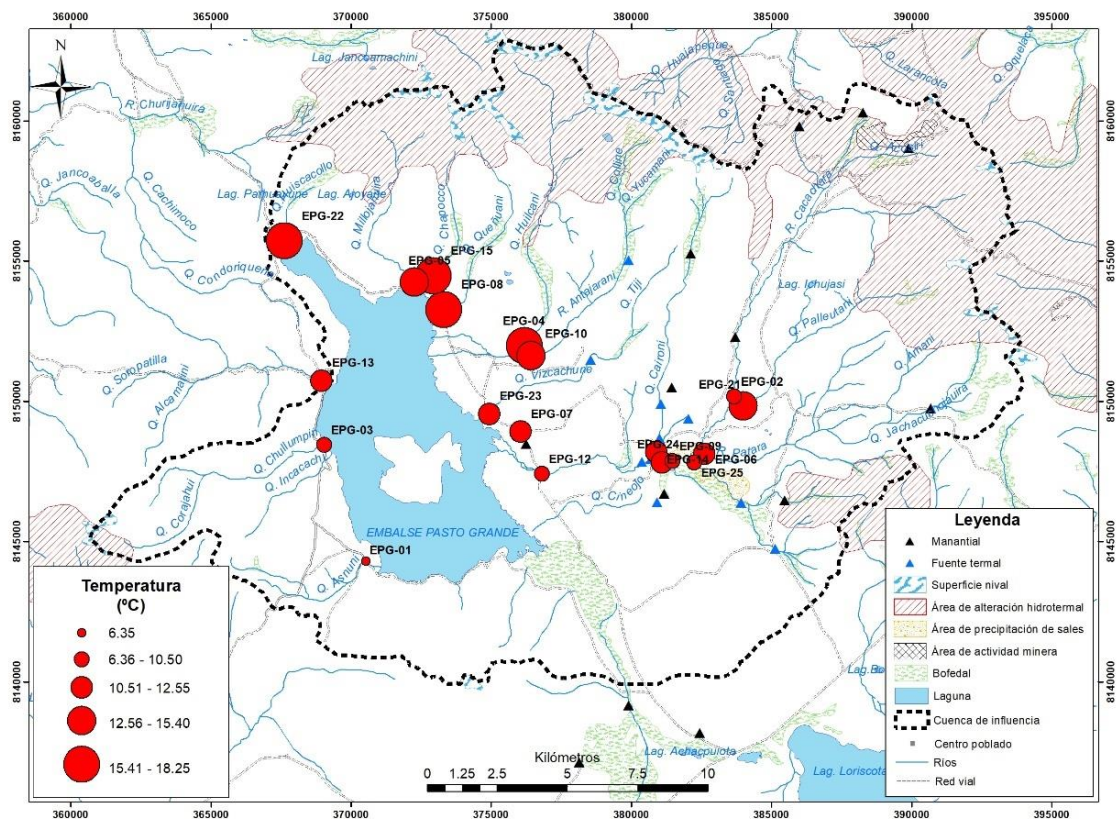


Figura 8. Valores de temperatura en los afluentes al embalse

El conjunto de datos tiene un comportamiento normal y el 50% de estos están por encima de 11.59 °C; el valor más alto de temperatura corresponde a la quebrada Huilcani (EPG-04) el cual tiene uno de los pH más bajos, al igual de las aguas embalsadas (EPG-22). De acuerdo MINAM (2017) y comparación con los ECA (15 °C), se tiene 6 afluentes que están por encima de los estándares nacionales.

4.1.3. Correlación y ACP, parámetros fisicoquímicos en agua

Existe correlación moderada a alta entre las variables recopiladas: pH-OD (0.4206378), pH-°C (-0.61001042), OD-pH (0.42063783), pH-TDS (0.86242417) y TDS-OD (0.8624242), (Tabla 3).

Tabla 3

Matriz de correlación de Pearson, parámetros fisicoquímicos

	pH	°C	OD_ppm	C_ μ s/cm	TDS_mg/L	Turb_FNU
pH	1	-0.13416229	0.4206378	-0.61001042	0.23498662	0.01048391
°C	-0.13416229	1	-0.3639853	-0.05302485	-0.01989328	0.04610859
OD (ppm)	0.42063783	-0.36398527	1	-0.11201841	0.86242417	0.11360716
C_ μ s/cm	-0.61001042	-0.05302485	-0.1120184	1	0.01638118	0.24935575
TDS_mg/L	0.23498662	-0.01989328	0.8624242	0.01638118	1	0.28609263
Turb_FNU	0.01048391	0.04610859	0.1136072	0.24935575	0.28609263	1

Las correlaciones altas entre el pH - TDS_mg/L y TDS_mg/L - OD_ppm, se debe a que los afluentes presentan precipitación sulfatos secundarios y a la ocurrencia de minerales presentes en el agua, respectivamente. Según, Ávila *et al.*(2015) las variables fisicoquímicas del agua (pH, Temperatura, Oxígeno disuelto, Salinidad, Sólidos Totales Disueltos, Conductividad), pueden ser analizadas por la correlación paramétrica bivariada de Pearson.

El ACP, ha seleccionado tres componentes principales que son mayores o iguales a 1 (PC1, PC2 y PC3); de acuerdo a esta tabla, el primer componente (PC1) tiene un aporte de 37.54%, segundo componente (PC2) aporta el 63.65% y el tercer componente (PC3) aporta el 81.43%. Entonces la variación total de la varianza acumulada es 81.43%, que es muy bueno, esto indica la reducción de dimensiones en tres componentes principales de las 6 variables iniciales (Tabla 4).

Tabla 4

Proporción de varianza explicada por cada componente

Parámetros estadísticos	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
Desviación estándar	1.5007	1.2518	1.0327	0.8772	0.54517	0.21855
Proporción de varianza	0.3754	0.2612	0.1777	0.1282	0.04954	0.00796
Proporción acumulada	0.3754	0.6365	0.8143	0.9425	0.99204	1
% de Var. acumulada	37.54	63.65	81.43	0.9425	0.99204	1

Los resultados demuestran lo dicho por Sánchez *et al.* (2010), la varianza por componente principal; explica la proporción relativa de la varianza total de cada eigenvalor (vector propio), que está dada por la magnitud de cada eigenvalor.

El PC1, contiene a las variables pH (-0.4480536), OD_ ppm (-0.6209792), TDS_mg/L (-0.5419384), estos parámetros fisicoquímicos se relacionan mejor con los siguientes afluentes (individuos): quebradas Huilcani, Millojahuiria, Caironi, represa Pasto Grande y agua embalsada. El PC2 contiene a las variables C_μs/cm (0.66372750) y Turb_FNU (0.47988723), estos parámetros fisicoquímicos se relacionan mejor con los siguientes afluentes (individuos): quebradas Asnuni, Chullumpiri, Queñuani, Palleutani, Vizcachuni, río Patara, confluencia del río Patara – Cacachara y manantial. El PC3, contiene a la variable °C (-0.8440431), este parámetro fisicoquímico se relaciona mejor con los siguientes afluentes: río Cacachara, fuente termal del río Patara, quebrada Chapocco, afluentes y fuente termal del río Patara (Tabla 5 y Figura 9).

Tabla 5
Componentes principales, explicación por variables e individuos

VARIABLES/INDIVIDUOS	PC1	PC2	PC3
pH	-0.4480536	-0.43884669	-0.1459848
°C	0.2225626	-0.03576635	-0.8440431
OD_ppm	-0.6209792	0.16356371	0.135967
C_ μs/cm	0.2315159	0.66372750	0.66372750
TDS_mg/L	-0.5419384	0.32947735	-0.1933081
Turb_FNU	-0.1296221	0.47988723	-0.4058181
Quebrada Huilcani	-1.56698599	0.36141772	1.16033925
Quebrada Millojahuiria	-1.12332065	0.18036387	-0.05090508
Río Cacachara	-0.60705061	0.87135489	-1.01789611
Afluente de fuentes termales del río Patara	-0.12254337	0.13085617	-1.21499602
Agua embalsada	-1.32867346	-0.10709607	1.4074998
Represa Pasto Grande	-0.85432714	-0.37604519	-0.36118864
Fuente termal río Patara	-0.06711756	0.09599379	-1.14215846
Quebrada Palleutani	-0.78697101	1.01371644	0.3410427
Manantial	-0.6546966	1.27893177	-0.49928869
Río Patara principal	-0.14533318	1.44144166	-1.38465416
Confluencia ríos Cacachara y Patara	-0.02616054	3.10712191	1.01925004
Quebrada Chapocco	-0.49942132	-0.9673111	1.41251717
Quebrada Vizcachuni	0.00859438	-1.2291957	-0.21292216
Quebrada Asnuni	0.88039198	-1.16000788	-1.57578681
Quebrada Queñuani	-0.66159849	-1.61553796	1.29440128
Confluencias quebradas Amani y Jachacuchojahuiria	0.79908067	-0.87795694	-0.30219097
Río Antajarani	0.35214132	-1.47776079	0.78515115
Quebrada Chullumpiri	0.95068378	-1.58569278	-0.7324936
Quebrada Caironi	5.45330779	0.91540618	1.0742793

Los resultados demuestran la reducción de variables en 3 componentes principales y su relación respectiva con los afluentes (individuos). El análisis ACP reduce a un pequeño número de componentes las variables y estos reproducen la mayor parte de la variabilidad de los datos originales y en consecuencia retienen la mayor parte de

la información (Bald *et al.*, 1999). El gráfico, indica las afinidades entre los parámetros fisicoquímicos (componentes principales) y afluentes al embalse Pasto Grande (individuos) (Figura 9).

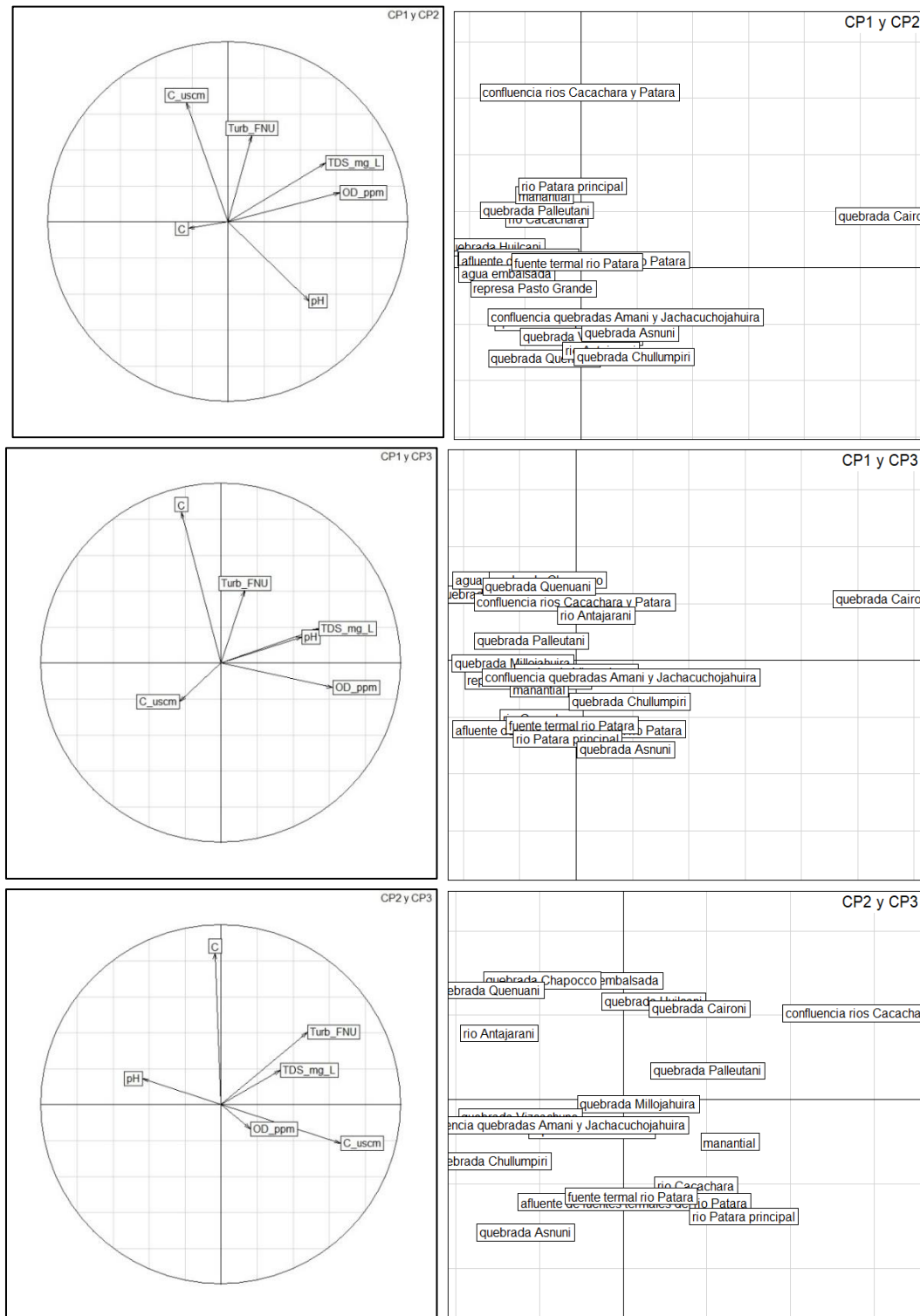


Figura 9. Gráfico circular y de individuos, parámetros fisicoquímicos de ACP

El gráfico bidimensional pareado con 3 componentes principales de Pasto Grande, es corroborado, por dicho por (Murte, 2013), en donde la visualización de datos en ACP, se dá a partir de gráficas tridimensionales o bidimensionales en las que se conjugan muestreos y variables

4.1.4. Concentración de elementos químicos en agua.

De la tabla 6, se eliminaron 16 resultados de elementos químicos (Ag, Bi, Hg, Mo, Nb, Se, Sn, Ta, Te, W, Zr, Ge, Hf, Sb, Th y V), porque tenían valores por debajo del límite de detección (70% y 100%). El elemento Ge, tiene concentraciones de 0.0022 mg/L en la fuente termal cerca del río Patara, 0.0125 mg/L en la quebrada Caironi y 0.0018 mg/L en el río Cacachara.

Tabla 6
Límites de detección en muestras de agua, para metales totales y disueltos

Elemento y unidad de medida	LD	LC	Elemento y unidad de medida	LD	LC
Ag_mg/L	0.000003	0.000010	Mo_mg/L	0.00002	0.00006
Al_mg/L	0.001	0.003	Na_mg/L	0.006	0.019
As_mg/L	0.00003	0.00010	Nb_mg/L	0.0005	0.0015
B_mg/L	0.002	0.006	Ni_mg/L	0.0002	0.0006
Ba_mg/L	0.0001	0.0003	P_mg/L	0.015	0.047
Be_mg/L	0.00002	0.00006	Pb_mg/L	0.0002	0.0006
Bi_mg/L	0.00001	0.00003	Rb_mg/L	0.0003	0.0009
Ca_mg/L	0.003	0.009	Sb_mg/L	0.00004	0.00013
Cd_mg/L	0.00001	0.00003	Se_mg/L	0.0004	0.0013
Ce_mg/L	0.00008	0.00024	Si_mg/L	0.04	0.13
Co_mg/L	0.00001	0.00003	SiO ₂ _mg/L	0.09	0.27
Cr_mg/L	0.0001	0.0003	Sn_mg/L	0.00003	0.00010
Cs_mg/L	0.0001	0.0003	Sr_mg/L	0.0002	0.0006
Cu_mg/L	0.00003	0.00009	Ta_mg/L	0.0007	0.0021
Fe_mg/L	0.0004	0.0013	Te_mg/L	0.001	0.003
Ga_mg/L	0.00004	0.00012	Th_mg/L	0.00006	0.00019
Ge_mg/L	0.0002	0.0006	Ti_mg/L	0.0002	0.0006
Hf_mg/L	0.00005	0.00015	Tl_mg/L	0.00002	0.00006
Hg_mg/L	0.00003	0.00009	U_mg/L	0.000003	0.000010
K_mg/L	0.04	0.13	V_mg/L	0.0001	0.0003
La_mg/L	0.0005	0.0015	W_mg/L	0.0002	0.0006
Li_mg/L	0.0001	0.0003	Yb_mg/L	0.00002	0.00006
Lu_mg/L	0.00002	0.00006	Zn_mg/L	0.0008	0.0026
Mg_mg/L	0.001	0.003	Zr_mg/L	0.00015	0.00045
Mn_mg/L	0.00003	0.00010			

El Sb, tiene concentraciones de: 0.05791 mg/L en la fuente termal Vizcachuni (cerca del río Patara), 0.02082 mg/L en el manantial del centro poblado Queñuani, 0.28754 mg/L en la quebrada Caironi y 0.04682 mg/L en el río Cacachara; este elemento en

los cuatro afluentes sobrepasa los ECA de tipo A1 y A2 (0.02 mg/L). El Hf, tiene concentraciones de: 0.00044 mg/L en la quebrada Chullumpiri, 0.00052 mg/L en la quebrada Huilcani, 0.00041 mg/L quebrada Millojahuirra, 0.00029 mg/L en la quebrada Queñuani y 0.00035 mg/L en la quebrada Vizcachuni. El Th, tiene concentraciones de: 0.00183 mg/L en el río Cacachara, 0.00032 mg/L en la quebrada Chullumpiri, 0.00422 mg/L en la quebrada Huilcani, 0.00382 mg/L en la quebrada Millojahuirra y 0.00023 mg/L en la fuente termal río Patara. El V, presenta concentraciones de: 0.002 mg/L en la quebrada Chullumpiri, 0.0043 mg/L en manantial Queñuani, 0.004 mg/L en la quebrada Caironi y 0.0041 mg/L quebrada Vizcachuni. La eliminación de datos para el tratamiento estadístico y análisis espacial se hizo de acuerdo a Quintanilla (2017).

Los valores máximos de concentraciones encontrados en los afluentes, muestran los siguientes 18 elementos químicos: Al (64.832), As (10.69355), B (28.283), Ba (0.697), Be (0.00709), Cd (0.05731), Cr (0.0066), Cu (0.28341), Fe (16.2926), Hg (<0.00009), Mn (5.66734), Mo (0.0074), Ni (0.1034), Pb (0.023), Sb (0.28754), Se (<0.0013), U (0.005661) y Zn (2.209); (Tabla 7).

Tabla 7

Estadística descriptiva de muestras de agua (metales totales)

Variable	Total	Mínimo	Máximo	Suma	Media	Desviación estándar
Al_mgL	19	0.02	64.832	315.00	16.58	21.86
As_mgL	19	0.00005	10.69355	13.79	0.73	2.45
B_mgL	19	0.003	28.283	47.38	2.49	6.47
Ba_mgL	19	0.0025	0.697	1.10	0.06	0.16
Be_mgL	19	0.00003	0.00709	0.04	0.002	0.003
Cd_mgL	19	0.000015	0.05731	0.25	0.01	0.023
Cr_mg/L	19	0.00015	0.0066	0.03	0.002	0.002
Cu_mgL	19	0.000045	0.28341	1.07	0.06	0.086
Fe_mgL	19	0.0399	16.2926	51.97	2.74	4.70
Hg_mgL	19	<0.00009	<0.00009	<0.00009	<0.00009	<0.00009
Mn_mgL	19	0.00005	5.66734	25.74	1.35	1.77
Mo_mgL	19	<0.00006	0.0074	<0.00006	<0.00006	<0.00006
Ni_mgL	19	0.0003	0.1034	0.66	0.03	0.042
Pb_mgL	19	0.0003	0.023	0.11	0.01	0.008
Sb_mgL	19	0.000065	0.28754	0.414065	0.021792895	0.06651432
Se_mgL	19	<0.0013	<0.0013	<0.0013	<0.0013	<0.0013
U_mgL	19	0.000005	0.005661	0.02	0.0012	0.002
Zn_mgL	19	0.0013	2.209	10.36	0.55	0.82

Según MINAM (2017), para los 18 elementos químicos en aguas superficiales, se obtuvo que, el Al, As, B, Cd, Fe, Mn, Ni, Pb y Sb, sobrepasan los límites permitidos.

4.1.5. Distribución espacial de elementos químicos en agua.

Aluminio (Al mg/L)

El aluminio tiene una concentración media de 16.58 mg/L, un mínimo de 0.02 mg/L y un máximo de 64.832 mg/L (Tabla 7). Las concentraciones mínimas (0.02-1.07mg/L) se encontraron en las quebradas Caironi, Queñuani, Chullumpiri, Chapocco, Asnuni, Vizcachuni, Palleutani, confluencia de las quebradas Amani y Jachacujahuira, río Antajarani. Las concentraciones moderadas (1.08-42.75 mg/L) ocurren en la represa Pasto Grande, aguas embalsadas, fuente termal del río Patara, confluencia ríos Cacachara y Patara, río Patara principal y afluente de fuentes termales río Patara. Las concentraciones altas (42.76 – 84.83 mg/L) se dan en las quebradas Millojahuira y Huilcani (Figura 10).

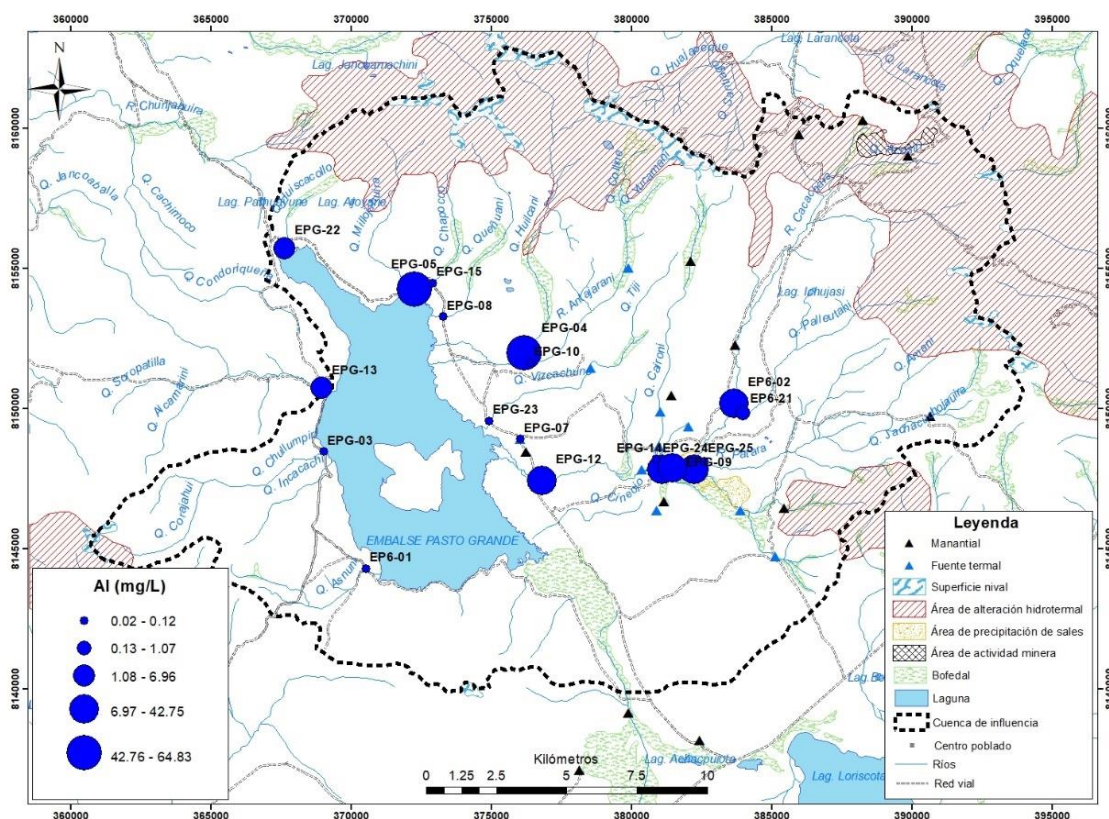


Figura 10. Concentraciones de Al (mg/L) en los afluentes al embalse

La concentración más baja EPG-07 (manantial), indica que no hay meteorización de Al, en cambio las muestras EPG-05 y EPG-04, demuestran altas concentraciones de Al y pH ácido. Según (MINAM, 2017) el embalse tiene 9 valores sobre los ECA (0.9 – 5 mg/L), todos relacionados a rocas con alteración hidrotermal.

Arsénico (As mg/L)

El Arsénico tiene una concentración media de 0.73 mg/L, un mínimo de 0.00005 mg/L y un máximo de 10.69355 mg/L (Tabla 7). Las concentraciones bajas (0.00005 – 0.099300 mg/L) están en las quebradas Millojahuirá, Huilcani, Palleutani, Queñuani, Asnuni, Chapocco, Vizcachuni, Chullumpiri, confluencias quebradas Amani y Jachacuchojahuirá, ríos Antajarani, Cacachara, afluyente de fuentes termales del río Patara, represa Pasto Grande, agua embalsada y manantial. Las concentraciones moderadas (0.099301 – 1.374180 mg/L) ocurren en el río Patara principal, confluencia ríos Cacachara y Patara y fuente termal del río Patara. El valor alto (1.374181 - 10.693550 mg/L) ocurre en la quebrada Caironi (Figura 11).

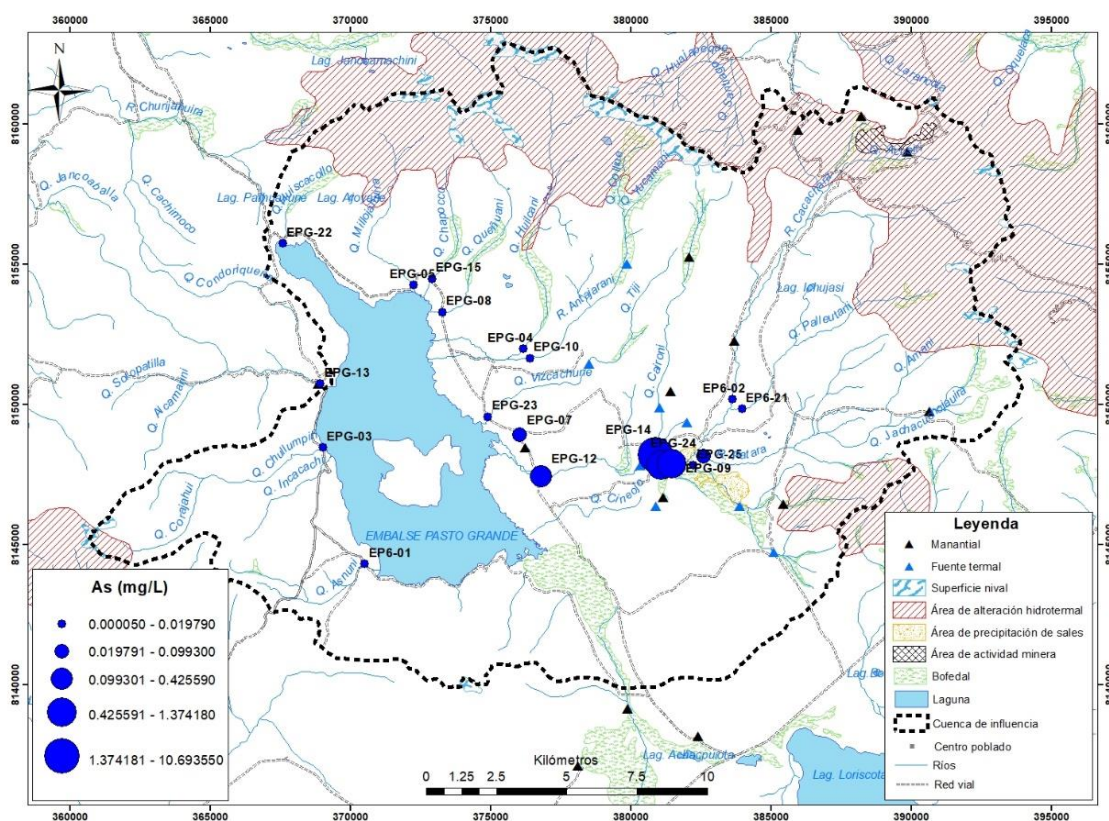


Figura 11. Concentraciones de As (mg/L) en los afluentes al embalse.

Los valores bajos de As tienen cierta relación con pH ácidos, y el valor de concentración alta ocurre con concentraciones bajas de Al. Los ECA (0.01 mg/L) de MINAM (2017) indica cinco concentraciones que sobrepasan los estándares, los cuales tienen afinidad espacial con las fuentes termales que pertenecen a la microcuenca del río Patara.

Bario (Ba mg/L)

El Bario tiene una concentración media de 16.58 mg/L, una mínima de 0.0025 mg/L y un máximo de 0.697 mg/L (Tabla 7). Las concentraciones mínimas (0.0025-0.0174 mg/L) se dieron en las quebradas Asnuni, Queñuani, Huilcani, Millojahuira, Chapocco, Chullumpiri, Vizcachuni, ríos Antajarani y Cacachara, y manantial. Las concentraciones moderadas (0.0175 -0.0522 mg/L) se encuentran en la quebrada Palleutani, confluencia de las quebradas Amani y Jachacuchajahuira, afluyente de fuentes termales del río Patara, fuente termal del río Patara, confluencia ríos Cacachara y Patara, río Patara principal, represa Pasto Grande y agua embalsada. La concentración alta (0.697 mg/L) se encuentra en la quebrada Caironi (Figura 12).

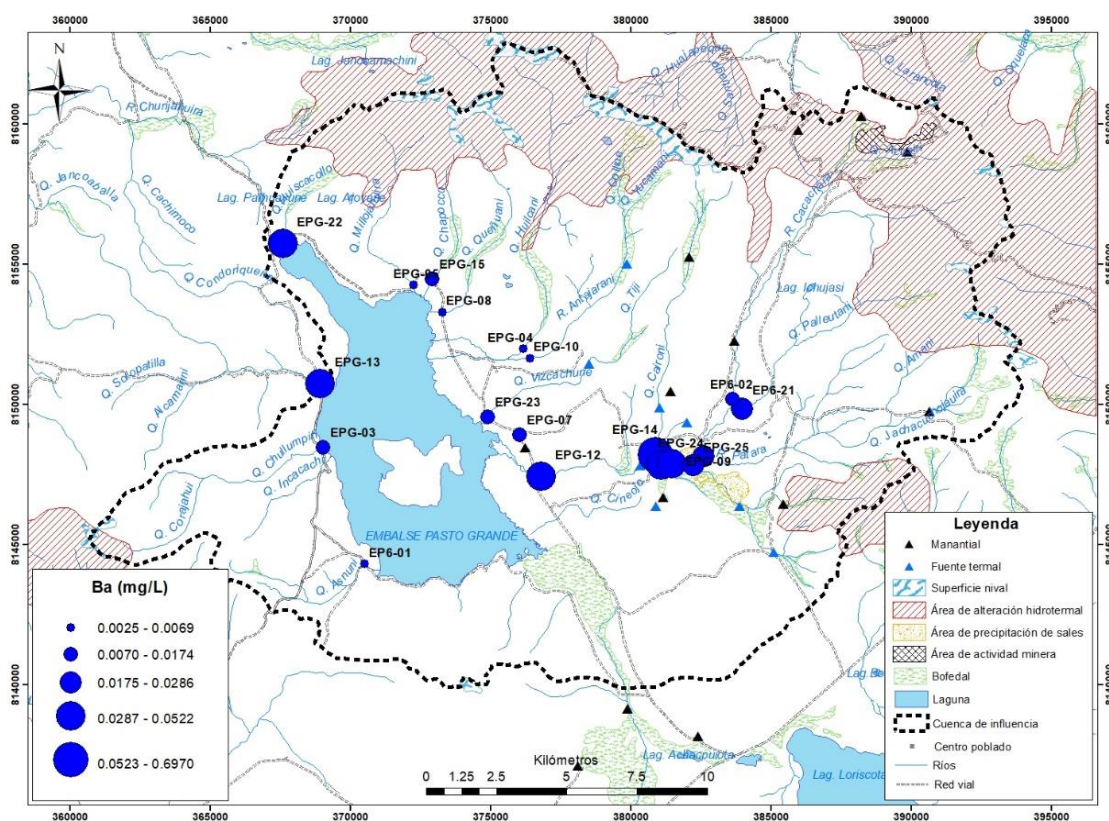


Figura 12. Concentraciones de Ba (mg/L) en los afluentes al embalse

La concentración más baja corresponde a la quebrada Asnuni (EPG-01) que no contienen rocas con alteración hidrotermal y la concentración más alta a la quebrada Caironi (EPG – 14) relacionada a las fuentes termales Vizcachuni y a valores altos de As y B. Los ECA del Ba (0.07 - 1 mg/L) según MINAM (2017) indica que este elemento no sobrepasa las concentraciones indicadas por los estándares nacionales.

Berilio (Be mg/L)

El Berilio tiene una concentración media de 0.002 mg/L; una mínima de 0.0003 mg/L y un máximo de 0.00709 mg/L (Tabla 7). Las concentraciones mínimas (0.0003-0.00118 mg/L) se encontraron en las quebradas Asnuni, Queñuani, Chapocco, Chullumpiri, Vizcachuni, Caironi, Palleuntani, confluencias quebradas Amani y Jachacuchajhuira, represa Pasto Grande, manantial y agua embalsada. Las concentraciones moderadas (0.00119 – 0.00461 mg/L) ocurren en la quebrada Millojahuira, Huilcani y río Cacachara. Las concentraciones altas (0.00462 – 0.00709 mg/L) se dan en el río Patara principal, fuente termal del río Patara, confluencia ríos Cacachara y Patara, y afluyente de fuentes termales del río o Patara (Figura 13).

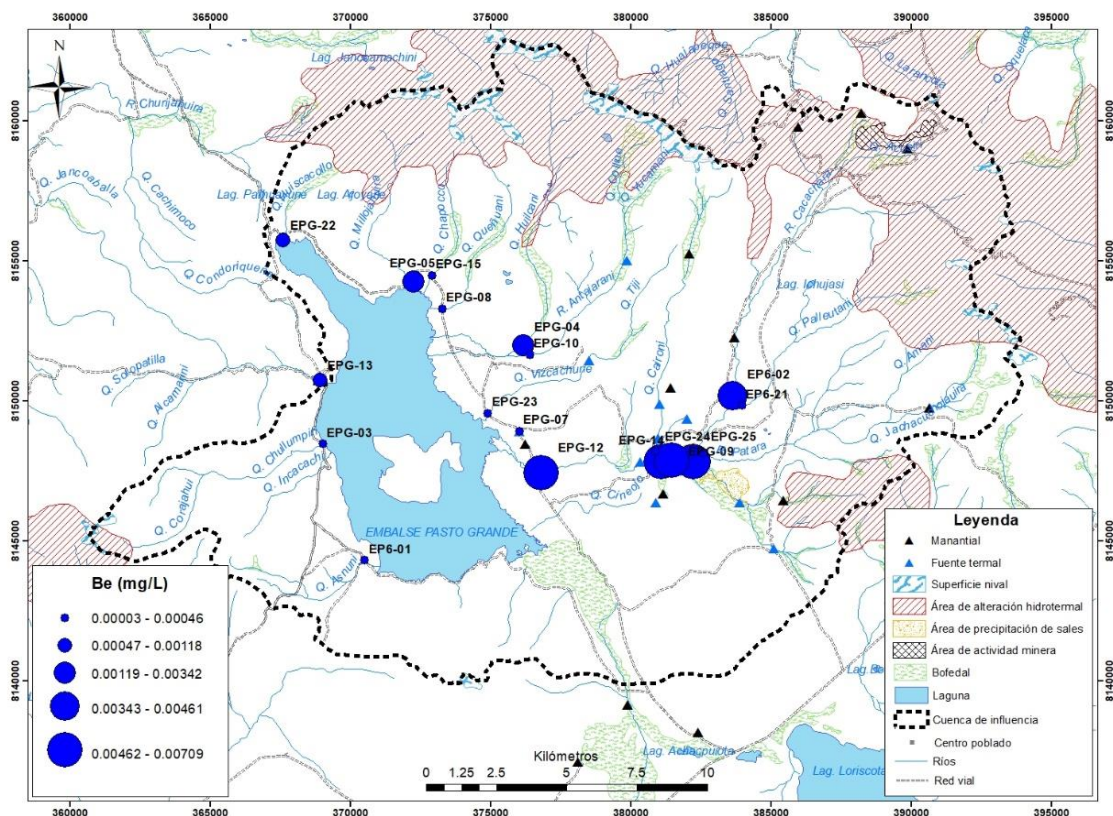


Figura 13. Concentraciones de Be (mg/L), en afluentes al embalse

Las concentraciones altas se encuentran relacionadas a la microcuenca del río Patara (EPG-12), el cual presenta fuentes termales. El Be coincide con las concentraciones de B; los ECA del Be (0.012 - 0.04 mg/L) según MINAM (2017) indican que este elemento no sobrepasa las concentraciones indicadas por los estándares nacionales.

Boro (B mg/L)

El Boro tiene concentración media de 16.58 mg/L, una mínima de 0.003 mg/L y un máximo de 28.283 mg/L (Tabla 7). Las concentraciones mínimas (0.003 - 1.1270 mg/L) se encontraron en las quebradas Queñuani, Chullumpiri, Millojahuirá y Asnuni. Las concentraciones moderadas (1.128 - 4.984 mg/L), ocurren en los ríos Cacachara, Antajarani, quebradas Palleutani, Huilcani, Vizcachuni, Chapocco y afluyente de fuentes termales del río Patara. Las concentraciones altas (4.985 - 28.283 mg/L) se dan en las aguas embalsadas, represa Pasto Grande, confluencias quebradas Amani y Jachacuchajuirá, confluencia ríos Cacachara y Patara, fuente termal río Patara, río Patara principal y quebrada Caironi (Figura 14).

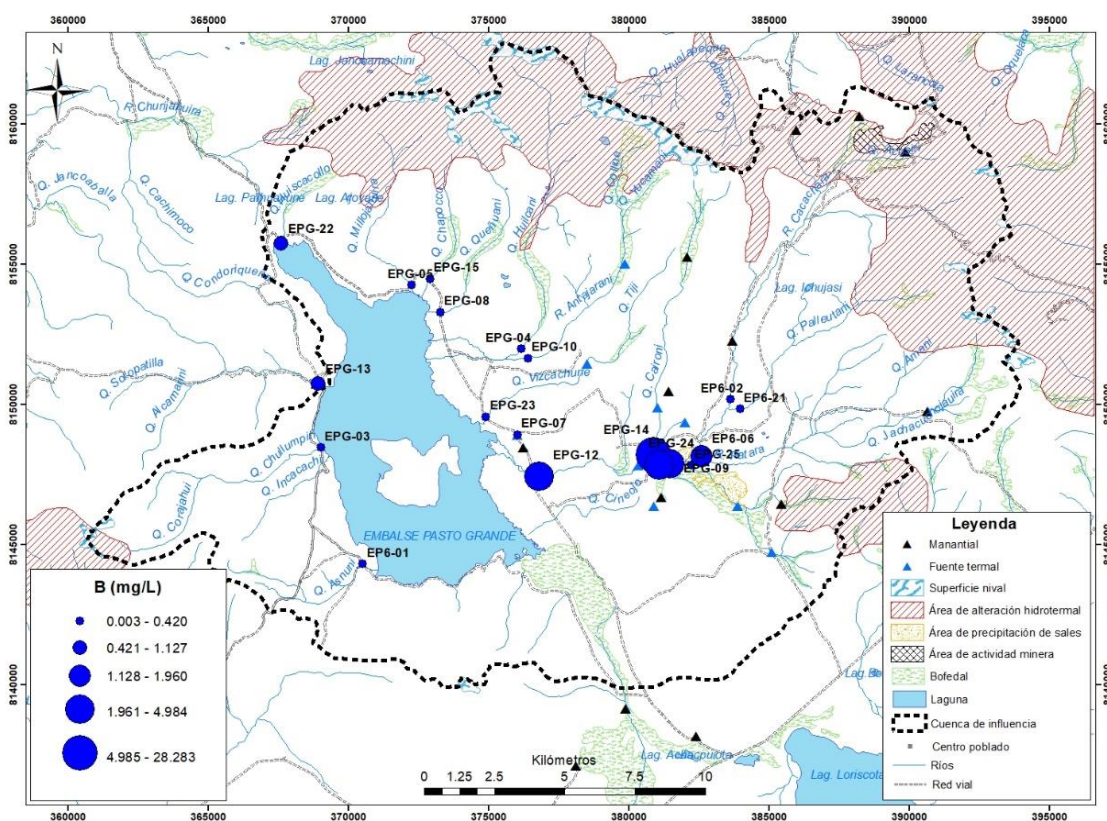


Figura 14. Concentraciones de B (mg/L) en los afluentes al embalse

Los valores mínimos (EPG-8 y EPG-3) provienen de sectores sin alteración hidrotermal, el valor más alto (EPG-14) se origina en áreas con presencia de fuentes termales cuyo lecho de quebrada contiene precipitación de sales. Los ECA del B (2.4 mg/L) según (MINAM, 2017) indican que este elemento sobrepasa las concentraciones en cuatro afluentes (EPG-24, EPG-9, EPG-12 y EPG-14).

Cadmio (Cd mg/L)

El Cadmio tiene una concentración media de 0.01 mg/L, un mínimo de 0.000015 mg/L y un máximo de 0.05731 mg/L (Tabla 7). Las concentraciones mínimas (0.000015 - 0.000510 mg/L) están en las quebradas Queñuani, Chullumpiri, Millojahaira, Asnuni, Huilcani, Vizcachuni, Chapocco, Caironi, Palleutani, Amani y Jachacuchojahaira, represa Pasto Grande, agua embalsada, río Antajarani y manantial. Las concentraciones moderadas (0.45530 – 0.049980 mg/L) ocurren en la fuente termal del río Patara, confluencia de los ríos Cacachara y Patara, afluyente de fuentes termales del río Patara y río Patara. La concentración alta (0.049981 – 0.057310 mg/L) se encuentra en el río Cacachara (Figura 15).

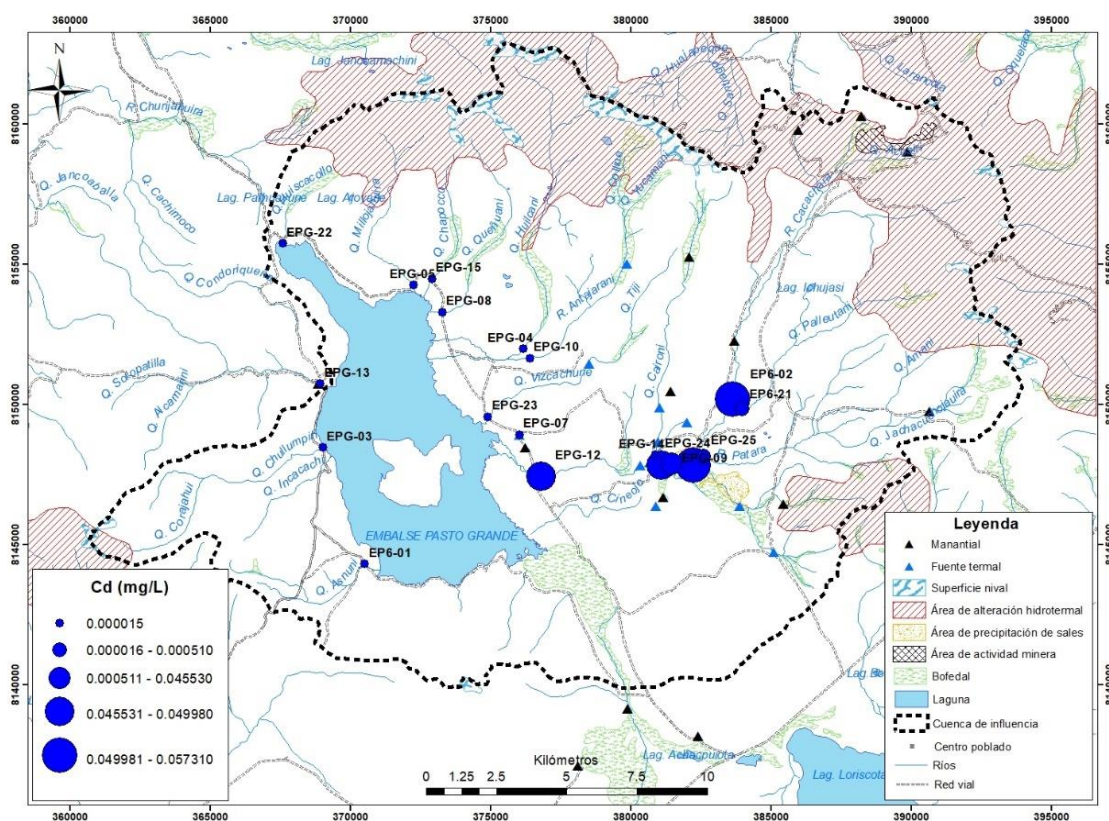


Figura 15. Concentraciones de Cd (mg/L), en afluentes al embalse

Las concentraciones mínimas se dan en afluentes con pH variables, aunque la concentración más alta ocurre en pH ácido (EPG-02) que pertenece al río Cacachara. Los ECA del Cd (0.003 – 0.005 mg/L) según (MINAM, 2017) indican que este elemento sobrepasa con sus concentraciones en cinco afluentes (EPG-09, EPG-24, EPG-12, EPG-25 y EPG-02), la mayoría de ellos corresponde a la microcuenca del río Patara.

Cobre (Cu mg/L)

El Cobre tiene una concentración media de 0.6 mg/L, una mínima de 0.000045 mg/L y un máximo de 0.28341 mg/L (Tabla 7). Las concentraciones bajas (0.000045 - 0.006980 mg/L) están en las quebradas Chapocco, Caironi, Queñuani, Asnuni, Millojahuir, Chullumpiri, Vizcachuni, Palleutani, confluencia quebrada Amani y Jachacuchojahuir y manantial. Las concentraciones moderadas (0.00681 - 0.171680 mg/L) ocurren en el embalse, represa Pasto Grande, quebrada Huilcani, río Patara principal, fuente termal del río Patara, confluencia ríos Cacachara y Patara, afluyente de fuentes termales del río Patara y río Cacachara. La concentración alta (0.171681 - 0.283410 mg/L) ocurre en el río Cacachara (Figura 16).

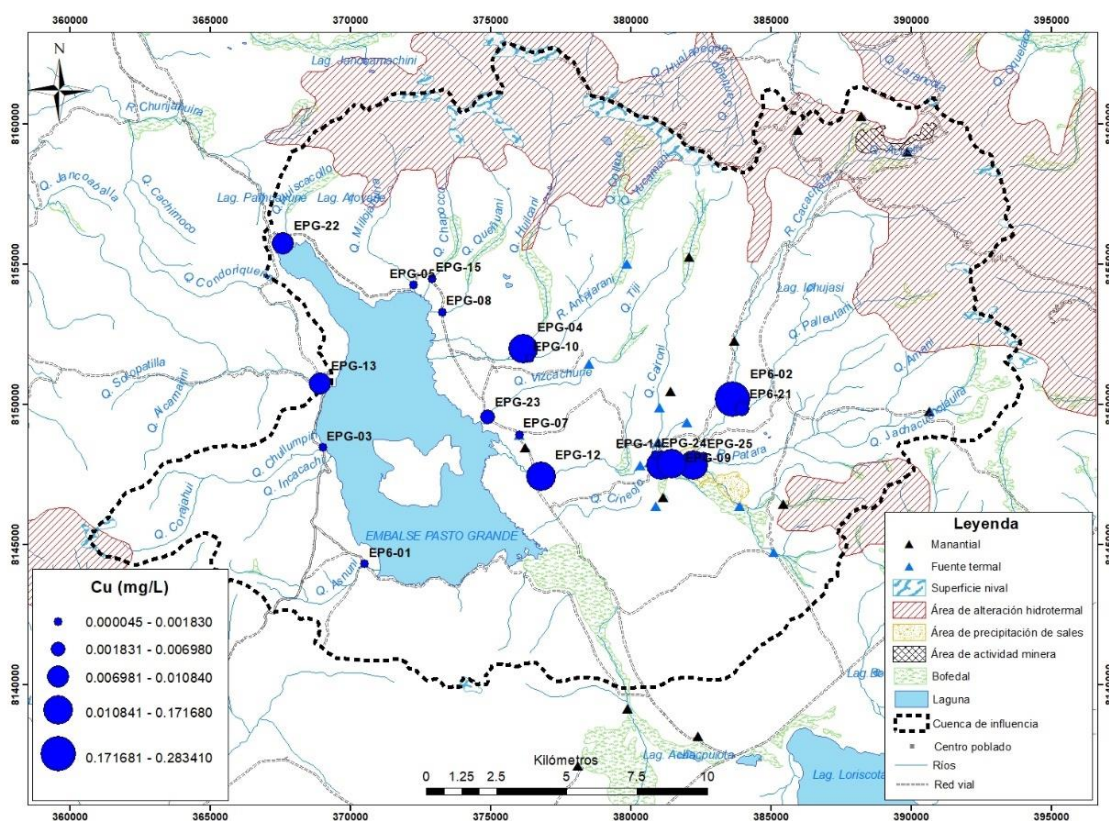


Figura 16. Concentraciones de Cu (mg/L), en afluentes al embalse

El valor bajo de Cu, está en la muestra manantial (EPG-07) y más alta en la muestra EPG-02 (río Cacachara), el último proviene de rocas alteradas por hidrotermalismo (minas de Cacachara y Santa Rosa). Las concentraciones altas de Cd y Cu coinciden espacialmente; los ECA del Cu (2 mg/L) según (MINAM, 2017) indican que este elemento no sobrepasa la normatividad en ninguno de los afluentes al embalse.

Cromo (Cr mg/L)

El Cromo tiene una concentración media de 0.002 mg/L, una mínima de 0.00015 mg/L y un máximo de 0.0066 mg/L (Tabla 7). Las concentraciones mínimas (0.00015 - 0.00260 mg/L) se encuentran en las quebradas Chapocco, Caironi, Queñuani, Asnuni, Chullumpiri, Palleutani, confluencias quebradas Amani y Jachacuhojahuira, río Antajarani, aguas embalsadas, represa Pasto Grande, río Patara principal y fuente termal del río Patara. Las concentraciones moderadas (0.00260 – 0.00390 mg/L) se encuentran las quebradas Vizcachuni, Millojahuira y afluyente de fuentes termales del río Patara. Las concentraciones altas (0.00391 – 0.00660 mg/L) se dan en la quebrada Huilcani y río Cacachara (Figura 17).

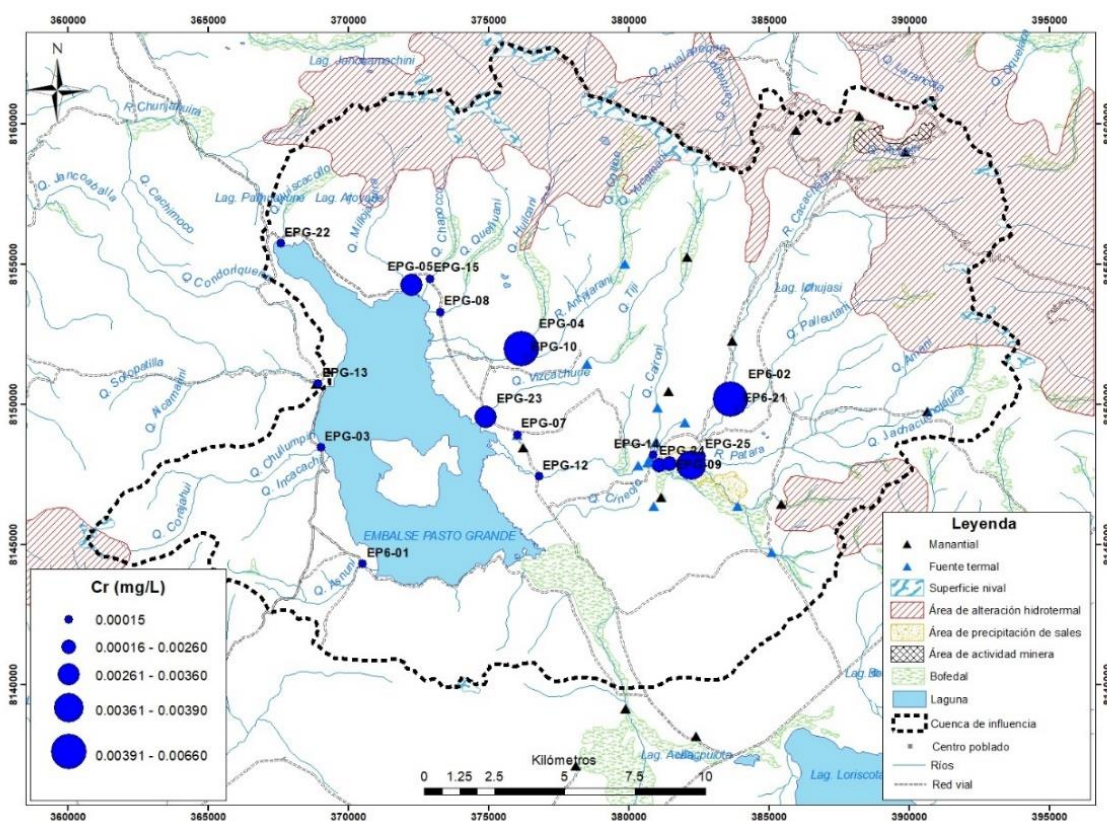


Figura 17. Concentraciones de Cr (mg/L), en afluentes al embalse

El conjunto de datos de Cr, tiene dos concentraciones altas que ocurren a partir de afloramientos con rocas alteradas por hidrotermalismo pasado, una en el río Cacachara (EPG-02) y la otra en la quebrada Huilcani (EPG-04). El Cr coincide con las concentraciones altas de Cd y Cu y en ambos casos con pH ácidos. Los ECA del Cr (0.05 mg/L) según (MINAM, 2017) indican que este elemento no supera sus concentraciones en ninguno de los afluentes al embalse.

Hierro (Fe mg/L)

El Hierro tiene una concentración media de 2.74 mg/L, una mínima de 0.0399 mg/L y un máximo de 16.2926 mg/L (Tabla 7). Las concentraciones bajas (0.0399-1.5656 mg/L) se tienen en las quebradas Palleutani, Chullumpiri, Asnuni, Vizcachuni, Chapocco, Queñuani, confluencias quebradas Amani y Jachacuchajhuira; ríos Antajarani, Patara, afluyente de fuentes termales del río Patara, represa Pasto Grande, fuente termal del río Patara y manantial. Los valores moderados (1.5657 – 7.9091 mg/L) ocurren en los afluentes río Cacachara, confluencias ríos Cacachara y Patara y quebrada Caironi. Las concentraciones altas (7.9092 – 16.2926 mg/L) ocurren en las quebradas Huilcani y Millojahuira (Figura 18).

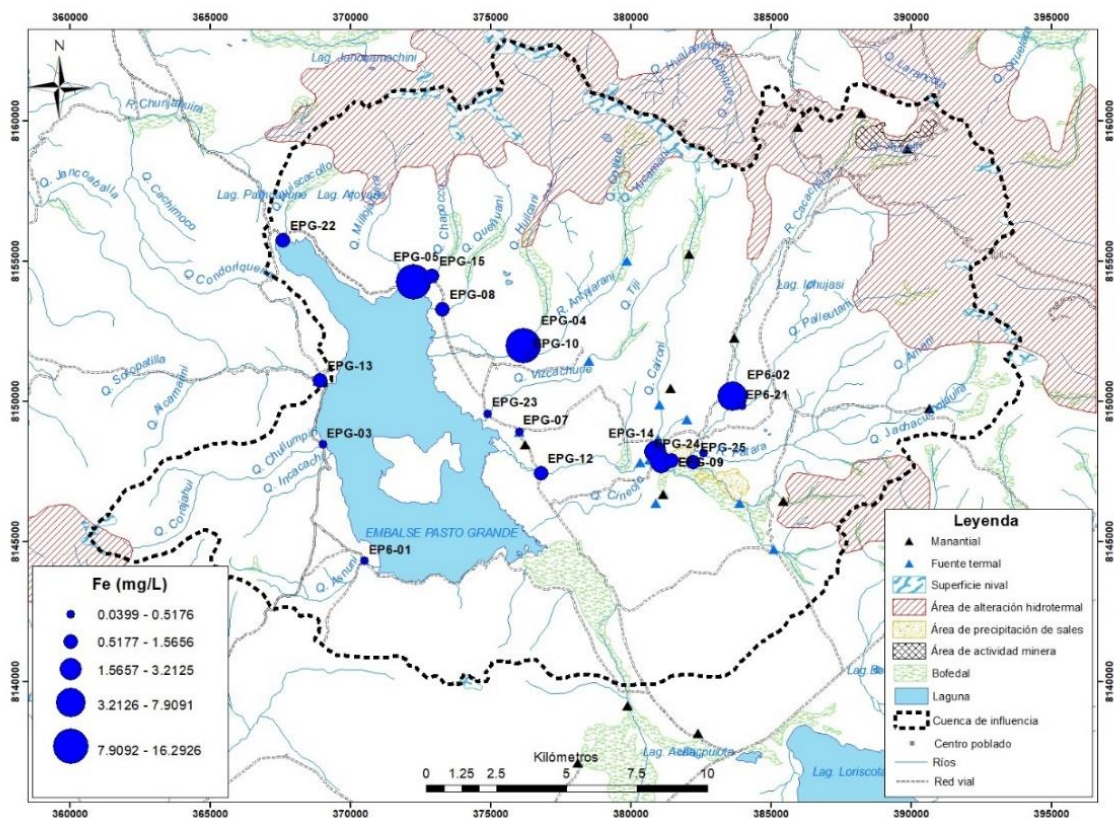


Figura 18. Concentraciones de Fe (mg/L), en afluentes al embalse

La concentración más baja de Fe está en la muestra EPG-21 (quebrada Palleutani) y las más altas en afluentes con pH ácido (EPG-05, EPG-04, EPG-02), en estos puntos de muestreo las temperaturas están por encima de los 16°C. Las concentraciones altas de Fe coinciden con las de Al y Cr; estos valores se originan en rocas alteradas por hidrotermalismo; los ECA del Fe (0.3 – 1 mg/L) según (MINAM, 2017) indican que este elemento supera sus concentraciones en 13 afluentes al embalse.

Manganeso (Mn mg/L)

El Manganeso tiene concentración media de 1.35 mg/L, una mínima de 0.00005 mg/L y un valor máximo de 5.66734 mg/L (Tabla 7). Las concentraciones bajas (0.00005 – 0.06361 mg/L) se encuentran en la quebrada Chullumpiri, Asnuni, Queñuani, Vizcachuni, Chapocco, Palleutani, Millojahuirá, Huilcani, confluencias quebradas Amani y Jachacuchajuirá y río Antajarani. Las concentraciones medias (0.06362 – 1.45996 mg/L) ocurren en la quebrada Caironi, represa Pasto Grande y agua embalsada. Las altas concentraciones (1.45997 – 5.66734 mg/L) se dan en la fuente termal del río Patara, ríos Patara y Cacachara, afluente de fuentes termales del río Patara y confluencia de los ríos Cacachara y Patara (Figura 19).

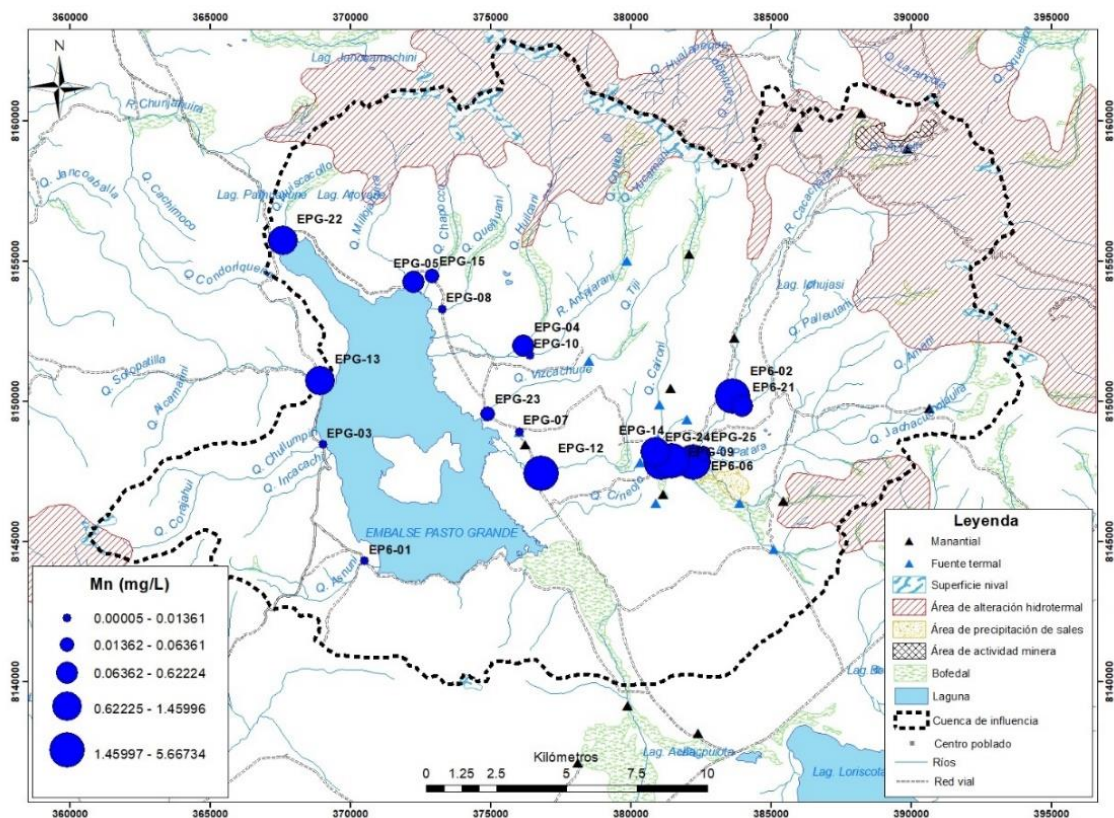


Figura 19. Concentraciones del Mn (mg/L), en afluentes al embalse

La concentración mínima ocurre en EPG-07 (manantial, el cual se forma por percolación del nivel freático) y la más alta concentración ocurre en EPG-02 (río Cacachara), en donde esta coincide con altas concentraciones de Cd, Cr y Cu, y pH ácido. Los ECA del Mn (0.4 mg/L) según (MINAM, 2017) indican que los valores de este elemento sobrepasa en 10 afluentes al embalse, los cuales tienen relación directa con afloramientos alterados por hidrotermalismo.

Níquel (Ni mg/L)

El Níquel tiene una concentración mínima de 0.0003 mg/L, un máximo de 0.1034 mg/L, una media de 0.66 mg/L (Tabla 7). Las concentraciones mínimas (0.0003 – 0.0218 mg/L) se dieron en las quebradas Chullumpiri, Asnuni, Queñuani, Chapocco, Vizcachuni, Caironi, Palleutani, confluencias quebradas Amani y Jachacuchojahuira, río Antajarani, represa Pasto Grande, agua embalsada y manantial. Las concentraciones moderadas (0.0219 – 0.0664 mg/L) ocurren en la quebrada Millojahuira, fuente termal del río Patara, confluencia de los ríos Cacachara y Patara y río Patara principal. Las concentraciones altas de Ni (0.0865 – 0.1034 mg/L) se dan en el afluente de fuentes termales del río Patara, quebrada Huilcani y río Cacachara (Figura 20).

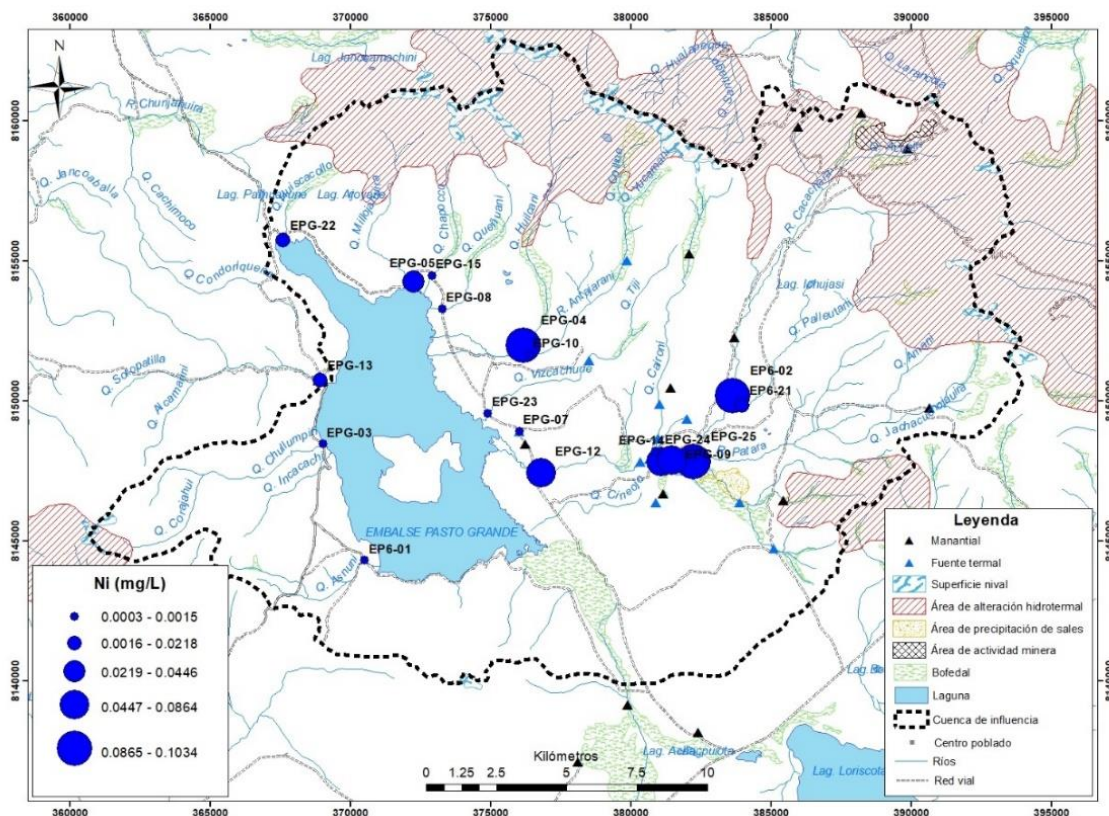


Figura 20. Concentraciones del Ni (mg/L), en afluentes al embalse

La concentración mínima ocurre en la muestra EPG-07 (manantial) y el valor máximo se da en el río Cacachara (EPG-02), este último coincide con los valores altos de Mn, Cu, Cd, Cr y Be; ambos afluentes se originan en afloramientos alterados por hidrotermalismo. Los ECA del Ni (0.07 mg/L) según (MINAM, 2017) indican que los valores de este elemento sobrepasan en 6 afluentes al embalse.

Plomo (Pb mg/L)

El Plomo tiene una concentración media de una media de 0.01 mg/L, una mínima de 0.0003 mg/L y un máximo de 0.023 mg/L (Tabla 7). Las concentraciones mínimas (0.0003-0.0060 mg/L) ocurrieron en las quebradas Chullumpiri, Asnuni, Queñuani, Chapocco, Vizcachuni, Caironi, Palleutani, Millojahuir, Huilcani, confluencia de las quebradas Amani y Jachacuchojahuir, represa Pasto Grande, manantial y río Antajarani. Las concentraciones moderadas (0.0061 – 0.0196 mg/L) ocurren en el río Cacachara, río Patara principal y fuente termal del río Patara. Las concentraciones altas (0.0196 – 0.0230 mg/L) se dan en la confluencia de ríos Cacachara y Patara y afluente de fuentes termales del río Patara (Figura 21).

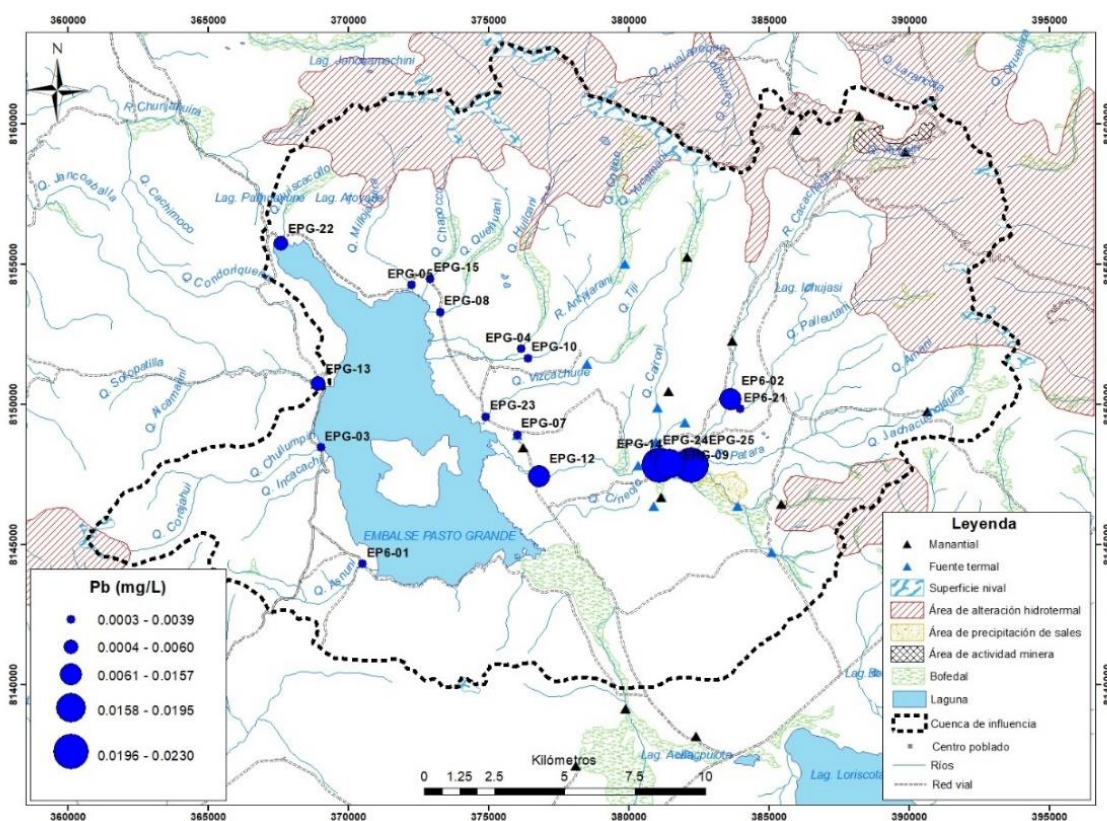


Figura 21. Concentraciones del Pb (mg/L), en afluentes al embalse

El conjunto de datos de Pb demuestra un comportamiento normal, en donde el valor mínimo ocurre en la muestra EPG-07 (manantial) y el valor máximo se da en el afluente de fuentes termales del río Patara (EPG-25), este último coincide con los valores altos de Mn, Ni y Be. Los ECA del Pb (0.01 – 0.05 mg/L) según (MINAM, 2017) indican que los valores de este elemento sobrepasan en 5 afluentes al embalse, los cuales tienen relación directa con el río Patara y fuentes termales.

Antimonio (Sb mg/L)

El Antimonio tiene concentraciones medias de 0.02179 mg/L, mínimas de 0.000065 mg/L, un máximo de 0.28754 mg/L (Tabla 7). Las concentraciones mínimas (0.000065 - 0.022820 mg/L) ocurrieron en las quebrada Asnuni, Chullumpiri, Huilcani, Millojahuirá, Queñuani, Chapocco, Palleutani, Vizcachuni, confluencias quebradas Amani y Jachacuchajahuira; ríos Cacachara, Antajarani, afluente de fuentes termales río Patara, manantial, agua embalsada. Las concentraciones moderadas (0.0208 - 0.057910 mg/L) ocurren en río Patara principal, confluencia ríos Cacachara y Patara y fuente termal del río Patara. Las concentraciones altas (0.05911 - 0.287540 mg/L) se da solamente en la quebrada Caironi (Figura 22).

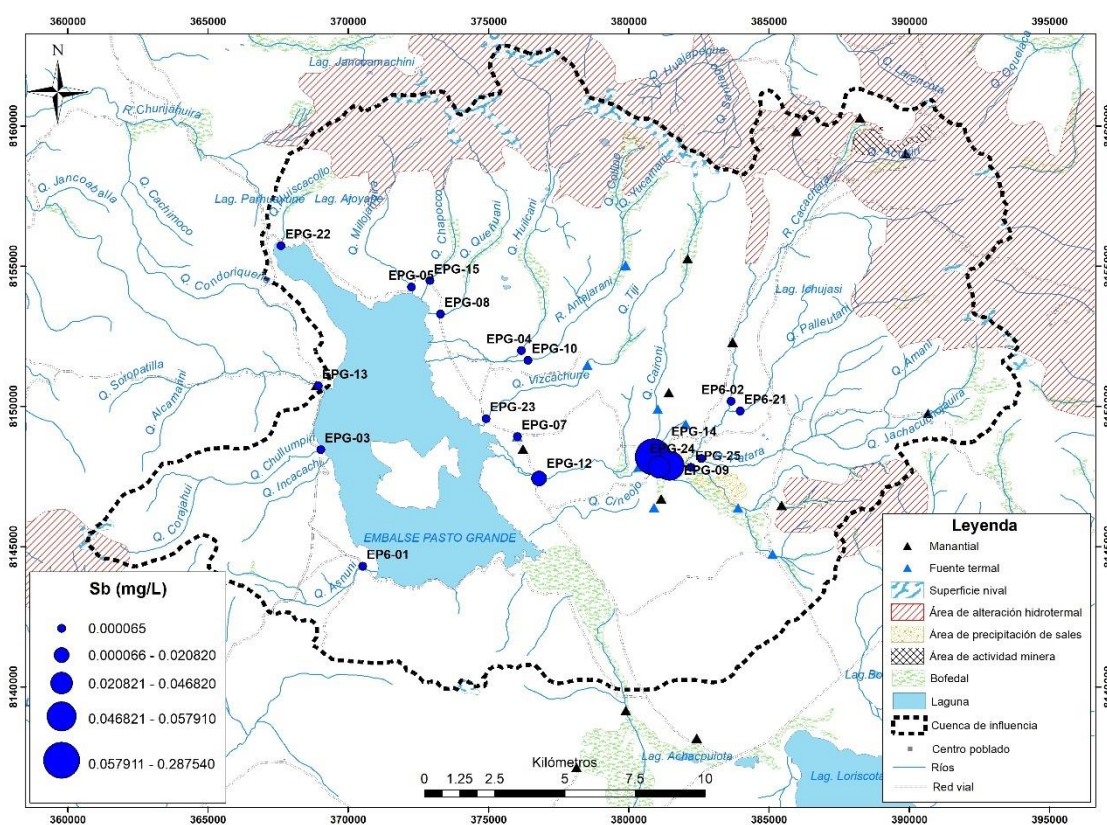


Figura 22. Concentraciones del Sb (mg/L), en afluentes al embalse

El conjunto de datos de Sb demuestra un comportamiento normal, en donde el valor mínimo ocurre en la muestra EPG-07 (manantial) y el valor máximo se da en el afluente quebrada Caironi (EPG-14), este último coincide con los valores altos de Cd, Cr, Cu, Mn y Ni. Los ECA del Sb (0.02 mg/L) según MINAM (2017) indican que este elemento sobrepasa en cuatro afluentes los estándares. Se observa que el Sb no presenta alta dispersión geoquímica porque precipita cerca del lugar de origen.

Uranio (U mg/L)

El Uranio tiene concentraciones medias de 0.0012 mg/L, mínimas de 0.000005 mg/L, un máximo de 0.005661 mg/L (Tabla 7). Las concentraciones mínimas (0.000005-0.000550 mg/L) ocurrieron en las quebradas Chullumpiri, Asnuni, Queñuani, Chapocco, Vizcachuni, Caironi, Palleutani, Millojahuiria, Huilcani, confluencia de las quebradas Amani y Jachacuchojahuiria, represa Pasto Grande, manantial y río Antajarani. Las concentraciones moderadas (0.000551 – 0.004356 mg/L) ocurre en el río Patara principal, fuente termal del río Patara y confluencia ríos Cacachara y Patara. Las concentraciones altas (0.004357 – 0.005661 mg/L) se dan en el afluente de fuentes termales del río Patara y río Cacachara (Figura 23).

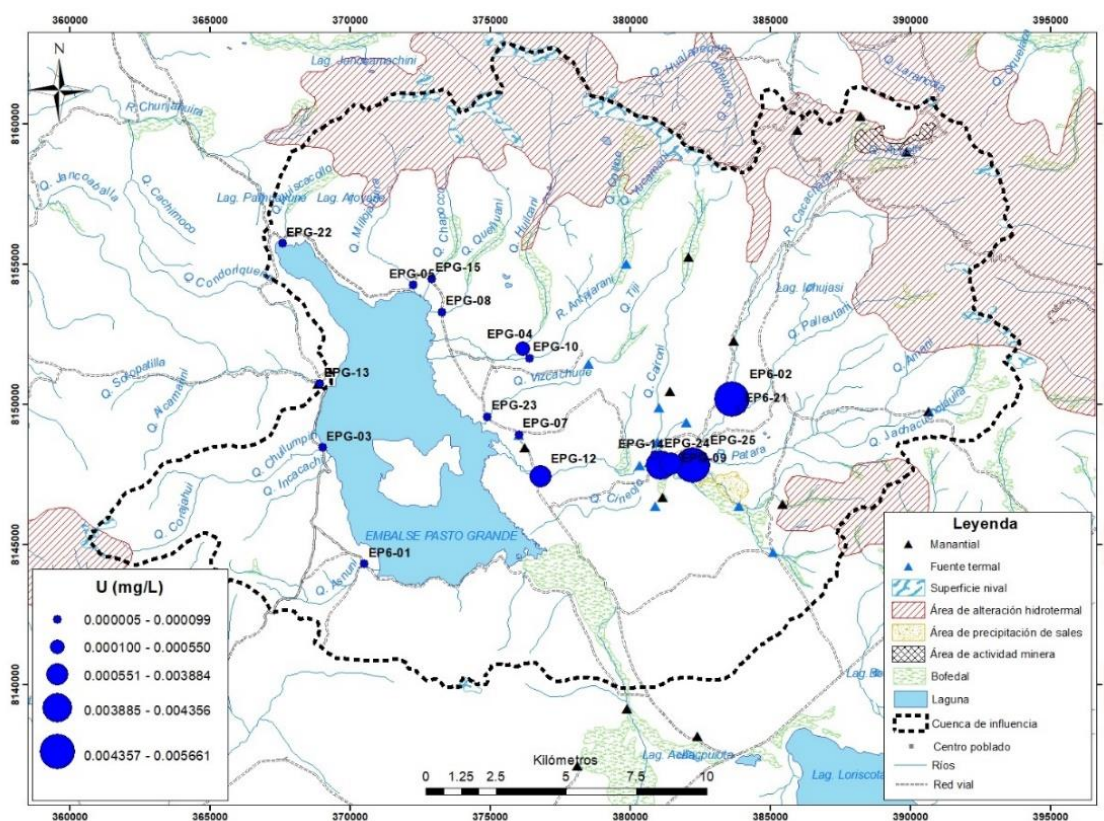


Figura 23. Concentraciones del U (mg/L), en afluentes al embalse

El conjunto de datos de U demuestra dispersión y dos valores extremos, en donde el valor mínimo ocurre en la muestra EPG-07 (manantial) y los valores máximos se dan en el río Cacachara (EPG-01) y afluente de fuentes termales del río Patara (EPG-25), estos dos últimos coinciden con los valores altos de Cd, Cr, Cu, Mn y Ni. Los ECA del U (0.02 mg/L) según (MINAM, 2017) indican que este elemento no sobrepasa los estándares en ninguno de los afluentes al embalse.

Zinc (Zn mg/L)

El Zinc tiene una concentración mínima de 0.013 mg/L, un máximo de 2.209 mg/L, una media de 0.55 mg/L (Tabla 7). Las concentraciones mínimas (0.0013-0.0602 mg/L) ocurrieron en las quebradas Asnuni, Queñuani, Chapocco, Vizcachuni, Caironi, Chullumpiri, Palleutani, confluencias quebradas Amani y Jachacuhojahuirá, manantial y agua embalsada. Las concentraciones moderadas (0.0603 – 1.7181 mg/L) se dieron en la quebrada Millojahuirá, Huilcani, fuente termal río Patara, confluencia ríos Cacachara y Patara, agua embalsada, represa Pasto Grande. Las concentraciones altas (1.7182 – 2.2080 mg/L) están en el afluente de fuentes termales del río Patara y ríos Patara principal y Cacachara (Figura 24).

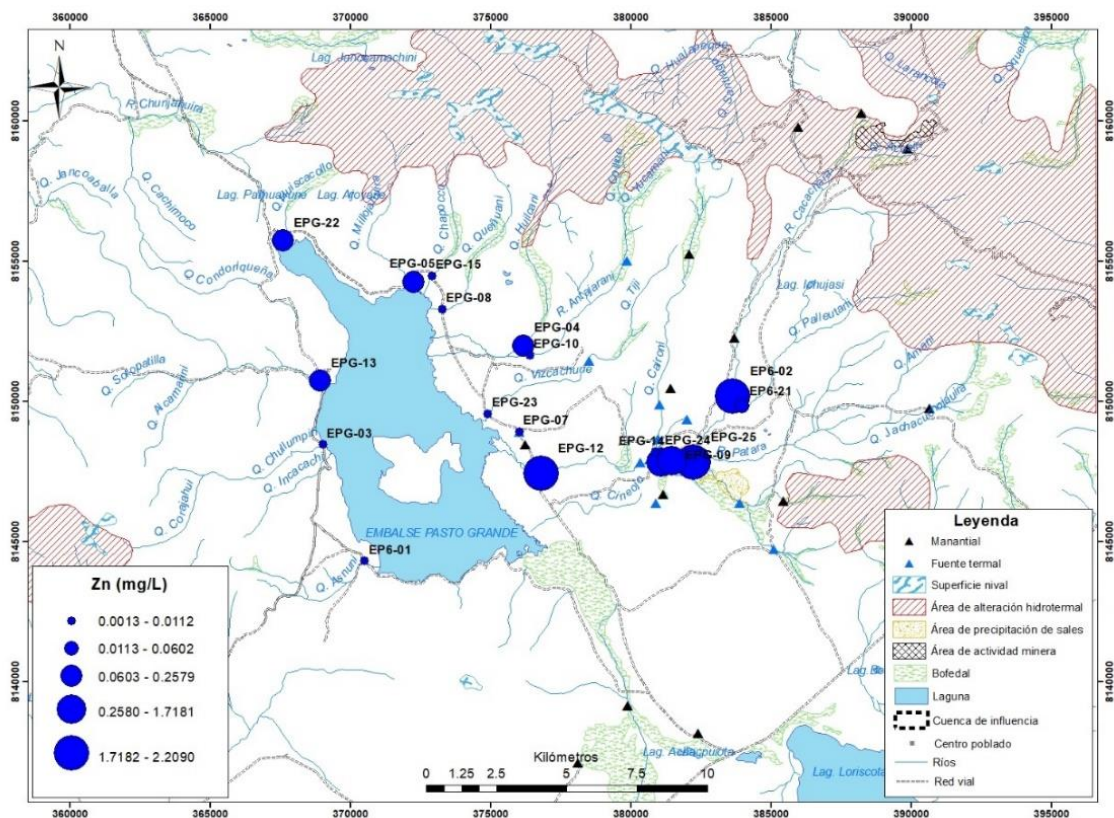


Figura 24. Concentraciones del Zn (mg/L), en afluentes al embalse

La concentración más baja se da en afluentes con pH neutros a alcalinos y las concentraciones moderadas a altas ocurren en pH ácidos (EPG-22, EPG-05, EPG-04). El Zn coincide con concentraciones altas de U, Ni, Mn, Cu, Cr, Cd, Be y B. Los ECA del Zn (3 - 5 mg/L) según (MINAM, 2017) indican que este elemento no sobrepasa los estándares en ninguno de los afluentes al embalse.

4.1.6. Correlación y ACP de elementos químicos en agua.

Existe correlación alta entre las siguientes variables recopiladas: Fe-Al (0.77321244), Mn-Ni (0.83539753), Al-Cr (0.8253723), Be-Cu (0.86987291), Be-Mn (0.87233477), Cr-Al (0.8253723), Cu-Pb (0.82650771), Ni-U (0.84135987), Ni-Zn (0.86338562), Al-Ni (0.9047436), As-B (0.98833092), As-Ba (0.99252808), As-Sb (0.99440413), B-Ba (0.98231153), B-Sb (0.99163292), Ba-Sb (0.97951428), Be-Cd (0.91569006), Be-Ni (0.92950454), Be-Pb (0.92841028), Be-U (0.90500937), Be-Zn (0.93373364), Cd-Cu (0.92238515), Cd-Mn (0.95095151), Cd-Ni (0.81776675), Cd-Pb (0.94491199), Cd-U (0.98854116), Cd-Zn (0.99259441), Cu-Cd (0.92238515), Cu-Mn (0.93575414), Cu-Ni (0.91588017), Cu-U (0.95095843), Cu-Zn (0.94224586), Mn-Pb (0.90682936), Mn-U (0.95505576), Mn-Zn (0.9714751), Pb-U (0.93421276), Pb-Zn (0.94067255), U-Zn (0.98381578), (Tabla 8).

Tabla 8
Matriz de correlación de Pearson, concentraciones en muestras de agua.

	Al_mg/L	As_mg/L	B_mg/L	Ba_mg/L	Be_mg/L
Al_mg/L	1	-0.13361434	-0.1096149	-0.16988548	0.77392962
As_mg/L	-0.1336143	1	0.98833092	0.99252808	-0.07335788
B_mg/L	-0.1096149	0.98833092	1	0.98231153	0.00238952
Ba_mg/L	-0.1698855	0.99252808	0.98231153	1	-0.11534132
Be_mg/L	0.7739296	-0.07335788	0.00238952	-0.11534132	1
Cd_mg/L	0.5659032	-0.04544757	0.02454045	-0.08669084	0.91569006
Cr_mg/L	0.8253723	-0.14909034	-0.1793225	-0.17854033	0.5203288
Cu_mg/L	0.7171522	-0.08516219	-0.0393939	-0.12207652	0.86987291
Fe_mg/L	0.7732124	0.00939315	-0.0238278	-0.00846821	0.22895092
Mn_mg/L	0.5915057	0.02895378	0.08928129	0.00609402	0.87233477
Ni_mg/L	0.9047436	-0.12350679	-0.0712714	-0.15791572	0.92950454
Pb_mg/L	0.5291999	-0.04544878	0.02461296	-0.08441899	0.92841028
Sb_mg/L	-0.1001696	0.99440413	0.99163292	0.97951428	-0.00904335
U_mg/L	0.6059116	-0.05409691	-0.0011276	-0.09650625	0.90500937
Zn_mg/L	0.6274977	-0.06849388	0.00313196	-0.10355443	0.93373364

	Cd_mg/L	Cr_mg/L	Cu_mg/L	Fe_mg/L	Mn_mg/L
Al_mg/L	0.56590319	0.8253723	0.71715217	0.77321244	0.59150574
As_mg/L	-0.0454476	-0.1490903	-0.0851622	0.00939315	0.02895378
B_mg/L	0.02454045	-0.1793225	-0.0393939	-0.02382781	0.08928129
Ba_mg/L	-0.0866908	-0.1785403	-0.1220765	-0.00846821	0.00609402
Be_mg/L	0.91569006	0.5203288	0.86987291	0.22895092	0.87233477
Cd_mg/L	1	0.4194208	0.92238515	0.01537363	0.95095151
Cr_mg/L	0.41942082	1	0.66368428	0.71477879	0.46738281
Cu_mg/L	0.92238515	0.6636843	1	0.25210162	0.93575414
Fe_mg/L	0.01537363	0.7147788	0.25210162	1	0.11396661
Mn_mg/L	0.95095151	0.4673828	0.93575414	0.11396661	1
Ni_mg/L	0.81776675	0.7310741	0.91588017	0.46724097	0.83539753
Pb_mg/L	0.94491199	0.3354487	0.82650771	-0.06503722	0.90682936
Sb_mg/L	0.01384535	-0.1412456	-0.0386154	0.0015648	0.07976233
U_mg/L	0.98854116	0.5107231	0.95095843	0.07367406	0.95505576
Zn_mg/L	0.99259441	0.4653346	0.94224586	0.09133263	0.9714751
	Ni_mg/L	Pb_mg/L	Sb_mg/L	U_mg/L	Zn_mg/L
Al_mg/L	0.9047436	0.5291999	-0.1001696	0.60591158	0.62749767
As_mg/L	-0.1235068	-0.04544878	0.99440413	-0.0540969	-0.06849388
B_mg/L	-0.0712714	0.02461296	0.99163292	-0.00112756	0.00313196
Ba_mg/L	-0.1579157	-0.08441899	0.97951428	-0.09650625	-0.10355443
Be_mg/L	0.92950454	0.92841028	-0.0090434	0.90500937	0.93373364
Cd_mg/L	0.81776675	0.94491199	0.01384535	0.98854116	0.99259441
Cr_mg/L	0.73107406	0.33544867	-0.1412456	0.51072305	0.46533459
Cu_mg/L	0.91588017	0.82650771	-0.0386154	0.95095843	0.94224586
Fe_mg/L	0.46724097	-0.06503722	0.0015648	0.07367406	0.09133263
Mn_mg/L	0.83539753	0.90682936	0.07976233	0.95505576	0.9714751
Ni_mg/L	1	0.78098243	-0.0740513	0.84135987	0.86338562
Pb_mg/L	0.78098243	1	0.01962691	0.93421276	0.94067255
Sb_mg/L	-0.0740513	0.01962691	1	-0.00089178	-0.01042905
U_mg/L	0.84135987	0.93421276	-0.0008918	1	0.98381578
Zn_mg/L	0.86338562	0.94067255	-0.010429	0.98381578	1

Según, Ávila *et al.* (2015) las variables, pueden ser analizadas por la correlación paramétrica bivariada de Pearson. Las altas correlaciones de la tabla 8, ayudan a proseguir en un análisis ACP. Razón por la cual es necesario realizar el Análisis de Componentes Principales (ACP).

De acuerdo a un análisis estadístico, se obtiene un primer componente (PC1) que aporta el 55.86%, un segundo componente (PC2) que aporta el 82.48% y un tercer componente (PC3) que aporta el 95.77%. Entonces la variación total de varianza

acumulada es 95.77%, lo que indica que es bueno, y a su vez este reduce las dimensiones en tres componentes principales de las 16 variables (Tabla 9).

Tabla 9
Proporción de varianza explicada por cada componente

Parámetros estadísticos	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
Desviación estándar	2.8946	1.9982	1.4121	0.56308	0.38689	0.2808	0.232	0.13476
Proporción de Varianza	0.5586	0.2662	0.1329	0.02114	0.00998	0.00526	0.00359	0.00121
Proporción acumulada	0.5586	0.8248	0.9577	0.97885	0.98882	0.99408	0.99767	0.99888
	PC9	PC10	PC11	PC12	PC13	PC14	PC15	
Desviación estándar	0.10554	0.05925	0.03201	0.02829	0.01696	0.006568	0.001685	
Proporción de Varianza	0.00074	0.00023	0.00007	0.00005	0.00002	0	0	
Proporción acumulada	0.99962	0.99986	0.99992	0.99998	1	1	1	

La explicación de la varianza por componente principal de acuerdo Sánchez *et al.*, (2010), en el cual, se explica la proporción relativa de la varianza total de cada eigenvector (vector propio), que está dada por la magnitud de cada eigenvalor, esto cumple en las muestras de agua.

El PC1, contiene a las variables: Be (0.33047597), Cd (0.32466269), Cu (0.33372246), Mn (0.32249951), Ni (0.33031259), Pb (0.30937628), U (0.33048684) y Zn (0.33301494), estos elementos químicos se relacionan mejor con los siguientes afluentes (individuos), quebrada Asnuni, río Cacachara, confluencias quebradas Amani y Jachacuchojahuir, quebrada Palleutani, quebrada Chullumpiri, manantial, quebrada Queñuani, fuente termal río Patara, río Antajarani, río Patara principal, represa Pasto Grande, quebrada Chapocco, agua embalsada, quebrada Vizcachuni, confluencias ríos Cacachara y Patara y afluente de fuentes termales río Patara. Para el PC2, contiene a las variables: As (-0.49221303), B (-0.49658462), Ba (-0.48770372) y Sb (-0.49535753), estos elementos químicos se relacionan mejor con el afluente (individuo) quebrada Caironi. Para el PC3, contiene a las variables: Al (-0.39795628), Cr (-0.44149452) y Fe (-0.65365485), estos elementos químicos se relacionan mejor con los siguientes afluentes (individuos), quebradas Huilcani y Millojahuir (Tabla 10 y Figura 25).

Tabla 10
Componentes principales, explicación por variables e individuos

Variable/individuo	CP1	CP2	CP3
Al_mg/L	0.27522016	0.04402369	-0.39795628
As_mg/L	-0.04526967	-0.49221303	-0.07859193
B_mg/L	-0.02617897	-0.49658462	-0.03654301
Ba_mg/L	-0.05889307	-0.48770372	-0.07411196
Be_mg/L	0.33047597	-0.03300378	0.0437831
Cd_mg/L	0.32466269	-0.05561027	0.20913264
Cr_mg/L	0.22720154	0.07411514	-0.44149452
Cu_mg/L	0.33372246	-0.01997451	0.01373584
Fe_mg/L	0.10386255	0.02484447	-0.65365485
Mn_mg/L	0.32249951	-0.08949163	0.13842157
Ni_mg/L	0.33031259	0.00872416	-0.14912533
Pb_mg/L	0.30937628	-0.05662174	0.25311277
Sb_mg/L	-0.02655909	-0.49535753	-0.0589474
U_mg/L	0.33048684	-0.0456451	0.15955979
Zn_mg/L	0.33301494	-0.04350372	0.161873
Quebrada Asnuni	-2.1541667	0.7983211	0.5226077
Río Cacachara	5.8001298	0.2328091	-0.522484
Confluencias quebradas Amani y Jachacuchojahuira	-2.1422068	0.5419067	0.522131
Quebrada Palleutani	-1.8324351	0.7172166	0.4994633
Quebrada Chullumpiri	-2.1559224	0.766295	0.5256326
Quebrada Huilcani	1.6008619	1.1009829	-4.0030587
Quebrada Millojahuira	0.0299896	1.0439045	-3.4264826
Manantial	-2.1657766	0.760945	0.5351965
Quebrada Queñuani	-2.1327632	0.7987354	0.3932891
Fuente termal río Patara	3.6443802	-0.9023526	0.9215506
Río Antajarani	-2.1508271	0.7706695	0.5255186
Río Patara principal	3.4982778	-0.5866746	1.4557475
Represa Pasto Grande	-1.1638829	0.4590131	0.55393
Quebrada Caironi	-2.5879306	-7.8711137	-0.912338
Quebrada Chapocco	-2.1319421	0.7592523	0.4028243
Agua embalsada	-1.1897583	0.5065118	0.4880704
Quebrada Vizcachuni	-1.7749674	0.8567601	-0.2160939
Confluencias ríos Cacachara y Patara	4.1518785	-0.8754955	0.8133149
Afluente de fuentes termales Río Patara	4.8570613	0.1223133	0.9211808

Las variables se redujeron en 3 componentes principales y su relación con los afluentes (individuos). El ACP reduce a un pequeño número de componentes las variables y estos reproducen la mayor parte de la variabilidad de los datos originales esto retiene la mayor parte de la información (Bald *et al.*, 1999). La figura 25, muestra indica las afinidades entre los elementos químicos (componentes principales) y afluentes al embalse Pasto Grande (individuos).

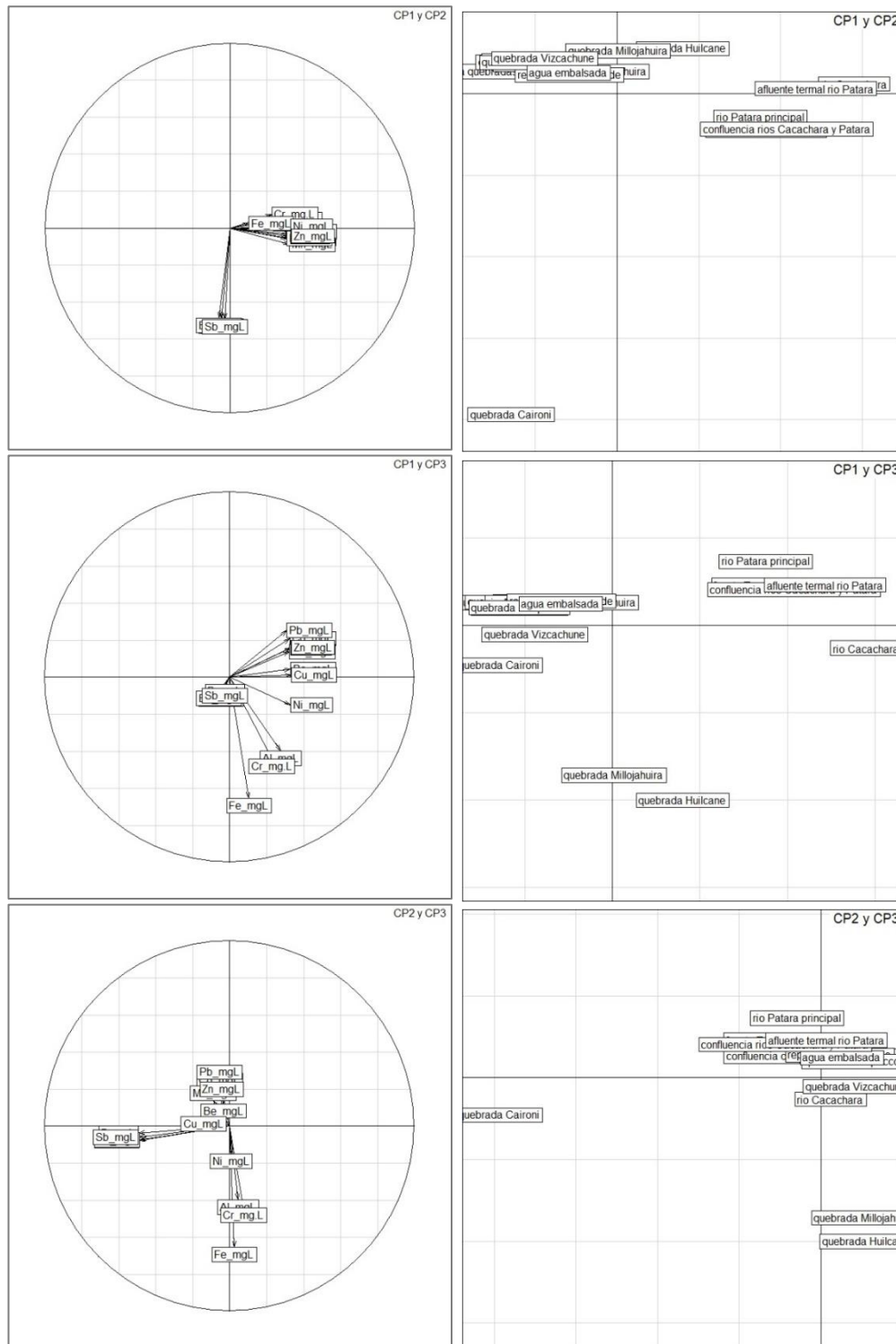


Figura 25. Gráfico circular y de individuos, muestras de agua de ACP.

El gráfico bidimensional pareado de 3 componentes, según Murte (2013) es una herramienta de visualización del ACP, el cual se origina a partir de gráficas tridimensionales o bidimensionales en las que se conjugan muestreos y variables.

4.1.7. Concentración de elementos químicos en sedimentos.

Los límites de detección por elemento químico y el método de análisis químico utilizado por el equipo, indican que el Hg está en el intervalo de 0.01 – 10000 ppm, el As esta 2 – 10000 ppm, el Pb 2 – 10000 ppm, el Cd esta entre 0.5 – 1000 ppm, Cr tiene un intervalo 1 – 10000 ppm y Sb esta entre los 2 – 10000 ppm (Tabla 11).

Tabla 11
Límites de detección en muestras de sedimentos

Variables	Límite inferior	Límite superior
Ag_ppm	0.2	100ppm
As_ppm	2	10000ppm
Sb_ppm	2	10000ppm
Hg_CV_ppm*	0.01	10000ppm
Pb_ppm	2	10000ppm
Zn_ppm	2	10000ppm
Mo_ppm	1	10000ppm
Al_%	0.01	25%
B_ppm	10	10000ppm
Ba_ppm	10	10000ppm
Be_ppm	0.5	1000ppm
Bi_ppm	2	10000ppm
Ca_%	0.01	25%
Cd_ppm	0.5	1000ppm
Co_ppm	1	10000ppm
Cr_ppm	1	10000ppm
Cu_ppm	1	10000ppm
Fe_%	0.01	50%
Ga_ppm	10	10000ppm
K_%	0.01	10%
La_ppm	10	10000ppm
Mg_%	0.01	25%
Mn_ppm	5	50000ppm
Na_%	0.01	10%
Ni_ppm	1	10000ppm
P_ppm	10	1%
S_%	0.01	10%
Sc_ppm	1	10000ppm
Sr_ppm	1	10000ppm
Ti_%	0.01	10%
V_ppm	1	10000ppm

**Para obtener las concentraciones de Hg se combinó ICP AES con método de vapor frío (CV-AES).*

Para el tratamiento estadístico, se eliminaron el W, U y Th, por contener entre 70%-100% de datos por debajo del límite de detección, esto se hizo de acuerdo a Quintanilla (2017).

El U tiene concentraciones de 10 ppm en la quebrada Queñuani, río Patara y río Cacachara. El Th, tiene concentraciones de 10 ppm en la quebrada Vizcachuni y río Cacachara (Tabla 12).

Tabla 12
Estadística descriptiva de las muestras de sedimentos de quebrada

Variables	Total	Mínimo	Máximo	Suma	Media	Desviación estándar
Al_%	16	0.74	4.08	27.54	1.72	0.797
As_ppm	16	10	9898	31294	1955.88	3773.297
B_ppm	16	5	132	467	29.19	41.043
Ba_ppm	16	60	832	5652	353.25	231.726
Be_ppm	16	0.25	3.4	13.9	0.87	0.788
Cd_ppm	16	0.25	5.2	21.1	1.32	1.437
Cr_ppm	16	16	62	557	34.81	14.698
Cu_ppm	16	19	128	895	55.94	24.015
Fe_%	16	0	10.65	68.67	4.29	2.683
Hg_CV_ppm	16	0.16	1280	2472.05	154.50	316.230
Mn_ppm	16	49	8110	25980	1623.75	2007.253
Mo_ppm	16	1	14	52	3.25	3.173
Ni_ppm	16	3	41	279	17.44	9.906
Pb_ppm	16	16	681	1645	102.81	196.247
Sb_ppm	16	1	46	205	12.81	18.027
V_ppm	16	37	134	1342	83.88	24.268
U_ppm	16	-10	10	-10	-10	-10
Zn_ppm	16	27	782	3444	215.25	238.871

En comparación con los estudios que hicieron Ávila *et al.*, (2014) en el lago Maracaibo, hay una alta variabilidad de metales, los cuales están influenciados por el tipo de roca, con las siguientes concentraciones: Cd (0.46 ppm), Cr (14.53 ppm), V (24.14 ppm), Ni (53,06) y Pb (34,57 ppm).

4.1.8. Distribución espacial de elementos químicos en sedimentos

Los elementos químicos comparados en sedimentos, son: As, Cd, Cu, Cr, Pb, Hg y Zn, esto según la (*Canadian Council of Ministers of the Environment*, 2004). En donde, ISQG es la Guía Provisional de Calidad del Sedimento (Guías de Calidad Ambiental Canadiense) y PEL es el Nivel de Efecto Probable (Guías de Calidad Ambiental Canadiense). Para comparar las concentraciones de sedimentos y agua con los estándares internacionales ISQG y PEL de Canadá se convirtieron las unidades de mg.kg^{-1} dw (peso seco) en equivalencia a ppm.

Aluminio (Al %)

El Aluminio tiene una concentración media de 1.72 %, un mínimo de 0.74 % y un máximo de 4.08 % (Tabla 12). Las concentraciones mínimas (0.74 – 1.28 %) se ubican en las quebradas Millojahaira, Chapocco, Queñuani, Vizcachuni, confluencia ríos Cacachara y Patara y confluencias quebradas Amani y Jachacuchajahuira. Las concentraciones moderadas (1.29 – 2.56 %) están en las quebradas Caironi, Huilcani, Chullumpiri, Palleutani, Asnuni, ríos Cacachara y Antajarani y río Patara principal. Las concentraciones altas (2.57 – 4.08 %) solamente ocurre en el afluente de fuentes termales del río Patara (Figura 26).

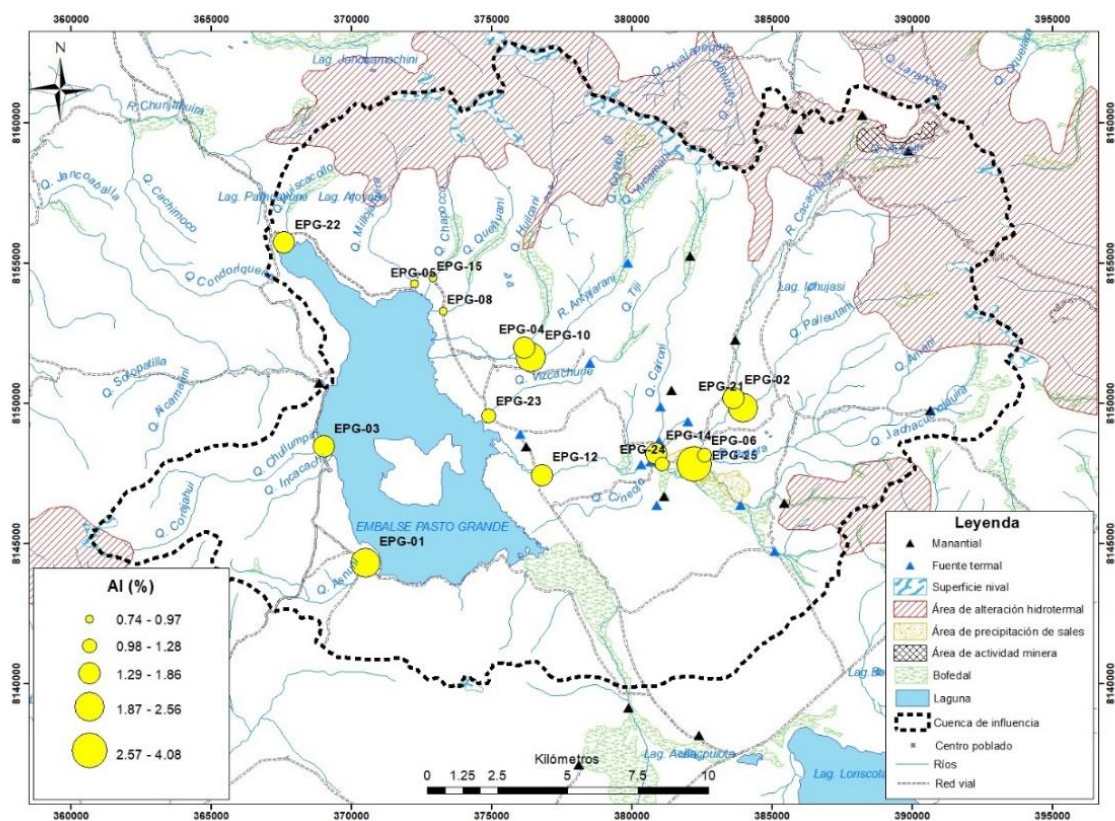


Figura 26. Concentraciones del Al (%), en afluentes al embalse

Los dos valores altos en la cuenca indican transporte de Al a partir de minerales de plagioclasas y arcillas (EPG-25 y EPG-21). Los valores bajos de Al se encuentran en algunos afluentes con pH ácido. Este elemento coincide con las concentraciones altas de As, Sb, Pb, Zn, Be, Cd y Cu. Según Tun-Canto *et al.* (2017), el aluminio (10 mg/L) y hierro (11 mg/L) están por encima de los límites permisibles (Río Hondo - México).

Antimonio (Sb ppm)

El Antimonio tiene una concentración media de 12.81 ppm, un mínimo de 1 ppm y un máximo de 46 ppm (Tabla 12). Los valores mínimos (1 – 4 mg/L) se ubican en las quebradas Millojahuiria, Queñuani, Chapocco, Vizcachuni, Huilcani, Asnuni, Chullumpiri, agua embalsada y río Antajarani. Las concentraciones moderadas (4.01 - 40 mg/L) ocurren en la quebrada Caironi, confluencias quebradas Amani y Jachacuchojahuiria, confluencia ríos Cacachara y Patara y río Cacachara. Las concentraciones altas (40.01 – 48.0 mg/L) se dan en el afluente de fuentes termales del río Patara y río Patara principal (Figuras 27).

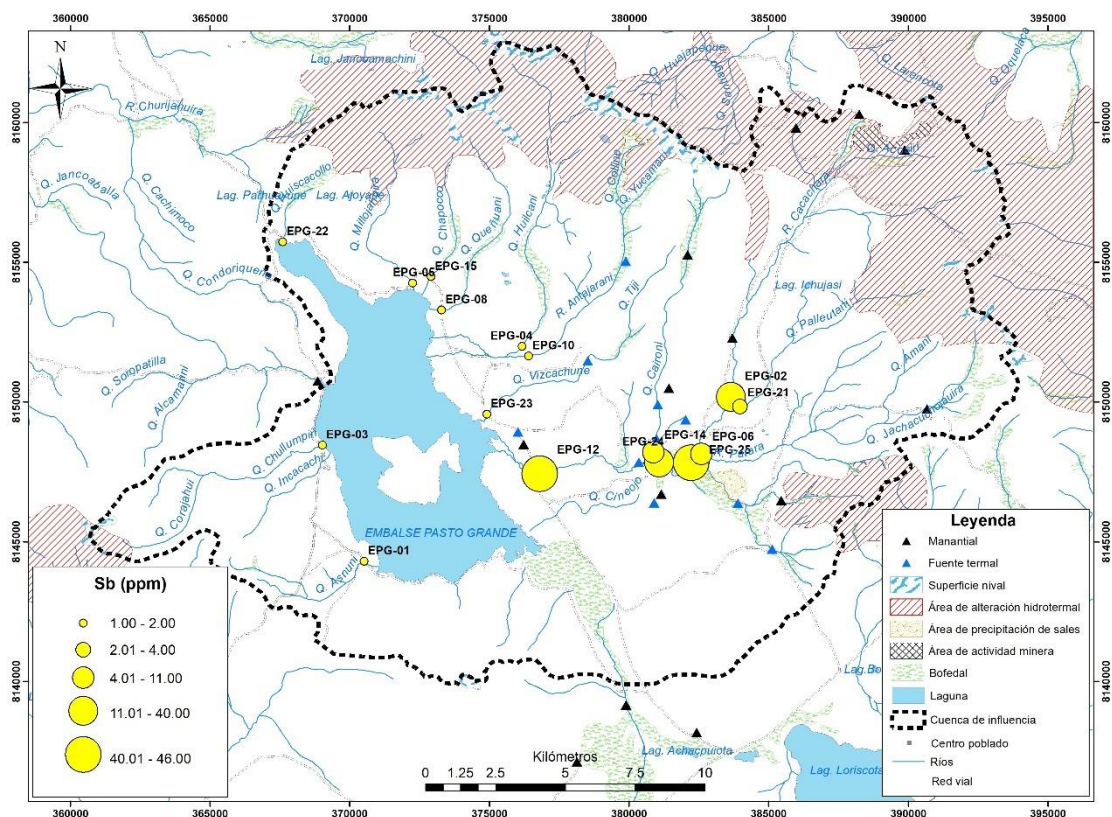


Figura 27. Concentraciones del Sb (ppm), en afluentes al embalse

Las concentraciones moderadas a altas (EPG-12, EPG-25, EPG-02) de Sb, indican aporte principal de las fuentes termales y afloramientos alterados. El Sb presente en sedimentos, ocurre por la mezcla de aguas calientes y frías. Los valores bajos de Sb se encuentran en afluentes con pH ácido hasta neutro. Este elemento coincide con las concentraciones altas de As, B, Ba, Pb, Zn, Be, Cd y Cu. Según Rivera & Chira (2008), en ambiente volcánico (grupo Calipuy, similar a la zona de estudio) el Sb presenta concentraciones anómalas de 2.31 ppm.

Arsénico (As ppm)

El Arsénico tiene una concentración media de 1955.88 ppm, un mínimo de 10 ppm y un máximo de 9898 ppm (Tabla 12). Los valores mínimos (10 – 88 ppm) se ubican en las quebradas Millojuhira, Chapocco, Queñuani, Huilcani, Chullumpiri, Asnuni, Palleutani, Vizcachuni y río Antajarani. Los valores moderados (88.01 – 1620 ppm) corresponden a la quebrada Caironi, confluencias quebradas Amani y Jachacuchajuhira y río Cacachara. Los valores altos (1620.01 – 9898 ppm) corresponde a el afluyente de fuentes termales del río Patara, confluencia río Cacachara y Patara y río Patara principal (Figura 28).

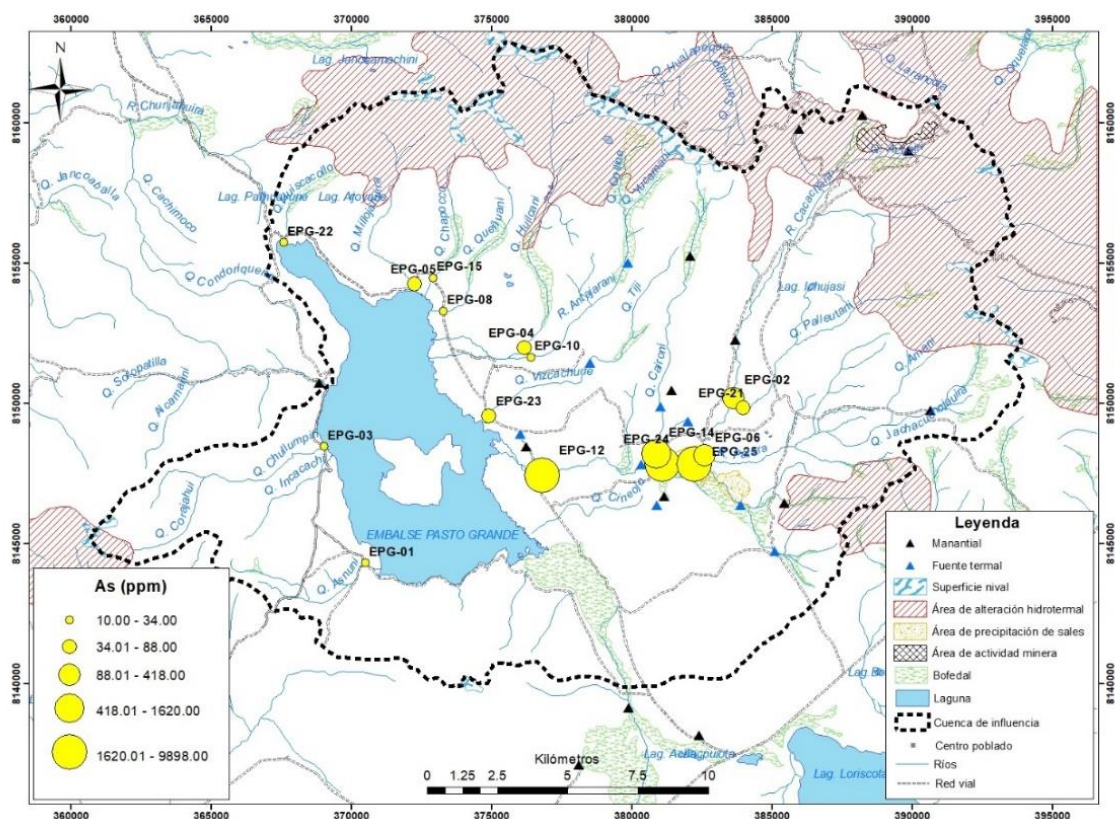


Figura 28. Concentraciones del As (ppm), en afluentes al embalse

Los valores moderados a altos (EPG-12, EPG-25, EPG-24) de As, indican que este elemento proviene de aportes de fuentes termales y precipita en el lecho del río por la mezcla de aguas calientes y frías. Algunos de los valores bajos tienen relación con afloramientos de rocas alteradas con diseminaciones de arsenopirita están en proceso de oxidación; este elemento coincide con las concentraciones altas de Sb, B, Be, Cd, Pb, Zn, Al y Cu. Según la norma internacional canadiense para aguas frescas ISQG y PEL, 6 afluentes exceden los estándares internacionales (tabla 20).

Boro (B ppm)

El Boro tiene una concentración media de 29.19 ppm, un mínimo de 5 ppm y un máximo de 132 ppm (Tabla 12). Los valores mínimos (5 – 10 ppm) se ubican en las quebradas Millojuhira, Queñuani, Chapocco, Vizcachuni, Huilcani, Asnuni, Chumpiri, agua embalsada y río Antajarani. Los valores moderados (30.01 – 70 ppm) corresponden al río Cacachara, confluencia de las quebradas Amani y Jachacuchojuhira y quebrada Caironi. Las concentraciones altas (70.01 – 132 ppm) confluencia ríos Cacachara y Patara y río Patara principal (Figura 29).

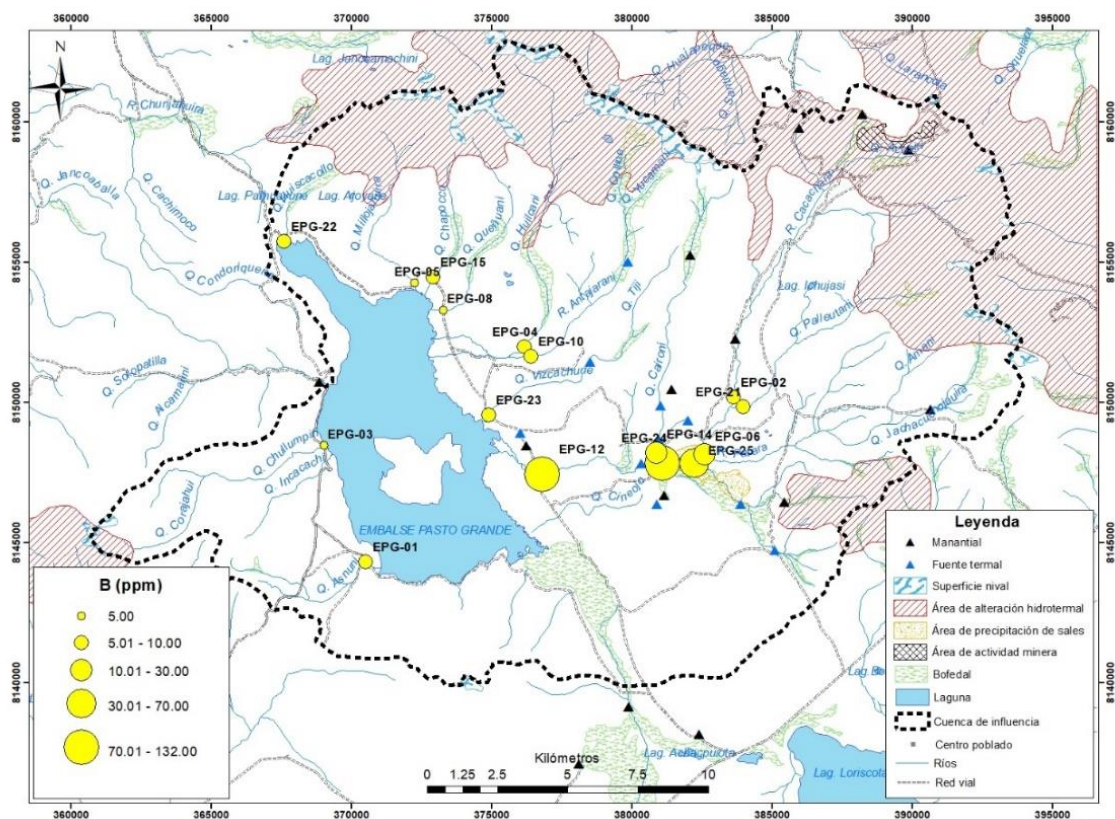


Figura 29. Concentraciones del B (ppm), en afluentes al embalse

Los valores moderados a altos (EPG-12, EPG-24 y EPG-25) de B, indican correlación con fuentes termales de la microcuenca del río Patara. Los valores bajos ocurren en afluentes con pH ácido, provenientes de rocas con alteración hidrotermal, a su vez se observa en los afluentes precipitados de color blanco a manera de costras. Este elemento coincide con las concentraciones altas de As, Sb y Ba. En relación a la zona de estudio Cruz *et al.*, (2014), indica que el B en las aguas geotermales de la zona de Crucero oscila entre 44 a 131 mg/L, estos precipitan en el lecho de río.

Bario (Ba ppm)

El Bario tiene una concentración media de 353.25 ppm, un mínimo de 60 ppm y un máximo de 832 ppm (Tabla 12). Las concentraciones mínimas (60 – 220 ppm) se ubican en las aguas embalsadas, quebradas Millojahuira, Queñuani, Palleutani, Chullumpiri, Vizcachuni y río Antajarani. Los valores moderados (220.01 – 540 ppm) corresponden a las quebradas Caironi, Asnuni, Chapocco, Huilcani, confluencias quebradas Amani y Jachacuhajahuira, río Cacachara, afluente de fuentes termales del río Patara. Las concentraciones altas (540.01 – 832 ppm) se dan en confluencia ríos Cacachara y Patara, y río Patara principal (Figura 30).

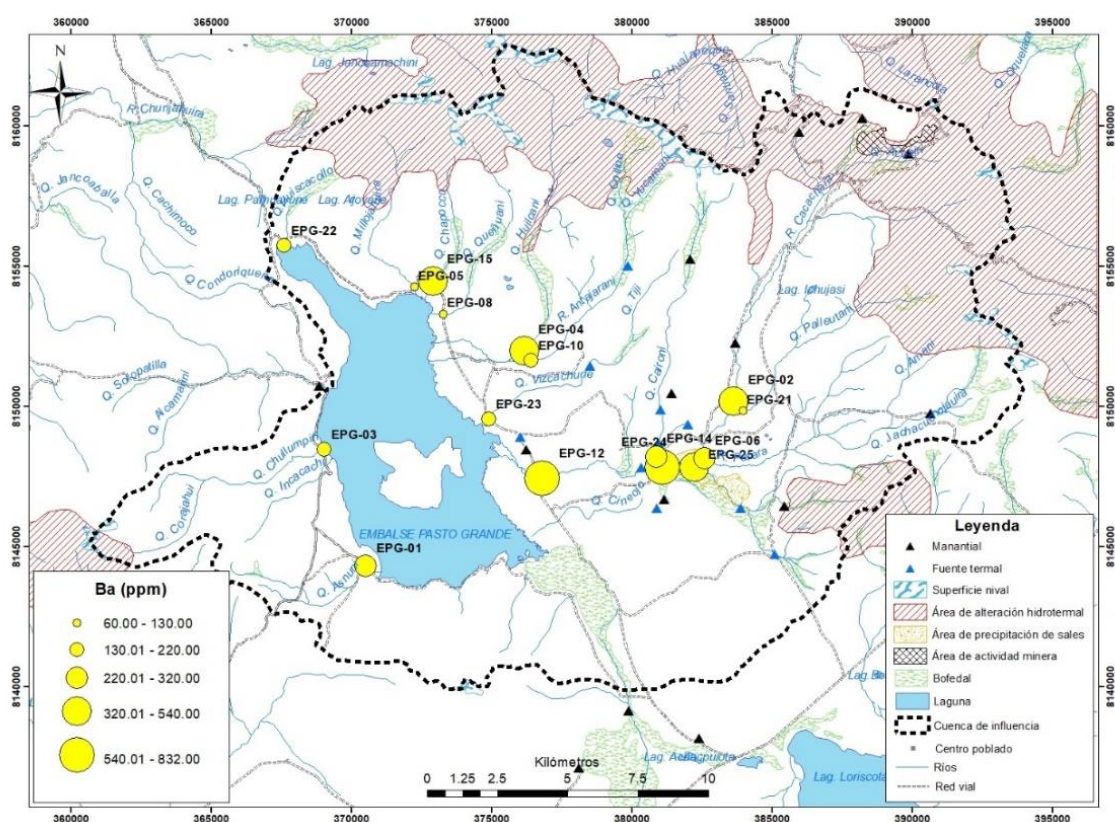


Figura 30. Concentraciones del Ba (ppm), en afluentes al embalse

Los valores moderados a altos (EPG-12, EPG-25, EPG-15, EPG-02) de Ba, indican que provienen de afloramientos con alteración hidrotermal; los parámetros fisicoquímicos como TDS y conductividad en estos afluentes son altos. Las concentraciones bajas de Ba ocurren en afluentes con pH ácido (EPG-05 y EPG-21). Según Vargas *et al.*, (2017), el Ba en sedimentos está vinculado a la actividad hidrotermal e intrusiva, el cual se asocia a mineralizaciones de Cu, Ag, Pb y Zn.

Berilio (Be ppm)

El Berilio tiene una concentración media de 0.87 ppm, un mínimo de 0.25 ppm y un máximo de 3.4 ppm (Tabla 12). Las concentraciones mínimas (0.25 – 0.60 ppm) se ubican en las aguas embalsadas, quebradas Millojuaira, Chapocco, Queñuani, Huilcani, Chullumpiri, Vizcachuni y río Cacachara. Los valores moderados (0.81 – 1.60 ppm) corresponde a las quebradas Asnuni, Caironi, Palleutani, confluencia de las quebradas Amani y Jachacuhajhuira, ríos Patara principal y Antajarani. Las concentraciones altas (16.1 – 3.40 ppm) ocurren en el afluente de fuentes termales del río Patara (Figuras 31).

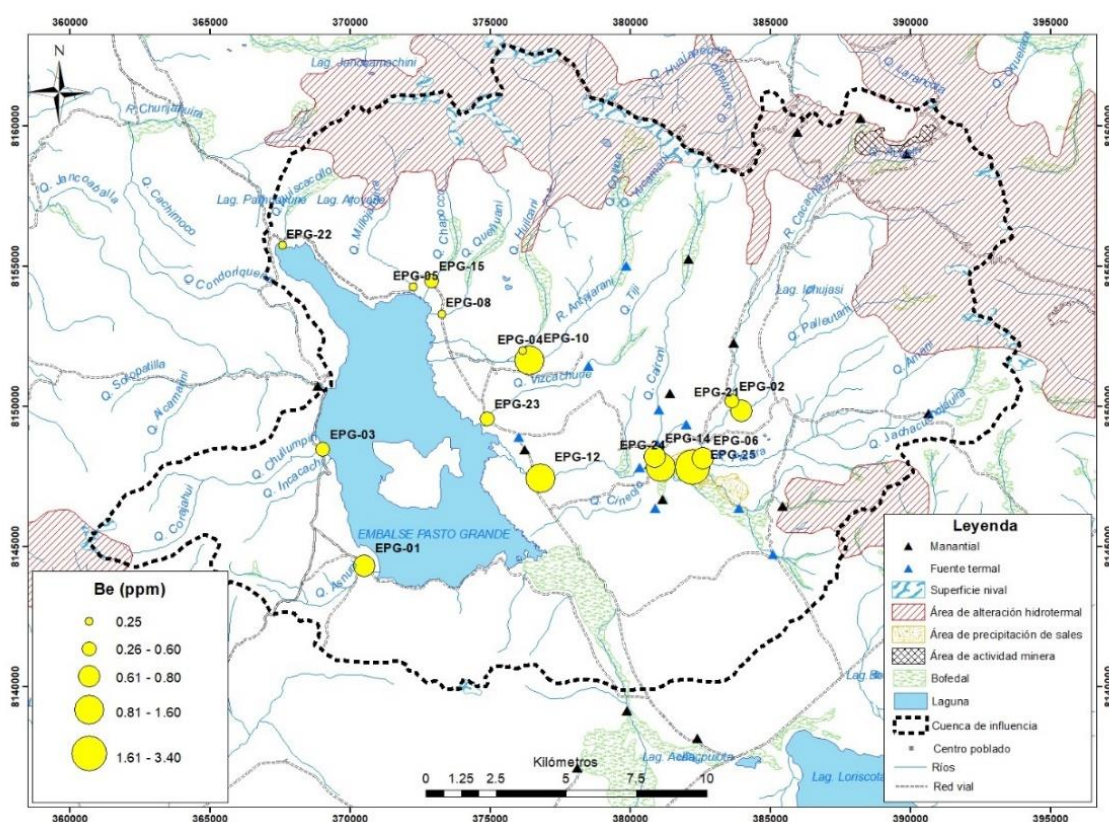


Figura 31. Concentraciones del Be (ppm), en afluentes al embalse

Los valores de Be, moderados a altos (EPG-25, EPG-12, EPG-24) indican que se correlacionan espacialmente con las fuentes termales del río Patara. El Be con altas concentraciones en los demás puntos de muestreo, coinciden con el As, Sb, Pb, Zn, Al y Cu, este elemento químico normalmente se encuentra como mineral en rocas volcánicas sin alteración. Según Mar & Hern (2011), el Be tiene valores que van de 0.87 a 1.37 ppm, esto indica que el río Tlaxcala contiene concentraciones muy bajas en sus sedimentos.

Cadmio (Cd ppm)

El Cadmio tiene una concentración media de 1.32 ppm, un mínimo de 0.25 ppm y un máximo de 5.2 ppm (Tabla 12). Los valores mínimos (0.25 – 0.90 ppm) se ubican en las aguas embalsadas; quebradas Chapocco, Huilcani, Chullumpiri, Asnuni, Palleutani, Vizcachuni, Caironi, confluencias quebradas Amani y Jachacuchajhuira y río Antajarani. Los valores moderados (0.91 – 3.20 ppm) corresponden a las quebradas Millojahuira, Queñuani, ríos Patara y Cacachara. La concentración alta (3.21 – 5.20 ppm) procede del afluente de fuentes termales del río Patara (Figura32).

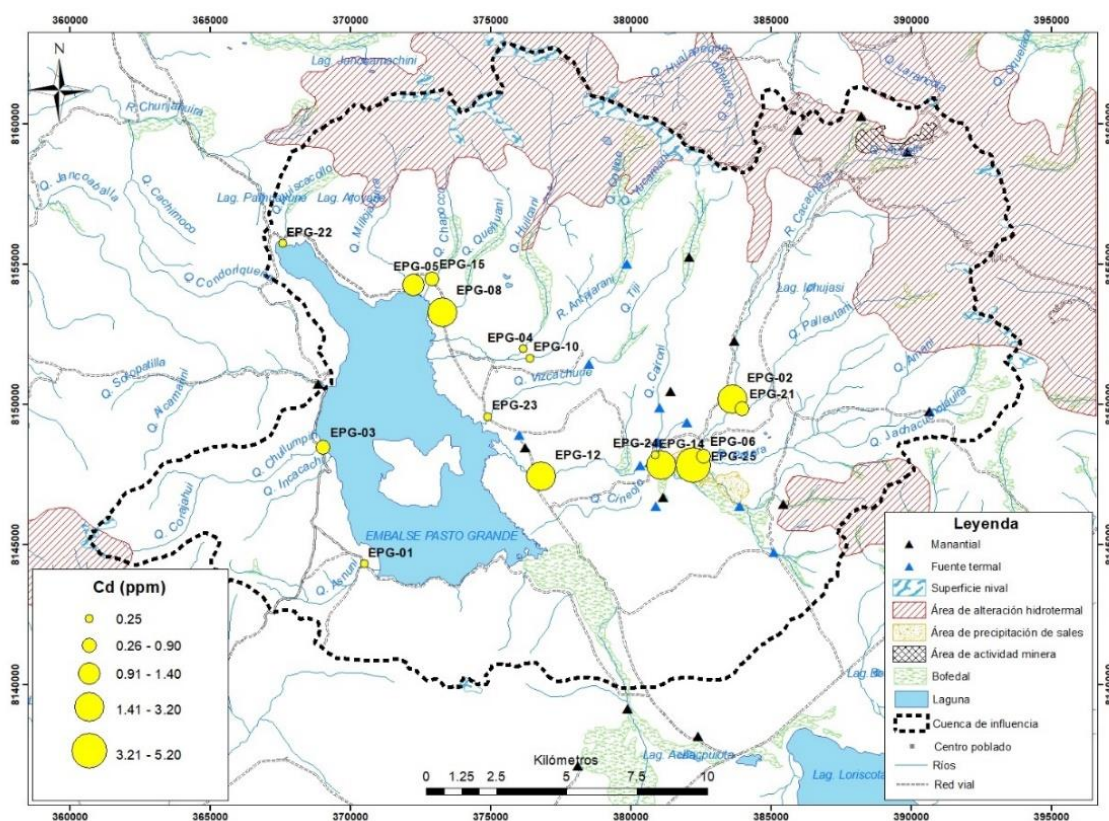


Figura 32. Concentraciones del Cd (ppm), en afluentes al embalse

El conjunto de datos de Cd indica dispersión con un valor extremo; las concentraciones altas (EPG-25, EPG-12, EPG-02) que tiene este elemento provienen de afloramientos rocosos con alteración hidrotermal, y estas coinciden con altas concentraciones de Be, Al, Zn, Pb, Sb y As. Los valores bajos de Cd (EPG-04 y EPG-14) se presentan en afluentes con pH ácido y precipita como parte de minerales secundarios. En aguas frescas, el Cd sobrepasa el ISQG en 7 afluentes y 1 sobrepasa el PEL, el valor más alto pertenece al afluente de fuentes termales del río Patara, (tabla 20).

Cromo (Cr ppm)

El Cromo tiene una concentración una media de 34.81 ppm, un mínimo de 16 ppm y un máximo de 62 ppm (Tabla 12). Las concentraciones mínimas (16 – 29 ppm) se ubican en las quebradas Millojahuiria, Queñuani, Chapocco, Vizcachuni, Caironi, Palleutani y agua embalsada. Las concentraciones moderadas (29.01 – 41 ppm) ocurren en la confluencia de los ríos Cacachara y Patara, confluencias quebradas Amani y Jachacuchajhuira, afluyente de fuentes termales del río Patara, río Patara principal y quebrada Asnuni. Las concentraciones (altas 41.01 -62 ppm) se dan en la quebradas Chullumpiri, Huilcani y río Cacachara (Figura 33).

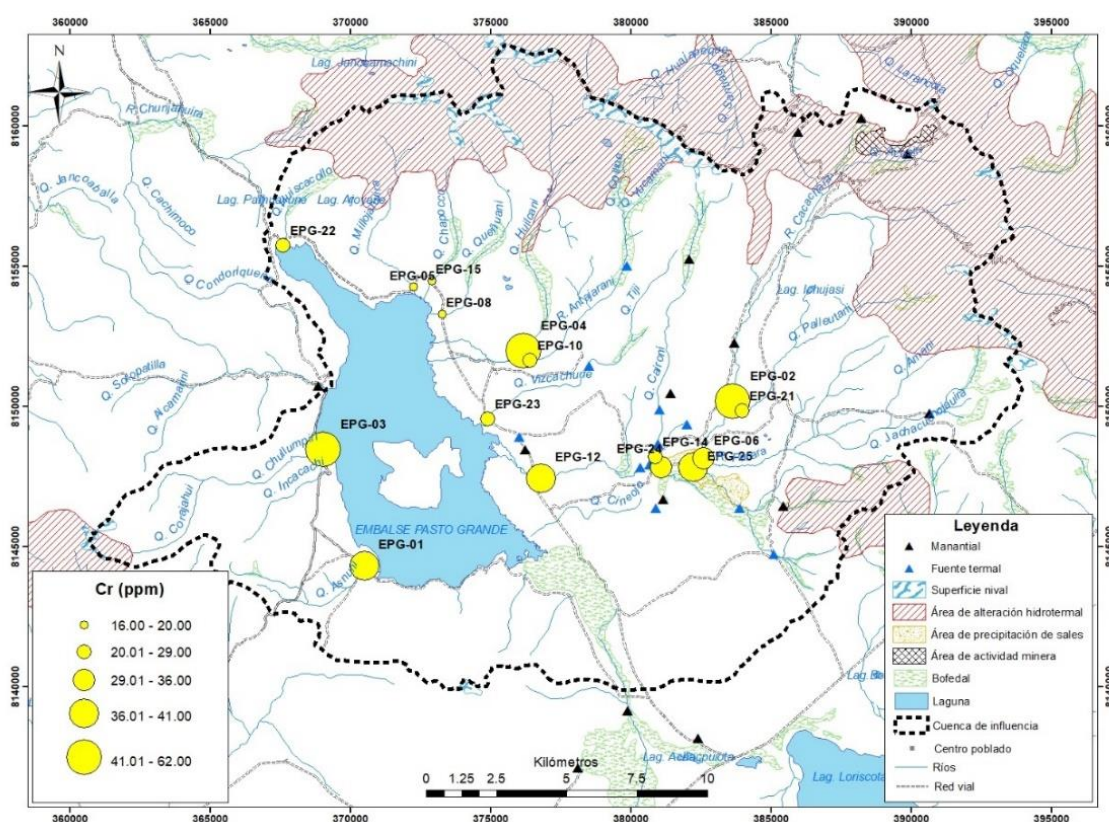


Figura 33. Concentraciones del Cr (ppm), en afluentes al embalse

El conjunto de datos de Cr, indica moderada dispersión con 2 valores extremos (EPG-02 y EPG-04) que están relacionados a afluentes con pH principalmente ácidos, a su vez estas también coinciden con concentraciones altas de Hg, Pb, Zn, Mo y Cr (este último en muestras de agua). Algo que resaltar es la ocurrencia de Cr en los afluentes Chullumpiri y Asnuni (EPG-03 y EPG-01) que provienen de sectores que no tienen afloramientos con alteración hidrotermal. En aguas frescas el Cr sobrepasa el ISQG en 6 afluentes y ninguno sobrepasa el PEL, (tabla 20).

Cobre (Cu ppm)

El Cobre tiene una concentración una media de 55.94 ppm, un mínimo de 19 ppm y un máximo de 128 ppm (Tabla 12). Las concentraciones mínimas (15 – 19 ppm) se ubican en las quebradas Millojahaira, Vizcachuni, Palleutani, Chapocco y aguas embalsadas. Las concentraciones moderadas (42.01 – 72 ppm) ocurren en las quebradas Caironi, Queñuani, Chullumpiri, Huilcani, confluencias quebradas Amani y Jachacuchajaira, ríos Antajarani, Cacachara y río Patara principal. Las concentraciones altas (72.01 – 128 ppm) suceden en la quebrada Asnuni y afluente de fuentes termales del río Patara (Figura 34).

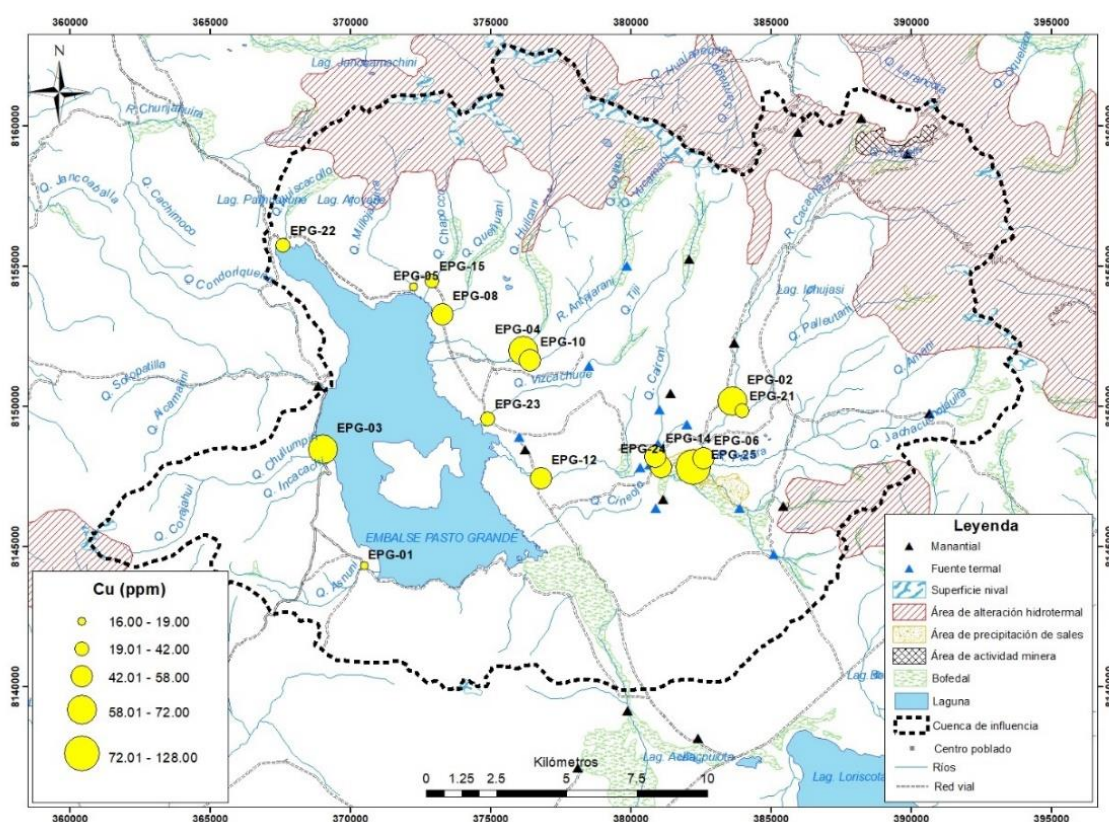


Figura 34. Concentraciones del Cu (ppm), en afluentes al embalse

Los valores de las concentraciones de Cu indican dispersión de datos con un valor extremo (EPG-25) el cual junto a valores altos están relacionadas a fuentes hidrotermales y afloramientos rocosos con alteración hidrotermal. El Cu proviene de la oxidación de diseminaciones de calcopirita (EPG-04 y EPG-02) que ocurre en afloramientos alterados; las concentraciones altas de Cu coinciden con las del Cd, Be, Al, Zn, Pb, Hg, Sb y As. Según los ECA internacionales de aguas frescas, el Cu sobrepasa el ISQG en 14 afluentes y ninguno sobrepasa el PEL, (tabla 20).

Hierro (Fe %)

El Hierro tiene una concentración una media de 4.29 %, un mínimo de 2.26 % y un máximo de 10.65 % (Tabla 12). Las concentraciones mínimas (2.26 – 3.59 %) se ubican en las quebradas Millojahaira, Vizcachuni, Queñuani, Palleutani, Chullumpiri, agua embalsada, confluencias quebradas Amani y Jachacuchajhuira. Las concentraciones moderadas (3.60 – 7.94 %) ocurren en los ríos Antajarani, Cacachara, Patara principal; quebradas Asnuni, Caironi, Huilcani, afluyente termal del río Patara y confluencia ríos Cacachara y Patara. La concentración más alta (7.95 – 10 %) se da en la quebrada Chapocco (Figura 35).

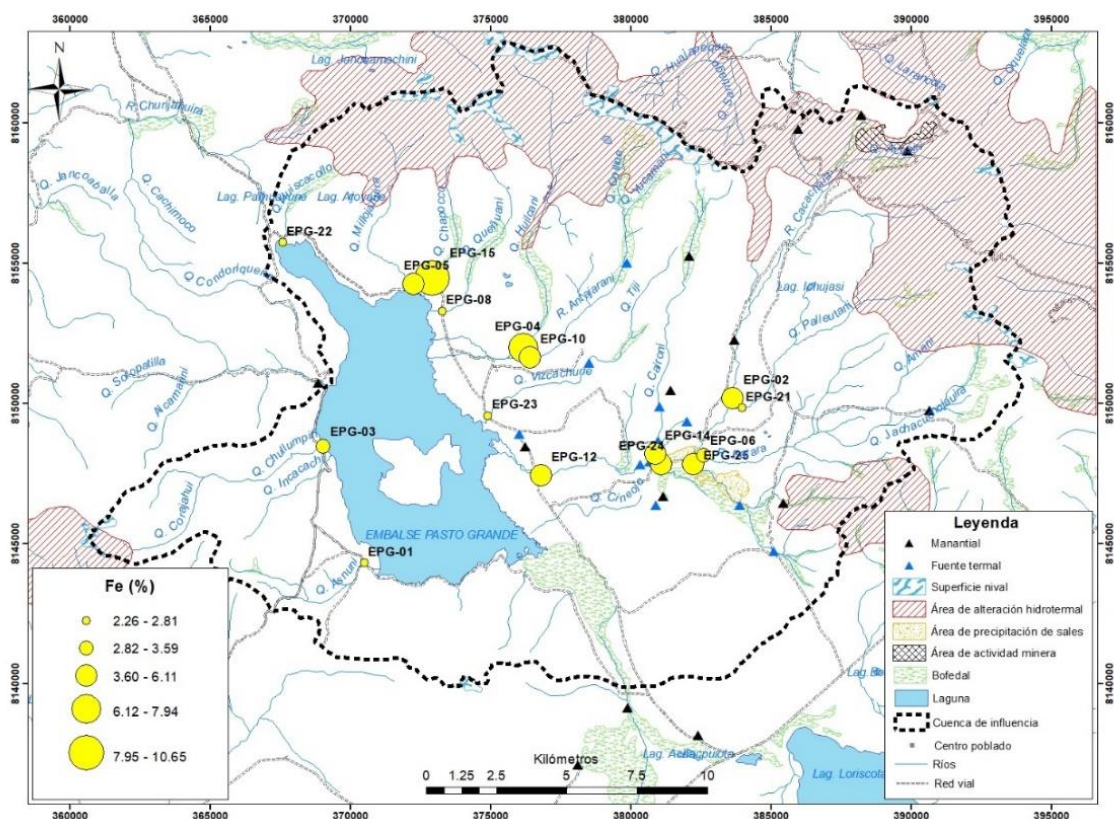


Figura 35. Concentraciones del Fe (%), en afluentes al embalse

El valor más alto de Fe (EPG-15), ocurre en un lecho de quebrada que corta un bofedal, el cual muestra coloraciones rojizas producto del DAR; en este punto los valores de turbidez y la temperatura son altos. En el punto de muestreo EPG-04 el contenido de Fe tiene relación directa con pH ácido. De acuerdo a Rivera & Chira (2008), en un sector similar a la zona de estudio el Fe tiene alta dispersión con concentraciones que llegan hasta el 3.8 %.

Manganeso (Mn ppm)

El Manganeso tiene una concentración media de 1623.75 ppm, un mínimo de 49 ppm y un máximo de 8110 ppm (Tabla 12). Las concentraciones mínimas (49 – 549 ppm) se ubican en las quebradas Millojahuiria, Queñuani, Huilcani, Chullumpiri, Asnuni, Palleutani, Vizcachuni, río Cacachara, afluyente de fuentes termales del río Patara. Las concentraciones moderadas (849.01 – 3840 ppm) ocurren en las quebradas Caironi, Chapocco, confluencia de los ríos Cacachara y Patara, ríos Patara principal, Antajarani y confluencia de las quebradas Amani y Jachacuchajhuira. Las concentraciones altas (3840.01 – 8110 ppm) ocurre solo en la quebrada Chapocco (Figura 36).

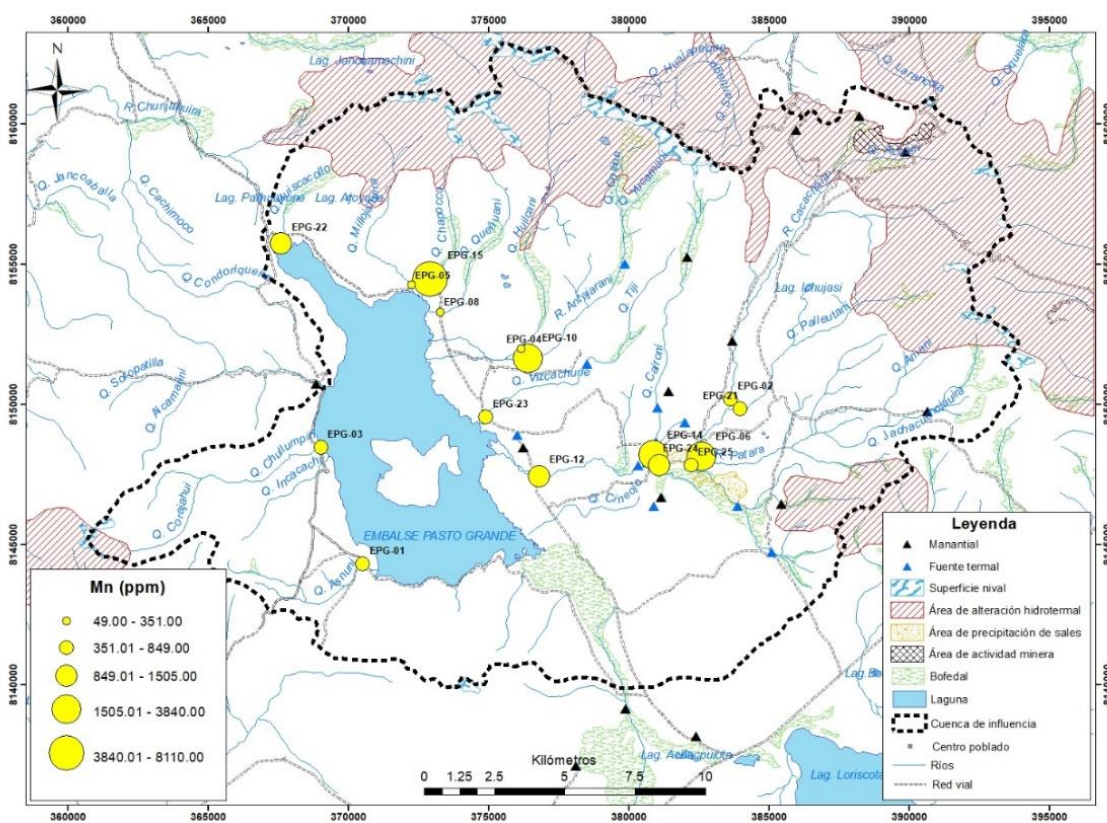


Figura 36. Concentraciones del Mn (ppm), en afluentes al embalse

El Mn tiene un valor extremo (EPG-15), el cual está en un lecho de quebrada que corta un bofedal; en este punto los valores de turbidez y la temperatura son altos al igual que los valores de Fe. Las concentraciones altas de Mn coinciden con el Fe, de acuerdo a Ávila *et al.* (2014) estos metales forman complejos metal-materia orgánica.

Mercurio (Hg ppm).

El Mercurio tiene una concentración media de 154.50 ppm, un mínimo de 0.16 ppm y un máximo de 1280 ppm (Tabla 12). Los valores mínimos (0.16 – 50 ppm) se ubican en las quebradas Palleutani, Chullumpiri, Asnuni, Chapocco, Millojahuira, Vizcachuni, Queñuani, ríos Cacachara, Antajarani y aguas embalsadas. Las concentraciones moderadas (50.01 – 400 ppm) ocurren en la confluencia ríos Cacachara y Patara, confluencias quebradas Amani y Jachacuchajahuira, quebrada Caironi y afluente de fuentes termales del río Patara. Las concentraciones altas (400.01 – 1280 ppm) solamente se dan en la quebrada Huilcani (Figura 37).

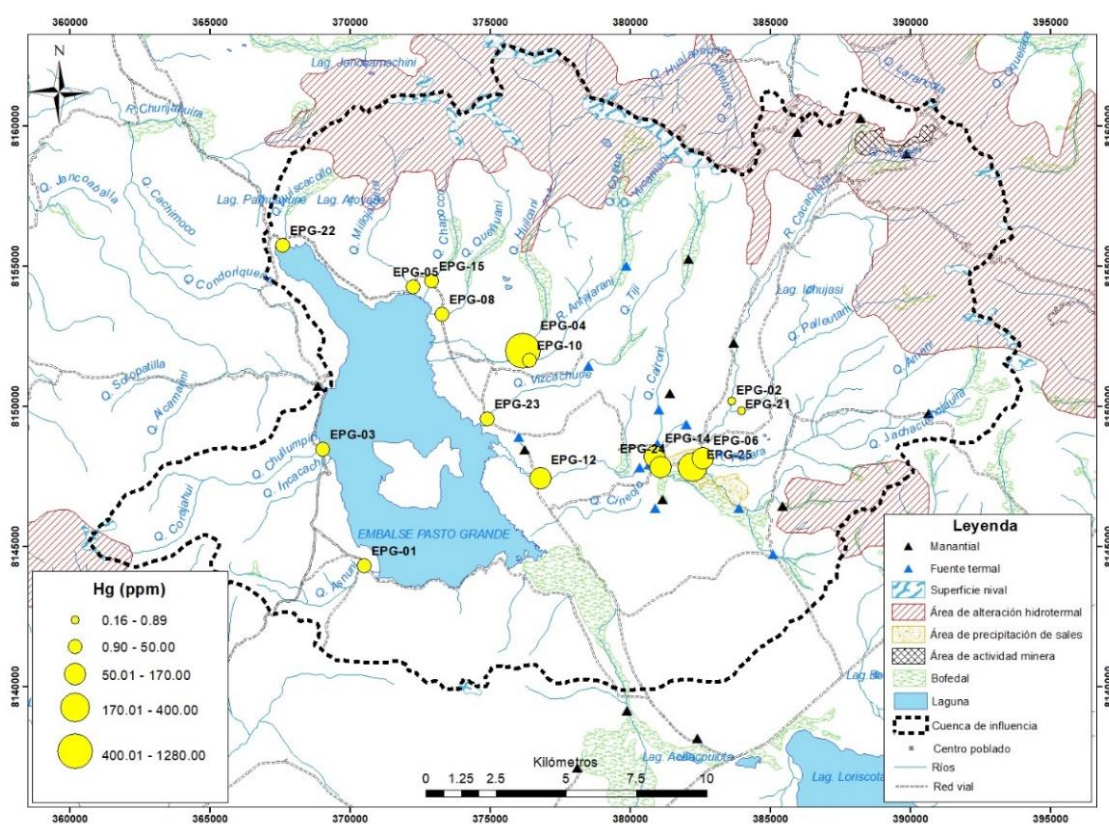


Figura 37. Concentraciones del Hg (ppm), en afluentes al embalse

El conjunto de datos de Hg indica dos valores extremos, estos corresponden a afluentes con pH ácido (EPG-04 y EPG-25); los cuales coinciden con concentraciones altas de Mo y Cr en sedimentos, y en muestras de agua coincide con las del Al, Cr, Ni y Fe. La proveniencia de Hg es de rocas con alteración hidrotermal y de fuentes termales. En aguas frescas, el Hg sobrepasa el ISQG y PEL en 15 afluentes (tabla 20).

Molibdeno (Mo ppm)

El Molibdeno tiene una concentración media de 1623.75 ppm, un mínimo de 49 ppm y un máximo de 8110 ppm (Tabla 12). Las concentraciones mínimas (1 – 2 ppm) se ubican en las quebradas Palleutani, Asnuni, Chullumpiri, Chapocco, Vizcachuni, Caironi, confluencias quebradas Amani y Jachacuhojahuira, confluencia ríos Cacachara y Patara, río Antajarani y aguas embalsadas. Las concentraciones moderadas (2.01 – 5 ppm) ocurren en las quebradas Queñuani, Millojahuira, afluyente de fuentes termales del río Patara, ríos Cacachara y Patara principal. Las concentraciones altas (5.01 – 14 ppm) suceden solamente en la quebrada Huilcani (Figura 38).

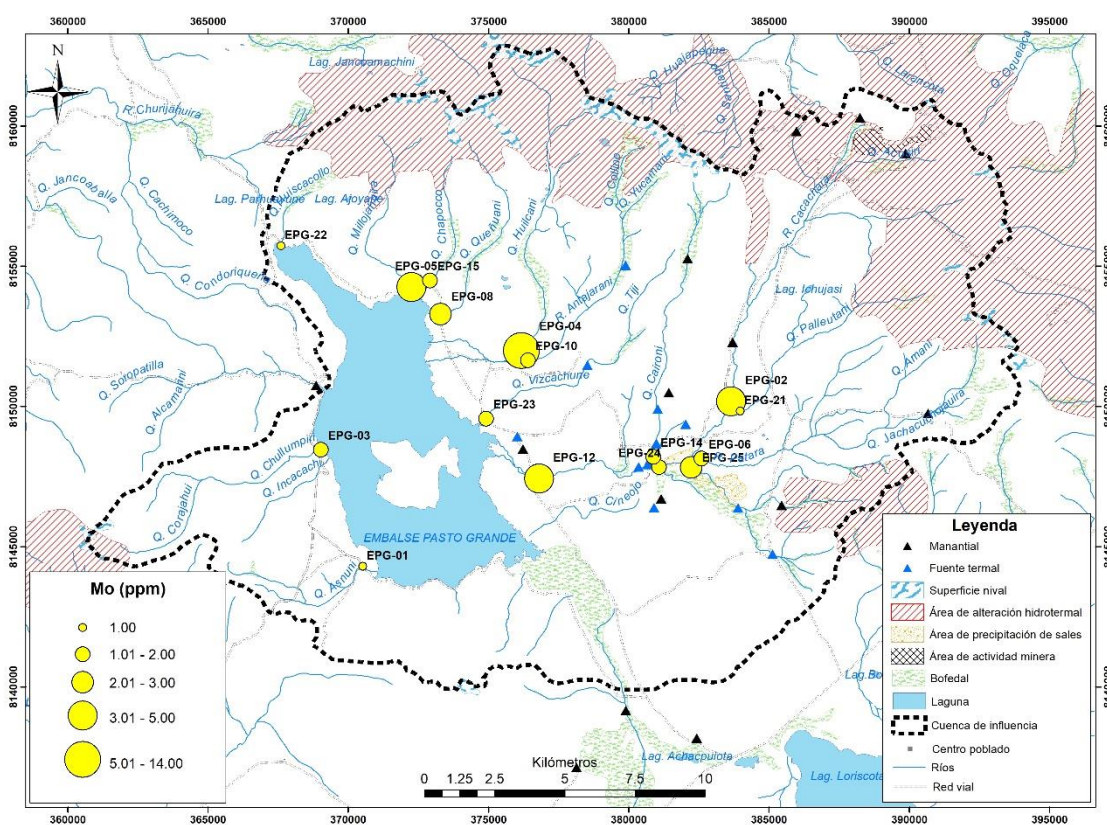


Figura 38. Concentraciones del Mo (ppm), en afluentes al embalse

El Mo tiene un valor extremo (EPG-04); el cual coincide con concentraciones altas de Cr y Hg; estos a su vez tienen valores altos de temperatura y pH. Según Montero-Serrano *et al.* (2009), el Mo es un marcador en ambientes sedimentario y precipita en presencia de H₂S (ambientes ácidos), lo cual ocurre de forma similar en la zona de estudio.

Níquel (Ni ppm)

El Níquel tiene una concentración media de 17.44 ppm, un mínimo de 3 ppm y un máximo de 41 ppm (Tabla 12). Las concentraciones mínimas (3 – 12 ppm) se ubican en las aguas embalsadas, quebradas Millojahuira, Chapocco, Queñuani, Huilcani, confluencia ríos Cacachara y Patara. Las concentraciones moderadas (12.01 – 28 ppm) suceden en las quebradas Vizcachuni, Caironi, Chullumpiri, Palleutani, Asnuni, confluencias quebradas Amani y Jachacuchojahuira, río Patara principal, afluente de fuentes termales del río Patara. Las concentraciones altas (28.01 – 41 ppm) ocurren en ríos Cacachara y Antajarani (Figura 39).

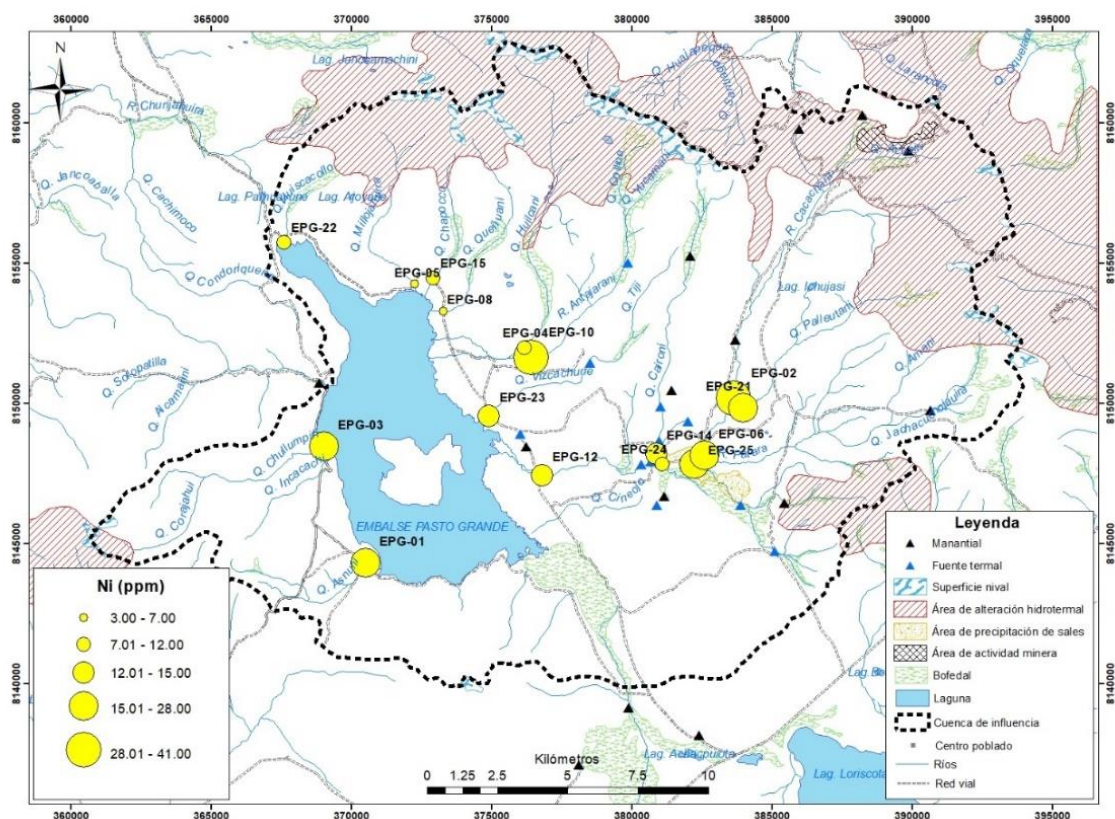


Figura 39. Concentraciones del Ni (ppm), en afluentes al embalse

El Ni tiene dos valores extremos (EPG-02 y EPG-10), estas concentraciones ocurren en afluentes con pH ácido, estos provienen de sectores con afloramientos de rocas con alteración hidrotermal. Las concentraciones altas de Ni coinciden con las de Pb, Zn y Cd. La formación Vizcachas y Pichu contienen Ni en concentraciones de 6.2 a 80.8 ppm (Vargas et al., 2017); estas unidades litológicas circunscriben parte del área de estudio.

Plomo (Pb ppm).

El Plomo tiene una concentración media de 102.81 ppm, un mínimo de 16 ppm y un máximo de 681 ppm (Tabla 12). Las concentraciones mínimas se ubican en las aguas embalsadas, quebradas Millojahuira, Chapocco, Queñuani, Chullumpiri, Asnuni, Vizcachuni, y río Antajarani. Las concentraciones moderadas (32.01 – 60 ppm) ocurren en las quebradas Huilcani, Palleutani, Caironi, confluencias Amani y Jachacuchajahuira, confluencias ríos Cacachara y Patara, río Patara principal. Las concentraciones altas (60.01 – 681 ppm) se dan en el afluente de fuentes termales del río Patara y río Cacachara (Figura 40).

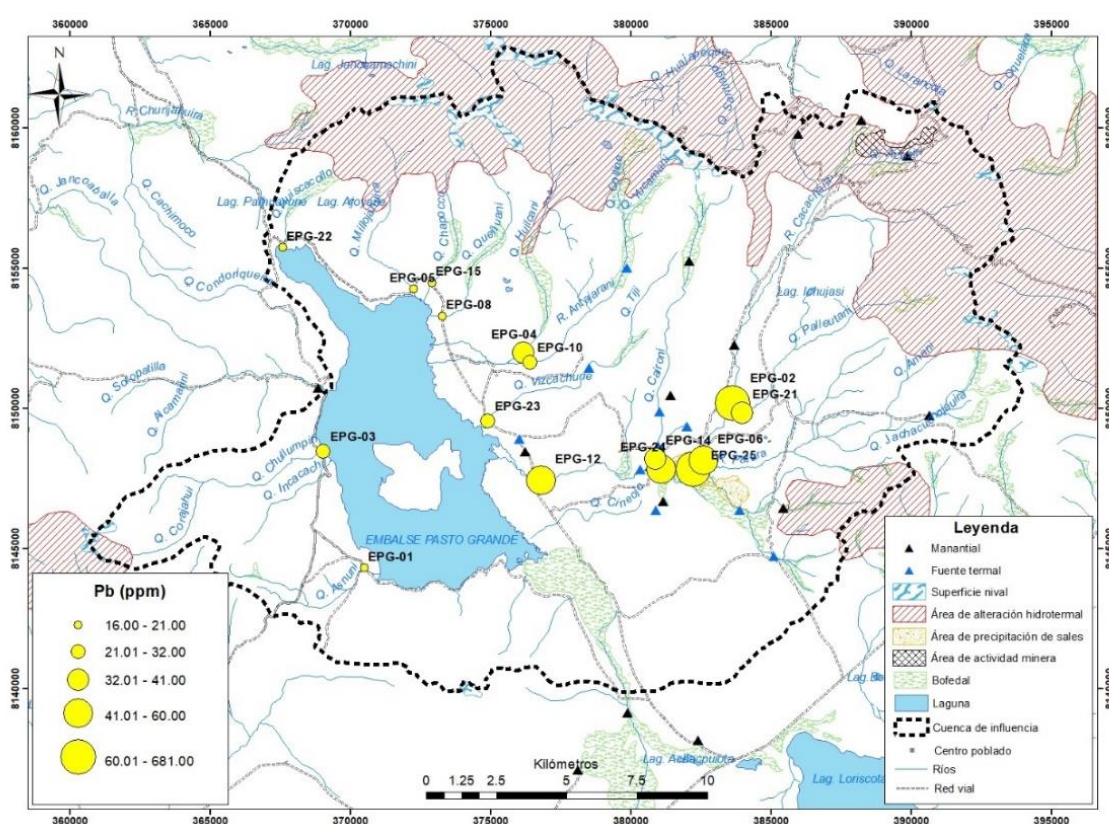


Figura 40. Concentraciones del Pb (ppm), en afluentes al embalse

El Pb tiene dos valores extremos (EPG-02 y EPG-25), estas concentraciones tienen relación con fuentes termales y procesos de meteorización de minerales que contienen Pb (sulfuro de plomo), presente en forma diseminada en rocas con alteración hidrotermal. Las concentraciones Pb coinciden con el Zn, Cr, Ni, Al, Be, Cd, Cu, As y Sb. Para aguas frescas, el Pb sobrepasa el ISQG en 8 afluentes y el PEL, en 2 afluentes (tabla 20).

Vanadio (V ppm).

El Vanadio tiene una concentración media de 83.875 ppm, un mínimo de 37 ppm y un máximo de 134 ppm (Tabla 12). Los valores mínimos (37 – 71 ppm) se ubican en las quebradas Queñuani, Palleutani, Vizcachuni, Millojahuira, confluencias quebradas Amani y Jachacuchajahuira y afluentes de fuentes termales del río Patara. Las concentraciones moderadas (71.01 – 99 ppm) ocurren en las quebradas Chapocco, Caironi, Huilcani, Chullumpiri, Asnuni, confluencias ríos Cacachara y Patara, ríos Antajarani, Cacachara y Patara principal. Las concentraciones altas suceden (99.01 – 134 ppm) en las quebradas Chullumpiri y Asnuni (Figura 41).

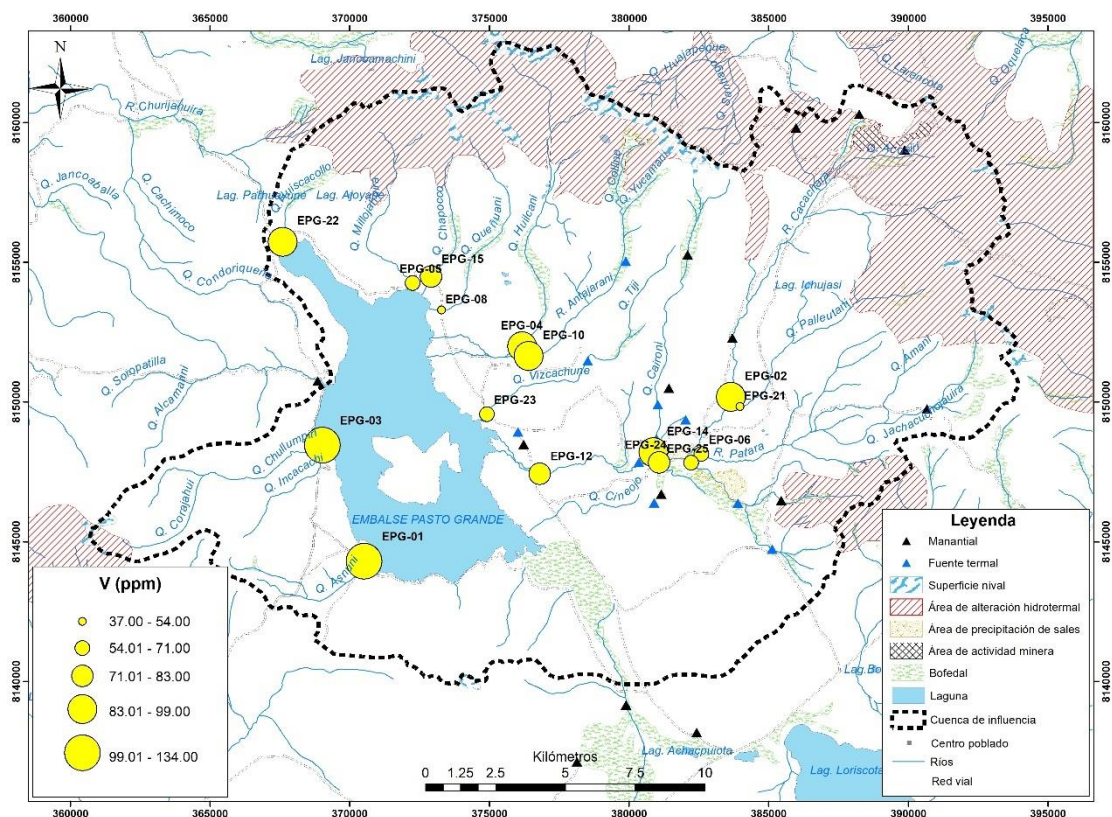


Figura 41. Concentraciones del V (ppm), en afluentes al embalse

El V tiene un valor extremo (EPG- 03), esta concentración ocurre en afluentes con pH neutro a alcalino y en sectores con afloramientos de rocas sin alteración hidrotermal. Las concentraciones altas de V también coinciden con las de Cr y Cu; los parámetros fisicoquímicos tienen valores altos de oxígeno disuelto y valores bajos de turbidez. El V tiene una concentración de 24.14 ppm y este coexiste con el Cr en sectores profundos del lago Maracaibo (Ávila *et al.*, 2014).

Zinc (Zn ppm).

El Zinc tiene una concentración media de 215.25 ppm, un mínimo de 27 ppm y un máximo de 782 ppm (Tabla 12). Los valores mínimos de Zn se ubican en las quebradas Millojuaira, Queñuani, Huilcani, Chapocco y aguas embalsadas. Las concentraciones moderadas (84.01 – 166 ppm) ocurren en las quebradas Asnuni, Chullumpiri, Caironi, Vizcachuni, confluencias quebradas Amani y Jachacuchojuaira, confluencia ríos Cacachara y Patara, ríos Antajarani y Patara principal. Las concentraciones altas (166.01 – 782 ppm) se dan en la quebrada Palleutani, río Cacachara y afluente de fuentes termales del río Patara (Figura 42).

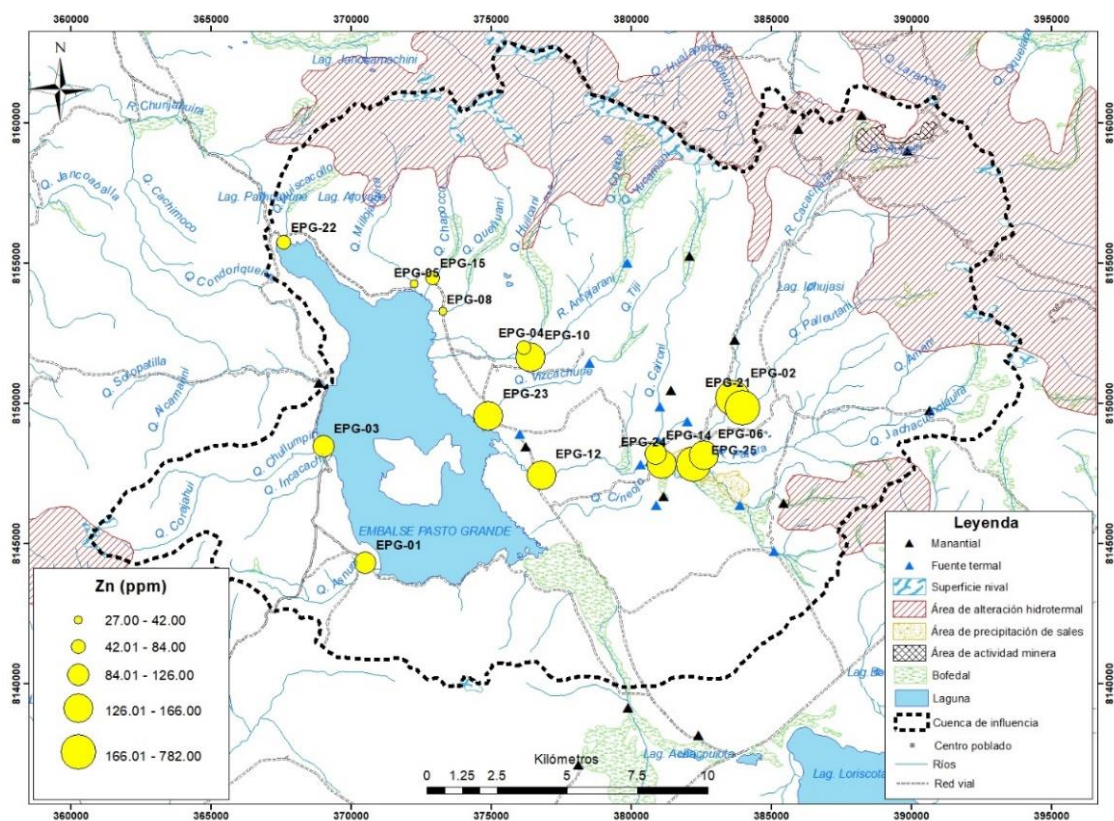


Figura 42. Concentraciones del Zn (mg/L), en afluentes al embalse

Los valores de Zn muestran dispersión con tres valores extremos (EPG-02, EPG-21 y EPG-25), estas concentraciones están relacionadas a afluentes con pH ácidos y con fuerte presencia de fuentes termales, a su vez coinciden con valores altos de As, Sb, Pb, Al, Be, Cd, Cr y Ni, todos los afluentes proceden de afloramientos con alteración hidrotermal. Para aguas frescas, el Zn sobrepasa el ISQG en 8 afluentes y el cuanto al PEL, 3 afluentes sobrepasan los estándares internacionales (tabla 20).

4.1.9. Correlación y ACP de elementos químicos en sedimentos.

Existe correlación alta a muy alta en las variables recopiladas: As-Sb (0.8551002), As-B (0.96694294), As-Ba (0.82164094), Sb-B (0.81171589), Sb-Ba (0.81705448), Sb-Cd (0.83365186), Hg-Mo (0.87344997), Pb-Zn (0.83945958), Zn-Pb (0.83945958), Mo-Hg (0.87344997), Al-Cu (0.84835278), B-As (0.96694294), B-Sb (0.81171589), B-Ba (0.85240514), Ba-As (0.82164094), Ba-Sb (0.81705448), Ba-B (0.85240514) y Cd-Sb (0.83365187), (Tabla 13).

Tabla 13

Matriz de correlación de Pearson, muestras de sedimento

Variable	As_ppm	Sb_ppm	Hg_CV_ppm	Pb_ICP_ppm
As_ppm	1	0.8551002	0.09101729	0.24435388
Sb_ppm	0.8551002	1	0.01589425	0.65033798
Hg_ppm	0.09101729	0.01589425	1	0.03426226
Pb_ppm	0.24435388	0.65033798	0.03426226	1
Zn_ppm	0.28745043	0.57933383	-0.03644812	0.83945958
Mo_ppm	0.0105998	0.06498216	0.87344997	0.11753464
Al_por	0.34713105	0.37389586	0.16895036	0.51577927
B_ppm	0.96694294	0.81171589	0.05059154	0.09722378
Ba_ppm	0.82164094	0.81705448	0.29640352	0.30695396
Be_ppm	0.75300577	0.68183526	0.06816836	0.47174575
Cd_ppm	0.69380556	0.83365186	0.0190127	0.74353956
Cr_ppm	0.07637219	0.32217683	0.48107008	0.452532
Cu_ppm	0.43523596	0.49521852	0.39172137	0.60338921
Fe_por	0.22073427	0.24172857	0.38804604	0.14576305
Mn_ppm	-0.12114421	-0.15852738	-0.18902356	-0.1970113
Ni_ppm	-0.11149974	0.14571542	-0.1542905	0.43344068
	Zn_ppm	Mo_ppm	Al_%	B_ppm
As_ppm	0.28745043	0.0105998	0.34713105	0.96694294
Sb_ppm	0.57933383	0.06498216	0.37389586	0.81171589
Hg_ppm	-0.03644812	0.87344997	0.16895036	0.05059154
Pb_ppm	0.83945958	0.11753464	0.51577927	0.09722378
Zn_ppm	1	-0.0770559	0.67493666	0.13629844
Mo_ppm	-0.0770559	1	-0.09236413	0.01139075
Al_%	0.67493666	-0.09236413	1	0.17603945
B_ppm	0.13629844	0.01139075	0.17603945	1
Ba_ppm	0.18638403	0.29841371	0.18608431	0.85240514
Be_ppm	0.61463134	-0.13939725	0.7825704	0.60529357
Cd_ppm	0.66038935	0.07053464	0.46370763	0.54530702
Cr_ppm	0.30924038	0.50714495	0.32398454	0.0636065
Cu_ppm	0.58507097	0.18133201	0.84835278	0.26014152
Fe_%	0.08844733	0.30442128	0.15853531	0.24352491
Mn_ppm	-0.21711763	-0.26832629	-0.23800705	-0.06338751
Ni_ppm	0.46741055	-0.18400784	0.53124452	-0.13811453

	Ba_ppm	Be_ppm	Cd_ppm	Cr_ppm
As_ppm	0.82164094	0.75300577	0.69380556	0.07637219
Sb_ppm	0.81705448	0.68183526	0.83365187	0.32217683
Hg_ppm	0.29640352	0.06816836	0.0190127	0.48107008
Pb_ppm	0.30695396	0.47174575	0.74353956	0.452532
Zn_ppm	0.18638403	0.61463134	0.66038935	0.30924038
Mo_ppm	0.29841371	-0.13939725	0.07053464	0.50714495
Al_%	0.18608431	0.7825704	0.46370763	0.32398454
B_ppm	0.85240514	0.60529357	0.54530703	0.0636065
Ba_ppm	1	0.48547728	0.49555618	0.40944211
Be_ppm	0.48547728	1	0.71490168	0.06309813
Cd_ppm	0.49555618	0.71490168	1	0.15275422
Cr_ppm	0.40944211	0.06309813	0.15275422	1
Cu_ppm	0.37826362	0.75347531	0.63545186	0.49121954
Fe_%	0.60229337	0.19722288	-0.00542049	0.37332607
Mn_ppm	0.0628034	-0.07151588	-0.26579025	-0.29770337
Ni_ppm	0.0031729	0.28727198	0.03801352	0.38339025
	Cu_ppm	Fe_%	Mn_ppm	Ni_ppm
As_ppm	0.435236	0.22073427	-0.12114421	-0.11149974
Sb_ppm	0.4952185	0.24172857	-0.15852738	0.14571542
Hg_ppm	0.3917214	0.38804604	-0.18902356	-0.1542905
Pb_ppm	0.6033892	0.14576305	-0.1970113	0.43344069
Zn_ppm	0.585071	0.08844733	-0.21711763	0.46741055
Mo_ppm	0.181332	0.30442128	-0.26832629	-0.18400784
Al_%	0.8483528	0.15853531	-0.23800705	0.53124452
B_ppm	0.2601415	0.24352491	-0.06338751	-0.13811453
Ba_ppm	0.3782636	0.60229337	0.0628034	0.0031729
Be_ppm	0.7534753	0.19722288	-0.07151588	0.28727198
Cd_ppm	0.6354519	-0.00542049	-0.26579025	0.03801352
Cr_ppm	0.4912195	0.37332607	-0.29770337	0.38339025
Cu_ppm	1	0.30574852	-0.1868513	0.39833778
Fe_%	0.3057485	1	0.59577287	0.16970251
Mn_ppm	-0.1868513	0.59577287	1	-0.02186444
Ni_ppm	0.3983378	0.16970251	-0.02186444	1

En el lago Maracaibo, un sistema similar al embalse; las correlaciones altas de Pearson de V, Pb, Ni y Cr, demuestran que estos elementos químicos en sedimentos están influenciados por el tipo de roca que circunscribe el lago (Ávila Perez *et al.*, 2015). Razón por la cual es necesario realizar el Análisis de Componentes Principales (ACP).

El primer componente (PC1) aporta el 40.84%, un segundo componente (PC2) que aporta el 57.27%, un tercer componente (PC3) que aporta el 73.05% y un cuarto componente (PC4) que aporta el 83.72%. La variación total de varianza acumulada

es 83.72%, que es muy bueno, lo cual está reduciendo las dimensiones en cuatro componentes principales de las 16 variables, esto para una mejor explicación (Tabla 14).

Tabla 14

Proporción de varianza explicada por cada componente de sedimentos

Parámetros estadísticos	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
Desviación estándar	2.5564	1.6215	1.5888	1.3064	1.00982	0.8943	0.53887	0.49696
Proporción de Varianza	0.4084	0.1643	0.1578	0.1067	0.06373	0.04999	0.01815	0.01544
Proporción acumulada	0.4084	0.5727	0.7305	0.8372	0.90092	0.95091	0.96906	0.98449
	PC9	PC10	PC11	PC12	PC13	PC14	PC15	PC16
Desviación estándar	0.30367	0.2506	0.21408	0.17713	0.0949	0.08219	0.01118	6.99E-19
Proporción de Varianza	0.00576	0.00393	0.00286	0.00196	0.00056	0.00042	0.00001	0.00E+00
Proporción acumulada	0.99026	0.99418	0.99705	0.99901	0.99957	0.99999	1	1.00E+00

La explicación de la varianza en los componente principales de Pasto Grande, se explica de acuerdo a la proporción relativa de la varianza total de cada eigenvector (vector propio), que está dada por la magnitud de cada eigenvalor (Sánchez *et al.*, 2010).

Así, el PC1, explican mejor las variables: As (0.30581625), Sb (0.34977075), Pb (0.28221787), Zn (0.27834848), Be (0.33116847), Cd (0.32622966) y Cu (0.31591977). están relacionados a los ríos Cacachara, Patara principal, confluencias de las quebradas Amani y Jachacuchojahuira, quebradas Queñuani, Caironi, Vizcachuni, Millojahuira, agua embalsada, Patara principal y afluente de fuentes termales río Patara. Para el PC2, explican mejor las variables: Al (-0.28301885), B (0.30682882), Ba (0.36754915) y Ni (-0.36062367). están los individuos: río Antajarani, quebrada Palleutani y confluencia ríos Cacachara y Patara. Para el PC3, explican mejor las variables: Hg (0.45129583), Mo (0.44879513) y Cr (0.43534374). Para PC4 explica mejor las variables: Fe (0.56690958) y Mn (0.65577). están las quebradas Chullumpiri y Huilcani. En PC4 están las quebradas Asnuni y Chapocco (Tabla 15 y Figura 43).

El ACP reduce a un pequeño número de componentes las variables y estos reproducen la mayor parte de la variabilidad de los datos originales y en consecuencia retienen la mayor parte de la información (Bald *et al.*, 1999).

Tabla 15
Componentes principales, explicación por variables e individuos

Variable/individuo	CP1	CP2	CP3	CP4
As_ppm	0.30581625	0.23082818	-0.28712002	-0.08531438
Sb_ppm	0.34977075	0.09171508	-0.17299717	-0.05816217
Hg_CV_ppm	0.09416956	0.30770915	0.45129583	-0.11685506
Pb_ICP_ppm	0.28221787	-0.24454154	0.12756399	-0.01669034
Zn_ppm	0.27834848	-0.3274783	0.04946745	0.00794114
Mo_ppm	0.0631204	0.33288509	0.44879513	-0.21855848
Al_por	0.27513486	-0.28301885	0.11054531	0.08213432
B_ppm	0.2595757	0.30682882	-0.31163024	-0.05344661
Ba_ppm	0.28686219	0.36754915	-0.06726432	0.11459581
Be_ppm	0.33116847	-0.09628133	-0.15944014	0.06426566
Cd_ppm	0.32622966	-0.06358079	-0.13864354	-0.21458016
Cr_ppm	0.1803964	0.05021006	0.43534374	0.01043681
Cu_ppm	0.31591977	-0.12495852	0.19264197	0.05179918
Fe_por	0.1360291	0.2805532	0.17706718	0.56690958
Mn_ppm	0.08165716	0.12736914	-0.13498035	0.65577
Ni_ppm	0.12317864	-0.36062367	0.17064745	0.3169412
Quebrada Asnuni	-0.3753865	-1.2070007	0.6396537	0.73224552
Río Cacachara	2.9559184	-1.82006173	1.6396588	0.09756932
Quebrada Chullumpiri	-0.8854188	-0.68017059	0.960762	-0.06685287
Quebrada Huilcani	0.1400718	3.087034	4.8001897	-0.67081587
Quebrada Millojahuira	-2.7835032	0.23758446	-0.8146835	-2.21152905
Quebradas Amani y Jachacuchojahuira	-0.9929464	-0.09655838	-0.2376092	0.64511822
Quebrada Queñuani	-2.1005043	-0.51008985	-0.7178089	-1.90392751
Río Antajarani	-0.6399584	-1.61811782	0.2451097	1.52711588
Río Patara principal	3.1406575	2.68791713	-1.7635415	-0.3056418
Quebrada Caironi	-0.8831818	0.34210448	-0.3605006	0.58163297
Quebrada Chapocco	-1.7737087	1.50829343	-0.7073796	3.47187615
Quebrada Palleutani	-0.8654307	-1.84396006	-0.2046863	-0.25736396
Agua embalsada	-2.0203555	-0.44083683	-0.4848199	-0.26853212
Quebrada Vizcachuni	-2.0293623	-0.31502719	-0.5174687	-0.69376351
Confluencias ríos Cacachara y Patara	2.2627169	2.35885383	-2.2764499	-0.34467302
Afluente de fuentes termales río Patara	6.8503921	-1.68996419	-0.2004259	-0.33245834

Rivera & Chira (2008) en un trabajo con similar geología a la zona de estudio, encontraron cinco componentes: PC1 (Zn-Cd-Pb-As-Cu-Sb-Sn-Fe), PC2 (Ni-Mo-V-W-Fe), PC3 (W-Fe), PC4 (Cr-Hg-Fe) y PC5 (Hg), de estos el primer componente contiene las mismas variables.

Las afinidades entre los elementos químicos (componentes principales) y afluentes al embalse Pasto Grande (individuos) se muestran en la Figura 43.

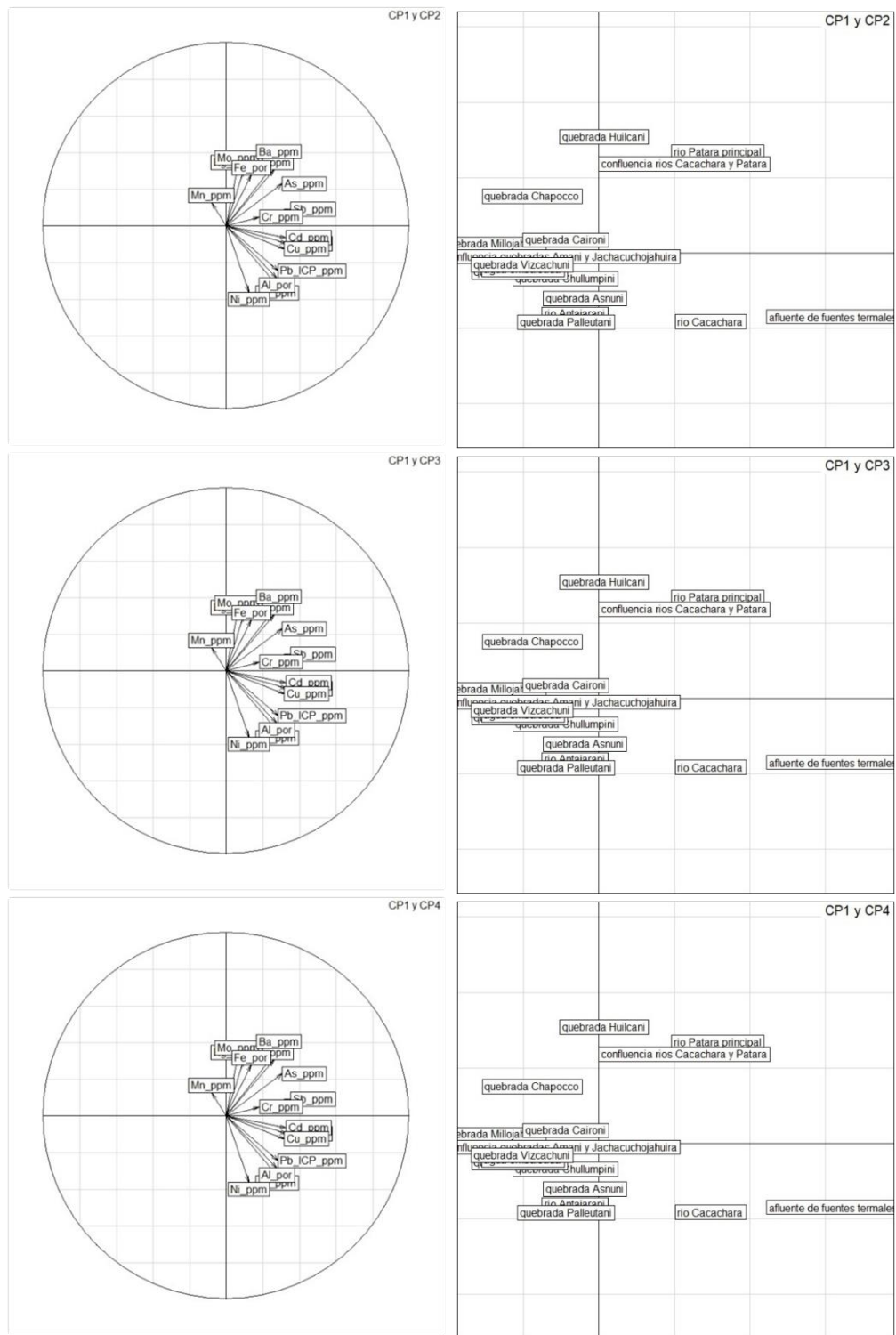


Figura 43. Gráfico circular y de individuos, muestras de sedimentos de ACP (a)

El gráfico bidimensional pareado de 4 componentes principales, en el área de estudio, es explicado por (Murte, 2013), en donde menciona, que la visualización de datos en ACP, ocurre a partir de gráficas tridimensionales o bidimensionales en las que se conjugan muestreos y variables.

Las afinidades entre los elementos químicos (componentes principales) y afluentes al embalse Pasto Grande (individuos), se muestran en la Figura 44.

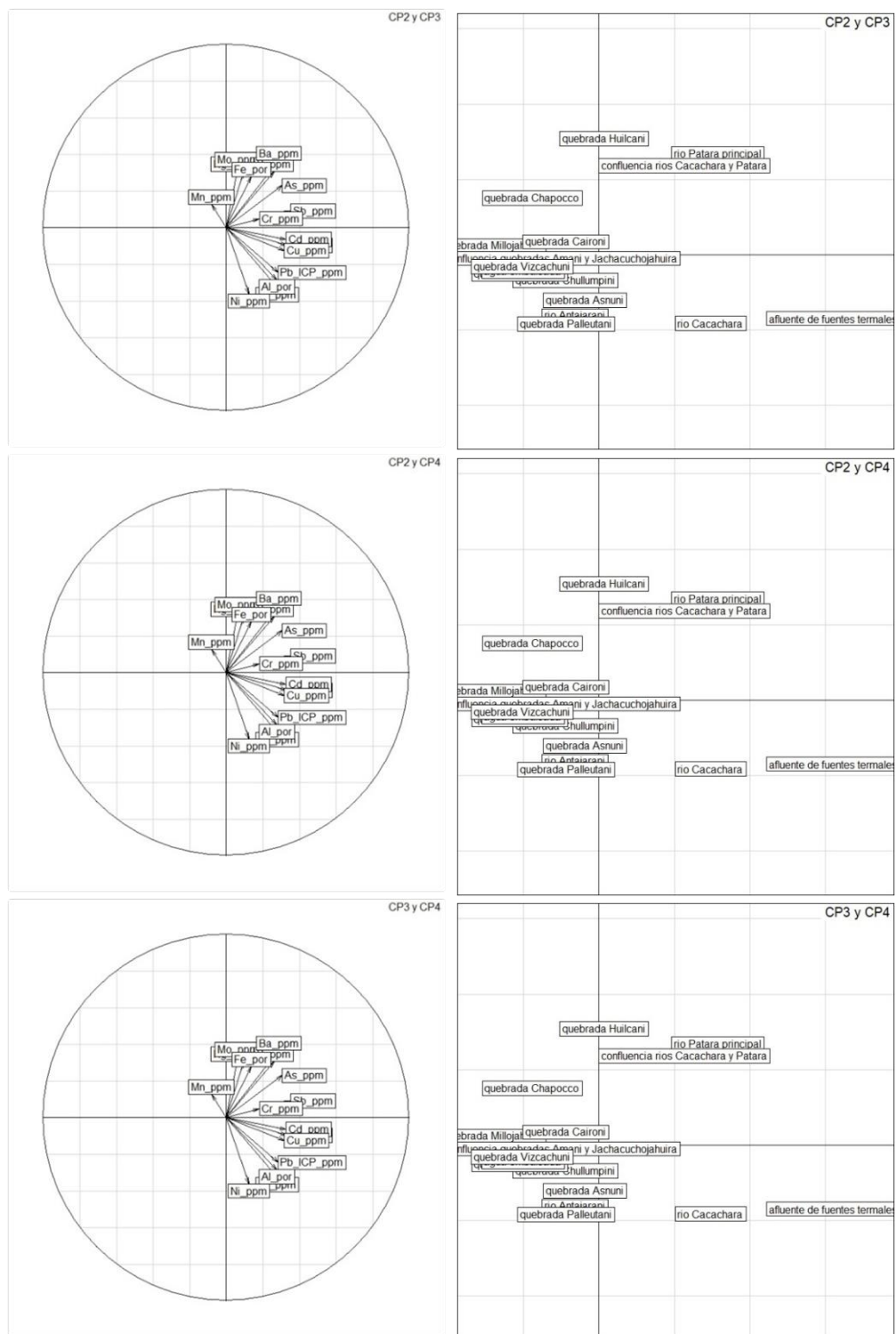


Figura 44. Gráfico circular y de individuos, muestras de sedimentos de ACP (b)

El gráfico bidimensional pareado de 4 componentes principales de la zona de estudio, son explicados por (Murte, 2013), esto para la visualización de datos

formados a partir de gráficas tridimensionales o bidimensionales en las que se conjugan muestreos y variables

Para ver la proporción de la varianza en las variables, se utilizó la medida estadística Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) y prueba de esfericidad de Bartlett. Así, se obtuvo:

Parámetros fisicoquímicos (PF)

Kaiser-Meyer-Olkin factor adequacy

Call: KMO (r = scaladatos)

Overall MSA = 0.37

MSA for each item = pH (0.48), C (0.13), OD_ppm (0.40), C_us/cm (0.50), TDS_mg/L (0.36), Turb_FNU (0.27)

Cortest. Bartlett (scaladatos)

R was not square, finding R from data

Chisq = 48.40446; p.value = 2.18794e-05; df = 15

Concentración de elementos químicos en muestras de agua (CEQMA)

Kaiser-Meyer-Olkin factor adequacy

Call: KMO (r = scaladatos)

Overall MSA = 0.47.

MSA for each item = Al_mgL (0.43), As_mgL (0.38), B_mgL(0.37), Ba_mgL(0.28), Be_mgL(0.49), Cd_mgL(0.45), Cr_mg.L(0.38), Cu_mgL(0.64), Fe_mgL(0.68), Mn_mgL(0.80), Ni_mgL(0.53), Pb_mgL(0.44), Sb_mgL(0.47), U_mgL(0.45), Zn_mgL(0.50).

Cortest. Bartlett (scaladatos)

R was not square, finding R from data

Chisq = 772.0789; p.value = 3.724927e-102; df = 105.

Concentración de elementos químicos en muestras de sedimentos de quebrada (CEQMSQ)

Kaiser-Meyer-Olkin factor adequacy

Call: KMO (r = datos)

Overall MSA = 0.50.

MSA for each item = As_ppm(0.5), Sb_ppm(0.5) Hg_CV_ppm(0.5), Pb_ICP_ppm(0.5), Zn_ppm(0.5), Mo_ppm(0.5), Al_por(0.5), B_ppm(0.5), Ba_ppm(0.5), Be_ppm(0.5), Cd_ppm(0.5), Cr_ppm(0.5), Cu_ppm(0.5), Fe_por(0.5), Mn_ppm(0.5), Ni_ppm(0.5).

Cortest. Bartlett (scaladatos)

R was not square, finding R from data

Chisq = 0; p.value = 0; df = 120, no es significativo la prueba Bartlett

Según análisis KMO, resulta, para: PF = 0.37, CEQMA = 0.47 y CEQMSQ = 0.50; indican que no se puede hacer análisis factorial, porque los valores son bajos.

La prueba de *Bartlett*, indica, para: PF = 15 (significativo), CEQMA = 105 (significativo) y CEQMSQ = 120 (no significativo).

La medición de *chic cuadrado*, en: PF = 48.40446, CEQMA = 772.0789 y CEQMSQ = 0; demuestran que existen diferencias en las proporciones observadas de las variables por lo tanto son estadísticamente significativas.

El *p_value* de: PF = 2.18794e-05, CEQMA = 3.724927e-102 y CEQMSQ = 0, indican la probabilidad aceptación de la hipótesis, por lo tanto, existe relación entre las variables evaluadas.

4.1.10. Interrelación, muestras de agua, parámetros fisicoquímicos y sedimentos en los afluentes con DAR.

Agua embalsada (muestra EPG-22).

Esta muestra se obtuvo para conocer las concentraciones de elementos químicos en agua y sedimento, esto sectores de fluctuación temporal de agua del embalse y donde se observa una coloración rojiza, justo en la desembocadura de la quebrada Huiscacollo. El sector está circunscrito por rocas volcánicas del Grupo Barroso el cual contiene dacitas porfíricas principalmente; los depósitos cuaternarios están conformados por materiales de origen fluvio-glaciar y bofedales; ambos con sedimentos heterogéneos (ver anexo 1 y 2). De acuerdo a la figura 45, existe ocurrencia decreciente desde el Al, Mn, Fe, B, Zn, Ba hasta el Ni en muestras de agua; en las muestras de sedimento indican concentraciones decrecientes desde el Mn, Zn, Ba, As, Pb, Cu, Cr, Ni, B, U, Sb hasta Al.

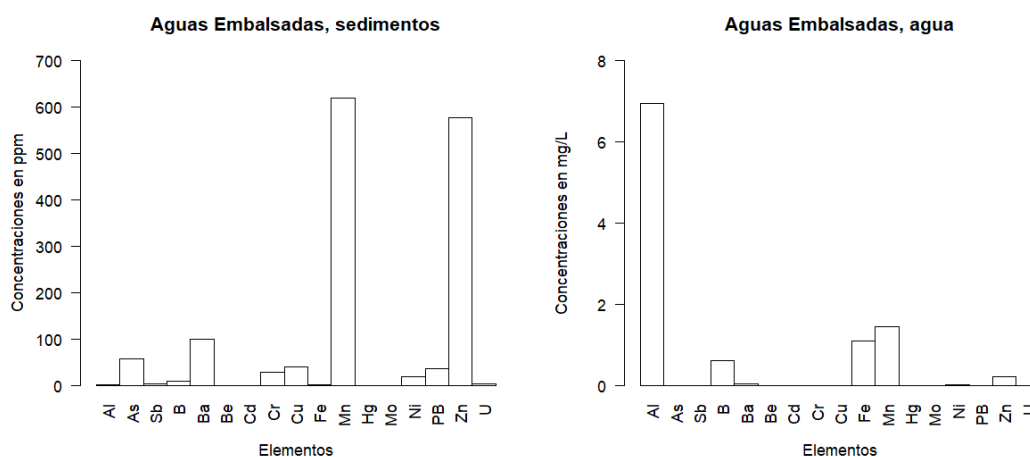


Figura 45. Diagrama barras de muestras de agua y sedimentos (muestra EPG-22)

Se puede apreciar ocurrencias diferenciadas en ambas muestras de Mn, Zn, B, Ba y Fe. Como la muestra representa un sistema lentic se puede mencionar que el B, procede de filosilicatos (arcillas) y este se encuentra en solución y precipita en pH ácido. El Al también se encuentra en solución y normalmente es poco móvil y se queda en el lugar de meteorización como arcilla. El pH en este punto de muestreo es 3.95, el oxígeno disuelto es de 3.25 ppm, los sólidos totales disueltos tienen valores de 299 mg/L, la conductividad es 597 $\mu\text{s}/\text{cm}$, la temperatura es de 17.26 $^{\circ}\text{C}$ y la turbidez es de 20.1 FNU. Los valores de los 18 elementos químicos son indicados por MINAM (2017).

Quebrada Millojahuira (muestra EPG-05)

Esta unidad hidrográfica, tiene un área de 14.74 Km², contiene rocas volcánicas alteradas por hidrotermalismo que pertenecen al Grupo Barroso y Formación Sencca, cuya extensión representa un 45% del área total de la microcuenca, la otra porción de la microcuenca lo representan depósitos del Pleistoceno y Cuaternario (55%). Las rocas alteradas muestran disseminaciones de pirita y arsenopirita, argilitización y silicificación en protolito de andesitas, dacitas y tufos riolíticos; las morrenas y depósitos aluviales también muestran fragmentos de rocas alteradas (ver anexo 1 y 2). De acuerdo a la figura 46, existe ocurrencia decreciente desde el Al, Fe, Mn y Zn en muestras de agua; en las muestras de sedimentos las concentraciones también decrecen desde el Mn, Ba, Zn, Cu, Cr, Ni, As, Hg, Pb, B y Fe; en ambas muestras se observa concentraciones diferenciadas de Mn, Zn y Fe.

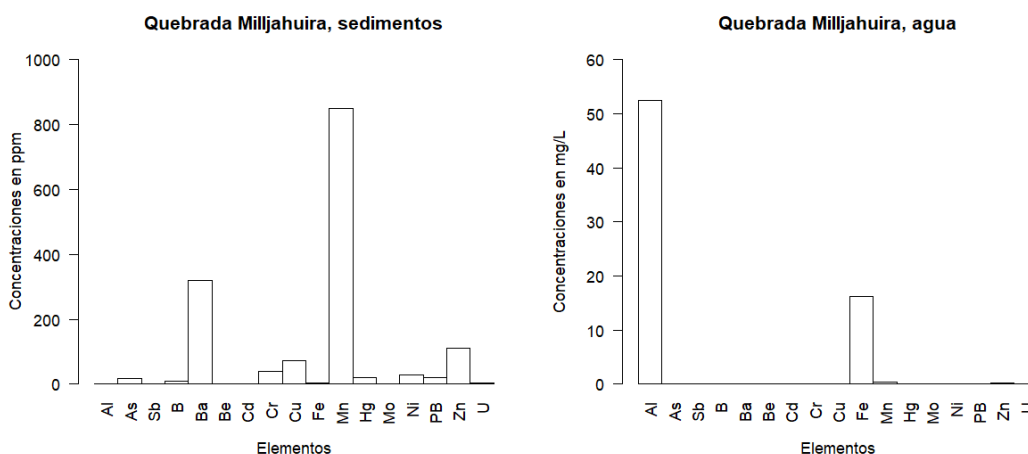


Figura 46. Diagrama barras de muestras de agua y sedimentos (muestra EPG-05)

La ocurrencia de Al demuestra la disolución de filosilicatos de las rocas alteradas y feldespatos (plagioclasas); el Fe se origina a partir de la oxidación de arsenopirita y pirita. Cabe decir que se observa Mn en el lecho de la quebrada como pirolusita, el cual “forra” los fragmentos de roca, este proviene de biotita y anfíboles. El Ba proviene de los feldespatos y alteración argílica; el Cu, Pb, Zn, Hg y As, se relacionan a las rocas alteradas y tipo de mineralización que ocurre en la naciente de la quebrada. El pH en este punto de muestreo es 2.94, el oxígeno disuelto es de 4.25 ppm, los sólidos totales disueltos tiene valores de 464 mg/L, la conductividad es 930 μ s/cm, la temperatura es de 13.63 °C y la turbidez es de 0 FNU. Los valores de los 18 elementos químicos son indicados por MINAM (2017).

Quebrada Chapocco (muestra EPG-15)

Esta unidad hidrográfica, tiene un área de 6.77 Km², contiene rocas alteradas por hidrotermalismo, cuya área representa un 30% de la microcuenca. Las rocas que se encuentran alteradas pertenecen al Grupo Barroso y están compuestas por andesitas y dacitas porfíricas. Los depósitos pleistocénicos y cuaternarios están conformados por morrenas y bofedales, los cuales contienen bloques dispersos y gravas de rocas volcánicas respectivamente. Los bofedales en esta unidad hidrográfica presentan gran extensión y contienen turba y arcillas poco compactas y estratificadas de color negro; estos depósitos presentan pequeños lechos que tienen formas dendríticas en donde se observa coloraciones negras y rojizas producto de la oxidación (ver anexo 1 y 2). De acuerdo a la figura 47, existe ocurrencia decreciente desde el Fe, B, Mn, Al hasta Ba en muestras de agua; en las muestras de sedimento se tienen concentraciones decrecientes desde el Mn, As, Ba, Hg, Zn, Cu, Pb, B, Cr hasta el Ni; ambos tipos de muestras se aprecia concentraciones diferenciadas de Mn y Ba.

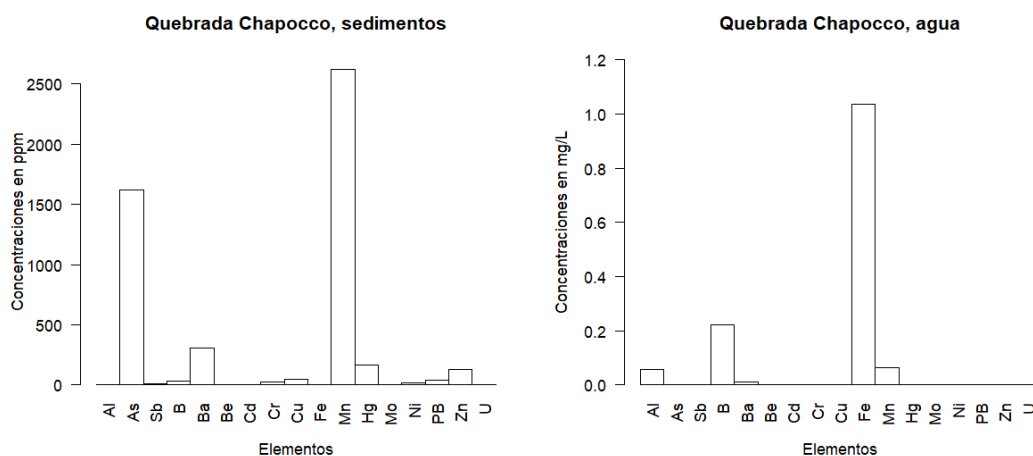


Figura 47. Diagrama barras de muestras de agua y sedimentos (muestra EPG-15)

Las altas concentraciones de Mn y As en muestras de sedimentos se originan por la meteorización física y/o fragmentación de óxidos y sulfuros, por la coloración del agua en el lecho de la quebrada se asumen Fe⁺³ y Mn⁺³, producto de oxidación de sulfuros de rocas alteradas y bloques de morrenas. El pH en este punto de muestreo es 6.19, el oxígeno disuelto es de 3.71 ppm, los sólidos totales disueltos tienen valores de 51 mg/L, la conductividad es 103 μ s/cm, la temperatura es de 16.3 °C y la turbidez es de 21.9 FNU. Los valores de los 18 elementos químicos son indicados por MINAM (2017).

Quebrada Huilcani (muestra EPG-04).

La unidad hidrográfica tiene un área de 25.94 Km², contiene rocas alteradas por hidrotermalismo, cuya área representa un 52% del área total de la microcuenca, la alteración afecta rocas del Grupo Barroso y Formación Sencca; lo demás está conformado por depósitos pleistocénicos y cuaternarios (48%). Las rocas alteradas muestran: diseminaciones de arsenopirita, argilitización avanzada y silicificación en protolito de dacitas y traquitas. Los depósitos aluviales muestran costras blancas y coloración amarillenta producto de la precipitación de minerales secundarios, los tamaños de roca son bloques con formas subredondeadas (ver anexo 1 y 2). De acuerdo a la figura 48, existe ocurrencia decreciente desde el Al, Fe, Mn y Zn en muestras de agua; en las muestras de sedimento las concentraciones decrecen desde el Mn, Ba, Zn, Cu y Cr; en ambos tipos de muestras existen concentraciones diferenciadas de Mn y Zn.

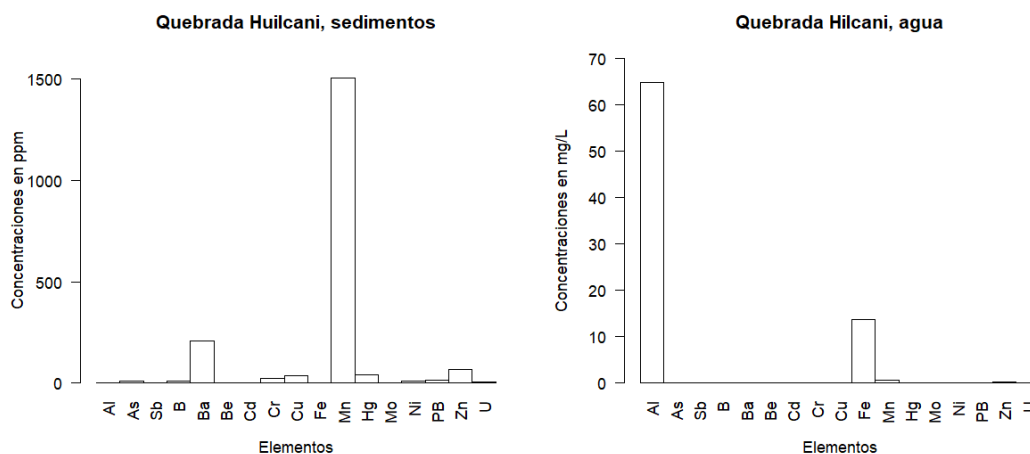


Figura 48. Diagrama barras de muestras de agua y sedimentos (muestra EPG-04)

El Mn y Ba se separan de los anfíboles y biotita, el Cr se divide de la muscovita, el Zn y Cu se oxidan de la blenda y calcopirita. En las muestras de agua el Al indica una relación de la disolución de filosilicatos. El Fe resulta de la oxidación de arsenopirita; gran parte del lecho de la quebrada lo conforman afloramientos rocosos de origen volcánico. El pH en este punto de muestreo es 2.85, el oxígeno disuelto es de 3.87 ppm, los sólidos totales disueltos tiene valores de 576 mg/L, la conductividad es 1155 $\mu\text{s}/\text{cm}$, la temperatura es de 18.25 °C y la turbidez es de 2.5 FNU. Los valores de los 18 elementos químicos son indicados por MINAM (2017).

Río Cacachara (muestra EPG-02).

Esta unidad hidrográfica, tiene un área de 61.54 Km², contiene rocas alteradas por hidrotermalismo que pertenecen al Grupo Barroso, Formación Sencca y Grupo Maure los cuales representan un 43% del área total de la microcuenca. Las rocas del Barroso y Sencca que dominan la microcuenca son: andesitas, tufos riodacíticos, domos riolíticos y riodacitas; el Grupo Maure presentan alteración parcial porque constan de litologías no permeables y sedimentos volcanogénicos. Los depósitos cuaternarios están conformados por materiales de origen fluvio-glaciar, aluvial y bofedales, los cuales forman planicies onduladas, que en época de lluvia presentan pequeñas lagunas temporales (ver anexo 1 y 2). De acuerdo a la figura 49, existe altas concentraciones de Al, le siguen Fe, Mn y Zn en muestras de agua, lo que demuestra disolución de filosilicatos de las rocas alteradas; en las muestras de sedimentos se observa altas concentraciones de Hg, le siguen Ba, Mn, As, Cu, Cr, Zn y Pb.

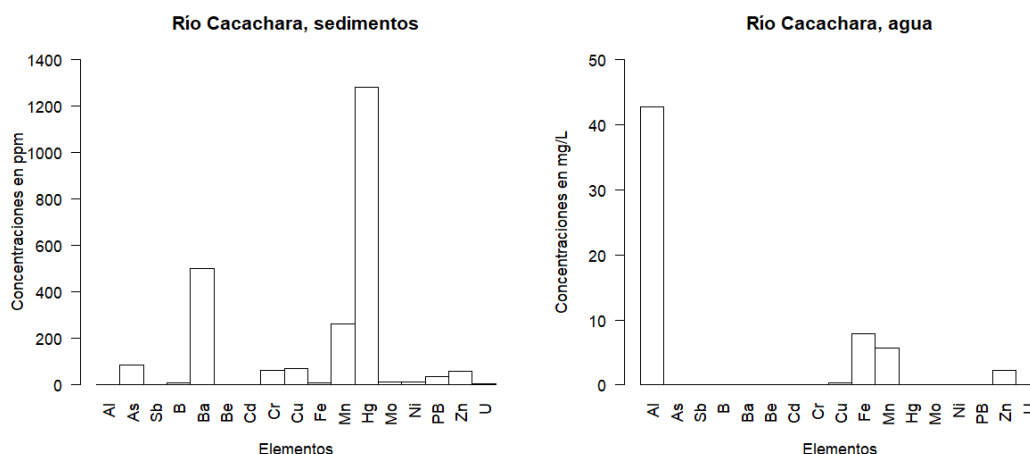


Figura 49. Diagrama barras de muestras de agua y sedimentos (muestra EPG-02)

En esta unidad hidrográfica existen dos minas, una de tajo abierto y otra en socavón, ambos sin actividad minera actual. El Hg, Fe y Zn se forman a partir de minerales (cinabrio, arsenopirita, pirita, blenda) presentes en vetas de la mina Cacachara que están expuestas en superficie. El pH en este punto de muestreo es 3.26 el oxígeno disuelto es de 4.9 ppm, los sólidos totales disueltos tiene valores de 839 mg/L, la conductividad es 1675 μ s/cm, la temperatura es de 10.5 °C y la turbidez es de 1.2 FNU. Los valores de los 18 elementos químicos son indicados por MINAM (2017).

Quebrada Palleutani (muestra EPG-21)

La unidad hidrográfica es parte del Río Patara, tiene un área de 18.3 Km², contiene rocas alteradas por hidrotermalismo, cuya área representa un 45% del área total de la microcuenca. Las rocas corresponden a rocas volcánicas ácidas del Grupo Barroso y Formación Sencca, además contienen depósitos cuaternarios que son de origen fluvio-glaciario, aluvial y bofedales. Los depósitos cuaternarios están conformados por cantos, gravas y arenas, en su mayoría con matriz de óxidos de Fe y cemento de carbonatos; estos tienen espesores que llegan hasta los 5 m y conforman el 55% del área total de la unidad hidrográfica (ver anexo 1 y 2). De acuerdo a la figura 50, existe ocurrencia decreciente desde el Al, Mn, Zn, Fe, B, Ba, Ni hasta el Cu en muestras de agua; las muestras de sedimento indican concentraciones decrecientes desde el Mn, As, Ba, Zn, Hg, Cu, Pb, Cr hasta el Ni; en ambos tipos de muestras se tienen concentraciones diferenciadas de Mn, Zn, Ba y Ni.

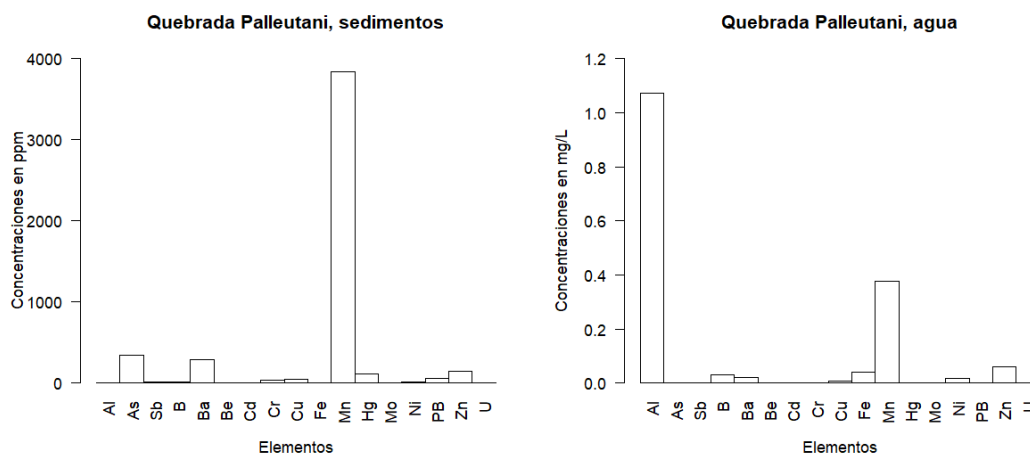


Figura 50. Diagrama barras de muestras de agua y sedimentos (muestra EPG-21)

Los altos valores de Mn en muestras de sedimentos concuerdan con las costras de pirolusita que forran los fragmentos de roca en el lecho de afluente. El Al indica disolución de filosilicatos de las rocas alteradas. El Zn, Fe, B, Ba, Ni y Cu demuestran la meteorización de minerales presentes en las rocas alteradas. El pH en este punto de muestreo es 4.27 el oxígeno disuelto es de 4.71 ppm, los sólidos totales disueltos tiene valores de 1060 mg/L, la conductividad es 2109 μ s/cm, la temperatura es de 15.4 °C y la turbidez es de 5.8 FNU. Los valores de los 18 elementos químicos son indicados por MINAM (2017).

Afluente del río Patara (muestra EPG-25).

Esta unidad hidrográfica pertenece a la microcuenca del río Patara, la cual recibe aguas de varias fuentes termales, tiene un área de 25.94 Km², contiene rocas que pertenecen al Grupo Barroso y Formación Sencca (50 %); las rocas volcánicas están conformadas por traquiandesitas porfiríticas con plagioclasas y hornblendas, tobas de composición riolita con cuarzo y vidrio volcánico. Los depósitos cuaternarios que conforman parte de la microcuenca son depósitos fluvio-glaciares, aluviales y bofedales. están compuestos por gravas que tienen matriz de óxidos de hierro, minerales secundarios (carbonatos y sulfatos) y arenas de diferente origen (ver anexo 1 y 2). De acuerdo a la figura 51, existe ocurrencia decreciente de Al, Mn, Zn, Fe, Ba y Cu en muestras de agua; las muestras de sedimento, presentan concentraciones decrecientes de As, Mn, Ba, B, Zn, Pb, Cu, Cr y Sb; en ambos tipos de muestras existen elementos que coinciden, pero con concentraciones diferentes: como Mn, Zn, Ba y Cu.

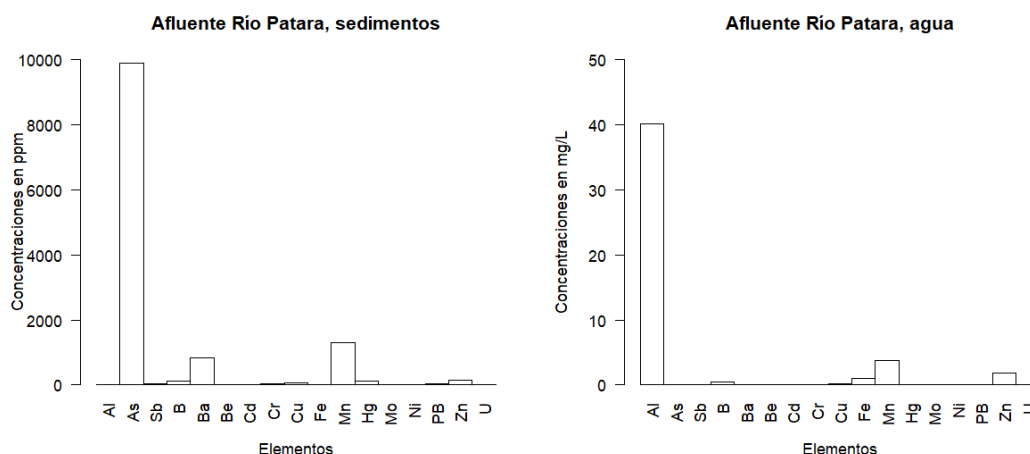


Figura 51. Diagrama barras de muestras de agua y sedimentos (muestra EPG-25)

El As en las muestras de sedimento se relacionan a sectores con presencia de fuentes termales, el Mn, Zn, B y Cu presentes también en agua indica disolución y precipitación de este elemento en los afluentes. El pH en este punto de muestreo es 3.9 el oxígeno disuelto es de 5.39 ppm, los sólidos totales disueltos tiene valores de 467 mg/L, la conductividad es 933 μ s/cm, la temperatura es de 9.25 °C y la turbidez es de 0.1 FNU. Los valores de los 18 elementos químicos son indicados por MINAM (2017).

Confluencia río Patara y río Cacachara (muestra EPG-24).

Las aguas provenientes del río Patara y Cacachara tiene también influencia de aguas que se originan en fuentes termales, su área es de 11.5 Km², contiene mayormente depósitos cuaternarios de origen fluvio-glaciar, ferricretas, bofedales y afloramientos rocosos del Grupo Barroso y Formación Sencca. Los fragmentos de rocas de los depósitos cuaternarios son esencialmente volcánicos (ver anexo 1 y 2). Una particularidad de estos depósitos son las ferricretas que están relacionadas a flujos de agua con pH ácidos, estos presentan capas de fragmentos de rocas con formas subredondeadas con más de 50 cm de espesor con cemento y matriz de óxidos de Fe. De acuerdo a la figura 52, existe ocurrencia decreciente desde el Al, B, Mn, Zn, As, Fe, Cu hasta el Ni en muestras de agua; en sedimentos, presentan contenidos decrecientes desde el As, Mn, Ba, Zn, B, Hg, Pb, Cu hasta el Cr; en ambos tipos de muestras ocurren concentraciones diferenciadas de Mn, As, Zn, B y Cu.

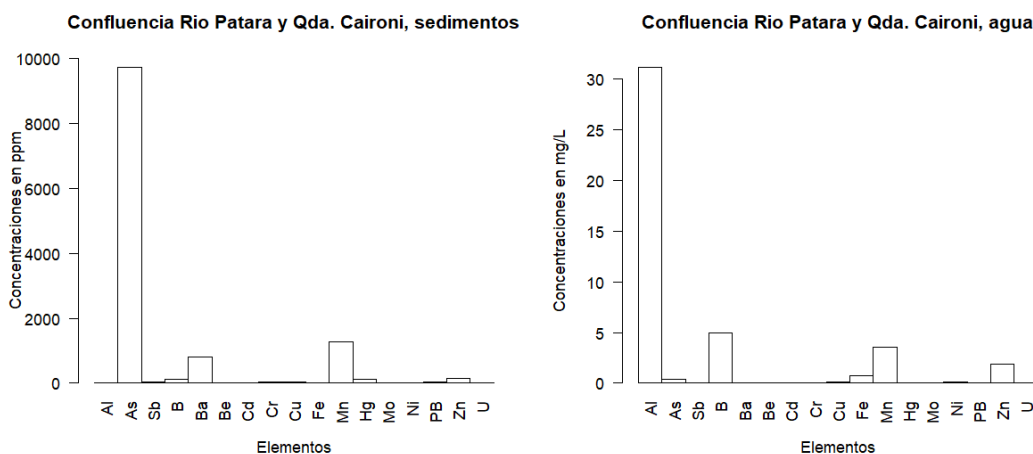


Figura 52. Diagrama barras de muestras de agua y sedimentos (muestra EPG-24)

Las concentraciones de Al en agua provienen de la disolución de filosilicatos, los elementos Mn, Zn, As, Fe, Cu y Ni, están presentes en minerales que componen las rocas de los depósitos cuaternarios. El As en muestras de sedimentos proviene de la meteorización física de rocas y sulfuros de hierro con arsénico. El pH en este punto de muestreo es 4.54 el oxígeno disuelto es de 4.5 ppm, los sólidos totales disueltos tiene valores de 1156 mg/L, la conductividad es 23.5 μ s/cm, la temperatura es de 11.59 °C y la turbidez es de 115.8 FNU. Los valores de los 18 elementos químicos son indicados por MINAM (2017).

Río Patara principal (muestra EPG-12).

La muestra que se extrajo en esta unidad hidrográfica, recolecta aguas que provienen del río Cacachara, quebradas Caironi, Palleutani, Jachacuhajhuira, fuente termal y afluente con fuentes termales, tiene un área de 9.96 Km². Contiene rocas de la Formación Sencca y depósitos cuaternarios de origen fluvio-glaciar y aluvial. Las rocas volcánicas están compuestas por tufos piroclásticos de composición riolita y los depósitos cuaternarios contienen gravas y arenas con estratificación incipiente. Los sedimentos forman secuencias de estratos que llegan a medir hasta 5 m, y su composición muestran materiales de origen volcánicos con matriz de arenas y cementos de óxidos de hierro y sulfatos (ver anexo 1 y 2). La figura 53, demuestra la ocurrencia en forma decreciente de Al, B, Mn, Fe, Zn, As hasta Cu en muestras de agua; en las muestras de sedimento, las concentraciones en forma decreciente van desde el Mn, Ba, Zn, As, Cu, Hg, Cr, Pb, B, Ni, Mo hasta el U; en ambos tipos de muestras se puede observar ocurrencia diferenciada de Mn, Zn, As, Cu, Fe y B.

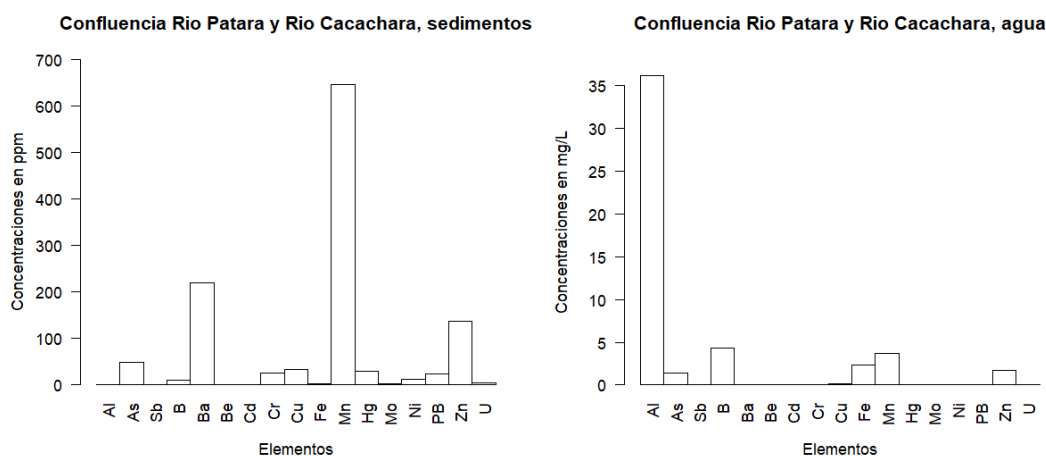


Figura 53. Diagrama barras de muestras de agua y sedimentos (muestra EPG-12)

Las aguas del lecho de río muestran coloraciones blancas hasta amarillas, las cuales tiñen a los cantos rodados y gravas, estos en sectores donde el caudal es débil forman costras a partir de precipitados que cementan a los depósitos fluviales. El pH en este punto de muestreo es 4.5, el oxígeno disuelto es de 5.32 ppm, los sólidos totales disueltos tiene valores de 1288 mg/L, la conductividad es 2576 μ s/cm, la temperatura es de 9.34 °C y la turbidez es de 3.5 FNU. Los valores de los 18 elementos químicos son indicados por MINAM (2017).

4.2. Evaluación de minerales carbonatados para neutralizar el DAR.

4.2.1. Caliza (calcita)

A. Características generales

La muestra de mano tiene una coloración blanca con tonalidades cremas a amarillas en donde se observan minerales no coloreados en su mayor parte y coloreados rellenando en fracturas y porosidades; tiene comportamiento muy compacto (Figura 54); se obtuvo en una secuencia intercalada de calizas, lutitas y margas verdes.

Textura: Clástica () No clástica (X)

Estructura interna: presenta una nodulación producto de hidrotermalismo.

Origen: Químico (X); Orgánico (); Evaporítico (); Hidrotermal (); otro ()

B. Composición mineralógica (%)

Composición mineralógica principal: carbonato de calcio (calcita) en un 90%.

Composición mineralógica secundaria: óxidos de manganeso (pirolusita) 6% y ópalo en venillas 4%.

Relleno: la pirolusita actúa como relleno de fracturas y en dendritas.

Tamaño de grano: en general menores a 1 mm

Los componentes mineralógicos son de origen: Aloquímico/Ortoquímico (X); Biogeoquímico ()

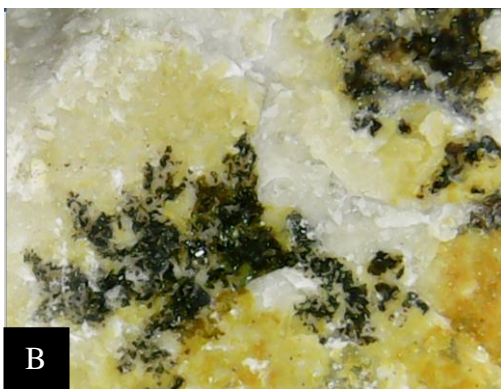
C. Textura de roca no clástica

Masiva o amorfa (), Oolítica (), Pisolítica (), Esferulítica (), Sacaroide (), Fibrosa (), Coloforme (), Porosa (), Fosilífera (), Micrita y dismicrita (), Micrita fosilífera (), Biomicrita (), Bioesparita (), Mudstone (), Wackestone (), Packstone (), Grainstone (), Boundstone (), Carbonato cristalino (X).

D. Observaciones:

La muestra presenta calcedonia en venillas como agregado botroidal, de espesores milimétricos, lo que indica que sufrió un evento hidrotermal pervasivo selectivo de intensidad baja a moderada.

E. Foto de la muestra:



*Figura 54. Muestra de caliza (A).
Pirolusita como agregado dendrítico (B), microcristales de calcita (C), geodas y
venillas de calcedonia (D y E).*

4.2.2. Travertino (aragonito)

A. Características generales

La muestra de mano tiene una coloración blanca amarillenta en donde se observan minerales en su mayor parte no coloreados y coloreados que ocurren en porosidades y fracturas; tiene comportamiento moderadamente compacto (Figura 55), esta se obtuvo en una secuencia de conglomerados y areniscas con cemento de carbonatos.

Textura: Clástica () No clástica (X)

Estructura interna: presenta unas pequeñas capas de espesores de 2cm producto de hidrotermalismo.

Origen: Químico (); Orgánico (); Evaporítico (); Hidrotermal (X); otro ()

B. Composición mineralógica (%)

Composición mineralógica principal: carbonato de calcio (aragonito) en un 95%.

Composición mineralógica secundaria: óxidos de manganeso (pirolusita) 5%.

Relleno: la pirolusita actúa como relleno de geodas.

Tamaño de grano: en general entre 0.5 mm a 1 mm.

Los componentes mineralógicos son de origen: Aloquímico/Ortoquímico (X); Biogeoquímico ()

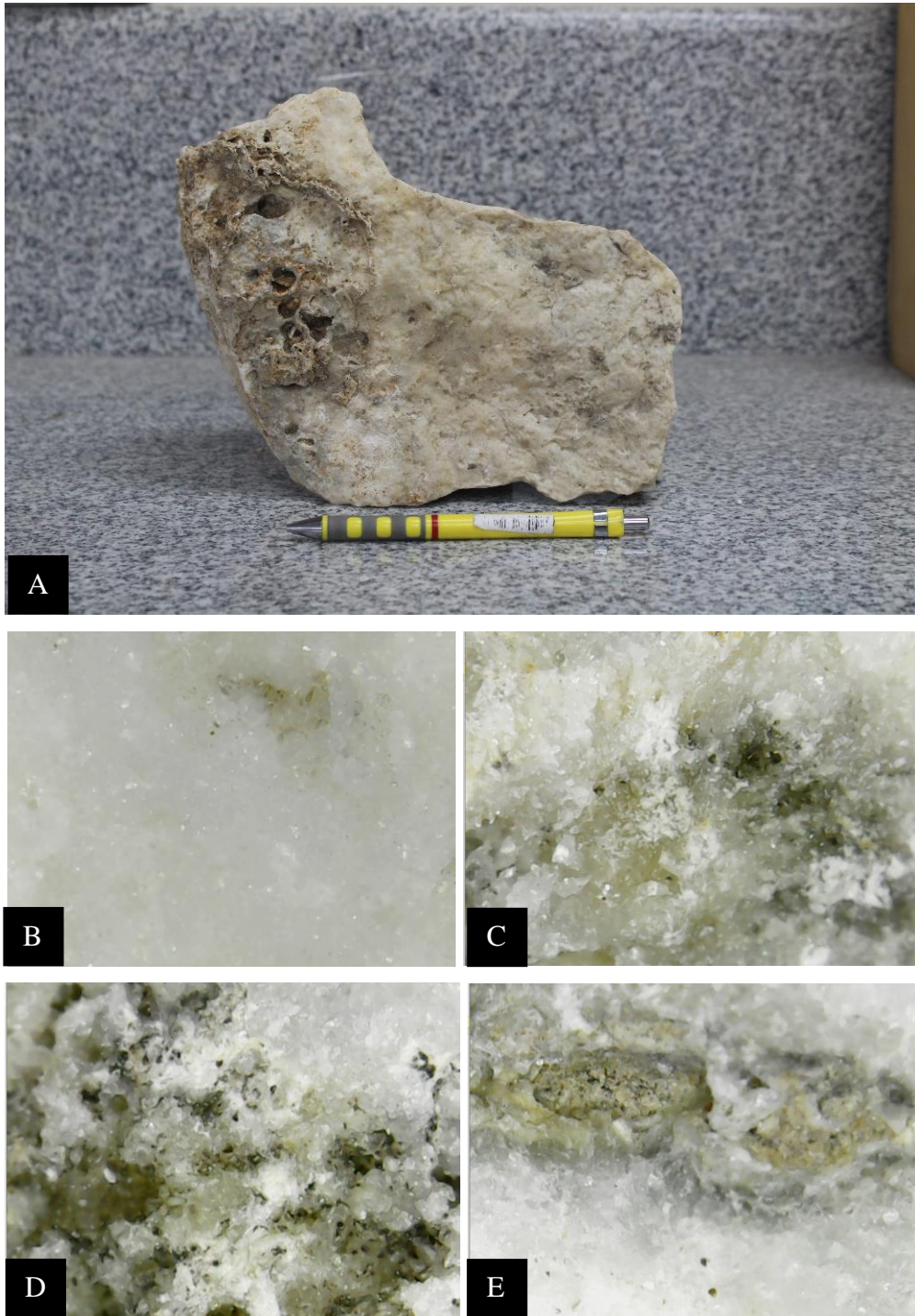
C. Textura de roca no clástica

Masiva o amorfa (X); Oolítica (); Pisolítica (); Esferulítica (); Sacaroide (); Fibrosa (); Coloforme (); Porosa (); Fosilífera (); Micrita y dismicrita (); Micrita fosilífera (); Biomicrita (); Bioesparita (); Mudstone (); Wackestone (); Packstone (); Grainstone (); Boundstone (); Carbonato cristalino (X).

D. Observaciones:

La muestra presenta oquedades producto de la degasificación de CO₂ durante la precipitación del aragonito por el cambio de temperatura. Presenta un bandeamiento producto de la formación propia de la roca.

E. Foto de la muestra:



*Figura 55. Muestra de travertino (A)
Microcristales de aragonito (B), pirolusita diseminada (C y D), oquedades con
textura “geoda” de la desgasificación que ocurre cuando el aragonito precipita (E).*

4.2.3. Dolomía (dolomita)

A. Características generales

La muestra de mano tiene una coloración gris oscura en donde se observan minerales no coloreados y coloreados en fracturas; tiene comportamiento muy compacto (Figura 56), esta muestra se obtuvo en los alrededores de la Mina San Vicente de Chanchamayo.

Textura: Clástica () No clástica (X)

Estructura interna: presenta bandeamiento producto de la precipitación de dolomita dentro del mar.

Origen: Químico (X); Orgánico (); Evaporítico (); Hidrotermal (); otro ()

B. Composición mineralógica (%)

Composición mineralógica principal: carbonato de calcio y magnesio (dolomita) en un 90%.

Composición mineralógica secundaria: antracita 5%, esfalerita o blenda 4% y pirita 1%.

Relleno: presenta dolomita como rellenos en venillas.

Tamaño de grano: en general menores a 2 mm

Los componentes mineralógicos son de origen: Aloquímico/Ortoquímico (X); Biogeoquímico ()

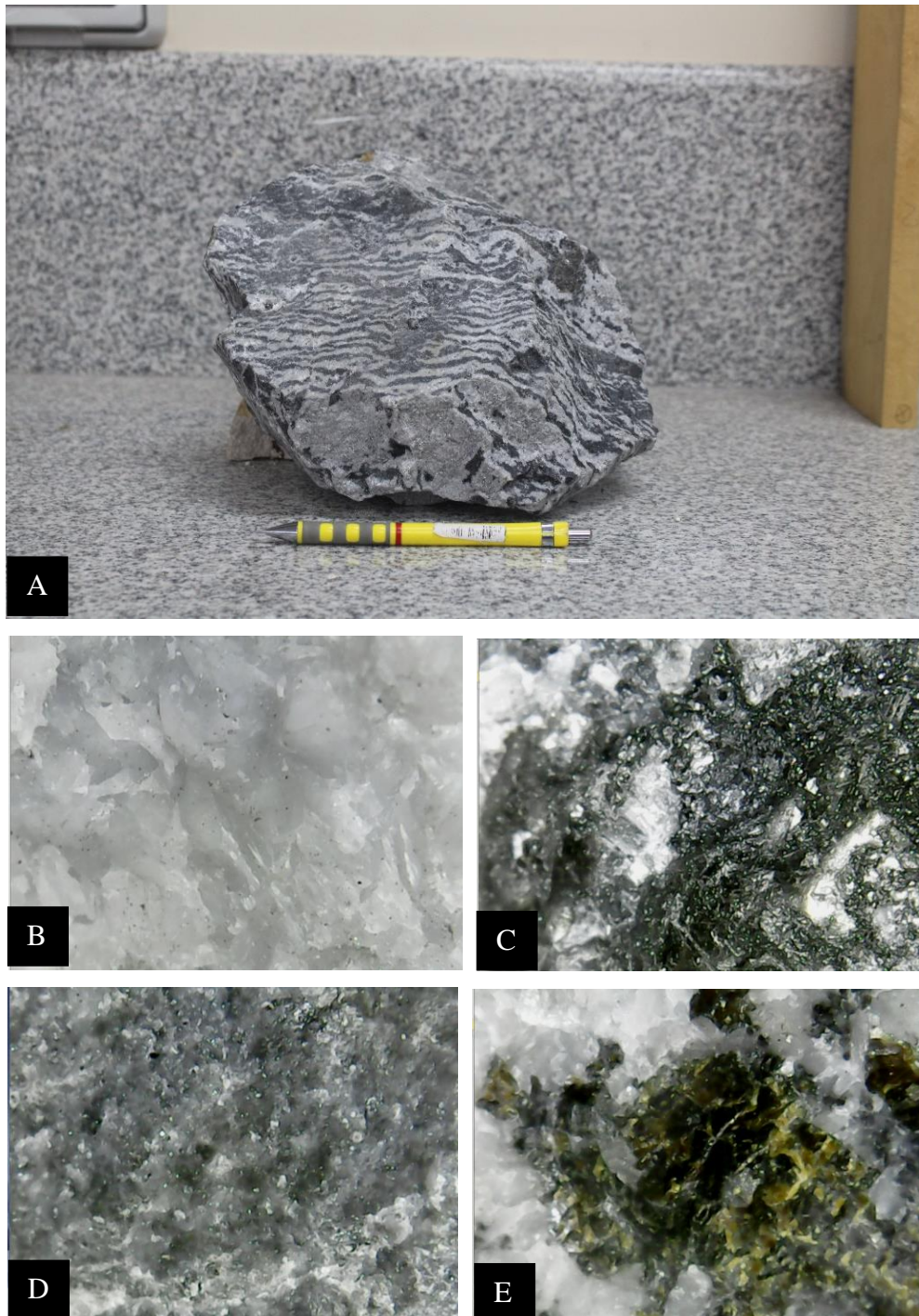
C. Textura de roca no clástica

Masiva o amorfa (X); Oolítica (); Pisolítica (); Esferulítica (); Sacaroide (); Fibrosa (); Coloforme (X); Porosa (); Fosilifera (); Micrita y dismicrita (); Micrita fosilifera (); Biomicrita (); Bioesparita (); Mudstone (); Wackestone (); Packstone (); Grainstone (); Boundstone (); Carbonato cristalino ().

D. Observaciones:

La muestra tiene una textura tipo “cebra”, de precipitación sistemática de minerales carbonatados en medio acuoso. Tiene dolomita euhedral, en venillas con espesores variados hasta centimétricos, antracita y pirita diseminada.

E. Foto de la muestra:



*Figura 56. Muestra de dolomía (A)
Microcristales euhedrales de dolomita mayores a 1mm (B), antracita (C),
microcristales de dolomita de color gris (D), esfalerita o blenda incluidas en
dolomita (E).*

Sin tomar en cuenta la granulometría se presenta la figura 57, en donde se muestra los tres tipos litológicos (caliza, travertino y dolomía) luego de ser sometidos a reacciones químicas para atenuar el DAR. Al inicio de la experimentación el pH era de 3.1 (línea roja), luego se obtuvo valores de por encima de 4 hasta llegar a 6.58 con el travertino.

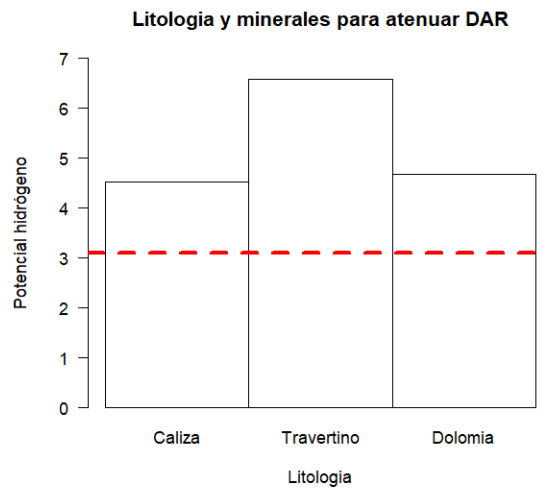


Figura 57. Muestra de tipos litológicos y mejor resultado para atenuar el DAR

De acuerdo a la fase de experimentación (Figura 57) se determinó que las características mineralógicas del travertino como roca sedimentaria, presenta más efectividad para atenuar el DAR en la zona de estudio; esto principalmente por sus características físicas (porosidad) cuando este se forma por procesos hidrotermales; esto hace que las reacciones químicas ocurran rápidamente (cohesión intramolecular molecular débil). Según, Aduvire (1991), el uso de carbonatos, está dentro del método químico para estabilización de DAR, en el cual se adiciona materiales alcalinos.

4.3. Evaluación granulométrica carbonatada para neutralizar el DAR.

4.3.1. Caliza (1½", 1", 1/2")

De acuerdo a la tabla 16 se observa que, luego de 4 horas con 13 minutos después de la experimentación se acumuló 410 ml de DAR tratado y esto mostro los siguientes valores en la granulometría con mejor actuación: el pH subió desde 3.06 hasta 4.56; el oxígeno disuelto también se incrementó desde 1.75 a 2.15 ppm; la conductividad se acrecentó desde 94.1 hasta 779 $\mu\text{s}/\text{cm}$; los sólidos disueltos bajaron de 470 hasta 390 ppm, las turbidez se mantuvo constante 1000 FNU; la temperatura aumento de 14.5 hasta 15.44 $^{\circ}\text{C}$. En cuanto al DAR retenido, es decir el que quedo en el contenedor del DAR durante la experimentación; se observó que el pH en la granulometría 1/2" subió hasta 6.48, llegando casi a neutralizar el drenaje ácido de roca. En cuanto a los demás parámetros fisicoquímicos estos se incrementaron y varían de acuerdo al tipo de granulometría (Figura 58).

Tabla 16

Parámetros fisicoquímicos, después de la experimentación con caliza

Granulometría		Potencial de hidrogeno	Oxígeno Disuelto	Conduc tividad	Solidos Totales (TDS)	Turbidez	Tempera tura
		pH	ppm	$\mu\text{s}/\text{cm}$	ppm	FNU	$^{\circ}\text{C}$
Inicio	1/2"	3.06	1.75	94.1	470	11.8	14.45
DAR luego del tratamiento	1½"	4.53	2.09	779	390	1000	15.44
	1"	4.4	2.14	921	464	1000	15.48
	1/2"	4.36	2.15	684	342	1000	15.56
DAR retenido durante el tratamiento	1½"	5.91	2.06	1049	524	1000	16.65
	1"	6.21	2.01	791	396	1000	16.04
	1/2"	6.48	2.01	847	423	1000	16.02

Para el tratamiento del DAR con este tipo de roca (con mineral calcita) y según los parámetros fisicoquímicos obtenidos, podrían producirse minerales secundarios de tipo sulfatos, carbonatos y otros. La moderada atenuación del DAR con este tipo de mineral en caliza, se debe a las impurezas que contiene, un ejemplo es la sílice amorfa (calcedonia/ópalo); este mineral no tiene acción neutralizante frente al DAR; una cantera de caliza más pura sería motivo de otro trabajo de investigación. En el campo geotermal Vizcachuni, las capas cerca de las fuentes termales presenta sílice sintetizada (Cruz *et al.*, 2014).

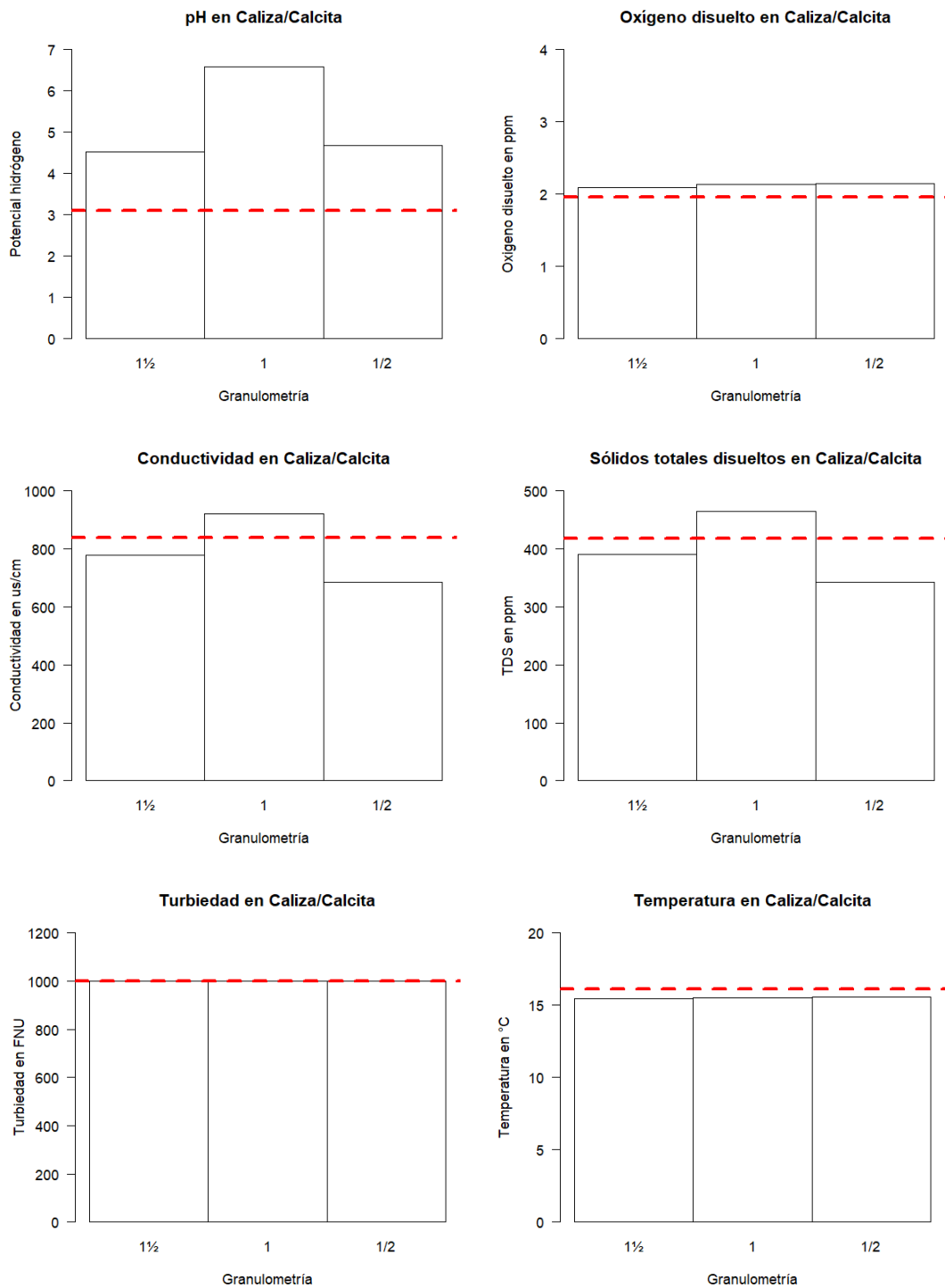


Figura 58. Parámetros fisicoquímicos, luego del tratamiento con caliza/calcita

La caliza que se utilizó contiene calcita, más del 90% como mineral. Según, López Pamo *et al.* (2002), la disolución de la calcita es mayor a pH ácidos y a altas pCO₂.

4.3.2. Travertino (1½", 1", 1/2")

De acuerdo a la tabla 17 se observa que, luego de 4 horas con 5 minutos después de la experimentación se acumuló 380 ml de DAR tratado y esto mostro los siguientes valores en la granulometría con mejor actuación: el pH subió desde 3.06 hasta 6.58; el oxígeno disuelto también se incrementó desde 1.75 a 2.03 ppm; la conductividad creció desde 94.1 hasta 7304 us/cm; los sólidos disueltos se incrementaron de 470 hasta 3615 ppm, las turbidez se mantuvo constante 1000 FNU; la temperatura aumento de 14.5 hasta 17.06 °C. En cuanto al DAR retenido, se observó que el pH en la granulometría 1½" subió hasta 6.68, llegando hasta casi la neutralidad del drenaje acido de roca. En cuanto a los demás parámetros fisicoquímicos estos se incrementaron notablemente, los cuales al igual que la caliza varían de acuerdo al tipo de granulometría (Figura 59).

Tabla 17

Parámetros fisicoquímicos, después de la experimentación con Travertino

Granulometría		Potencial de hidrogeno	Oxígeno Disuelto	Conduc tividad	Solidos Totales (TDS)	Turbidez	Tempera tura
		pH	ppm	µs/cm	ppm	FNU	°C
Inicio		3.06	1.75	94.1	470	11.8	14.45
DAR luego del tratamiento	1½"	5.07	1.92	4920	24.63	1000	16.3
	1"	6.49	1.95	4733	23.67	1000	16.58
	1/2"	6.58	2.03	7304	3651	1000	17.06
DAR retenido durante el tratamiento	1½"	6.68	1.75	5735	2869	1000	18.19
	1"	6.95	1.76	7100	3552	1000	18.2
	1/2"	6.35	1.81	8097	4049	1000	17.86

Para el tratamiento del DAR con este tipo de roca (con mineral aragonito) y según los parámetros fisicoquímicos obtenidos (TDS) el más alto dentro de los tres tipos de litología, podrían producirse minerales secundarios (sulfatos, carbonatos y otros). Según la descripción es esta roca como travertino de textura producto de desgasificación y poco compacta (porosa), podemos deducir que es la más apta para trabajos de mitigación del DAR. La precipitación de hidróxidos de Fe y Al puede ocurrir por disolución de Fe³⁺ y Al³⁺, los minerales resultantes de color blanco pueden ser carbonatos (Aduvire, 1991).

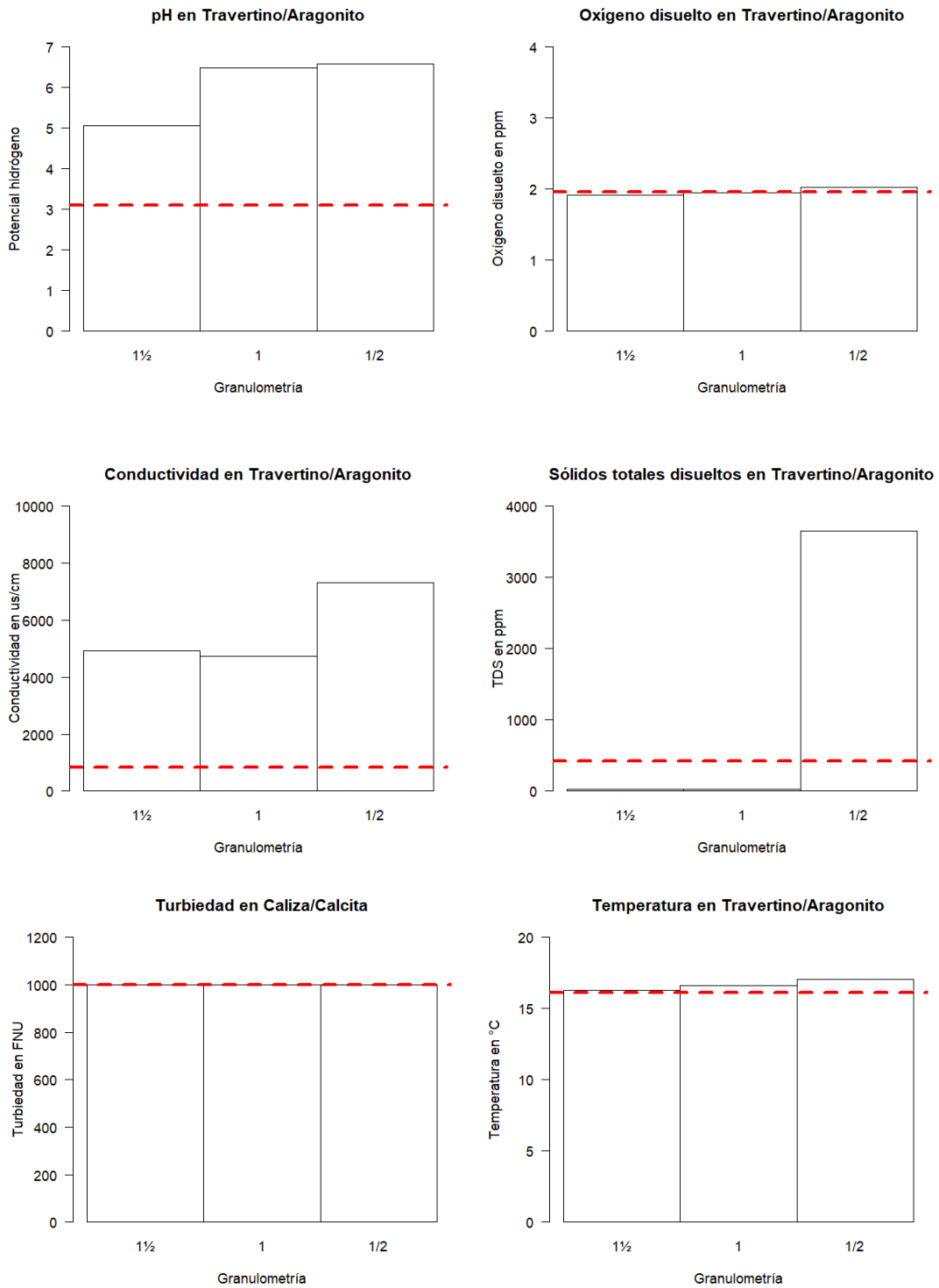


Figura 59. Parámetros fisicoquímicos, luego del tratamiento con travertino /aragonito

Según, López (2011), el travertino con tamaños de partículas de la grava son las más eficientes para neutralizar el DAR.

4.3.3. Dolomía (1½", 1", 1/2")

De acuerdo a la tabla 18 se observa que, luego de 4 horas con 40 minutos después de la experimentación se acumuló 350 ml de DAR tratado y esto mostro los siguientes valores en la granulometría con mejor actuación: el pH subió desde 3.06 hasta 4.68; el oxígeno disuelto también se incrementó débilmente desde 1.75 a 1.92 ppm; la conductividad se acrecentó desde 94.1 hasta 919 us/cm; los sólidos totales disueltos decrecieron de 470 hasta 460 ppm, las turbidez se mantuvo constante 1000 FNU; la temperatura aumento de 14.5 hasta 15.54 °C. En cuanto al DAR retenido, se observó que el pH en la granulometría 1/2" subió hasta 4.65, llegando a incrementar este parámetro. En cuanto a los demás parámetros fisicoquímicos estos se incrementaron notablemente, los cuales varían de acuerdo al tipo de granulometría (Figura 60).

Tabla 18
Parámetros fisicoquímicos, después de la experimentación con dolomía

Granulometría		Potencial de hidrogeno	Oxígeno Disuelto	Conduc tividad	Solidos Totales (TDS)	Turbidez	Tempera tura
		pH	ppm	µs/cm	ppm	FNU	°C
Inicio		3.06	1.75	94.1	470	11.8	14.45
DAR luego del tratamiento	1½"	3.98	2.03	684	342	1000	15.25
	1"	4.38	2.04	682	341	1000	15.23
	1/2"	4.68	1.92	919	460	1000	15.54
DAR retenido durante el tratamiento	1½"	4.65	2.04	706	353	1000	15.51
	1"	4.72	2.04	696	348	1000	15.57
	1/2"	4.47	2.02	678	339	1000	15.3

Para el tratamiento del DAR con este tipo de roca (con mineral dolomita) y según los parámetros fisicoquímicos obtenidos, se puede producir la separación de antracita por ser parte de esta roca. Durante la experimentación se observó un cambio de transparencia en el DAR a un gris claro, lo que indica productos secundarios luego del tratamiento con este mineral. Cabe decir que la esfalerita y dolomita contenida en esta roca genera reacciones químicas que también producirán productos secundarios luego del tratamiento. Los precipitados naturales (sínter de sílice y carbonato) de las fuentes Calacoa y Tutupaca están enriquecidas en As, Hg, Li y Sr (Steinmuller & Zavala, 1997).

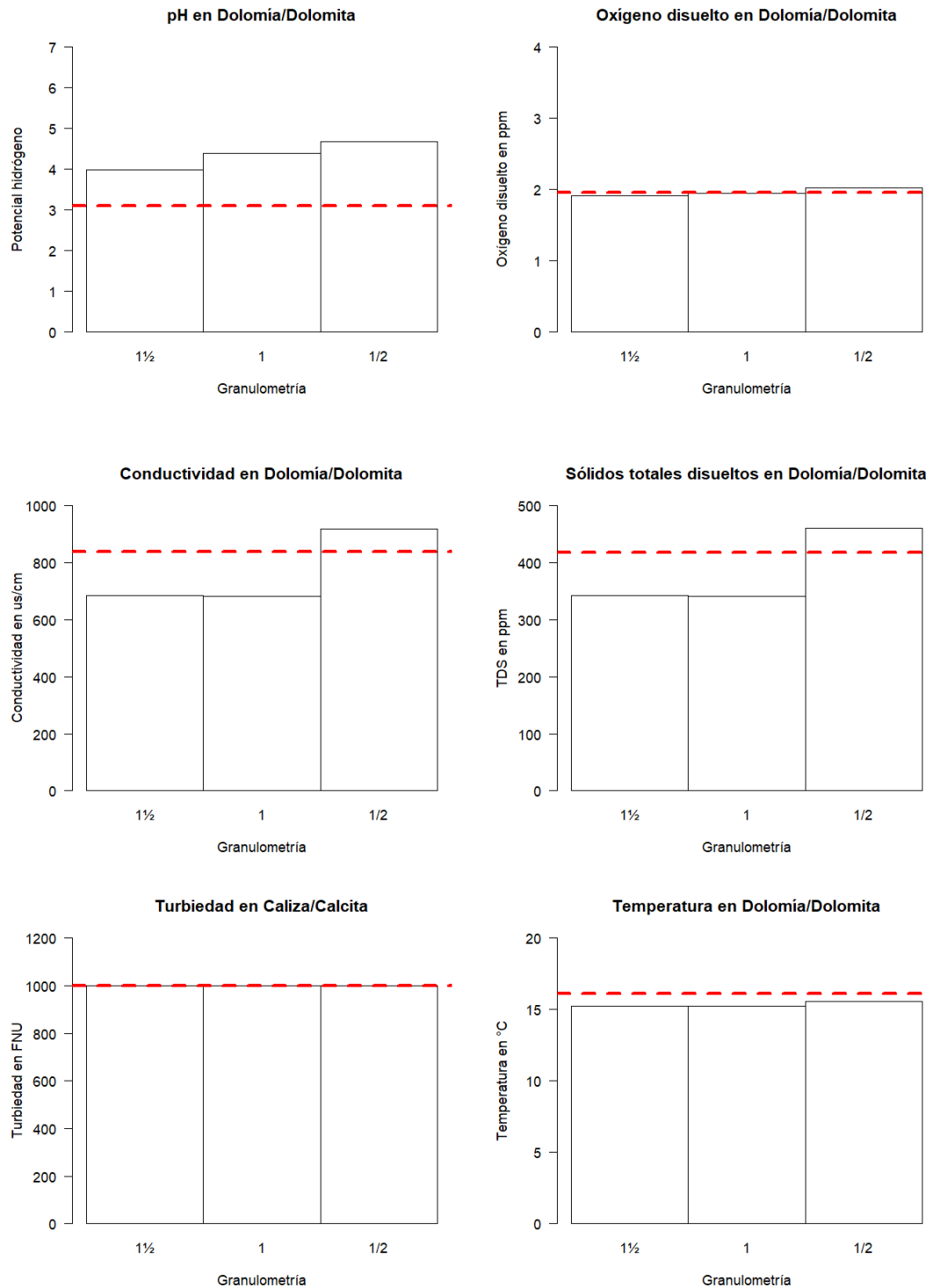


Figura 60. Parámetros fisicoquímicos, luego del tratamiento con dolomía/dolomita. La dolomía que se utilizó contiene dolomita, más del 90% como mineral. Según, Lottermoser (2007), uno de los minerales que pueden consumir ácido y neutralizar el drenaje ácido es la dolomita.

Para corroborar las reacciones químicas en los tres tipos litológicos, las muestras fueron pesadas al inicio de la experimentación y luego de la experimentación, para ver la pérdida de masa en la roca por diferente granulometría. De acuerdo a la tabla 19 se observa que la caliza con más de 90% de calcita con granulometría 1½", es la que perdió más masa, de 1000.06 gr al inicio a 995.42 gr al final del experimento (pérdida de 4.64 gr), esto indica mayor reactividad química. La litología que menos reacciona es la dolomía con granulometría de 1½" de 1000.5 gr al inicio a 1000.34 gr al finalizar el experimento (0.24 gr de pérdida de masa).

Tabla 19
Masa antes y después de la experimentación en los tipos de roca

Etapa	Muestra	Masa en gramos		
		1½"	1"	1/2"
Antes de la experimentación	Caliza	1000.06	1000.4	1000.34
	Dolomía	1000.5	1000.72	1000.67
	Travertino	1000.23	1000.98	1000.86
	Estándar			1000.34
Después de la experimentación	Caliza	995.42	996.96	994.62
	Dolomía	1000.34	1000.36	999.8
	Travertino	997.32	998.8	998.32
	Estándar			1000.21

La tabla 19, muestra la pérdida de masa a causa de las reacciones químicas. López (2011), indica que el travertino (CaCO_3) es un mineral carbonatado abundante en el Perú que consume ácido a través de la formación de bicarbonato (HCO_3) o ácido carbónico (H_2CO_3) y podemos afirmar que tiende a neutralizar las soluciones llevándolas hasta un pH neutro.

Los resultados obtenidos en este trabajo de investigación demuestran 9 afluentes que presentan acides en sus aguas, dentro los cuales 7 tienen influencia directa de rocas alteradas por hidrotermalismo con diseminación de sulfuros y 2 que se relacionan a fuentes termales que ocurren en la zona de estudio. Las concentraciones de elementos químicos de metales totales en agua indican valores que decrecen desde el Al, Mn, Fe, Cu, B, Zn, Ni, Ba hasta el As. Los elementos químicos como Hg, Sb, Pb, Cr, Mo y U, no se presentan en las muestras de agua lo que indica que no están en disolución. Las concentraciones de elementos químicos en muestras de sedimentos de quebrada muestran valores que decrecen desde el Mn, Ba, Zn, As,

Cu, Pb, Cr, Hg, B, Sb, Mo, U hasta el Al; el Mn se presenta como mineral pirolusita, el cual forma patinas negras en los rodados de los causes. Sucapuca *et al.*, (2017), reportan la presencia principal de los siguientes elementos químicos en agua de tres de los afluentes al embalse: Fe, Al, Mn, Ni, Zn y Cu; en cuanto a los sedimentos mencionan ocurrencias de Al, As, Fe y Zn.

En nuestro trabajo de investigación se tomaron 16 muestras sedimento y 19 de agua, este último con sus respectivos parámetros fisicoquímicos. Los elementos que ocurren en agua y sedimento (tabla 20) son Mn, Zn, Ba, Cu, Fe, B, As y Ni; las concentraciones de Hg y As tienen relación directa con afluentes que provienen de sectores con fuentes termales.

Tabla 20
Calidad de los sedimentos (ISQG) y niveles de efecto probable (PEL).

Elemento químico	Aguas frescas		Marinas/estuario	
	En mg.kg ¹ dw			
	ISQG	PEL	ISQG	PEL
As	5.9	17	7.24	41.6
Pb	35	91.3	30.2	112
Cd	0.6	3.5	0.7	4.2
Cr	37.3	90	52.3	160
Cu	35.7	197	18.7	108
Hg	0.17	0.486	0.13	0.7

Fuente: *Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life*

Los elementos mostrados en la tabla 20, se explican en mapas de distribución espacial a partir de la página 58, estos son comparados con estudios similares de nuestro país y el extranjero. Cabe decir que en el Perú no existe ECA de sedimentos, lo cual dificulta la interpretación de estudios ambientales, queda en manos de las autoridades tomar cartas en el asunto.

En cuanto a los parámetros fisicoquímicos del agua, en especial el pH, Sucapuca *et al.* (2017) indica un promedio de 5.795, en nuestro caso fue 5.44; se observa una diferencia posiblemente por el número de afluentes tomados los cuales vierten aguas ácidas al embalse.

Santofimia *et al.*, (2017) en el estudio hecho en el nevado Pastoruri, indican concentraciones de Fe, Al, Mg, Mn, Zn, Co y Ni, producto de alteración de la piritita y minerales aluminosilicatados, que afectan las lagunas de origen glacial. En el embalse Pasto Grande, los minerales reconocidos muestran diseminaciones de arsenopírita en rocas alteradas, silicatos (arcillas) y sulfatos producto de la alteración de rocas volcánicas.

En cuanto a las alternativas de tratamiento del DAR, Sucapuca *et al.* (2017), indican la utilización de tratamiento químico (cal) y biológico (humedales artificiales y acondicionamiento de bofedales) que asegure el cambio del pH a rangos neutros; en nuestro trabajo se plantea la utilización de un carbonato diferente (aragonito), cuya cantera se encuentra a 10 Km de la zona de estudio, no requiere compra a comparación de cal.

Los estudios hechos por PERPG (2012), indica un pH de 5.795 hasta el año 2011, en cinco afluentes que dan al embalse (Millojahaira, Anajarane, Patara, Tocco y otros); en esta evaluación el pH bajo a 5.44, lo que indica que la calidad de agua decrece en el tiempo, esto demuestra que las acciones de remediación deben ser inmediatas, para preservar la salud en los que consumen esta agua.

CONCLUSIONES

El embalse Pasto Grande muestra 9 afluentes con pH ácido, 7 provienen de rocas alteradas por hidrotermalismo y 2 proceden de fuentes termales. Los valores promedio de parámetros fisicoquímicos indican: pH (5.44), oxígeno disuelto (73.09 mg/L), conductividad eléctrica (871.61 $\mu\text{s}/\text{cm}$), sólidos totales disueltos (762.64 mg/L), turbidez (14.36 FNU) y temperatura (12.43). Las siguientes concentraciones y valores sobrepasan los ECA: en agua, As (10.69355 mg/L), Cd (0.05731 mg/L), Fe (16.2926 mg/L), Mn (5.66734 mg/L), Ni (0.1034 mg/L), Pb (0.023 mg/L); en sedimentos de quebrada, As (9898 ppm), Cd (5.2 ppm), Cr (62 ppm), Pb (681 ppm), Hg (1280 ppm).

De la experimentación hecha en los tres tipos de roca con mineralogía principal de calcita, dolomita y aragonito, el que mayor efectividad presenta en la neutralización del drenaje ácido de roca es el travertino con 90% de aragonito, esto se debe a la estructuración cristalográfica durante su formación (porosidad).

La granulometría con mayor efectividad para mitigar el DAR es el que tiene partículas del tamaño de 1/2" del travertino, el cual mostró un cambio de 3.1 de pH a 6.58 en cuatro horas de tratamiento.



RECOMENDACIONES

Para incrementar información de parámetros fisicoquímicos y concentraciones en el embalse se puede hacer la toma de datos en épocas de estiaje y lluvia, esto para comparar los cambios de valores en diferentes épocas. Lo mencionado ayudará a una mejor comprensión hidrogeoquímica de la zona estudiada. Se debe muestrear los afluentes por aniones y cationes. Las fuentes termales requieren más muestras con análisis de agua por metales totales y disueltos.

Se deben hacer también análisis químicos en los DAR tratados con los tres tipos de mineralogía, en los cuales se debe conocer los cationes, aniones, metales totales y metales disueltos producido luego de la experimentación. Además, se debe hacer estudios de difracción de rayos x (DRX) para saber la mineralogía de los productos mineralógicos producidos en forma natural y luego de la experimentación en los afluentes del embalse; esto puede ayudar a predecir reacciones químicas dentro del embalse.

BIBLIOGRAFÍA

- Aduvire, O. (1991). Drenaje Ácido de Mina. Generación y Tratamiento. *Instituto Geológico y Minero de España*, 51.
- Aduvire, O. (2006). Drenaje Ácido de Mina. Generación y Tratamiento. *Instituto Geológico y Minero de España*, 51.
- Albarède, F. (2009). *Geochemistry an Introduction* (Second Edi). Cambridge University Press. New York USA.
- Aliaga, E., Palomino, E., Yupanqui, E., Salvador, M., Bobadilla, M., Hilden, F., & López, N. (2019). Capacidad de las plantas nativas en ambientes con drenaje ácidos para la bioacumulación de metales pesados. *Aporte Santiaguino*, 12(2), 9–20.
http://revistas.unasam.edu.pe/index.php/AS_V10N2/article/view/172
- Alonso, J. (2020). La Tierra se calienta, los Andes se derriten. *Dw*, 1, 2–3.
<https://www.dw.com/es/la-tierra-se-calienta-los-andes-se-derriten/a-52308279>
- Alvarez, C., & Ari, G. (2021). Uso de imágenes satelitales para la localización de zonas mineralizadas con potencial generación de drenaje ácido de roca en la unidad minera Florencia - Tucari. *Informe Tecnico OEFA*, 1–24.
- Álvaro Gallo, A. (2010). *Mineralogía y geoquímica de sulfatos secundarios en ambientes de drenaje ácido de mina. Implicaciones ambientales en el área minera del yacimiento de San Miguel (Faja Pirítica Ibérica)*. 252.
- ANA. (1980). Estudio Integral de las Cuencas de Tacna y Moquegua, Proyecto Pasto Grande. Prospecciones Geoelectricas y Geosismicas en el Tunel Chilota-Humajalso y Vaso. *Autoridad Nacional Del Agua*.
- ANA. (2018). *Clasificación de cuerpos de agua continentales superficiales*. 1, 113.
<https://www.ana.gob.pe/publicaciones/clasificacion-de-los-cuerpos-de-agua-continentales-superficiales>

- Arendt, C. A., Hyland, E. G., & Piliouras, A. (2021). The Geological Consequences of Global Climate Change. In *Encyclopedia of Geology* (2nd ed., Issue March 2019). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.12499-6>
- Ávila, H., Quintero, E., Angulo, N., Cárdenas, C., Araujo, M., Morales, N., & Prieto, M. (2014). Determinación de metales pesados en sedimentos superficiales costeros del Sistema Lago de Maracaibo, Venezuela Ciencias Ambientales. *Multiciencias*, *14*, 16–21.
- Ávila Perez, H., García Ibañez, S., & Rosas Acevedo, J. L. (2015). Análisis de componentes principales en un ecosistema léntico de México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, *2*(2), 43–53.
- Bald, J., Borja, A., Franco, J., Castro, R., & Puig, J. (1999). El análisis de componentes principales (acp) como herramienta de cálculo cuantitativo del impacto ambiental en el medio marino. *V Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, May 2015*, 1001–1014.
- Betancourt, C., & Suarez, R. (2010). Influencia de procesos autóctonos y alóctonos sobre las características físicoquímicas del embalse Paso Bonito, Cienfuegos, Cuba. *Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos*, *26*, 257–267.
- Betrie, G. D., Sadiq, R., Morin, K. A., & Tesfamariam, S. (2015). Ecological risk assessment of acid rock drainage under uncertainty: The fugacity approach. *Environmental Technology and Innovation*, *4*, 240–247. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2015.07.004>
- Byrappa, K., Yoshimura, M., & Yoshimura, K. B. and M. (2001). Handbook of Hydrothermal Technology. In *Noyes publications*. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780815514459500027>
- Caceres, V. D. humberto. (2008). *Exploracion geologica y geoquimica del prospecto de cobre texas, cordillera domeyko, II región, Chile*. 84.

- Canadian Council of Ministers of the Environment. (2004). Canadian Environmental Quality Guidelines Canadian Council of Ministers of the Environment, 2004. *Quality, Ccme 1991*, 1–8.
- Carpio, J., & Peña, F. (2020). Hidrogeología de la Cuenca del Río Tambo. *Instituto Geológico Minero y Metalúrgico*.
- Carretero, M. I., & Pozo, M. (2007). *Minerología aplicada ala salud medio ambiente* (p. 397). Thomson Editores. Madrid España.
- Cereceda, C., Vasquez, S., Maquera, V., Chapilliquen, P., García, A., Santos, B., & Ng, W. (2016). Fuentes Naturales De Drenaje Ácido : Cuenca Del Río Tambo (Puno-Moquegua). *Instituto Geológico Minero y Metalúrgico*, 1–4.
- Cruz, V., Rodriguez, V., & Cacya, L. (2014). *Caracterización y Evaluación del Potencial Geotérmico de la Región Moquegua*.
- Dold, B. (2017). Acid rock drainage prediction: A critical review. *Journal of Geochemical Exploration*, 172, 120–132.
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.09.014>
- Echavarría, L. E. (2004). Los fluidos hidrotermales formadores de la mineralización epitermal el Dorado-Monserrat, Macizo del Deseado. *Revista de La Asociacion Geologica Argentina*, 59(1), 70–82.
- Feige Gault, K. B., Gammon, P., & Fortin, D. (2015). A geochemical characterization of cold-water natural acid rock drainage at the Zn-Pb XY deposit, Yukon, Canada. *Applied Geochemistry*, 62, 35–47.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.06.003>
- Fernández, M., & Guardado, R. M. (2021). *Evaluación del Índice de Calidad del Agua (ICAsup) en el río Cabaña , Moa-Cuba Evaluation of Water Quality Index in Cabaña River , Moa-*. 105–119.

- Herrero Barrero, T. (2014). *Impacto de los drenajes ácidos en los ecosistemas acuáticos producidos por la minería del carbón en El Bierzo: bioacumulación de metales pesados y evolución de las comunidades biológicas*. 306.
- Jesús, M., & Pérez, M. (2014). Meteorización química. *Enseñanzas de Las Ciencias de La Tierra*, 22, 230–230.
- Kotlyakov, V. M. (2015). El cambio climático y la glaciación de la Tierra. *Análisis Espacial y Representación Geográfica: Innovación y Aplicación*, 2171–2174. http://congresoage.unizar.es/eBook/trabajos/229_Kotliakov.pdf
- López, H. (2011). *Tratamiento Anaeróbico De Aguas Acidas De Mina Con Travertino Y Compost a Escala De Laboratorio*. 92. <http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/2159/LopezGutierrez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- López Pamo, E., Aduvire, O., & Baretino, D. (2002). Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: Estado actual y perspectivas de futuro. *Boletín Geológico y Minero*, 113(1), 3–21.
- Lottermoser, B. G. (2007). Mine Wastes. Characterization, Treatment, Environmental Impacts. In *Springer: Vol. Second*. Springer-Verlag. Heidelberg-Berlin.
- Macheyeki, A. S., Xiaohui, L., Kafumu, D. P., & Feng, Y. (2020). *Aplied Geochemistry, Advances in mineral exploration techniques*.
- Mar, G., & Hern, L. (2011). *Zahuapan : río - región - contaminación* (M. de L. Jiménez Guillén, Raúl; Hernández Rodríguez (ed.)). El Colegio de Tlaxcala, A.C.Mexico.
- Marfil, S., & Maiz, P. (2012). Geochemistry of Hydrothermal Alteration in Volcanic Rocks. *Geochemistry - Earth's System Processes*. <https://doi.org/10.5772/31517>

- Martel Valverde, G., C. Torres Lázaro, J., & Jara Infantes, W. H. (2018). Variación del pH en Aguas Superficiales Debido a Drenajes Ácidos de Roca en la Subcuenca Quillcay, Huaraz, Ancash. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*, 5(5), 57–68. <https://doi.org/10.36580/rgem.i5.57-68>
- MINAM. (2017). Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen disposiciones complementarias. *El Peruano*, 6–9. <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-004-2017-MINAM.pdf>
- MINEM, M. de E. y M. P. (1995). Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Acido de Minas. *Ed. 1. Lima : Dirección Nacional de Asuntos Ambientales*, 50.
- Ministerio de Salud. (2013). Protocolo de monitoreo de la calidad sanitaria de los recursos hídricos superficiales. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- Misra, K. C. (2012). *Introducción to Geochemistry, Principles and aplicaciones* (First edit). Jhon Willey & Sons, Ltd. Oxford - USA.
- Montero-Serrano, J. C., Martínez-Santana, M., Tribovillard, N., Riboulleau, A., & Garbán, G. (2009). Comportamiento geoquímico del molibdeno y sus isótopos en el ambiente sedimentario - Un resumen bibliográfico. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 44(2), 263–275. <https://doi.org/10.4067/s0718-19572009000200001>
- Murte, L. (2013). Evaluación De La Calidad Del Agua Mediante El Uso De Trazadores Leonardo. *SSRN Electronic Journal*, 1(2), 117-99 شماره 8; ص. <http://www.eldis.org/vfile/upload/1/document/0708/DOC23587.pdf> <http://socserv2.socsci.mcmaster.ca/~econ/ugcm/3ll3/michels/polipart.pdf> <https://www.theatlantic.com/magazine/archive/1994/02/the-coming-anarchy/304670/> <https://scholar.google.it/scholar?>
- Nordstrom, D. K. (2009). Acid rock drainage and climate change. *Journal of Geochemical Exploration*, 100(2–3), 97–104. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2008.08.002>

- Núñez Aylas, M., Benites Alfaro, E., & Zevallos León, M. (2014). Evaluación de la calidad del agua asociado al drenaje ácido de mina (DAM), en el río Yauli en época de estiaje distrito de Yauli – Junín, 2013. *Ucv - Scientia*, 6(1), 25–30.
- Oseke, F. I., Anornu, G. K., Adjei, K. A., & Eduvie, M. O. (2021). Assessment of water quality using GIS techniques and water quality index in reservoirs affected by water diversion. *Water-Energy Nexus*, 4, 25–34.
<https://doi.org/10.1016/j.wen.2020.12.002>
- Oyarzun, R., Cubas, P., & Higuera, P. (2010). Geoquímica Ambiental e Indicadores Geobotánicos. *Proyecto de Innovación 123 - UCM*, 1–9.
- Paz, M., & Montecinos, T. (2011). Glaciares Andinos, Recursos Hídricos y Cambio Climático. *Programa Chile Sustentable*.
- PERPG, (Proyecto Especial Pasto Grande - Moquegua). (2012). *INFORME FINAL DEL ESTUDIO: “Mejoramiento de la calidad de aguas de embalse Pasto Grande del Distrito de Carumas, Provincia Mariscal Nieto, Región Moquegua”*: Vol. TOMO 1 (pp. 11–12). <https://www.pastogrande.gob.pe/wp-content/uploads/2021/09/Tomo-1-.pdf>
- Peterson, H. E. (2014). *Unsaturated hydrology, evaporation and geochemistry of neutral and acid rock drainage in the highly heterogeneous mine waste rock at the Antamina mine, Peru (PhD Thesis)*. April, 345.
- Pirajno, F. (2009). Hydrothermal processes and mineral systems. In *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8613-7>
- Quintanilla, B. (2017). *Estadística en variables con censura: aplicación a datos medioambientales*. 1–70.
<https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/63786/6/bquintanillacTFM0617memoria.pdf>

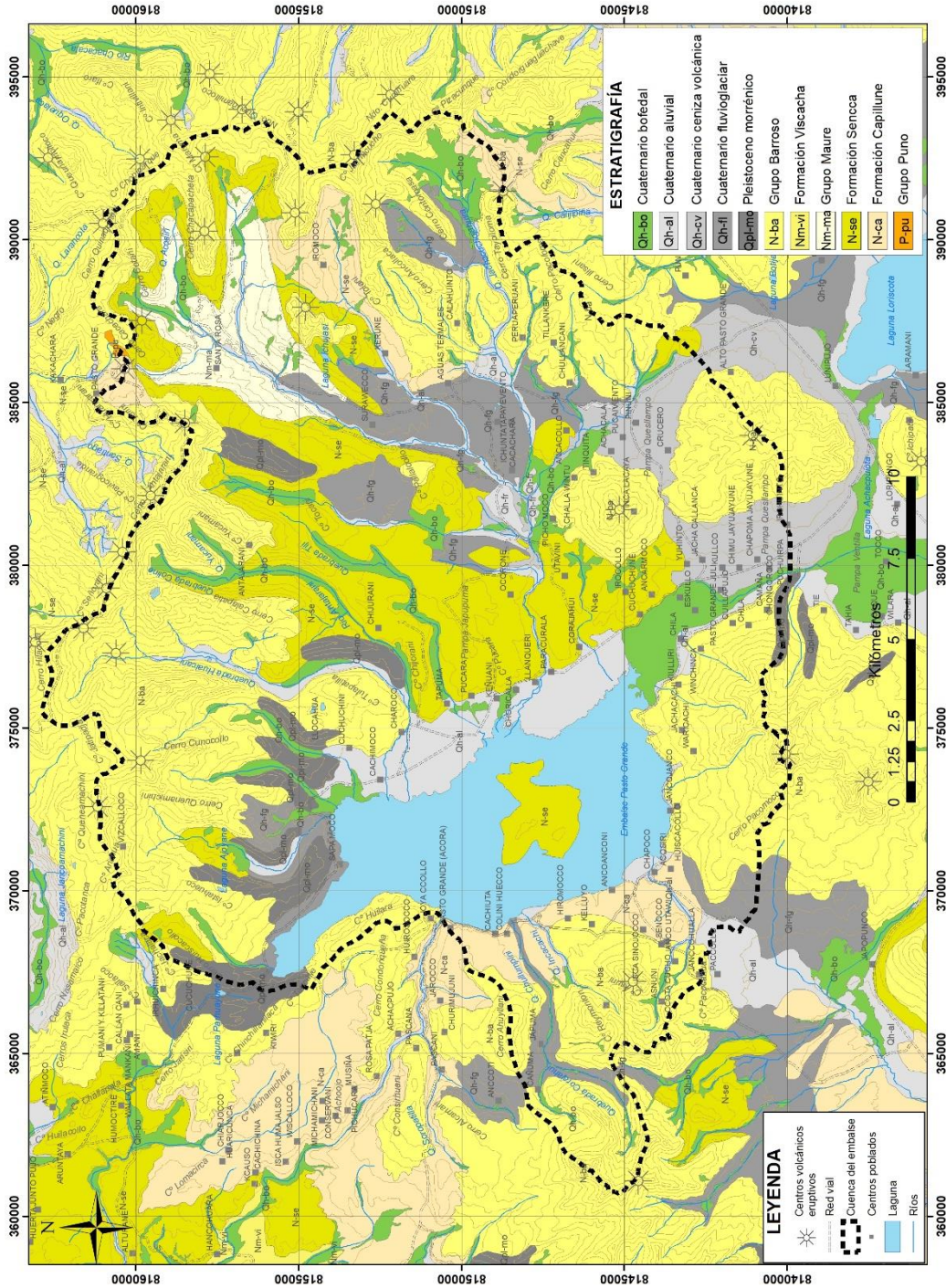


- Rivera, H., & Chira, J. (2008). *Análisis correlacional y evolutivo de los metales pesados en sedimentos del río Santa entre Huaraz – Carhuaz , departamento de Ancash* *CORRELATIONAL AND EVOLUTIVE ANALYSIS OF HEAVY METALS IN STREAM SEDIMENTS FROM SANTA RIVER. 11*, 19–24.
- Robb, L. (2005). *Introduction to Ore-Forming Processes* (L. Robb (ed.); Second edi). Blackwell Science Ltd. Oxford UK.
- Ruiz-Cubillo, P., Arauz, A., Garcia, J., Villalobos, G., Sedó, A., & Suárez Matarrita, C. (2015). Drenaje Ácido De Rocas En Taludes De La Ruta Nacional 27, San José - Caldera, Costa Rica Acid Rock Drainage on Slopes From Route 27 San José - Caldera, Costa Rica. *Revista Geologica de America Central*, 53, 25–46. <https://doi.org/0.15517/rgac.v53i0.21146>
- Sánchez, A., Choumiline, E., Estela López-Ortiz, B., Aguíñiga, S., Sánchez-Vargas, L., Romero-Guadarrama, A., & Rodríguez-Meza, D. (2010). Patrón de transporte de sedimento en bahía magdalena, baja california sur, méxico, inferido del análisis de tendencias granulométricas. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 38(2), 167–177. <https://doi.org/10.3856/vol38-issue2-fulltext-1>
- Santofimia, E., López-Pamo, E., Palomino, E. J., González-Toril, E., & Aguilera, Á. (2017). Acid rock drainage in Nevado Pastoruri glacier area (Huascarán National Park, Perú): hydrochemical and mineralogical characterization and associated environmental implications. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(32), 25243–25259. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0093-0>
- Sheoran, A. S., Sheoran, V., & Choudhary, R. P. (2010). Bioremediation of acid-rock drainage by sulphate-reducing prokaryotes: A review. *Minerals Engineering*, 23(14), 1073–1100. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.07.001>
- Shokes, T. E., & Möller, G. (1999). Removal of dissolved heavy metals from acid rock drainage using iron metal. *Environmental Science and Technology*, 33(2), 282–287. <https://doi.org/10.1021/es980543x>

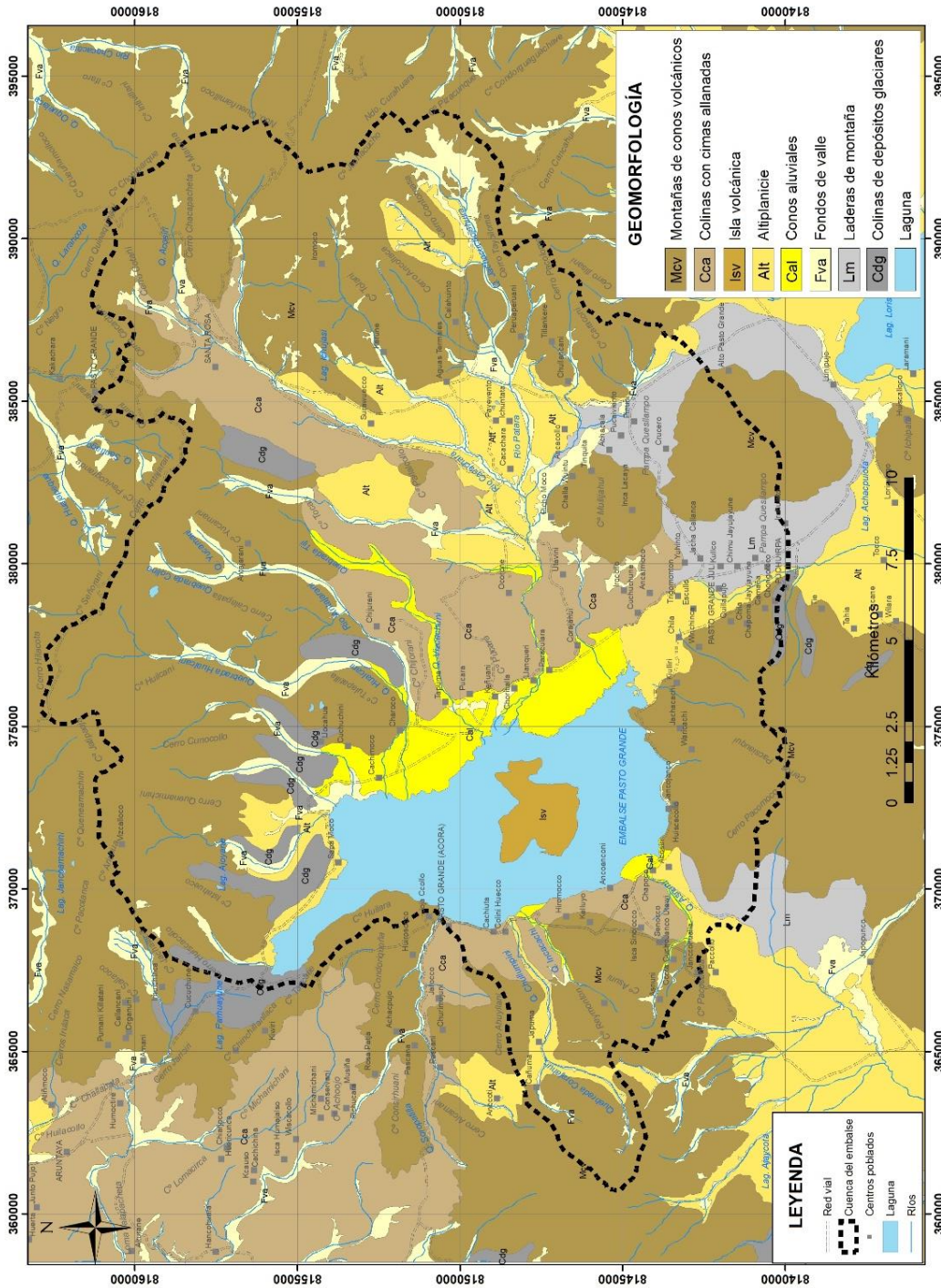
- Simmonds, V., Jahangiryar, F., Moazzen, M., & Ravaghi, A. (2017). Distribution of base metals and the related elements in the stream-sediments around the Ahar area (NW Iran) and their implications. *Chemie Der Erde*, 77(3), 429–441. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2017.07.006>
- Sracek, O., Choquette, M., Gélinas, P., Lefebvre, R., & Nicholson, R. V. (2004). Geochemical characterization of acid mine drainage from a waste rock pile, Mine Doyon, Québec, Canada. *Journal of Contaminant Hydrology*, 69(1–2), 45–71. [https://doi.org/10.1016/S0169-7722\(03\)00150-5](https://doi.org/10.1016/S0169-7722(03)00150-5)
- St-Arnault, M., Vriens, B., Klein, B., Mayer, K. U., & Beckie, R. D. (2019). Mineralogical controls on drainage quality during the weathering of waste rock. *Applied Geochemistry*, 108(May 2019), 104376. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104376>
- Steinmuller, K., & Zavala, B. C. (1997). Hidrotermalismo en el Sur del Perú. *Vigilancia de La Actividad Volcánica e Hidrotermalismo En El Sur Del Perú*, 18 Serie D.
- Stewart, W. A., Miller, S. D., & Smart, R. (2006). Advances in acid rock drainage (ARD) characterisation of mine wastes. *7th International Conference on Acid Rock Drainage 2006, ICARD - Also Serves as the 23rd Annual Meetings of the American Society of Mining and Reclamation*, 3, 2098–2119. <https://doi.org/10.21000/jasmr06022098>
- Sucapuca, F., Diaz, J., M., M., & Perez, G. (2017). Medidas De Remediación De Las Aguas Del Embalse Pasto Grande. *REVISTA CIENCIA Y TECNOLOGÍA Para El Desarrollo-UJCM*, 3(5), 83–90.
- Townley, B. K. (2006). Metalogénesis: Hidrotermalismo y Modelos de Yacimientos. *Apuntes y Referencias Documento de Trabajo*, 92.
- Tun-Canto, G. E., Álvarez-Legorreta, T., Zapata-Buenfil, G., & Sosa-Cordero, E. (2017). Metales pesados en suelos y sedimentos de la zona cañera del sur de Quintana Roo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 34(3), 157–169. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2017.3.433>

- Uria, M. Y. R., Romero, F. M., Sedov, S., & Rebolledo, E. S. (2020). Pedogenic carbonates for the treatment of acid mine drainage (AMD). Laboratory experiments. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 72(1), 1–16. <https://doi.org/10.18268/BSGM2020v72n1a250919>
- Vargas, L., Perez, V., Castañeda, D., Tacuche, E., Pajares, C., Aguilar, P., De La Cruz, C., Pascual, O., & Vargas, J. (2017). Prospección geoquímica de segunda fase en la cuenca Tambo: Subcuencas medio Tambo, Coralque, Medio alto Tambo, Ichuña y Alto Tambo. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- Xi, X., Wang, S., Yao, L., Zhang, Y., Niu, R., & Zhou, Y. (2021). Evaluation on geological environment carrying capacity of mining city – A case study in Huangshi City, Hubei Province, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 102. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102410>
- Zamora, G., & Benzaazoua, M. (2003). Predicciones de drenaje ácido de roca mediante tests geoquímicos estáticos y dinámicos. *Revista Metalúrgica*, 24, 5–13. http://www.revistasbolivianas.org.bo/pdf/rmuto/n24/n24_a02.pdf
- Zemp, M., Huss, M., Thibert, E., Eckert, N., McNabb, R., Huber, J., Barandun, M., Machguth, H., Nussbaumer, S. U., Gärtner-Roer, I., Thomson, L., Paul, F., Maussion, F., Kutuzov, S., & Cogley, J. G. (2020). Author Correction: Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016 (Nature, (2019), 568, 7752, (382-386), 10.1038/s41586-019-1071-0). *Nature*, 577(7792), E9. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1889-5>
- Zimmer, A., K. Brito Rodríguez, M., J. Alegre Oropeza, C., W. Sánchez León, J., & Recharte Bullard, J. (2018). Implementación de Dos Sistemas de Biorremediación como Estrategia para la Prevención y Mitigación de los Efectos del Drenaje Ácido de Roca en la Cordillera Blanca, Perú. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*, 4(4), 57–76. <https://doi.org/10.36580/rgem.i4.57-76>

ANEXOS



Anexo 1. Mapa litioestratigráfico del embalse Pasto Grande.



Anexo 2. Mapa geomorfológico del embalse Pasto Grande.



Universidad Nacional
del Altiplano Puno



Vicerrectorado
de Investigación



Repositorio
Institucional

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo Roger Gonzales Aliaga
identificado con DNI 01341663 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado
Doctorado, Ciencia Tecnología y Medio Ambiente

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:
“ Evaluación del Drenaje Ácido de Roca Sobre la Variabilidad Físico-Química del Agua y
Sedimentos de Quebrada en los Afluentes al Embalse Pasto Grande de la Región Puno
”

Es un tema original.

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

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

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

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

Puno 23 de Noviembre del 2023

FIRMA (obligatoria)



Huella



Universidad Nacional
del Altiplano Puno



Vicerrectorado
de Investigación



Repositorio
Institucional

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

Por el presente documento, Yo Roger Gonzales Aliaga,
identificado con DNI 01341663 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado
Doctorado, Ciencia Tecnología y Medio Ambiente

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

“ Evaluación del Drenaje Ácido de Roca Sobre la Variabilidad Físico-Química del Agua y
Sedimentos de Quebrada en los Afluentes al Embalse Pasto Grande de la Región Puno ”

para la obtención de Grado, Título Profesional o Segunda Especialidad.

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

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

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

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

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

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

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 23 de Noviembre del 20 23

FIRMA (obligatoria)



Huella