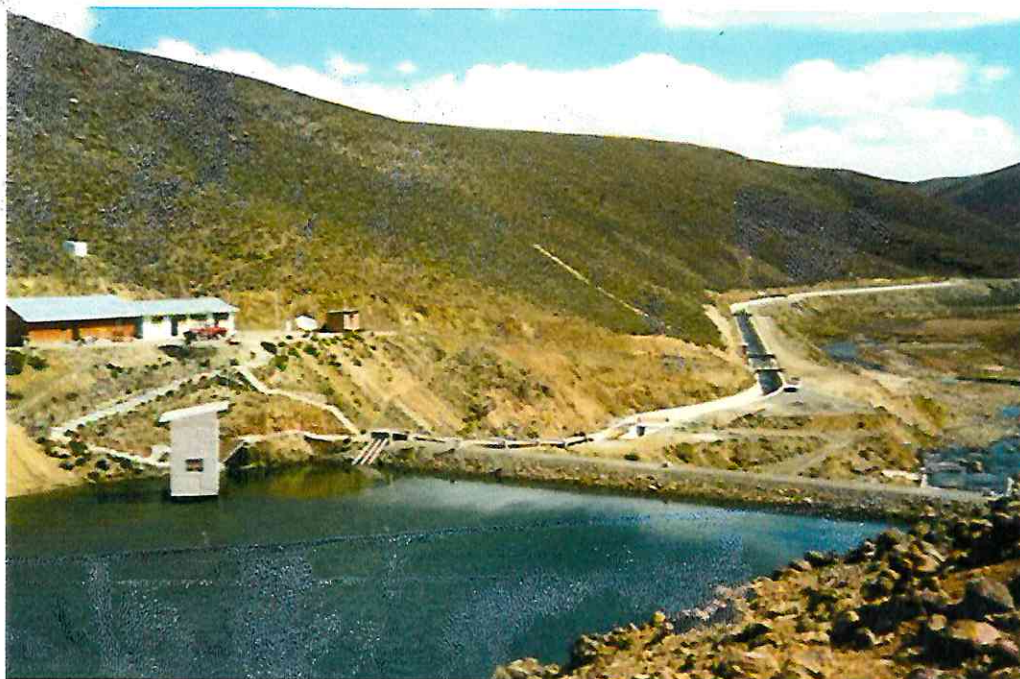




TOMO N° 6

CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA DE LA SUBCUENCA DEL RIO VIZCACHAS Y RELACIÓN AGUA – SUELO – ROCA

**ESTUDIO MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL
EMBALSE PASTO GRANDE DISTRITO CARUMAS, PROVINCIA
MARISCAL NIETO, REGIÓN MOQUEGUA**

2012

VCHI. S.A.

Contrato N° 002-2012-GG-PERPG

acciona
Ingeniería

CONSORCIO V-5

Ing. Victor Diaz Nuñez
INGENIERO CIVIL
CIP 6530

Consorcio
V-5

CONSORCIO V-5

Ing. Juan Quiroga Vite
INGENIERO GEÓLOGO
CIP 55872

TOMO N° 6

"CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA DE LA SUBCUENCA DEL RIO VIZCACHAS Y RELACIÓN AGUA-SUELO-ROCA

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	ANTECEDENTES	1
1.2	UBICACIÓN DEL PROYECTO	1
1.3	OBJETIVOS Y ALCANCES	4
1.4	EL EMBALSE PASTO GRANDE Y LA PROBLEMÁTICA DEL USO DE AGUA ALMACENADA	4
2	CARACTERIZACIÓN geológica DE LA SUBCUENCA DEL RIO VIZCACHAS	6
2.1	SITUACIÓN Y EXTENSIÓN	6
2.2	FISIOGRAFIA	6
2.2.1	Planicies Alto Andinas	6
2.2.2	Colinas	7
2.2.3	Montañas	8
2.3	GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA REGIONAL	8
2.3.1	Geomorfología Regional	8
	• Estribaciones Occidentales	9
	• Cadena de Conos Volcánicos	10
2.3.2	Aspectos Geológicos y Litológicos	11
	- Formación Maure	11
	- Formaciones Capillune	12
2.4	APORTE HIDRICO DE LA CUENCA	14
2.4.1	Subcuenca del Rio Vizcachas	14
2.4.2	Principales Fuentes de Agua Superficial	14
2.4.3	Fuentes de Agua Subterránea	18
2.5	ACTIVIDAD MINERA EN LA SUBCUENCA DEL RIO VIZCACHAS	19
2.5.1	Caracterización Mineralógica De Los Yacimientos Minerales Económicos	20
2.5.1.1	Mineralización	20
2.4.1.2	Actividades Mineras	20
2.6	PROCESOS DE INTEMPERISMO Y DESGLACIACION	21


 CONSORCIO V-5

 Ing. Víctor Díaz Nuñez
 INGENIERO CIVIL
 CIP. 6530


 CONSORCIO V-5

 Dr. César Lazcano Carreño
 BIÓLOGO
 CBP. 269


 CONSORCIO V-5

 Ing. Juan Quiroga Vite
 INGENIERO GEÓLOGO
 CIP. 55872

2.7 CONTAMINACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LA CUENCA Y SU INCIDENCIA EN EL EMBALSE PASTO GRANDE	22
2.7 GEOLOGÍA DEL EMBALSE PASTO GRANDE	24
2.7.2 Litoestratigrafía	25
3 HIDROGEOLOGÍA DE LAS AGUAS FRIAS	27
3.1 GENERALIDADES	27
3.2 FUENTES DE AGUAS SUBTERRANEAS	27
3.3 HIDROGEOLOGIA REGIONAL	28
3.3.1 Aspectos Geológicos	28
3.3.2 Aspectos Hidrogeológicos	29
3.3.3 Afloramientos de Agua	29
3.3.4 El Sistema Acuífero	30
3.3.5 Acuíferos Principales	32
3.3.6 Modelo Hidrogeológico Esquemático	33
3.3.7 Aspectos Hidrogeológicos En Zonas De Interés	35
3.3.8 Hidroquímica del Agua Superficial y Subterránea	36
4 LAS AGUAS TERMALES EN EL PROYECTO PASTO GRANDE	45
4.1 GENERALIDADES	45
4.2 CONDICIONES DEL ESTUDIO	46
4.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS TERMALES DE LA MICROCUENCA ALTA DEL RIO MILLOJAHUIRA	46
4.4 RIESGOS POTENCIALES	48
4.5 MANIFESTACIONES DE SURGENCIAS TERMALES	49
5 RELACIONES SUELO-SUBSUELO Y CALIDAD DEL AGUA	51
5.1 GENERALIDADES	51
5.2 ASOCIACIONES DE SUELO	52
5.3 PROCESO DE EROSIÓN Y GEOQUÍMICA DE SUELOS Y SEDIMENTOS	56
5.4 RELACIONES PRELIMINARES ROCA- SUELO –AGUA	57
5.4.1 Caracterización de metales movilizables en mineral mediante ensayo de generación de lixiviados	57
5.4.2 Análisis granulométricos y geoquímicos de suelos	59
5.5 ANÁLISIS DE AGUA Y SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	60
5.6 INFLUENCIA DE FACTORES AMBIENTALES EN LA GEOQUÍMICA DE SUELOS Y AGUAS	61
5.6.1 Contaminación Ambiental en Suelos	61
5.7 CALIDAD DEL AGUA EN LA SUB CUENCA DEL RIO VIZCACHAS	62
5.7.1 Calidad del agua en el embalse y sus afluentes	62



CONSORCIO V-5

Ing. Víctor Díaz Nuñez
INGENIERO CIVIL
CIP. 6530



CONSORCIO V-5

Dr. César Lazcano Carreño
BIÓLOGO
CSP. 269



CONSORCIO V-5

Ing. Juan Quiroga Vite
INGENIERO GEÓLOGO
CIP. 55872

6	RELACION DE LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRANEA CON LA CALIDAD DEL AGUA DE LOS AFLUENTES DEL EMBALSE Y CON LAS AGUAS DEL EMBALSE MISMO .	69
6.1	GENERALIDADES	69
6.2	HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA.....	70
6.3	EVOLUCIÓN GEOQUÍMICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	71
7	RELACION entre la composicion del suelo y subsuelo y las aguas subterraneas CON el comportamiento de los sedimentos de fondo del EMBALSE	73
7.1	CALIDAD DEL SUELO Y VALORES DE REFERENCIA.....	73
7.2	CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN AGUAS SUPERFICIALES.....	75
7.2.1	Fuentes de contaminación	75
7.2.2	Factores Ambientales Que Controlan La Composición De Las Aguas Naturales.....	76
7.2.3	Distribución De Las Especies Metálicas En Solución	77
7.2.4	Relación calidad agua-litología	78
7.2.1	Análisis de Agua y Sólidos en Suspensión	81
7.2.2	Contenido metálico de los sedimentos de fondo.....	81
7.2.3	Evaluación de la Contaminación de Sedimentos en el Embalse.....	82
8	INCIDENCIA DE LA COMPOSICIÓN DEL SUELO Y SUBSUELO EN EL FUNCIONAMIENTO DE LAS DIVERSAS ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN PLANTEADAS. .	84
8.1	INVESTIGACIONES DE CAMPO.....	85
8.2	TRABAJOS REALIZADOS.....	86
8.1	ASPECTOS GEOLOGICOS Y GEOTECNICOS	86

ANEXOS

ANEXO 1: MAPAS

ANEXO 2: MAPAS DE ESTACIONES DEL MUESTREO

ANEXO 3: ANÁLISIS DE LABORATORIO – AGUAS Y SEDIMENTOS DE EMBALSE

ANEXO 4: ANÁLISIS DE LABORATORIO – SUELOS Y ROCAS

ANEXO 5: MONITOREO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

ANEXO 6: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO Y GEOQUÍMICO DE SUELOS

CONSORCIO V-5

Ing. Víctor Díaz Nuñez
INGENIERO CIVIL
CIP. 6530

CONSORCIO V-5

Dr. César Lazcano Carreño
BIÓLOGO
CBP. 269

CONSORCIO V-5

Ing. Juan Quiroga Vite
INGENIERO GEÓLOGO
CIP. 55872

CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA DE LA SUB CUENCA DEL RIO VIZCACHAS Y RELACIONES AGUA-SUELO-ROCA

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

El valle del río Moquegua, por su ubicación geográfica dentro del territorio nacional es desértico y de clima árido, pero la parte alta de la cuenca hidrográfica cuenta con recursos hídricos aprovechables que son los que se utilizan en las actividades socio-económicas de la Región. En este sentido, el embalse Pasto Grande conforma prácticamente una laguna que es la fuente de agua de dominio principal dentro de la subcuenca del río Vizcachas, constituyéndose en una obra hidráulica de gran importancia estratégica para el abastecimiento de agua. El embalse Pasto Grande, se encuentran en la Zona Alto andina, y en su entorno existen otras fuentes de agua como humedales que alimentan al río Vizcachas, riachuelos y lagunas menores.

La concepción hidrológica e hidráulica primigenia del Proyecto Pasto grande, en su inicio probablemente evaluó solo la disponibilidad de los recursos hídricos existentes y se diseñó la capacidad del embalse teórico para los objetivos planteados. Sin embargo, se desconocía sobre los efectos mediatos que podrían ocurrir al almacenar grandes masas de agua, cuya calidad viene siendo impactada desde hace pocos años por causas de la contaminación natural y antropogénica que no se conocían plenamente, pero que su efecto actual, pone en grave riesgo el uso de sus aguas para los fines que fueron planteados.

Para el área del proyecto no existe información hidrogeológica relevante ni se tiene estudios hidrogeológicos específicos sobre las aguas subterráneas ni de las aguas termales en la subcuenca del río Vizcachas, tampoco sobre los sistemas geotérmicos que dan origen a las aguas termales. Sin embargo entre los estudios que describen la geotermia de la región merecen especial mención los realizados por INGEMMET de Vicentina Cruz, sobre la caracterización geoquímica de las fuentes termales alrededor del volcán Ticsani – Moquegua ubicado a 60 km al Noreste de la ciudad de Moquegua, entre las coordenada 70° 36' Oeste y 16° 44' S a 5408 msnm.

Entre los antecedentes relacionados con el estudio de impacto ambiental se tiene el realizado por OIKOS SR. Ltda., en octubre de 1996 para la empresa comunal de producción y servicios "Lago Azul" Ltda, bajo el nombre de estudio de impacto ambiental del cultivo extensivo de trucha en la represa Pasto Grande.

Finalmente se resaltan diversas publicaciones relacionadas con la geología de la zona por parte de INGEMMET, así como los estudios geológicos y de Impacto ambiental realizados por minera ARUNTANI para efecto de sus actividades de exploración, explotación y cierre de mina.

1.2 UBICACIÓN DEL PROYECTO

El embalse Pasto Grande está ubicado en la jurisdicción del distrito de Carumas, provincia de Mariscal Nieto, en el departamento de Moquegua, a una altitud de 4250 m.s.n.m., al este de la

ciudad de Moquegua. Geográficamente el área está enmarcada en las coordenadas siguientes y en el Datún Horizontal - WGS 84:

Cuadro 1.1 Coordenadas UTM de ubicación del Proyecto

Norte	Este
8 144 000 8 156 000	369 000 378 000

El acceso desde Lima es principalmente por la ciudad de Tacna donde se llega por vía aérea, para luego llegar a la ciudad de Moquegua por vía terrestre. Por la vía Torata se continúa hasta el embalse. El trayecto se recorre en aproximadamente 4 horas en vehículo liviano.

CONSORCIO V-5

Ing. Víctor Díaz Nuñez
INGENIERO CIVIL
CIP. 6530

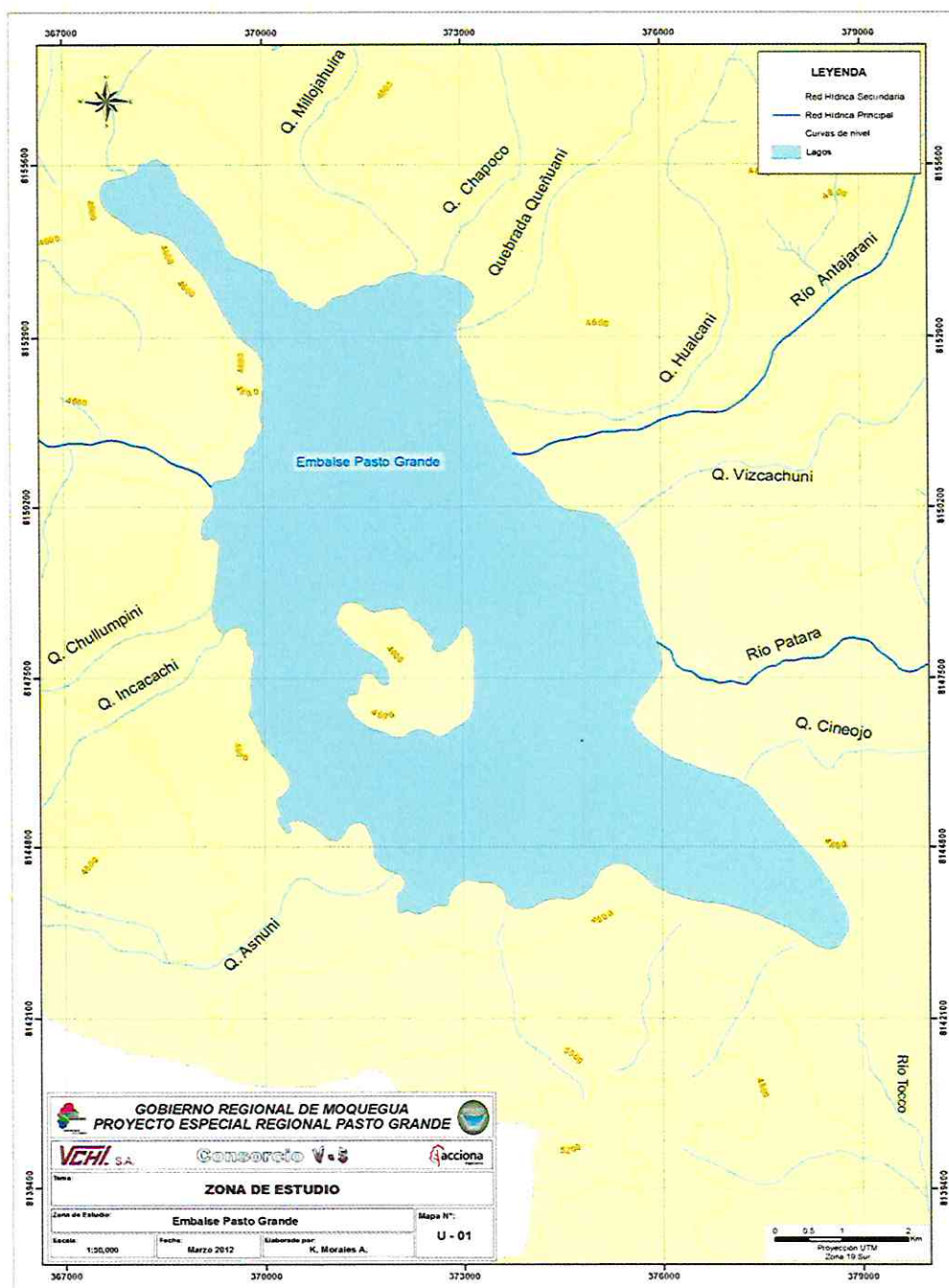
CONSORCIO V-5

Dr. César Lazcano Carreño
BIOLOGO
CBP. 269

CONSORCIO V-5

Ing. Juan Quiroga Vite
INGENIERO GEÓLOGO
CIP 55872

Figura 1.1: Mapa de Ubicación
Zona de Estudio del Embalse Pasto Grande
Distrito Carumas – Provincia Mariscal Nieto- Región Moquegua



CONSORCIO V-5

Ing. Víctor Díaz Nuñez
INGENIERO CIVIL
CIP. 6530

CONSORCIO V-5

Dr. César Lazcano Carreño
BIOLOGO
CBP. 269

CONSORCIO V-5

Ing. Juan Quiroga Vite
INGENIERO GEÓLOGO
CIP. 55872

1.3 OBJETIVOS Y ALCANCES

El objetivo del presente estudio es la caracterización geológica e hidrogeológica del área de influencia del embalse Pasto Grande, en la subcuenca del río Vizcachas y sus afluentes, a fin de proponer un modelo conceptual del funcionamiento del sistema acuífero existente, y de esta manera explicar de manera razonable las causas y efectos que producen las aguas subterráneas respecto a la contaminación de las aguas en el embalse Pasto Grande, y a la vez exponer los argumentos fundamentales que sustentan esta situación con aspectos de geología y geoquímica que explican las diversas relaciones agua-suelo-roca y su incidencia en la calidad del agua en el embalse.

En los alcances se trata de realizar una revisión detallada de toda la información relacionada con este proceso natural y antropogénico y describir las interrelaciones que existen entre los flujos que provienen de las aguas superficiales con las aguas subterráneas y la geología de la zona.

Finalmente, se propone que esta investigación conduzca a la identificación de los procesos y las causas de la contaminación que ocurren en el embalse mediante la investigación de diverso tipo en los sistemas acuíferos existentes y determinar las relaciones roca-suelo-agua y su incidencia en el comportamiento del sistema, para finalmente plantear medidas correctivas y soluciones de ingeniería, que permitan una solución factible.

1.4 EL EMBALSE PASTO GRANDE Y LA PROBLEMÁTICA DEL USO DE AGUA ALMACENADA

El embalse Pasto Grande es una de las fuentes de agua más importantes para la Región Moquegua; fue construido en 1989, para una capacidad de almacenamiento de 185 MMC; los afluentes que favorecen el llenado del embalse son: el río Tocco, Vizcachas y Pasto Grande. En el Mapa hidrográfico (Anexo1.Lamina 1) se puede observar la red de drenaje en el área de influencia del proyecto, es decir, el río Vizcachas y sus afluentes

El vaso se ha localizado el fondo de valle y las pampas hidromórficas de Pasto Grande Juli y Pasto Grande Acora; la superficie del vaso en el periodo de máximo llenado (registrado) alcanzó los 4680 ha. La morfometría es de forma "rectangular", con un ligero ensanchamiento en el centro.

Desde el punto de vista de la operación hidráulica, el objetivo principal ha sido "la utilización cada vez más eficiente del recurso hídrico, para obtener mayores beneficios, económicos y sociales, y conservar el recurso al más alto nivel de productividad". En este sentido, "el propósito principal del Embalse Pasto Grande es el de almacenar aguas en el periodo lluvioso y utilizarla en los meses secos, periodo de máxima demanda. Sin embargo, actualmente este objetivo se encuentra en grave riesgo debido a la permanente acción de procesos de contaminación natural y entrópica.

Desde la construcción de la Presa Pasto Grande (1989) han transcurrido casi 14 años desde que se dio inicio al "llenado" del Embalse Pasto Grande, y nueve (9) años de utilización de los recursos hídricos regulados para asegurar el uso poblacional en las ciudades de Moquegua e Ilo y otros centros poblados, en el afianzamiento hídrico del riego en los valles de Moquegua, Torata e Ilo, y en los planes de ampliación de la frontera agrícola y generación de energía; de aquí la importancia de evaluar no solo la eficiencia en el uso del agua almacenada, sino sobre todo la calidad de la misma.

La Red Hidrográfica aguas arriba del embalse está constituida por 3 ríos importantes: Vizcachas, Tocco y Pasto Grande, los que conjuntamente drenan y forman el embalse Pasto Grande; se localizan semi-radialmente, cuyas nacientes son la Cordillera Occidental de los Andes.

Mediante análisis de laboratorio se ha determinado exceso de sustancias y elementos químicos contaminantes en el embalse y en las aguas provenientes del sector Norte y NE de la cuenca en las micro cuencas de los ríos Millojahuirá, Hualcane que son atribuidas a procesos de contaminación por lixiviación natural en el ámbito geológico de las cabeceras de cuenca en los cerros con presencia de zonas mineralizadas y alteración hidrotermal, surgencia de aguas termales ácidas. En la microcuenca del río Cacachara, la contaminación ocurre por el desarrollo de actividad minera, pero principalmente por procesos naturales. Sin embargo, para comprender la naturaleza de los procesos que contaminan las aguas del embalse, se ha requerido de estudios geológicos, hidrogeológicos y geoquímicos. Con estudio de detalle se podrá obtener un conocimiento más integral de los fenómenos y procesos naturales que coadyuvan en el mejoramiento de las condiciones hidroquímicas y el aprovechamiento de las aguas que provienen de estas zonas que se almacenan y acumulan en el embalse mismo, Dichos estudios que se han iniciado y se vienen realizando en esta perspectiva y que, al concluirse, en esta etapa, han permitido evaluar alternativas de solución, las que se presentan en estudio integral.

En el área de proyecto, la meteorización y edafogénesis, han originado los sedimentos finos que rellenan el fondo del valle o embalse a partir de erosión de rocas mayormente volcánicas, las que han contribuido a elevar el contenido salino de las aguas superficiales que van al embalse, pero su influencia es mucho menor en los acuíferos o embalses subterráneos, por la propia naturaleza del medio geológico y del flujo de agua subterránea,

Actualmente, el Gobierno Regional de Moquegua y el proyecto Pasto Grande están trabajando en la perspectiva del mejoramiento de la calidad de las aguas del embalse afectadas por la contaminación. Este trabajo ha servido para lograr el objetivo planteado y mejorar el desarrollo agrícola-ganadero de la zona, y el uso poblacional e industrial del agua tratada sin restricción alguna.

CONSORCIO V-5

Ing. Víctor Díaz Nuñez
INGENIERO CIVIL
CIP. 6530

CONSORCIO V-5

Dr. César Lazcano Carreño
BIÓLOGO
CBP. 269

CONSORCIO V-5

Ing. Juan Quiroga Vite
INGENIERO GEÓLOGO
CIP. 55872

2 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA DE LA SUBCUENCA DEL RIO VIZCACHAS

2.1 SITUACIÓN Y EXTENSIÓN

El área de captación del río Vizcachas es de 447,49 Km². El embalse Pasto Grande y las zonas adyacentes comprendidas en el área de estudio están situadas en los pisos ecológicos superiores denominados Paramo húmedo subalpino y Tundra muy húmeda alpina.

La primera formación conocida como Puna se extiende entre los 3 900 y 4 500 msnm, y se caracteriza por presentar un clima húmedo y frígido. La topografía es variada, presentando extensos sectores de pendiente suave o con relieve ondulado limitados por quebradas poco profundas y cerros medianos. La segunda formación se extiende hasta alrededor de los 5000 msnm, interrumpida por los remanentes de los nevados perpetuos que se extienden a mayor altura. La formación presenta un clima per húmedo muy frío caracterizado porque las precipitaciones con frecuencia son de tipo sólido, manteniéndose siempre bajo el grado de congelación durante las noches. La topografía es plana con laderas y colinas de escasa pendiente. Hacia los niveles superiores, las áreas desérticas son frecuentes y las mayores elevaciones generalmente cubiertas con nieve. El área de los nevados y desiertos fríos sirve de almacenes de agua en estado sólido (nieve), que con los deshielos e infiltraciones alimentan los cauces de agua que drenan a la cuenca baja hacia la zona de bofedales y finalmente al embalse Pasto Grande

2.2 FISIOGRAFIA

En la subcuenca del río Vizcachas - embalse Pasto Grande, se reconoce la Unidad Fisiográfica Altiplano, reconocida a partir de los alrededores de la pampa de Humalso, destacándose una sucesión de conos volcánicos, desde el caserío de Chilligua hacia el Este, y que constituyen la denominada Cadena de Conos Volcánicos. Las altitudes de esta unidad comprenden los 4,200 a 4,600 msnm. La cobertura vegetal está constituida por gramíneas e ichu. La presencia de este tipo de vegetación solo permite la crianza de ovinos y camélidos americanos como actividad principal. La erosión y el transporte de sedimentos son mínimos.

Los cuerpos de agua como las lagunas y el embalse importante de Pasto Grande se encuentran en esta unidad, así como humedales que alimentan riachuelos y lagunas.

El análisis fisiográfico del área en estudio realizado tomando en consideración las geoformas existentes y la interrelación de estas con los fenómenos climáticos propios de la zona, ha permitido identificar las diferentes unidades fisiográficas, las que se describen a continuación:

2.2.1 Planicies Alto Andinas

Dentro de esta unidad mayor se encuentran las siguientes unidades menores:

- **Valle Aluvial de Relieve Plano**

Son unidades de relieve plano, originadas por la acción erosiva acumulativa de las corrientes de agua (ríos), los que han modelado las superficies existentes. Componen esta geoforma el lecho

actual del río y los planos de inundación, los que en su gran mayoría están convertidos en bofedales, debido a su condición hidromórfica. Litológicamente están constituidos por materiales no consolidados de origen fluvial y aluvial del cuaternario, provenientes de las formaciones vecinas y con poco recorrido.

- **Valle Glacial**

Son geoformas de depresión en forma de "U", originadas por la erosión glacial durante el descenso de los glaciales. Se ubican mayormente en la cabecera de las cuencas o valles aluviales.

- **Superficie de Colmatación Lagunar**

Son unidades de relieve plano, originadas por la acumulación fluvio-lagunar en superficies de pendiente planas a ligeramente inclinadas; el material que forma estas áreas ha sido transportado y depositado por agentes como el río y la nieve, relleno los depósitos algo consolidados, hasta llegar a configurar las formas actuales. Por su posición, se ha identificado 2 sub-paisajes: los que están sujetos a inundaciones periódicas o casi permanentes: superficies plano-inclinadas, de buen drenaje; y superficies planas, con drenaje imperfecto.

- **Superficies de Erosión**

Son geoformas onduladas a ligeramente onduladas, que han sido originadas por grandes eventos erosivos, los que actuaron sobre relieves heterogéneos y cuya intensidad prolongada ha desgastado las estructuras pre-existentes, que a la fecha tienen tendencia al nivelado: están constituidas por arenas y materiales gruesos, litológicamente provenientes de las rocas volcánicas cementadas y antiguas morrenas.

2.2.2 Colinas

- **Superficies Coluvio Aluviales**

Son áreas transicionales, limitadas en la parte baja por el fondo del valle y en la parte alta por las laderas de la montaña; su relieve es iniciando y poco accidentado.

Litológicamente están constituidas por depósitos no consolidados de diferentes tamaños, provenientes de las partes altas, los que han sido arrastrados por acción de las corrientes de agua (pluvial) y por la gravedad.

- **Lomadas**

Son superficies de poca altura (hasta 30 metros sobre el nivel de base local), sobre cuya superficie consolidada se observan procesos menores de erosión. Se encuentran generalmente sobresaliendo en las áreas de colmatación y cuyo origen se debe a la constante denudación de antiguas formas volcánicas de poca altura. Litológicamente están constituidas por rocas volcánicas tubáceas y poco cementadas.

- **Colinas**

Son geoformas con alturas que oscilan entre 80-100 m. sobre el nivel de base local, con pendientes que varían de 15 hasta 50%, observándose algunos procesos erosivos en sus laderas debido principalmente a la fuerte pendiente y al tipo de material. Litológicamente están constituidas por rocas volcánicas de diferente composición y relictos de morrenas antiguas; por su pendiente se han identificado en 2 sub-regiones:

Colinas con laderas moderadamente empinadas (15-25%) y Colinas con laderas empinadas (25-50%).

2.2.3 Montañas

- **Depósitos de Pie de Monte**

Son geoformas de relieve inclinado, constituidas por depósitos coluvio-aluviales y suelos residuales, los que ocupan amplios espacios ubicados al pie de las montañas, con pendientes de 4-25% (ligeramente planas a moderadamente empinadas). Litológicamente están constituidas por bloques de rocas volcánicas sobre antiguos depósitos morrénicos.

- **Montañas Denudacionales**

Unidades ampliamente distribuidas, se identifican como cumbres y estribaciones de antiguos sistemas volcánicos, los que han sido deformados y modelados por la intensa erosión y la influencia de agentes modeladores con proceso de compresión, distensión, vulcanismo y glaciación. Su origen se remonta a una serie de eventos de diferente naturaleza, los mismos que actuaron con mayor o menor intensidad según el lugar y la litología predominante. Están constituidos por rocas volcánicas variadas y algunos depósitos morrénicos.

2.3 GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA REGIONAL

Las diferentes formaciones geológicas a nivel regional y que constituyen la zona de estudio en la subcuenca del río Vizcachas son muy antiguas y datan del Terciario, vale decir, desde el Terciario Inferior hasta el Cuaternario Reciente. Presentan características litológicas y estructurales muy particulares, representadas principalmente por rocas volcánicas extrusivas y rocas sedimentarias; actuando sobre estos materiales rocosos, procesos geodinámicos, tanto internos como externos, y que siguen operando en la región, modificando las formaciones rocosas de acuerdo al mayor o menor comportamiento geomecánico. En el Anexo 1. Lámina 2 se muestra el Mapa Geológico correspondiente al área de estudio, en el que se puede observar la gran influencia de las formaciones Capillune y Volcánico Barroso, sobre la geología del área de proyecto.

El comportamiento geodinámico de las rocas en la región está identificado por el grado de fracturación de carácter tectónico o sismo tectónico, por la permeabilidad de las rocas a la acción erosiva de las aguas meteóricas, el viento y los glaciares. Estas perturbaciones de las rocas y el proceso de vulcanismo de la región han ocurrido desde tiempos remotos hasta nuestros días. Intensificándose las actividades volcánicas, especialmente en la parte sur del territorio nacional; lo revelan muchos conos volcánicos o cráteres con fumarolas o cenizas volcánicas.

En este sentido, en la zona, la ocurrencia de episodios volcánicos ha dado lugar a una morfología irregular del terreno como producto de la acumulación de elementos sólidos, piroclastos, cenizas volcánicas, lavas o derrames, y aguas termales. Cabe señalar, que estos materiales volcánicos cubren la mayor parte de la extensión de los departamentos de Moquegua y Tacna.

2.3.1 Geomorfología Regional

El panorama geomorfológico de la zona y su alrededores, es el resultado geodinámico de las fuerzas internas y externas que se ejercen sobre las diferentes formaciones geológicas que han actuado, generando formas geométricas diferentes en la superficie del terreno, y de los procesos endógenos

y exógenos, como las intrusiones, el vulcanismo y tectonismo; así como, los fenómenos meteorológicos, traducidos en lluvias o aguas superficiales, la acción del viento, los glaciares, que han erosionado las rocas y suelos, generando perfiles topográficos de diferente forma y ángulos del terreno, como valles, lagunas y quebradas.

Regionalmente, todas estas actividades geodinámicas se han producido con cierta severidad a través del tiempo geológico, para dar lugar a la formación morfológica de pendientes y laderas, de drenajes y formas variables, de acuerdo a la posición geográfica del terreno, como: líneas litorales y faja costera, planicies y laderas, estribaciones cordilleranas y zonas volcánicas y las alto-planicies y montañas. En la zona andina, cada una de estas unidades morfo genéticas se caracterizan por sus propiedades físicas y genéticas, representadas por cerros, conos volcánicos, alto planicies, quebradas, valles y cuencas de drenaje de agua permanente o temporal, expuestas bajo ambiente de clima árido a semiárido y de lluvias estacionales.

Para facilitar la exposición de las características geológicas y geomorfológicas en la zona de proyecto, a continuación se describen aquellas pertenecientes a la zona alto-andina, por ser las de mayor interés.

- *Estribaciones Occidentales*

Al este y noreste de la llanura costera se extiende el flanco andino, cuya porción principal atraviesa diagonalmente el área del Proyecto Grande. Es una región formada por rocas volcánicas y macizos intrusivos: en su conjunto, muestra una topografía abrupta y seccionada por cursos de drenaje.

En esta unidad geomorfológica regional se distinguen dos configuraciones:

Parte baja del flanco andino.- que se desarrolla inmediatamente después de la llanura costera, es un terreno de fuerte pendiente y de topografía difícil, que se eleva rápidamente hasta altitudes de 3,100 a 3,400 msnm. En esta porción del flanco andino destacan entre otros aspectos los siguientes rasgos morfológicos:

La depresión del área de Torata, que es una anfiteatro de la erosión fluvial, está limitada por la línea de cumbres de los cerros Los Ángeles, Estuquiña y Huaracane, por el espolón del cerro Huaracane y por la laderas escarpadas de Otorá, Paralaque y del Pueblo Torata.

Los riachuelos El Chical, Otorá, Chujulay y Torata, atraviesan la depresión en cañones de cauces algo sinuosos. El piso de la depresión es de roca volcánica; sin embargo, hay remanentes de la formación Moquegua, como la mesa del Cerro Baúl en el lado oriental, el afloramiento del Cerro San Miguel en el centro; y en el espolón del Cerro Huanaco en el oeste; todo lo cual, hace suponer que han sido totalmente removidos por erosión.

Entre otros rasgos, en la sección baja del flanco andino, destacan algunos cerros de laderas escarpadas como los llamados Trebolar, Cruz Blanca, Yarito, ciertos espolones de crestas angulosas, especialmente los que se desarrollan en dos quebradas adyacentes y numerosas quebradas angostas, profundas y de fuerte pendiente, que imprimen al paisaje su aspecto quebrado e irregular.

El sistema de fallas Incapuquio se encuentra en esta zona; en ciertos trechos de estas fallas, la erosión post falla a tallado depresiones alargadas a manera de "callejones". Un ejemplo característico es la depresión de Incapuquio, a lo largo de la falla del mismo nombre, donde actualmente se levanta el campamento central de la mina Toquepala.

La parte alta del flanco andino, que sigue inmediatamente al frente abrupto empinado, es un terreno de superficie moderadamente ondulada e inclinada al sur-oeste, con algunos sectores planos.

En conjunto, la sección que tratamos se visualiza como una repisa de ancho variable, que se desarrolla delante de la zona de conos volcánicos.

Evidentemente, se trata de una superficie de erosión antigua, labrada de rocas volcánicas del grupo Toquepala que se reconoce más allá de los límites de la zona. Hacia el noroeste se extiende a Omate y Torata.

El borde de la repisa queda a altitudes de 3,200 a 3,400 msnm, y esta señalado en partes por una especie de acantilado de erosión de contorno irregular. Es notorio que la mencionada superficie de erosión se extienda hacia la costa suavemente inclinada, debido a que las cimas, casi planas de muchos cerros de las estribaciones occidentales, imaginariamente reconstruidas, corresponden a la misma superficie que termina en el borde de las pampas costeras.

La mencionada superficie fue extensamente cubiertas por las tobas de la formación Huaylillas, tal como nos indican los remanentes aislados de dichas formación. Tanto la superficie de erosión como su cobertura de tobas se pierden hacia el este y noreste, por debajo de los conos volcánicos que se levantan en el extremo noreste de la zona.

- *Cadena de Conos Volcánicos*

Desde el borde de la línea divisoria y del altiplano, comprendida de los 16° de latitud sur, se desarrolla una cadena montañosa formada por una sucesión de conos volcánicos como: Tutupaca, Ubinas, Huaynaputina y otros, a la que denominamos cadena de conos volcánicos. La cadena volcánica tiene un ancho de 20 a 30 km, con rumbo noreste sureste; en parte, coincide con la divisoria continental y en grandes sectores queda algo más al oeste de la mencionada línea.

Toda la zona volcánica ha sido afectada por la glaciación cuaternaria. Rasgos morfológicos de erosión glacial, superficies estriadas, pequeñas lagunas de cubetas rocosas, con diques morrénicos y crestas filudas, son comunes en los flancos de los volcanes. Esta unidad volcánica está expuesta a altitudes entre los 3,000 y 5,000 msnm.

En cambio el Altiplano, unidad geomorfológica de la región, se identifica a partir del borde oriental de Omate y continua hasta Bolivia. Se caracteriza por su topografía llana, entre cadenas de cerros o circundando los conos volcánicos. Se presenta a manera de pequeñas planicies, mayormente integradas por materiales fluvioglaciares, llamados pampas o panteones.

Las altitudes de estas pampas fluctúan entre 4,400 a 4,800 msnm; entre estas costas merecen citarse las de Humalso, Canana y Catapampa, por ser las de mayor amplitud.

El origen de estas planicies son las antiguas cuencas o pantanos que han sido parcial o totalmente rellenadas por material piroclástico o fluvio-glaciario, o ambas a la vez, hallándose actualmente afectadas por procesos erosivos fluviales. En las depresiones de estas pampas, generalmente se han desarrollado zonas pantanosas conocidas con el nombre de ciénagas, denominadas regionalmente "bofedales".

Sobre la unidad fisiográfica del altiplano destacan unas cadenas de cerros, a manera de colinas bajas, las cuales se les llama "lomas"; como son: Loma Torrine, que tiene una altura de 4,825 msnm representada por los cerros Chacapacheta, Yurara, Humalso, Carapacu y Maracunacasi.

También se puede citar a la Poma Chuaña, Como a Huacullane y loma Desaguadero. Estas lomas se caracterizan por ofrecer perfiles suaves y alturas más o menos uniformes, siendo las lomas occidentales las que ofrecen mayores altitudes.

Litológicamente se han formado sobre rocas sedimentarias y volcánicas cubiertas por materiales detríticos. Las planicies del altiplano se han formado sobre sedimentos aluviales o lacustres del cuaternario, al rellenar cuencas relativamente amplias. Sobre estas pampas se encuentran pequeños caseríos o cabañas de pastores que se dedican a la crianza de alpacas.

2.3.2 Aspectos Geológicos y Litológicos.

La geología de la subcuenca del río Vizcachas y de sus microcuencas, está dominada mayormente por rocas volcánicas de las formaciones Volcánicas Barroso y los volcánicos y sedimentarios de la formación Capillune, las que presentan amplia distribución en toda la Región y su incidencia en los procesos geológicos que causan la contaminación del embalse es determinante, por la propia naturaleza litológica de estos volcánicos.

A continuación se describen las principales formaciones geológicas de la zona alto andina en el área de proyecto, desde el punto de vista estratigráfico, genético, litológico y estructural; desde las más antiguas hasta las más recientes.

- Formación Maure

Esta unidad presenta escasos afloramientos al noroeste del área de estudio. Está constituida por brechas, conglomerados, areniscas, tobas, limolitas y arcillas. La brecha es de origen volcánico y de color gris verdoso. Las areniscas son de grano medio, color pardo amarillento a rosado y fácilmente erosionables. Las areniscas conglomerádicas tienen coloración grisácea y matriz tobácea. Las tobas de composición dacítica o riolítica; son de naturaleza lítica y presentan una coloración amarillenta a crema, tienen poca consistencia y abundantes inclusiones de pómez y otras rocas e intercalaciones de lechos de arcillas blanquecinas. Los conglomerados tienen esencialmente clastos de cuarcitas y andesitas.

Las riolitas presentan una topografía suave, constituyendo pequeñas colinas de laderas con pendientes moderadas. Excepcionalmente, en algunos valles se han distinguido paredes casi verticales. En el área, la secuencia estudiada se apoya en discordancia angular con las formaciones

cretáceas, observándose en otros lugares el volcánico Tacaza, debajo de las tobas Sencca con ligera discordancia. Estructuralmente se presentan como plegamientos simples.

- **Formaciones Capillune**

Está constituida por una serie sedimentaria lacustre, compuesta por conglomerados areniscas, piroclastos, limolitas y arcillas, con coloraciones grises, blanco amarillentas y verdosas.

La uniformidad litológica y textural de la formación, es frecuente en extensos afloramientos. Topográficamente, contiene pequeñas lomadas de cumbres más o menos horizontales, y mamelones esparcidos en la región o conformando terrenos o tierras bajas que cubren amplias zonas. Se encuentran en posición horizontal a ligeramente inclinadas, sin ofrecer mayores deformaciones estructurales.

Esta unidad está constituida por una serie alternante de areniscas arcósicas, de grano fino, pobremente diagenizadas, con colores grises a amarillentos, que mayormente se presentan en capas de 30 a 40 cm de arcillas blanco amarillentas, en capas delgadas; de lentes de areniscas conglomerádicas, dentro de una matriz tobácea, cuyos elementos son subangulosos a subredondeados; también es frecuente la ocurrencia de limolitas de color amarillento, en capas de 20 – 25 m, de rocas piroclásticas consistentes en tobas líticas, lapillis y pómez, que se presentan en bancos de carácter lenticular dentro de la secuencia.

Es importante destacar la ocurrencia de un conglomerado de base que se presenta en la quebrada labrada por el río Vizcachas. Dicho conglomerado consiste de cantos gruesos, angulosos, sin estratificación clara; el tamaño de los guijarros varía de 10 a 50 cm de diámetro, en escasa matriz areno tobácea, de color gris amarillento.

Aflora en la margen derecha de las microcuencas del Millojahuirá, Antajarane, Sarapatilla, Huiscacollo y en la zona baja del río Patara. (Ver mapa geológico).

• **Volcánico Barroso**

Pertenece al cuaternario y pleistoceno del grupo Barroso. Está constituido por lavas andesíticas, en estratos volcánicos de rocas de color gris oscuro a gris claro; por efecto de la meteorización química se transforman en colores rojizos y marrones. Las capas o estratos son muy inclinados y se presentan en bloques fracturados; estas rocas se apoyan sobre una discordancia erosional de la formación Capillune y se exponen con una amplia propagación en la región sur.

La subunidad presenta variaciones litológicas aun en áreas próximas, cambiando de una fase traquítica a una tranquiandesita y mayormente andesítica y con intercalaciones de bancos de tobas volcánicas y algunos bancos de brechas lenticulares.

El volcánico Barroso, particularmente presenta una gran fracturación; a través de dichas fracturas, en algunas localidades, se producen emanaciones de gases sulfurosos, con la consecuente formación de depósitos de azufre; y todas ellas, permiten una circulación fácil de las aguas meteóricas, originando acuíferos muy importantes en las rocas de base, constituidos por materiales clásticos con capas impermeables.

En el área de estudio aflora en la margen izquierda de la quebrada Millojahuir, en la zona de altas cumbres en las microcuencas de las quebradas de Palleutani, Arnani, Jachacuchajahuira, Calijipina, Chullumpini, Corajahui, entre otras menores.

- **Formacion Llallahui**

Esta unidad está constituida por derrames volcánicos, piroclastos, brechas de flujo y aglomerados andesíticos y basálticos, en estratos de 20 a 30 metros de espesor. Regionalmente se le atribuye una potencia de 1000 metros, En la zona de estudio solo aflora la parte basal, sobreyaciendo a la formación Puno.

• **Depósitos Fluvioglaciares**

Con esta denominación se conoce a la distribución de una serie de depósitos que se encuentran en diferentes lugares de la zona, ocupando las laderas y sectores bajos de las cuencas o valles, el fondo de la cabecera de los valles y las pequeñas depresiones topográficas del terreno y cerros, ubicados a altitudes de 3,500 a 4,500 msnm.

Los depósitos fluvioglaciares tienen una litología que consiste de conglomerados finos, con intercalaciones de areniscas en bancos o capas gruesas deleznales y de color blanco grisáceo.

• **Depósitos Aluviales**

Bajo esta denominación están comprendidos todos los depósitos recientes, constituidos por materiales que han sido arrancados y transportados por las aguas superficiales y depositados a poca distancia de su lugar de origen. Estos suelos transportados se presentan tapizando el fondo de los valles o quebradas, son poco consolidados y los elementos no tienen ninguna selección, tratándose más bien de una mezcla heterogénea de rocas y suelos de diferentes tamaños de diferentes tamaños formas, angulosas a subredondeados, en escasa matriz fina con variaciones notables en la granulometría de una exposición a otra.

• **Depósitos Fluviales**

El fondo de los valles de la zona, se encuentra ocupado por este tipo materiales, que consiste en la acumulación caótica de rocas de diferentes tamaños y naturaleza. Por la granulometría de los clastos se pueden clasificar en cascajos, gravas, arenas y limos en matriz arcillosa.

• **Depósitos Eólicos**

Son acumulaciones de arenas sueltas y cenizas volcánicas, que se han depositado sobre la superficie del terreno, formando colinas, montículos y depresiones topográficas de la zona, ubicadas tanto, en las partes costeras, pampas o planicies de la vertiente pacífica occidental. Todos estos materiales sueltos y dispersos son producto de la erosión y transporte de la acción del viento de los litorales y de la vertiente occidental sobre las rocas volcánicas.

2.4 APOORTE HIDRICO DE LA CUENCA

2.4.1 Subcuenca del Río Vizcachas

El río Vizcachas es el principal afluente del Embalse Pasto Grande y se origina en las cercanías del divortium aquarum de la cuenca del Río llave, en altitudes superiores a los 4,800 msnm, por la confluencia de los ríos Patara y Tocco, en las Pampas de Pasto Grande. En el Mapa Hidrográfico de la Lamina 1. Anexo 1 se puede observar la red hidrográfica de esta subcuenca con sus principales afluentes, entre los que se distingue a los ríos menores que discurren por las quebradas de Millojahuirá, Queñuani, Hualcane, Antajarane, Vizcachuni, Caironi, Patara, Cacachara, Tocc, Asnuni, Incacachi, Chullumpini, Sarapatilla, Huiscacollo, entre otras quebradas menores.

El río Tocco es alimentado por manantiales casi permanentes de los cuales los más importantes son Copapujo, Incalayoc y Escollo.

El río Patara tiene como afluente al río Cacachara, y los ríos Antajarane, Hualcane y Millojahuirá son alimentados por deshielos de nevados y por pequeños manantiales. En el Millojahuirá y el Patara existen surgencias de agua termal.

La Pampa Pasto Grande, donde se ubica el embalse, es una zona cóncava, con un solo punto de drenaje superficial; su lecho está formado por superficies cubiertas de pasturas, lagunas y suelo al descubierto, características geomorfológicas por las cuales se producen pérdidas de agua significativas por evaporación y evapotranspiración.

El área de captación del río Vizcachas es de 447,49 Km², distribuidos entre sus tributarios, según el resumen siguiente:

Cuadro 2.1
Área de la Cuenca Colectora que da Origen al Embalse Pasto Grande

CUENCA		AREA (km ²)
1.-	Millojahuirá	18,8
2.-	Queñuane - Chapoco	28,4
3.-	Antajarane	45,0
4.-	Viscachune	18,9
5.-	Patara	188,7
6.-	Tocco	148,1
TOTAL		447,9

Fuente: Estudio Meneses.

2.4.2 Principales Fuentes de Agua Superficial

Las fuentes hídricas identificadas durante el proceso de reconocimiento geológico e hidrogeológico incluyen cuerpos de agua como son las lagunas y el propio embalse de Pasto Grande, así como

corrientes superficiales constituidas por ríos y riachuelos o pequeños arroyos, y manifestaciones de aguas subterráneas en forma de manantiales y bofedales.

• LAGUNAS Y EMBALSES

Son masas de agua acumuladas en una depresión natural (vaso) de la superficie terrestre. Las aguas almacenadas provienen de deshielos de glaciares, aportes de otras lagunas o directamente de aguas de precipitación que escurren en la cuenca de dicha laguna. Estas lagunas emiten los excedentes de agua a través de canal (boquilla). Si las lagunas poseen agua todo el año se le denomina permanente, pero si se agotan en época de estiaje son temporales.

- Embalse Pasto Grande

Pertenece a la sub cuenca del río Vizcachas, y se ubica a una altitud de 4,550 msnm. El acceso a este cuerpo de agua artificial es a través de la carretera binacional. A la altura del Paraje Achacpujo existe un desviación por una trocha que conduce al embalse. Tiene un vaso semi-encañonado. Su contorno tiene escasa cobertura vegetal y especies como el ichu, Thola y otros arbustos se presentan en pequeñas áreas. El embalse se alimenta directamente a través de riachuelos y humedales. Anteriormente tenía uso piscícola donde se cultivaban truchas, pero a raíz de factores contaminantes esta actividad ya no se desarrolla.

De manera resumida, las principales características técnicas del embalse son las siguientes:

Presa

- * Tipo: Presa de tierra y enrocado con núcleo impermeable
- * Altura de coronación: 10.33 m.
- * Longitud de coronación: 80 m.
- * Ancho de Coronación: 4m.

Embalse

- * Capacidad total almacenamiento: 185 MMC
- * Capacidad útil: 180 MMC
- * Volumen muerto: 5 MMC
- * Superficie de espejo de agua máximo: 46.375 Km²

- Laguna Carusani.

Las filtraciones de este cuerpo de agua vierten hacia el río Vizcachas. Se encuentra ubicado a una altitud de 4598 msnm, y tiene una pequeña laguna donde concentra flujo. Son de fisiografía semiencañonada y no cuentan con caudal de salida. 54 Has. No existe un flujo medible, por lo que se considera prácticamente $Q=0.00$ L/s.

• BOFEDALES

Son zonas de humedad que se generan por la presencia de la napa freática en la superficie del terreno. Se localizan en zonas alto andinas y permiten el desarrollo de pastos naturales que son fuente de alimentación del ganado ovino y camélidos americanos. Cuando la saturación de la

superficie llega al límite empieza a fluir y forman pequeñas corrientes que alimentan a los riachuelos colindantes.

- **Huachunta**

Pertenece a la micro cuenca Vizcachas. Se localiza en distrito de Carumas, provincia de Mariscal Nieto y Dpto. de Moquegua. A una altitud de 4,407 msnm. Tiene una extensión de 1154 Has. No existe flujo $Q=0.00$ L/s.

- **Cacachara**

Pertenece a la subcuenca Vizcachas. Se localiza en distrito de Carumas, provincia de Mariscal Nieto y Dpto. de Moquegua. A una altitud de 4,851 msnm. A una altitud de 4,851 msnm. Tiene una extensión de 191 Has. Existe caudal de flujo $Q=7.00$ L/s.

• **MANANTIALES**

Son corrientes de agua subterránea que afloran en la superficie en forma concentrada ("ojo de agua") o en forma dispersa como filtraciones difusas. Estas corrientes son infiltraciones provenientes de algún acuífero cercano y discurren a través de estratos permeables del subsuelo. Estas fuentes pueden ser permanentes (emiten todo el año) o temporales (emiten en época de lluvia).

En esta microcuenca se llegaron a inventariar algunas unidades, la mayoría de ellos son del tipo disperso. Respecto al uso, todos tienen uso pecuario (bebedero de ganado). Los caudales aforados oscilan entre 5 y 158 L/s. A continuación se describen los manantiales más representativos en esta sub cuenca. También, dentro de los manantiales reconocidos se debe mencionar a los de origen geotermal, de aguas con temperaturas superiores a los cinco grados por encima de la temperatura ambiente y que se ubican en el contexto de la hidrogeología de las fuentes termales.

- **Pucará**

Pertenece a la sub cuenca Vizcachas. Se localiza en el distrito de Carumas, provincia de Mariscal Nieto y Dpto. de Moquegua. Se ubica a una altitud de 4,580 msnm, Se llega a través de la antigua Carretera Moquegua-Puno y luego tomando el desvío hacia Carumas. Es del tipo difuso. Se aprovecha como bebedero de ganado. Se aforó 5 L/s.

- **Quesllampo**

Pertenece a la sub cuenca Vizcachas. Se localiza en el distrito de Carumas, provincia de Mariscal Nieto y Dpto. de Moquegua. Se ubica a una altitud de 4,588 msnm, Se llega a través de la antigua Carretera Moquegua-Puno y luego tomando el desvío hacia Carumas. Es del tipo difuso. Se aprovecha como bebedero de ganado. Se aforó 22 L/s.

- **Chacapacheta**

Pertenece a la sub cuenca Vizcachas. Se localiza en el distrito de Carumas, provincia de Mariscal Nieto y Dpto. de Moquegua. Se ubica a una altitud de 4,781msnm, Se llega a través de la antigua

Carretera Moquegua-Puno y luego tomando el desvío hacia Carumas. Es del tipo difuso. Se aprovecha como bebedero de ganado. Se aforó 18 L/s. Existe caudal de flujo $Q=7.00$ L/s.

• RIACHUELOS O RÍOS MENORES

Son pequeñas corrientes de agua que transitan por una quebrada. Se abastecen de aguas provenientes de manantiales o lagunas. El caudal puede reducirse pero no agotarse (permanentes) o agotarse totalmente (intermitentes). En época de lluvias son vuelven torrentosos, transformándose en algunos casos en aluviones.

Para el presente estudio, se ha asumido que la categoría de riachuelos incluye los tributarios de los cursos principales de la sub cuenca.

- Tocco

Pertenece a la sub cuenca Vizcachas. Nace en el paraje de Churumujuna a 4,584m de altitud. Se localiza en el Distrito de Carumas, provincia de Mariscal Nieto. Su cauce es estable. Su lecho es pedregoso. Esta fuente no tiene uso definido. Se aforó un caudal de $Q = 162$ L/s. Su pendiente es $S=0.004$ y su longitud 8.870 km.

- Queñuani

Pertenece a la sub cuenca Vizcachas. Nace en el cerro Jatipidia a 5,053m de altitud. Se localiza en el Distrito de Carumas, provincia de Mariscal Nieto. Su cauce es estable. Su lecho es pedregoso. Esta fuente no tiene uso definido. Se aforó un caudal de $Q = 1.0$ L/s. Su pendiente es $S=0.063$ y su longitud 8.412 km.

• RÍOS

Son corrientes de agua de mayor orden, originados por la descarga de los riachuelos y transitan por cauces de mayor longitud, mayor anchura y menor pendiente. Se abastecen de riachuelos, manantiales y lagunas.

En el ambiente natural predomina la fase de sedimentación fluvial descargando al embalse una pequeña carga de sedimentos muy finos y sustancias en suspensión. En el área de estudio se ha verificado el río permanente Vizcachas.

- Río Vizcachas

Pertenece a la sub cuenca Vizcachas. Actualmente se considera que este río se inicia con las descargas del embalse Pasto Grande, pero en su recorrido recibe aportes del riachuelo Sojota y el río Chilota. A 4,350 msnm. Su cauce es estable con presencia de cantos rodados en el lecho. Tiene una longitud de 54.562 km y su pendiente promedio es $S=0.011$. El caudal registrado fue 1,288 L/s (aforo del 24/10/02). Sus aguas son aprovechadas para beber por el ganado que se explota en la zona. Su cauce inicial antiguo es ocupado por el actual embalse Pasto Grande.

2.4.3 Fuentes de Agua Subterránea

Los recursos hídricos subterráneos existentes en la zona de estudio dependen fundamentalmente de las características hidrogeológicas de los sistemas acuíferos, de sus condiciones hidrodinámicas y de las condiciones de recarga y descarga.

Los acuíferos más importantes se localizan en las cuencas medias y bajas de micro cuencas asociadas a la red de drenaje de los ríos de menor orden que el río Vizcachas, en las zonas comprendidas entre la cuenca media a baja y en un área que se extiende, bordeando la cuenca baja con la zona del embalse. En general, se pueden diferenciar: primero, acuíferos en medio poroso constituidos principalmente por depósitos no consolidados cuaternarios, y segundo, acuíferos fracturados en formaciones rocosas de naturaleza volcánica, ambos conformando un sistema integrado donde los acuíferos porosos y fracturados se conectan hidráulicamente de manera muy diversa.

La zona de estudio cuenta con una importante recarga anual proveniente de la ramificada red hídrica que drenan las áreas montañosas de cabecera de cuenca. Aunque las precipitaciones son escasas, pues no superan los 750 mm anuales, la red de riachuelos permanentes y temporales en las zonas altas y las crecidas de verano que se infiltran en los terrenos permeables en los acuíferos porosos y fracturados de la sub cuenca, permiten la acumulación de reservas de agua subterránea, que afloran a través de manantiales en diversos puntos de la sub cuenca.

El flujo subterráneo está bien definido por las fuertes a regulares pendientes existentes hacia la zona más deprimida de los pequeños valles andinos que confluyen hacia el río Vizcachas.

La evaluación de las aguas subterráneas frías y termales de la sub cuenca y cuencas de orden inferior, actualmente se encuentra muy limitada, dado que no existe información histórica que permita obtener conclusiones definitivas. Se carece de perforaciones hidrogeológicas y piezómetros que permitan caracterizar, primero, la hidrogeología del sistema acuífero de aguas frías y, segundo, no se tiene mayor información directa sobre la hidrogeología de las aguas termales. Respecto a hidrogeología de las aguas subterráneas frías se ha tratado de indicar parámetros hidrogeológicos, espesor del relleno cuaternario en los valles y su potencial hídrico real en base a métodos indirectos provenientes de los estudios geofísicos genéricos realizados para proyectos conexos, con los cuales se ha podido esbozar y plantear un modelo hidrogeológico conceptual, el que debe ser confirmado solo con la realización posterior de investigaciones hidrogeológicas detalladas en toda la subcuenca del río Vizcachas. En la zona de mina Santa Rosa existen algunos piezómetros de escasa profundidad solo par fines de control de flujo subterráneo a nivel de algunos componentes mineros como son el Pad de lixiviación y en el cauce de la quebrada.

Sin embargo, se considera que en base a sus características litológicas y estructurales de las rocas existentes en el medio y los rasgos geomorfológicos de la zona, las condiciones geológicas de las formaciones rocosas de naturaleza predominantemente volcánica y, la excelente recarga debido a las precipitaciones pluviales, es posible encontrar importantes acumulaciones de agua subterránea en el medio poroso y, aun, en el medio volcánico fracturado, destacándose el área comprendida en la zona más deprimida y los bofedales del valle, así como las presencia de manantiales de agua fría.

El uso actual del agua subterránea en el área de estudio es mínimo a través del consumo de agua para uso poblacional a partir de los manantiales, así como para uso ganadero y, los aprovechamientos superficiales canalizan el agua de vertientes hacia los lugares de consumo. Las reservas hídricas del valle del río Vizcachas y sus condiciones agroecológicas están suba provechadas.

2.5 ACTIVIDAD MINERA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO VIZCACHAS

El efecto ambiental de la industria minera en el área de proyecto ha sido y es producir contaminantes potenciales que afectan a los recursos hídricos, al suelo y al aire, y en el medio natural; los excesos y mal manejo ambiental de operaciones antiguas han generado drenajes ácidos de agua de mina, de desmontes o de relaves mineros. La presencia de algunos metales, como hierro, cobre, níquel, cadmio y metaloides como antimonio o arsénico, es muy común en pequeñas cantidades en los depósitos metálicos, pero son altamente tóxicos, aun en pequeñas cantidades, particularmente en forma soluble, la cual puede ser absorbida por los organismos vivos.

En la subcuenca del río Vizcachas se tiene evidencia de pequeña a moderada actividad minera antigua desarrollada por polimetálicos, oro y plata, a nivel de pequeña a mediana minería, pero que ha dejado un pasivo ambiental muy disperso a través de remanentes de desmontes y otros componentes de mina. En el aspecto hidrológico, la actividad minera localmente ha causado una modificación de los cauces y de la vida acuática, produciendo también importantes cambios en la calidad y el balance del agua entre infiltración y escorrentía, debido a la modificación del suelo, y es responsable de los paisajes disturbados en la zona de mina con una morfogénesis específica.

En general, el tajo, las labores subterráneas y escombreras presentes en las zonas mineras se han convertido potencialmente en peligrosos focos de contaminación para las aguas superficiales y subterráneas, produciéndose pérdida de su calidad por procesos de salinización, incremento de la turbidez, concentraciones anómalas de metales pesados y metaloides como Pb, Al, Cu, As, Ni, etc., debido a que modifican las condiciones de pH, Eh y conductividad de las aguas con su consiguiente influencia sobre la solubilidad de muchos elementos y, especialmente, de los de carácter metálico.

En este acápite se trata de brindar información general sobre el significado de la actividad minera en la subcuenca del río Vizcachas, y analizar la interacción de las aguas del drenaje superficial y subterráneo con las zonas de alteración hidrotermal, la actividad minera a través de las labores mineras subterráneas y a tajo abierto ya realizadas, y los depósitos de residuos minero-metalúrgicos que yacen como pasivos ambientales en proceso de cierre. También se trata de tomar en consideración la ocurrencia de impactos ambientales debido a la naturaleza de estos proyectos mineros y el importante tema de la ejecución de los planes de cierre de minas que se vienen implementando. La finalidad es analizar e interrelacionar los efectos de la actividad minera y la acción natural sobre la contaminación del embalse Pasto Grande y proponer criterios de priorización que permitan dirigir los esfuerzos de monitoreo y protección ambiental con la mayor eficacia y eficiencia posible, en materias de contaminación del drenaje, por el efecto de la actividad minera pasada, presente o futura en el marco del mejoramiento de la calidad del agua de este embalse.

CONSORCIO V-S

Ing. Víctor Díaz Nuñez
INGENIERO CIVIL
CIP. 6530

CONSORCIO V-S

Dr. César Lazcano Carreño
BIÓLOGO
CBP. 269

CONSORCIO V-S

Ing. Juan Quiroga Vite
INGENIERO GEÓLOGO
CIP. 55872

2.5.1 Caracterización Mineralógica De Los Yacimientos Minerales Económicos

2.5.1.1 Mineralización

En la parte alta de la micro cuenca Cacachara existen zonas mineralizadas con sulfuros de cobre, zinc, plata, plomo y oro en estructuras volcánicas fisurales. De acuerdo a las actividades de exploración se han identificado los yacimientos de los cerros Santa Rosa y Cotañani.

El yacimiento Santa Rosa es un sistema de vetas con sulfuros de plata y plomo principalmente emplazada en el volcánico Llallahui.

El yacimiento Cotañani consiste en una mineralización de sulfuros con una zona superior de silicificación asociada con enriquecimiento aurífero, que constituyo el principal potencial que se explotó en este proyecto, actualmente en fase de cierre.

2.4.1.2 Actividades Mineras

Las actividades mineras en el área estudiada se han venido desarrollando desde hace muchos años, con el otorgamiento de la concesión minera por explotación a favor de Minera del Hill S.A. (MDH), actualmente Aruntani.

La Unidad Minera Santa Rosa está ubicada en el distrito de Carumas, provincia de Mariscal Nieto, departamento de Moquegua, a una altitud promedio de 4,900 msnm.

Compañía Minera Aruntani S.A.C. realizo operaciones en la Unidad Minera Santa Rosa, la cual estaba conformada por distintas concesiones mineras, pero actualmente se encuentra en pleno proceso de cierre.

La Unidad Minera Santa Rosa inició sus operaciones en el año 2000, con un nivel de tratamiento de mineral de 3,000 toneladas métricas por día, y de acuerdo a su último EIA estuvo tratando hasta 17,000 toneladas métricas por día. Desarrollo y exploto las reservas probadas que tenía estimadas. En la actualidad con las reservas agotadas las operaciones mineras duraron hasta fines del 2,009.

- Mina Cotañani

En el yacimiento aurífero Cotañani se realizaron todas las actividades de prospección, exploración y explotación minera con estudios geológico, mineralógico y perforaciones diamantinas, en base a cuyo resultado se elaboraron los estudios de factibilidad minera para la explotación a cielo abierto, así como los estudios de impacto ambiental.

Las operaciones de explotación del yacimiento se realizo a través del Tajo Abierto. El desarrollo del tajo comprometió a varias unidades litológicas con diferentes características y comportamientos mecánicos, además de presentar tres rasgos geológicos importantes: la falla Mauruma, la quebrada Acosiri y quebrada Cotañani. Los minerales auríferos se encuentran asociados al cuarzo y a la limonita

Compañía Minera Aruntani explotó el mineral por el método de minado a "tajo abierto", el cual era acarreado y transportado hacia los PAD's de lixiviación y luego la solución rica era procesada en la Planta de Beneficio que utilizaba el proceso Merrill Crowe, obteniéndose como producto final el doré oro / plata.

Los componentes todavía existentes en la Unidad Minera Santa Rosa, están constituidos por el tajo, botaderos y los PAD's, así como instalaciones conformadas por planta de beneficio, almacén, taller, campamento (pabellones de obreros, empleados, staff), comedor, oficinas, y demás servicios auxiliares.

La explotación del yacimiento mediante el minado a tajo abierto se realizaba con equipo pesado, con bancos de 10 m de alto, una berma de 20 m de ancho y un talud de banco de 70°, siendo el talud de operación del tajo de aproximadamente 37°.

- Mina Cacachara

El yacimiento Cacachara estuvo en explotación hasta 1,984, con el sistema de explotación de minería subterránea por medio de galerías en niveles siguiendo la veta. La concentración del mineral en la planta concentradora tuvo una capacidad de 50 TMD, obteniendo concentrado de plata y plomo para exportación.

De la información proporcionada y la inspección ocular, se deduce que actualmente no existen actividades de explotación y se encuentran paralizadas, las galerías en mal estado, vertimiento de agua acida de mina, la planta concentradora parcialmente desmantelada y el campamento también parcialmente desmantelado.

2.6 PROCESOS DE INTEMPERISMO Y DESGLACIACION

El calentamiento global está afectando directamente a los glaciares existentes en esta parte del Perú. Este fenómeno es de conocimiento y dominio mundial y actualmente viene siendo estudiado y monitoreado por el INGEMMET, las Naciones Unidas y diversas entidades internacionales interesadas en conocer el fenómeno y sus consecuencias, una de las cuales es precisamente el retroceso y desaparición de antiguas zonas glaciares, que exponen terrenos de diversa naturaleza. Se sabe que un 22% de los glaciales de los Andes peruanos que existían en 1970, han desaparecido, de acuerdo al Instituto de Recursos Naturales (INRENA), una agencia del gobierno peruano, y científicos de otros países han dicho que los nevados peruanos pueden desaparecer en una década.

El problema está en que los glaciales no pueden renovarse a sí mismos. Los glaciales están desapareciendo en las cordilleras tropicales de Los Andes. Según los estudiosos de la desglaciación se prevé que los glaciales andinos de Perú desaparecerían antes del 2015, en algunos lugares. Esto obviamente no es la generalidad, pero si se tiene casos y evidencias que confirman que este fenómeno está en proceso. Actualmente con la desglaciación y retroceso de los glaciares, amplias zonas mineralizadas en mayor o menor grado y conteniendo recursos económicos están expuestas en las altas cumbres de las cordilleras originando, eventualmente, procesos de contaminación por generación de agua acida natural.

Es ampliamente conocido por científicos expertos en geología y glaciología que existen nieves perennes y glaciares en la zona de nevados ubicados al norte del embalse. Estos recursos criogénicos (de hielo) del ambiente glacial, en forma de glaciares son de suma importancia como reservorio o embalses naturales de recursos hídricos criogénicos y por su valor como área de recarga del recurso hídrico subterráneo

La actividad minera desarrollada en la Región, incluyendo las minas de Aruntani y los nuevos proyectos mineros, se ubican en las cercanías de los nevados y están proyectados en una zona con un importante número de remanentes de glaciares. Tanto los glaciares como los recursos hídricos provenientes de estas fuentes criogénicas son de extrema sensibilidad ambiental y cumplen un rol crítico de abastecimiento de agua dulce que, luego de ser almacenada en el embalse Pasto Grande se destina para consumo humano y riego en la región.

Existe evidencia contundente que las actividades desarrolladas por los proyectos mineros, incluyendo sus fases de exploración y construcción de caminos, ya han impactado directamente en zona de glaciares de y/o ambientes periglaciales. La proximidad entre glaciares y ambientes periglacial con la actividad minera y con los caminos de acceso a las zonas de trabajo de estos proyectos hacen indispensable contar con información certera sobre el impacto que han tenido, que tienen o que tendrán los proyectos mineros respecto a los glaciares y ambientes periglaciales.

En el Estudio de Impacto Ambiental de Minera Aruntani, para su Unidad Santa Rosa, si bien hacen referencia directa a la presencia de glaciares en la zona de sus ex-operaciones, tampoco contemplan la implicancia de sus actividades pasadas, presentes o futuras en los remanentes de glaciares y/o en los ambientes periglaciales de la zona.

2.7 CONTAMINACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LA CUENCA Y SU INCIDENCIA EN EL EMBALSE PASTO GRANDE

Los fenómenos geológicos y climáticos que han dado origen a las montañas y glaciares en la Región, también las han dotado de recursos minerales y metales preciosos. Hoy en día, la creciente demanda de estos productos y los adelantos tecnológicos han vuelto a las zonas montañosas, aún a las más lejanas, lugares más accesibles y rentables para la minería, y que en otros tiempos explotaron culturas pasadas.

Contrariamente, a los beneficios obtenidos por las empresas mineras, estas han afectado los frágiles ecosistemas montañosos y las culturas locales, así como al medio ambiente y las comunidades de las zonas más altas y de las tierras bajas. El reto estriba en equilibrar las oportunidades de la explotación minera con la responsabilidad social y ambiental, asegurando al mismo tiempo la protección de los recursos hídricos del embalse Pasto Grande.

Al haber concluido las actividades de explotación minera, por ejemplo, en la mina de la Unidad Productiva Santa Rosa, han quedado una enorme cantidad de material removido y escombros conformando taludes. En esta zona de montañas con remanentes de la desglaciación, la contaminación del agua, debido a los desechos producidos por la minería, puede ser potencialmente

grave, ya que en ellas se origina la mayor parte del agua que se consume en el ámbito de Moquegua y que se utiliza en la agricultura de regadío.

El agua que llega de las montañas del entorno del embalse, a menudo tiene naturaleza ácida y está muy contaminada de metales pesados. En el área de proyecto se han declarado biológicamente muertos algunos ríos (Cacachara, Cotañani, Acosiri, Millojahuira) a causa de la contaminación de sus aguas con minerales tóxicos, así como debido a la producción de drenaje ácido provenientes de los desechos rocosos. En algunas microcuencas montañosas como la de Millojahuira, y en zonas mineras como en la Unidad Santa Rosa y el río Cacachara, los niveles de hierro, cobre y arsénico en el agua son muchas veces superiores a la norma vigente.

En el área de la subcuenca del río Vizcachas, el Drenaje Ácido de Mina (DAM) es el mayor problema ambiental provocado por la contaminación natural y la industria minera y, es también su mayor pasivo, especialmente para las corrientes de agua. Una mina generadora de ácido tiene el potencial para causar un impacto devastador a largo plazo en los ríos, arroyos y vida acuática, volviéndose en efecto, una "máquina de contaminación perpetua".

Existen cuatro tipos importantes de impactos mineros en cuanto a calidad de agua, que afectan a los recursos hídricos que van a almacenarse en el embalse Pasto Grande: (1) drenaje Ácido de mina (DAM) y drenaje ácido natural, (2) Metales Pesados y Lixiviación, (3) Contaminación Química, y (4) las escombreras.



Foto 2.1: Impactos Al Medio Natural Por Vertimiento De Agua Acidas (DAM)

2.7 GEOLOGÍA DEL EMBALSE PASTO GRANDE

El vaso de almacenamiento, donde se ha formado el embalse Pasto Grande, se localiza en las nacientes del río Vizcachas por arriba de los 4 500 m.s.n.m; es de forma alargada y se halla en una depresión labrada en rocas volcánicas; alrededor de estas pampas se presentan cerros ó montañas que son remanentes volcánicos destruidos por la erosión de los glaciares y distribuidos transversalmente con respecto a la ubicación del vaso; en las partes bajas predominan las planicies llamadas pampas.

En la zona de presa Pasto Grande se observan afloramientos de rocas volcánicas: andesitas y brechas volcánicas, que constituyen la cimentación de la presa ejecutada.

La boquilla de la presa, corta una depresión con una sección transversal en forma de "V" con flancos asimétricos y que ha sido originada por procesos erosivos del tipo fluvial y que corresponden al valle del río Vizcachas.

2.7.1 Geomorfología local del embalse Pasto Grande

La morfología que presenta el Embalse de Pasto Grande se caracteriza por tener sectores de superficies planas, otras ligeramente onduladas y algo alejado del vaso se observa una zona de cumbres escarpadas.

En las nacientes del río Vizcachas se nota la típica quebrada fluvio-glaciar, que actualmente está siendo labrada por la acción erosiva de este río y que es manifiesta en la zona encañonada del río Vizcachas, a continuación de la Pampa de Pasto Grande que actualmente constituye el embalse.

La zona del embalse, está a una altura aproximada mínima de 4 500 m.s.n.m, donde predominan las planicies llamadas Pampas, formadas por sedimentos fluviales, lagunares y glaciares de edad cuaternaria, derivados litológicamente de rocas de origen volcánico piroclásticos que han sido erosionados, acarreados y depositados en cuencas, sobre las rocas volcánicas pre existentes.

Alrededor de estas Pampas se presentan cerros ó montañas que son los remanentes de formaciones volcánicas destruidas por la erosión de los glaciares; esta sucesión de Pampas, con remanentes de lagunas y bofedales es conocida geomorfológicamente como el altiplano.

La depresión topográfica que sirve como vaso y que ha sido originada por procesos erosivos principalmente del tipo aluvial, actualmente presenta, como consecuencia del embalse, depósitos de origen lagunar constituidos mayoritariamente por limos y arcillas que recubren a las formaciones preexistentes (formaciones rocosas y depósitos cuaternarios) y que confieren impermeabilidad al vaso.



Foto 2.2: Panorámica de la geomorfología del Embalse Pasto Grande, obsérvese parte de la cordillera occidental Constituida por material volcánico cubierto por una escasa vegetación.

2.7.2 Litoestratigrafía

En el área de embalse de Pasto Grande se han distinguido las unidades litoestratigráficas que abarcan del Terciario al Cuaternario, y son las siguientes:

- **Formación Capilluni.**

La litología de esta unidad consiste en una serie sedimentaria lacustre, compuesta por conglomerados, areniscas, piroclásticos, limolitas y arcillas con coloraciones grises, blanco-amarillentas y verdosas. La uniformidad litológica y textural de la formación es frecuente en extensos afloramientos. Configuran topográficamente, pequeñas lomadas de cumbres más o menos horizontales, y mamelones esparcidos en la región o conformando tierras bajas que cubren amplias zonas. Se encuentran en posición horizontal a ligeramente inclinadas sin ofrecer mayores deformaciones estructurales. Los mayores afloramientos del Capilluni se dan en la margen izquierda del embalse, con estratificación en capas delgadas de 20 a 30 cm que son fácilmente disgregables; las areniscas pasan a areniscas conglomerádicas cuyos elementos están aglutinados en una matriz tufácea; adoptan tonos pardos amarillentos por la acción de la meteorización o intemperismo.

- **Volcánico Barroso.**

Esta unidad sobre yace a los clásticos de la Formación Capilluni e infra yacen al Cuaternario reciente. En el área únicamente se ha podido diferenciar una secuencia constituida por andesitas y brechas volcánicas que se han detectado en diferentes lugares próximos al embalse y que predominan en la zona de presa; estructuralmente, se muestran intensamente fracturadas y en algunos casos afectadas por fallas del tipo tensional, las mismas que ponen de manifiesto un pequeño desplazamiento vertical.

- **Depósitos Cuaternarios.**

Los principales materiales observados en el área corresponden a depósitos no consolidados entre los que se tienen fluvioglaciares, aluviales, bofedales y fluviales.

3 HIDROGEOLOGÍA DE LAS AGUAS FRIAS

3.1 GENERALIDADES

En la cuenca del río Vizcachas existen aguas superficiales, subterráneas y termales, que constituyen recursos hídricos importantes para el desarrollo de la Región. El interés por el estudio del agua subterránea se debe a la necesidad de llegar a conocer el grado de influencia que tiene el medio geológico sobre éstas, así como llegar a establecer las interrelaciones entre las aguas superficiales, subterráneas y termales, dada la problemática actual sobre la calidad del agua del embalse Pasto Grande. La presencia de volcanes activos causa que las aguas termales contengan anomalías minerales que alteran de forma natural la composición del agua fría que discurre normalmente por sus cauces hacia el embalse. Las surgencias de aguas subterráneas y termales que alimentan a los pequeños ríos en la subcuenca del río Vizcachas contienen altos niveles de algunos elementos contaminantes y metales pesados que afectan la calidad de las mismas, proceso que continúa desarrollándose cuando drenan finalmente en el embalse Pasto Grande.

De acuerdo a la información consultada en los estudios previos y al análisis de los datos recogidos en la zona de estudio durante las fases de investigaciones de campo y gabinete, ha sido posible obtener y mejorar el conocimiento del funcionamiento del sistema hidrogeológico constituido por flujos de agua subterránea fría y surgencias de aguas termales.

Las aguas subterráneas que saturan las rocas que se ubican en la parte alta de la cuenca del río Vizcachas, constituyen un sistema hidrogeológico complejo de origen volcánico sedimentario y tectónico. Para este efecto se han realizado estudios en base a la cartografía geológica existente, seguido de un inventario de manantiales, fuentes termales y bofedales, así como el análisis de los resultados de laboratorio de ensayos físico-químicos e hidroquímicos de muestras seleccionadas. A partir de estos conceptos e investigaciones, se ha podido reconocer tres zonas críticas que contribuyen al proceso de contaminación de las aguas del embalse Pasto Grande de manera natural: la primera, en la quebrada Millojahuirá; la segunda, en la micro cuenca del río Antajarane y, la tercera, en la micro cuenca del río Cacachara.

3.2 FUENTES DE AGUAS SUBTERRANEAS

El agua subterránea en el área de estudio se manifiesta en forma natural por la presencia de diversos manantiales y bofedales que, generalmente, se presentan en forma aislada y en los sectores bajos de las microcuencas, donde tienden a brotar con mayor caudal, razón por la cual en estas zonas se desarrollan los bofedales de regulares a grandes extensiones.

En los Mapas de estaciones de muestreo de agua del Anexo 2, están ubicados los puntos de muestreo de las fuentes subterráneas correspondientes a las aguas frías y aguas termales. Los certificados de laboratorio correspondientes se ubican en el Anexo 3.

Manantiales: Local y regionalmente, el agua subterránea aflora a modo de manantiales aislados, los cuales son parte del sustento de la actividad humana y silvestre.

Los manantiales de mayor caudal se ubican en las partes bajas y los efímeros en las cumbres. Según los lugareños aumentan en número y caudal durante la época de lluvia y tienden a desaparecer hacia al final del estiaje.

Bofedales: A pesar de que las condiciones naturales en algunos sectores del área de estudio han sido perturbadas parcialmente por la actividad minera, varias áreas aún se mantienen húmedas debido a que están asociadas o alimentadas por manantiales. Estos humedales o "bofedales" se ubican principalmente en el fondo de las quebradas, y en laderas, desde donde el agua drena hacia las quebradas más próximas, dando lugar al caudal base de los ríos y arroyos del entorno.

Pozos de monitoreo y piezómetros: por información de campo se sabe que en el área de influencia directa de la unidad minera Santa Rosa existen algunos piezómetros someros de control puntual en la zona de las pozas de solución rica (pregnant) del proceso minero-metalúrgico, de donde se ha podido obtener información hidrogeológica muy local de la zona del PAD de lixiviación a través de 3 piezómetros y en el cauce del río Cacachara con un piezómetro, después de haberse iniciado el proceso de cierre de mina.

Tajos abiertos y labores mineras: El agua subterránea también afloraba en forma artificial por bocaminas de algunas labores mineras que constituyen antiguos pasivos ambientales. En el fondo del tajo abierto de la mina anta Rosa no se ha observado agua subterránea, pero se sabe que durante el proceso de excavación o minado, algunos taladros encontraron la napa piezométrica a los 4 metros debajo del fondo del tajo, pero en otros puntos con distinta topografía, el nivel del agua se encontró por debajo de los 30 metros de la superficie en otros puntos. Los procesos naturales han ocasionado la aparición del aguas acidas a modo de pequeños manantiales ubicados en Acosiri, lo cual indica, además, que existe movimiento de agua subterránea de diversa calidad en la cuenca del río Cacachara, la cual al verse y mezclarse con las aguas del río Patara, que trae un caudal mucho mayor, mejora su calidad de modo natural.

3.3 HIDROGEOLOGIA REGIONAL

3.3.1 Aspectos Geológicos.

Las diferentes erupciones han dejado la acumulación de material volcánico desde el Mesozoico al Cenozoico. Las rocas del Cenozoico cubren la mayor parte de la zona de estudio, formando una extensa altiplanicie representada por una serie de cerros y llanuras o pampas, recortada por valles y quebradas de cauces anchos y poco profundos. La mayoría de estos cerros corresponden a conos volcánicos antiguos fuertemente erosionados por las quebradas y por la acción glacial ocurrida durante el Pleistoceno.

En la parte noroeste del área de estudio se encuentran rocas de la Formación Maure constituidas por piro clásticos de naturaleza andesítica, dacítica y riolítica. Sin embargo, en gran parte de la subcuenca aflora la Formación Capillune, constituida por una intercalación de arenas, areniscas, arcillas, conglomerados, piroclastos y tefras que se presentan en capas delgadas y con coloraciones grises, blanquecinas y anaranjadas. Por encima de las formaciones Maure y Capillune se encuentra en discordancia la Formación Volcánico Barroso del Plioceno - Pleistoceno, aflorando en grandes extensiones, conformado por derrames lávicos y piro clásticos de composición andesítica y dacítica. Todos estos materiales se encuentran parcialmente cubiertos por depósitos glaciares y fluvioglaciares conformados por gravas, gravillas y arenas mezclados con piroclastos. En esta zona se distinguen también numerosos complejos volcánicos.

De acuerdo a las investigaciones hidrogeológicas que ha realizado sobre esta formación la Southern Peru Copper Corporation (SPCC) en las pampas de Huaitire, Vizcachas, etc. se ha podido determinar la presencia de acuífero Capillune en la zona de Vizcachas. Las condiciones favorables que volvieron a imperar en la región después de la finalización de la actividad volcánica que depositó al Sencca, permitieron la reanudación de la acumulación de sedimentos en un ambiente lagunar y sobre los materiales ya descritos. Los estratos así depositados, de origen, características y naturaleza semejantes a la formación Maure se les conoce actualmente con el nombre de Formación Capillune (S. Mendivil 1965).

3.3.2 Aspectos Hidrogeológicos

Las investigaciones hidrogeológicas realizadas por Southern Peru Copper Corporation (SPCC) desde los años de 1960, en las que se incluían estudios de geología, geofísica, perforación de taladros exploratorios y experimentales, algunos de ellos realizados en la cuenca del río Vizcachas, han permitido esclarecer que en una gran extensión del Altiplano de los departamentos de Moquegua y Tacna, el material del subsuelo está conformado por dos gruesas formaciones litológicas de origen volcánico y sedimentario de carácter regional denominadas formaciones Maure y Capillune, que contienen napas acuíferas confinadas de vasto potencial.

En la zona de investigación de la formación Capillune, por encontrarse a poca profundidad, ha sido accesible la zona inferior de la formación, lo que ha permitido la evaluación detallada de su potencial acuífero y facilitar su desarrollo. Los múltiples estudios experimentales de los mantos acuíferos efectuados mediante pruebas detalladas de extracción en la estaciones de bombeo, han proporcionado las características hidráulicas del medio acuífero y han permitido comprobar su capacidad de almacenamiento.

En el Mapa Hidrogeológico Regional de la Lamina 03 del Anexo 1, se puede identificar las relaciones entre la litología y el tipo de acuífero en el área de estudio, pudiéndose observar la enorme presencia y extensión de las rocas volcánicas y su incidencia en los procesos geológicos actuales.

3.3.3 Afloramientos de Agua

Las observaciones efectuadas en la zona en estudio han revelado la existencia de diversos manantiales de agua fría y de agua termal; algunos de ellos de caudal considerable. Un grupo de estos afloramientos de agua se encuentran ubicados en las faldas de las principales elevaciones de la zona, y se caracterizan por su régimen periódico. Un segundo grupo (el más importante) son de régimen permanente, y afloran en el fondo de algunas quebradas, así como en las partes bajas de las pampas. En general sus aguas son de buena calidad con pH neutros a alcalinos.

- Manantiales de régimen periódico.

De modo general, estos se encuentran aflorando entre las cotas 4,600 y 4,900 m.s.n.m, se originan a causa de las filtraciones de las precipitaciones pluviales y del deshielo de los nevados Quenemachiri, Antajarani y otros más. Aumentan considerablemente de caudal con las lluvias y disminuyen progresivamente con la ausencia de éstas, hasta desaparecer en muchos casos. En las faldas de los nevados se han contado estos manantiales que drenan hacia el fondo del valle y en los bordes del cerro Ancochaullane.

- Manantiales de régimen permanente.

Se producen entre las cotas 4 250 y 4 600 m.s.n.m., por lo general son de caudal considerable y se mantienen durante los 12 meses del año. Los manantiales han sido determinados a lo largo de toda su extensión, muchos de ellos con fuertes descargas. Estos manantiales han dado origen a extensos bofedales y cursos de agua que a lo largo de su desplazamiento van disminuyendo progresivamente su caudal inicial por efectos de infiltración y evaporación (este coeficiente adquiere valores elevados en estas regiones).

3.3.4 El Sistema Acuífero

En el área de proyecto existe un sistema hidrogeológico regional constituido principalmente por el acuífero de la formación Maure. Sin embargo, el sistema acuífero local está conformado por dos tipos de acuífero. Primero, por acuíferos en medio poroso dispersos sobre las quebradas y pampas en toda el área altiplánica, constituyendo acuíferos freáticos detríticos en depósitos fluvioglaciales, coluviales, aluviales y bofedales no consolidados. Segundo, por acuíferos fracturados en lechos rocosos sedimentarios y volcánicos, destacando de manera especial el acuífero Capillune.

- Mantos Libres en Medio Poroso

Los recursos hídricos conformados por mantos libres se hallan restringidos a capas relativamente delgadas de materiales clásticos fluvioglaciales, fluviales y coluviales, de amplia distribución en el área. El medio poroso lo conforman los materiales sueltos no consolidados de origen fluvioglacial, aluvial y coluvial que cubren parcialmente las rocas volcánicas de la formación Capilluni, que en el área de estudio no son de gran espesor aunque pero si de regular extensión. Presentan como límites en profundidad, a los mismos depósitos volcánicos sedimentarios que constituyen el basamento rocoso. Este tipo de acuíferos son alimentados por las aguas de precipitación, de deshielo y de los manantiales termales que en muchos casos generan contaminación de las aguas superficiales y que por infiltración van a dar al acuífero subterráneo.

- Depósitos Fluvioglaciales

Potentes acumulaciones de material morrénico se observan en las faldas de los nevados; por lo común estas acumulaciones se encuentran comprendidas entre las cotas 4,400 - 4,800 m.s.n.m. y originan formas topográficas definidas (morrenas laterales, frontales y de fondo). Un ejemplo típico de estas formas se puede apreciar en los bordes de la quebrada Millojahuirá, donde estas acumulaciones se presentan en formas de crestones alargados. Los depósitos morrénicos se caracterizan por la heterogeneidad de sus componentes. De un modo general, se encuentran formados por un conjunto de fragmentos angulosos de naturaleza volcánica, presentando superficies estriadas.

Las zonas más bajas (zonas de pampas) se caracterizan por la presencia de un extenso manto a manera de cobertura y de naturaleza fluvioglacial. Esta cobertura se encuentra mayormente formada por materiales volcánicos. La selección de los materiales fluvi-glaciales se realiza desde las partes superiores hacia las zonas bajas. En efecto, en las partes superiores la cobertura se encuentra formada por materiales más gruesos y presentan abundantes bloques con diámetro hasta de un

metro. Progresivamente y hacia las zonas más bajas el material va haciéndose más fino, para terminar en grava fina y arenas. La potencia máxima de esta cobertura se calcula en 0 a 30 metros.

- Depósitos Fluviales

Los depósitos fluviales representan las más recientes acumulaciones en la zona de estudio, y se encuentran representados por arenas, gravas y limos. Su potencia y extensión es muy reducida, encontrándose localizados en los lechos de los ríos y en la cuenca baja de las quebradas Millojahuirá, Antajarane, Patara, Hualcane Vizcachuni, Tocco, entre otros ríos menores, así como en los grandes bofedales de Pampa Pasto Grande y en algunas otras quebradas menores.

- Depósitos coluviales

Estos depósitos se caracterizan por constituir materiales transportados por gravedad, la acción del hielo-deshielo y, principalmente por el agua. Su origen es local, producto de la alteración in situ de las rocas volcánicas y posterior transporte como derrubio de ladera o depósito de solifluxión. Frecuentemente están asociados a una masa inestable. Su composición depende de la roca de la que proceden, y que en el área de estudio es frecuentemente volcánica. Están constituidos por fragmentos heterométricos, generalmente de tamaño grueso, englobados en una matriz limo arcillosa y su espesor es variable, aunque no muy desarrollado.

- Mantos Confinados en Medio Fracturado

Las características de las rocas volcánicas constituyen un caso muy específico respecto de las rocas sedimentarias o plutónicas. Las rocas volcánicas antiguas procedentes de un arco volcánico o de volcanes extintos, tienen naturaleza distinta; lavas, piroclastos, tobas y otros elementos forman los depósitos volcánicos condicionados por factores diversos como la edad, la distancia al centro de emisión, la tectónica posterior, la erosión e intemperización, etc. Por consiguiente, la localización de acuíferos requiere de la reconstrucción de la historia geológica, para conocer su morfología y su relación con materiales de contacto. La estructura general de las formaciones volcánicas consiste principalmente en un apilamiento de materiales, pueden ser acuífugos (impermeables) hasta acuíferos de alta conductividad hidráulica, piroclastos con porosidad efectiva del 50% (Cuadro 4.1), estas características hacen que sus propiedades hidrogeológicas sean variables, en base a su orientación y espesor, los materiales volcánicos con alta heterogeneidad y anisotropía (Custodio & Llamas 1996).

Las rocas sedimentarias, componentes del acuífero Capillune tienen amplia distribución en la subcuenca y forman acuíferos extensos de regular a buena permeabilidad por sus excelentes características litológicas.

Cuadro 3.1 Clasificación Hidrogeológica de Rocas Volcánicas

UNIDAD VOLCANICA	LITOLOGIA	m (%)	K (m/día)	ESPESOR	CLASIFICACIÓN
Grupo Maure	Conglomerados Areniscas Volcánicos	De 1 a 40 De 4 a 25 De 1 a 10	De 0.2 a 8.64 De 0.076 a 0.36 De 1.5 a 19.87	± 1200	Acuífero Volcánicos Sedimentario
Formación Capillune	Arenas, areniscas Piro clásticos Cenizas y arcillas	De 4 a 25 De 1 a 50 De 4 a 60	De 0.076 a 0.36 De 10X10-5 a 1 De 8.3 X10-7 a 1	± 210	Acuífero Volcánico Sedimentario

Fuentes: Peña & Sulca (2009), Custodio (1996), Sanders & Smith (1998), Morris & Johnson (1982), Davis (1969).

3.3.5 Acuíferos Principales

- **El Acuífero Maure**

La litología del Acuífero Maure se compone de una secuencia volcánico sedimentaria inter-estratificada con conglomerados, areniscas cuarzosas parcialmente compactas; limolitas de color verde oscuro; horizontes de material volcánico redepositado y tobas (tufos) volcánicas. Estos materiales parecen haber sido alterados por procesos exógenos y se presentan en diferentes formas y tamaños. La permeabilidad de estos materiales es muy variable, como la porosidad. Estas variaciones litológicas generan que el Grupo Maure tenga características de acuífero semiconfinado. Es un acuífero regional de poca extensión en el área de estudio. En el altiplano, en sectores de El Ayro y Vizcachas, parte alta de la Región Tacna y Moquegua han mostrado evidencias de constituir un acuífero potencial (INADE 1993, PET, 2008).

- **Acuífero Capillune**

La Formación Capillune tiene estratificación horizontal a subhorizontal, cerca a su contacto con rocas más antiguas, presentan buzamientos entre 20 y 25°. Su litología se compone de una intercalación de areniscas, arcillas, conglomerados y piroclásticos que se presentan en capas delgadas grises, blanquecinas y anaranjadas. La configuración de sus estratos y su litología genera heterogeneidad acentuada, principalmente por que las capas sub-horizontales tienen variada composición litológica, por lo tanto su comportamiento hidráulico también es variable, los horizontes permeables tienen una acentuada permeabilidad horizontal (foto 1). Este componente litológico permite clasificar a los horizontes de areniscas tobáceas, piro clastos y lapillis en acuíferos y a los horizontes de arcillas, cenizas y limos como acuitardos, por tanto, esta formación es típica de acuíferos multicapa, y que en sectores se encuentran confinados.



Foto 3.1.- Estratos horizontales a sub horizontales de la Formación Capillune, evidenciando niveles saturados y niveles impermeables

3.3.6 Modelo Hidrogeológico Esquemático

El desarrollo del modelo conceptual es uno de los pasos de importancia en la elaboración de los modelos de simulación de acuíferos y de transporte de contaminantes, que se requieren para el control y monitoreo de la calidad del agua en el embalse Pasto Grande. Durante el proceso de elaboración del modelo conceptual, es frecuente realizar asunciones y simplificaciones a fin de representar procesos complejos como los que están ocurriendo en Pasto Grande. Las asunciones son explicadas debido a la imposibilidad de reconstruir completamente el sistema acuífero a ser modelado. Consecuentemente, en la formulación del modelo conceptual se emplea el principio de simplicidad, de modo que el modelo sea lo más simple posible, manteniendo la suficiente complejidad para la representación adecuada de los elementos físicos del sistema acuífero y reproducir su comportamiento hidráulico y la respuesta frente al ingreso de agua contaminada, mezcla de aguas de distinta calidad y temperatura, posibles aguas procedentes de las actividades mineras, estiajes y cambios hidrológicos naturales y antropogénicos. La figura 3.1 muestra un diagrama de bloque hidrogeológico esquemático obtenido a partir del modelo generado con los conceptos e interpretaciones preliminares, el cual debe ser complementado en una etapa posterior con mayor información de campo y de estudios previos para tener el modelo definitivo en la zona de la cuenca de Vizcachas. La ejecución de perforaciones hidrogeológicas y de piezómetros en el área

de interés contribuirá enormemente en la obtención de datos relevantes, no solo para el modelo hidrogeológico, sino también para el control y monitoreo del sistema acuífero presente en el área.

En las secciones hidrogeológicas esquemáticas A y B indicadas en las Lámina 5 del Anexo 1, se ilustran las características del sistema acuífero constituido por mantos freáticos en medio poroso y, mantos confinados en medio fracturado interactuando con flujos de agua termal. Considerando la disposición heterogénea de las rocas volcánicas en el área de estudio se tiene el siguiente modelo hidrogeológico conceptual, aun de manera preliminar, debido a la carencia de información hidrogeológica histórica.

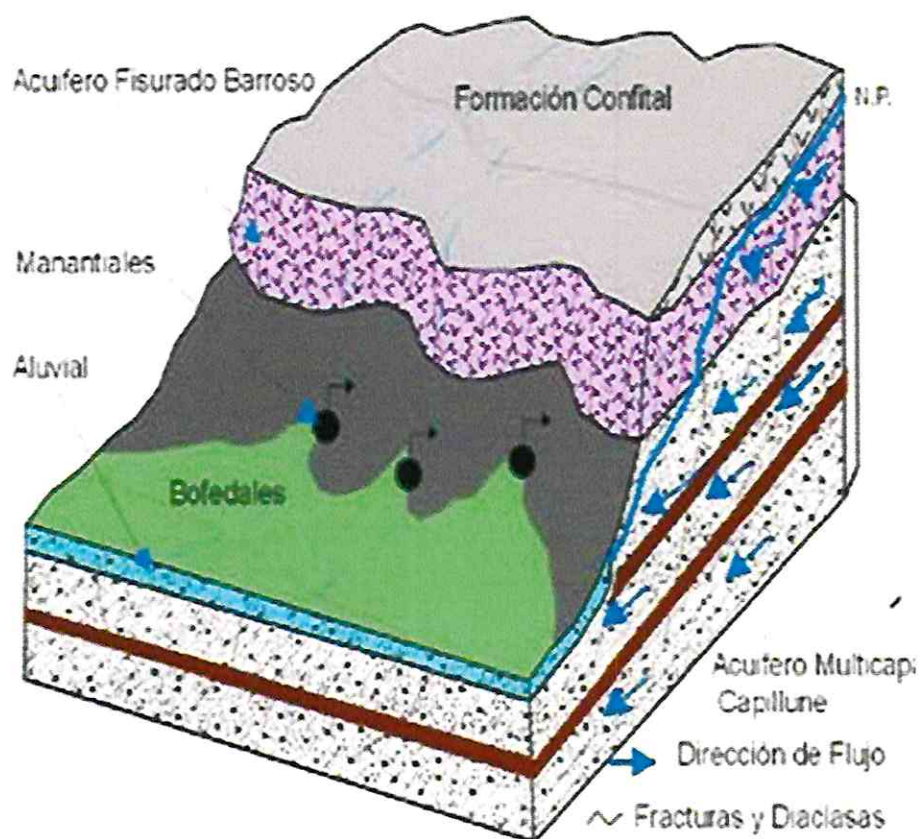


Figura 3.1.- Acuíferos multicapa, con descarga de control litológico

Los valores promedios de las principales propiedades hidrogeológicas del horizonte acuífero Capillune obtenidas en el campo de Titijones por SPCC en 1983 son los siguientes:

Porosidad:	35 %
Coefficiente de transmisividad	$3.6 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.
Coefficiente de Almacenamiento	1×10^{-3}

3.3.7 Aspectos Hidrogeológicos En Zonas De Interés.

- **Hidrogeología de la quebrada de Millojahuirá**

En el área de la quebrada Millojahuirá se presenta un cauce con escurrimiento de agua superficial debido a la presencia de manantiales o puquíos, surgencias de aguas termales y agua de deshielo. El curso principal de agua corresponde básicamente al río Millojahuirá que tiene su nacimiento en la cabecera del nevado cerro Istahueco de una altura mayor a 5000 msnm. Esta pequeña cuenca hidrográfica es alimentada por los deshielos, pero el curso del río es alimentado simultáneamente por aguas subterráneas que mayormente predomina como puquíos o manantiales provenientes de los nevados de cerros volcánicos de buena a alta permeabilidad por fracturación que la caracteriza. Durante el periodo de precipitación pluvial durante el verano (Diciembre-Abril), la infiltración del agua en el subsuelo recarga el sistema acuífero local.

- **Hidrogeología de la zona de mina Santa Rosa**

La actividad minera se ha desarrollado en la microcuenca del río Cacachara y, en la microcuenca Cotañani, en la cima occidental del eje morfoestructural de la cordillera volcánica occidental del sur del Perú formando la divisoria continental de aguas entre la vertiente hidrográfica del Pacífico y el lago Titicaca.

Las características físicas del área, dispuesta dentro de un rango altitudinal entre 4.500 y 5.000 msnm, son típicas de la sierra altoandina del Sur del Perú. El paisaje muestra zonas de relieve variado, plano y subnormal, así como formaciones orogénicas con pendientes fuertemente inclinadas a extremadamente empinadas (10 a más de 75%).

El área muestra afloramientos de rocas de origen volcánico, muchos de estos recubiertos de arenas tobáceas y suelos. Son característicos dentro del paisaje de la zona los bofedales, que muestran una vegetación típica con abundantes áreas húmedas y ojos de agua; y amplias zonas de material tobáceo volcánico completamente desprovistas de vegetación. Asimismo, por ser una zona tan elevada, la ocurrencia de nieve es no permanente en los niveles más elevados y eventual en los inferiores.

La estructura geológica que forma el medio físico de la microcuenca Cotañani, corresponde a un escenario formado por rocas volcánicas y sedimentarias continentales, con predominancia de las estructuras volcánicas; correspondientes a los periodos Terciario y Cuaternario. En el área se han identificado unidades litoestratigráficas conformadas por las formaciones terciarias Llallahuí y Capillune, el Grupo Barrosos, así como por depósitos cuaternarios de morrenas, escombros periglaciares, turbera bofedal y fluvioaluviales.

El Cerro Cotañani, compuesto por rocas de una pulsación lávica del Barroso, se encuentra mineralizado con sulfuros, oro y otros metales; que constituye el depósito mineralizado que fue explotado por Unidad de Producción Santa Rosa. De acuerdo a la ubicación del PAD y la Planta de

Recuperación, estos se encuentran en esta Unidad Geológica, en la margen derecha de la Quebrada Acosiri.

En la parte alta de la micro cuenca Cacachara, existen zonas mineralizadas con sulfuros de cobre, zinc, plata, plomo y oro; en estructuras volcánicas fisurales. Desde la cabecera de cuenca, por infiltración de agua de precipitación pluvial, existe flujo de aguas subterráneas de naturaleza ácida en el medio volcánico fracturado, las cuales alimentan los flujos de agua superficial del fondo de las quebradas Cotañani, Acosiri y el río Cacachara. Estos flujos son manifestaciones naturales de la contaminación natural que existen en el área minera de la cuenca del Cacachara.

Las aguas subterráneas en el área de estudio, tienen aparentemente un estado más dinámico, ya que se observa varios afloramientos en las laderas de los cerros, dando lugar a la formación de bofedales de gran importancia para el desarrollo ganadero muy localizado.

Por la cantidad de agua que aflora, es previsible que el origen de estas aguas tenga su origen en las filtraciones, que en gran parte provienen de los deshielos de las zonas cubiertas con nieve no permanente, y además de las precipitaciones estacionales que ocurren en los meses de diciembre a abril. La formación geológica permite inferir el movimiento de las aguas infiltradas. Se deben efectuar estudios hidrogeológicos específicos en la zona minera, orientados a caracterizar los flujos subterráneos, volúmenes, fuentes de recarga y descarga, calidad del agua, entre otros.

3.3.8 Hidroquímica del Agua Superficial y Subterránea

De acuerdo a los análisis de la calidad del agua (Ver Tomo de Calidad de Aguas) realizados para la caracterización del agua en la zona de proyecto, tal como se observa en el Gráfico 4.1 (Ver en el Tomo respectivo, la Caracterización Hidroquímica en la sub cuenca del río Vizcachas y del Embalse Pasto Grande), las aguas que ingresan al Embalse Pasto Grande provenientes de la quebrada Millojahuira son entre cálcicas sulfatas y sulfatadas, con predominio del ión sulfato. Las aguas de la micro cuenca del río Tocco tienen como ión predominante al bicarbonato y como cationes predominantes al calcio y sodio.

Con respecto a la hidroquímica de la microcuenca del río Patara, según el Diagrama Piper, (ver gráfico respectivo en Tomo Calidad de Aguas), las aguas de la quebrada Cotañani son de tipo cálcica-magnésica-sulfatada; asimismo la hidroquímica de la quebrada Acosiri indican que sus aguas son cálcicas sulfatadas en las nacientes y sulfatadas aguas abajo. Las aguas de la quebrada Cacachara, presenta predominio de los iones calcio y sulfato, incrementando a solo sulfato después de su confluencia con la quebrada Acosiri. Asimismo las aguas en las nacientes del río Patara son sódicas-bicarbonatadas, variando hasta antes de ingresar al embalse con aguas cálcicas-sulfatadas.

La composición química y los parámetros fisicoquímicos del agua se consignan en los anexos respectivos. En general, el valor del pH del agua superficial no contaminada oscila entre 6.5 y 7.5, siendo más altos en los arroyos. Las aguas de los cauces afectados por la contaminación natural (Millojahuira, Hualcane) presentan valores bajos de pH entre 3 y 5, El río Cacachara afectado mayormente por la contaminación antropogénica, pero también natural en menor proporción, tiene bajos valores de pH (ácido).

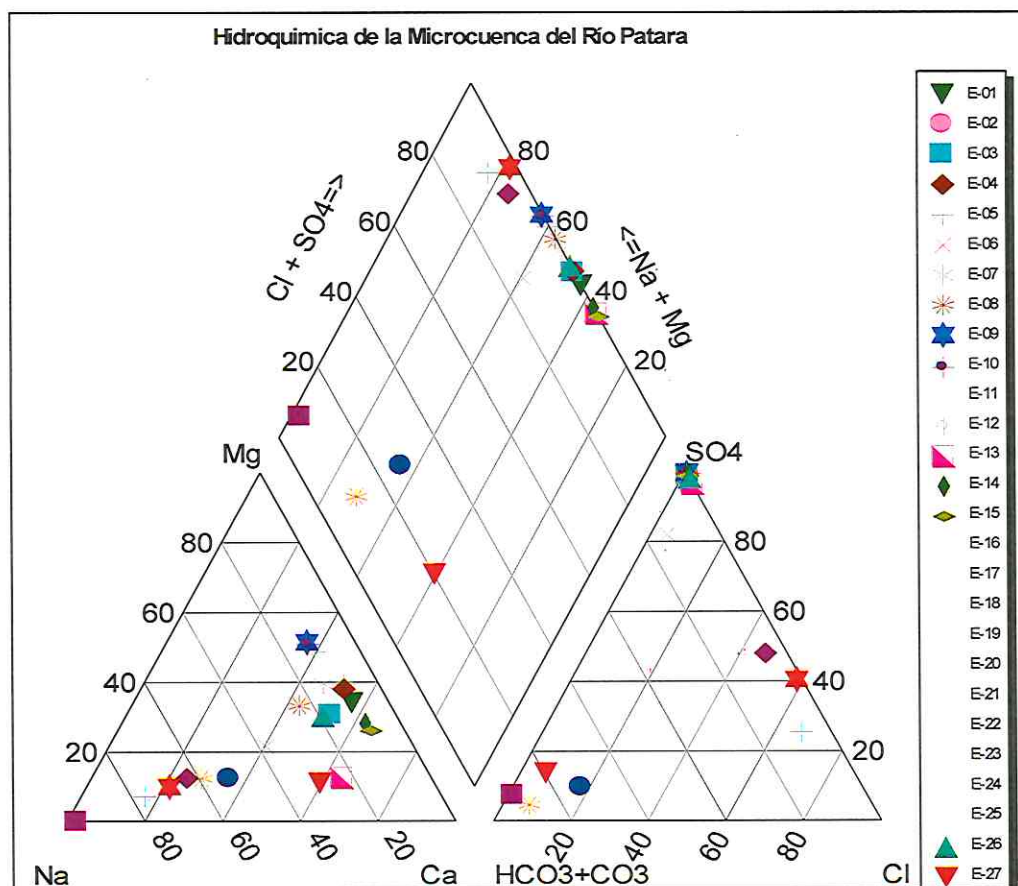


Grafico 3.1.- Las aguas subterráneas procedentes de las rocas volcánicas medidas en los manantiales son cálcico sulfatadas y bicarbonatadas sódicas, que representan a aguas dulces de poca profundidad y corto periodos de circulación, a veces mezcladas con aguas termales. Según la evolución hidroquímica preliminar observada, muestran aguas de recorridos locales y los manantiales observados tienen pH neutro a alcalino, y considerando que la mayoría de las surgencias están por encima de los 4500 msnm, se tiene una zona de recarga entre los 4500 y más de 5000 msnm.

3.3.9 Fuentes Termales

El cauce del río Patara presenta en varios puntos de la margen derecha fuentes termales observables, agua que surge del interior de la corteza rocosa con temperaturas mayores que oscilan entre 52 y 53° C°. Se encuentran muy cerca del cauce de río, y afloran en rocas tobáceas calcáreas de color blanquecino compactas y fracturadas (Formación Sencca). Estas aguas termales de origen telúricas tienen efectos curativos por sus componentes químicos basados de bicarbonatos de sodio, cloruros, sales, de cal, y otros minerales, etc.

Los análisis químicos de las aguas termales mediante ICP-OES y sus parámetros fisicoquímicos principales se muestran en los resultados proporcionados por los laboratorios consignados en los

certificados correspondientes mostrados en el Anexo 3. Se trata de aguas salinas con presencia de elementos contaminantes como boro, arsénico, entre otros. Por otra parte, en la surgencia geotermal de la cabecera del río Millojahuirá emanan gases de H_2S , presentando un pH ácido. Por sus características, al mezclarse con las aguas superficiales, estas aguas termales van a incidir fuertemente en la calidad de las aguas superficiales que escurre, dado que se producen procesos de contaminación, disolución, oxidación de componentes Fe^{+3} en este cauce, aguas que finalmente llegan al embalse Pasto Grande. En cambio, las fuentes termales Caironi, de menor temperatura, afectan en menor proporción a las aguas del embalse que las aguas termales del sitio denominado Aguas Calientes, en la margen derecha del Patara. Estas últimas proporcionan valores de carbonato que mejora la calidad de las aguas de este río. La adición de boro, aunque no en grandes valores, constituye un problema potencial de contaminación en el tiempo.

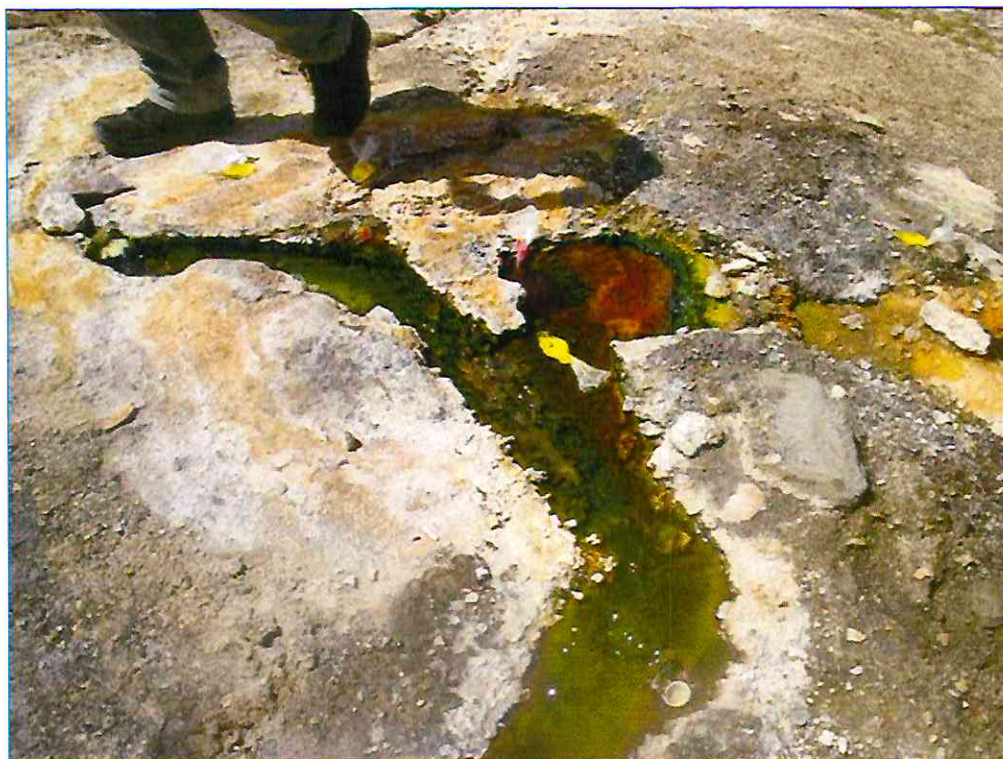


FOTO N° 3.2 Presencia de fuentes termales de origen telúrico .en roca tobácea calcárea en el paraje denominado Aguas Calientes (punto de muestreo G-85)

3.9 CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS EN LA MICROCUENCA CACAHAHA

En el área donde se ha realizado la actividad minera, la calidad hidrogeoquímica del agua subterránea refleja los aportes desde el suelo y subsuelo y las relaciones agua-suelo-roca con la meteorización, así como también desde fuentes de contaminación de origen antropogénico, tales

como la minería, área despejadas interfluviales, áreas contaminadas por surgencias geotermales e impactos por desglaciación.

Dentro del contexto de los geoindicadores, la selección de ciertos parámetros importantes de primer orden y de segundo orden, han permitido evaluar procesos de contaminación de las aguas subterráneas (y superficiales) y la tendencia significativa en el período de los últimos nueve años, tales como la salinidad (CE; SO₄, STD, etc.), la acidez (pH, Oxígeno disuelto, Fe, As) y la contaminación minera (pH, Fe, As, SO₄ y otros).

La contaminación de origen minero en el área de la microcuenca del río Cacachara y, particularmente en la zona de la mina Santa Rosa, presenta dos aspectos a distinguir, uno mayor de carácter natural relacionado en la lixiviación del material rocoso mineralizado, y otro menor, de carácter antropogénico debido a la actividad minera.

El sulfato derivado de la oxidación de minerales sulfurosos es el gran indicador individual de la contaminación derivada de la explotación minera de Au y Ag, en el cerro Acosiri y de los polimetálicos que se explotaron en el Cacachara. La disminución del pH está generalmente asociada con este proceso, al igual que los incrementos de cargas disueltas de Fe, Pb y otros metales por lixiviación natural. Los resultados del monitoreo de la calidad de agua subterránea en la zona de minas Santa Rosa, así lo demuestran desde el año 2003 hasta el 2012 (Setiembre). Las muestras en blanco de las estaciones EM-1 y EM-7, ubicadas en las zonas más altas de la cuenca Cacachara, y que corresponden a estaciones de monitoreo de fuentes superficiales, han demostrado la existencia de un proceso de lixiviación natural en de la zona mineralizada donde se localizaba el yacimiento Santa Rosa, ubicado en la zona de cabecera de cuenca del Cacachara, entre las microcuencas Cotañani y Acosiri, específicamente en el Cerro Acosiri.

La estación EM-1, quebrada Acosiri, se ubica en la parte alta de la quebrada Acosiri aproximadamente a una altitud de 4,795 msnm, en las coordenadas 340,496 E y 8°159,2561 N. La estación EM-7, quebrada Cotañani, se ubica en la parte alta de la quebrada Cotañani, aproximadamente a una altitud de 4813 msnm, en las coordenadas 358,362E y 8°160,452 N.

Las cargas metálicas procedentes de la lixiviación y/o actividad minera contaminan no solo las aguas subterráneas sino también las superficiales en forma de drenaje ácido de mina (DAM).

El problema del DAM se torna crítico para la calidad de las aguas subterráneas en la zona de mina particularmente si los niveles freáticos en el medio detrítico poroso o en el medio rocoso fracturado se elevarán por encima de la cota de fondo del tajo y del PAD de lixiviación, sin embargo, esto no sucede realmente, pues tras el período de cierre temporal, no se han registrado niveles de agua elevados en los piezómetros de control del PAD ni en la poza de mayores eventos (EP-1. EP-2 y EP-3) y botadero. Los niveles de agua subterránea en esta zona de componentes mineros están por debajo del fondo del PAD y del tajo.

Los proceso de meteorización de los minerales diseminados en el macizo rocoso y asociados a las zonas mineralizadas ya explotados pueden servir como indicadores secundarios de los procesos de contaminación en el área de mina, después del cierre final.

3.10. EVOLUCIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL ÁREA DE LA U.P. SANTA ROSA – MICRO CUENCA CACACHARA

El monitoreo de las aguas subterráneas en la zona de mina se realiza en las estaciones EP-1, EP-2, EP-3 y EP-4. El control de la variación espacial y temporal de la calidad de las aguas subterráneas ha tenido como propósito principal:

- Determinar la distribución subterránea de la contaminación y la migración de los contaminantes.
- Determinar la distribución de las aguas subterráneas de baja calidad causada por la interacción natural agua-roca, y por acción de la actividad minera.
- Monitorear la efectividad de las medidas para controlar o remediar la contaminación en la zona de componentes mineros.

Los resultados de los análisis de laboratorio obtenidos de los informes trimestrales presentados por Aruntani SAC al MINEM se muestran en las tablas 3.1, 3.2 y 3.3, ubicadas en el Anexo No. 5, y sustentan las conclusiones del estudio de las aguas subterráneas en la zona de mina Santa Rosa.

Para determinar la migración y distribución de los contaminantes en las aguas subterráneas en la cuenca Cacachara, se precisa de piezómetros ubicados en el entorno de esta cuenca; para este propósito se realizó un reconocimiento de campo, habiéndose determinado la ubicación de los puntos de ubicación. También se han ubicado los puntos para piezómetros en otras áreas de interés para la subcuenca del río Vizcachas como en las microcuencas de los ríos Mollojahuira, Hualcane, Antajarane y Patara, tal como se muestra en el Cuadro 3.2.

A continuación se hace una síntesis analítica de los resultados de laboratorio obtenidos desde el 2003 al 2012.

Período: Junio 2003 – Marzo 2004.

Estación EP-1. Control del PAD.

Coordenadas: 390519E; 8159,80714; 4818 msnm.

La calidad del agua según los Límites Máximos Permisibles (LMP) de la Ley General de Aguas vigente a la fecha, es de agua ácida, con pH menor de 5.5 unidades (pH=5, aguas de clases I, II y III. Las concentraciones de cianuro son menores a 0.001 mg/l, valores muy por debajo de la LMP para agua de clase I, II, III y IV.

Las concentraciones de As, Cu y Zn se encuentran por debajo de las LMP para las aguas de clase I, II, III y IV. Las concentraciones de **hierro** se encuentran por encima de los límites permisibles para aguas de Clase I, II, I (0.30 mg/l) y III. Las concentraciones de **Mn** se encuentran por encima de los límites permisibles para aguas de clase I y II (0.10 mg/l). Las concentraciones de **Pb** se encuentran por encima del límite para aguas de clase I y II en los meses de Junio y Diciembre.

Estación EP-2. Control del PAD

Coordenadas: 390 614E; 8 159,782N; 4821 msnm.

La calidad de las aguas según los LMP es de un agua ácida con pH igual a 4.81 unidades. Las concentraciones de cianuro son menores a 0.001 mg/L, valor muy por debajo de los LMP para aguas de Clase I, II, III y IV.

Las concentraciones de metales como As, Cu y Zn se encuentran por debajo de los LMP para las aguas de clase I, II, III y IV. Las concentraciones de hierro se encuentran por encima de los LMP para aguas de clase I, II y III.

Estación EP-3. Qda. Mauruna Margen Derecha del Acosiri

Coordenadas: 390293E; 8159,222; 4765 msnm

En el período Junio 2003-Marzo 2004, la calidad del agua según los LMP es de un agua ácida con pH fluctuante entre 5.35 y 6.7 unidades. Las concentraciones de cianuro son menores de 0.001 mg/L, valor muy por debajo de los LMP para aguas de clase I, II, III y IV.

Las concentraciones de metales como As, Cu y Zn se encuentran por debajo de los LMP para aguas de clase I, II, III y IV. Las concentraciones de **hierro** se encuentran por encima de los límites permisibles para aguas de clase I, II y III.

Las concentraciones de **manganeso** se encuentran por encima de los límites permisibles para aguas de clase I y II. Las concentraciones de plomo se encuentran por debajo del límite para agua de clase I y II, sobre todo en los meses de Dic 2003 y Marzo 2004.

Estación EP-4. En el cauce del río Cacachara

386,554E; 8157,107N; 4671 msnm

La calidad de las aguas según los LMP de la LGA presenta un pH que fluctúa entre 5.35 y 6.7 unidades. En todas las estaciones las concentraciones de cianuro son menores a 0.001 mg/L, valor muy por debajo de los LMP para las aguas de Clase I, II, III y IV.

Las concentraciones de As, Cu y Zn se encuentran por debajo de los LMP para las aguas de clase I, II, III y IV. Las concentraciones de **hierro** se encuentran por encima de los límites permisibles para aguas de clase I, II y III.

En todas las estaciones de monitoreo se encuentran concentraciones de **Fe** y **Mn** por encima de los límites máximos permisibles para aguas de clase I, II y III, debido principalmente, a que existe un proceso de lixiviación natural de la mineralización existente en la zona. El fenómeno se debe a que en los cerros Cacachara, Quinaquinami, Chopiparqui y Chacapacheto existen procesos de lixiviación natural.

Las concentraciones de Pb se encuentra por debajo del límite para aguas de clase I y II, sobretodo en los meses Diciembre 2003 y Marzo 2004.

CONSORCIO V-5

Ing. Víctor Díaz Nuñez
INGENIERO CIVIL
CIP 6530

CONSORCIO V-6

Dr. César Lazcano Carreño
BIOLOGO
CIP 222

CONSORCIO V-5

Ing. Juan Quiroga Vite
INGENIERO GEOLOGO
CIP 55872

PERÍODO: III TRIMESTRE 2006

Los valores registrados de pH indican que la calidad de las aguas muestreadas en las estaciones EP-1, EP-2, EP-3 son ácidas con pH 3.2 y 3.44 y 6.77 respectivamente, pero la estación EP-4 presenta aguas alcalinas (pH=8.32).

La concentración del As en las estaciones EP-1, EP-2 y EP-3 resultaron ser inferiores a 0.01 mg/L, mientras que en la estación EP-4 se determinó en valor de 0.5 mg/L.

Las concentraciones de Cianuro Wad y Cadmio, en todas las estaciones de control se registraron valores inferiores a los LMP contemplados en la normatividad. Las máximas y mínimas concentraciones de los elementos Cr, Ni, Pb y Zn se registraron en las estaciones EP-4 y EP-3 respectivamente, mientras que la máxima y mínima concentración de la se registra en la estación de control EP-1 y EP-3 respectivamente.

PERÍODO III TRIMESTRE 2007

Los valores registrados de pH en la estación EP-1, EP-2 y EP -3 resultaron con valores de 4.10, 4.21 y 5.58 siendo aguas ácidos. Solo la estación EP-4 mostró un pH=6.32, unidades, encuadrándose en la clase III de la Ley General de Aguas.

Las concentraciones de cianuro wad, en todas las estaciones no llegaron a superar los LMP, pero el **Níquel**, superó en la totalidad de las estaciones el LMP.

PERÍODO: III TRIMESTRE 2008

Las estaciones EP-1 y EP-2 registraron valores iguales a 2.51 y 2.60 respectivamente, los cuales son propios de aguas ácidas, mientras que las estaciones EP-3 y EP-4 alcanzaron valores de 6.0 y 6.64 respectivamente, estando comprendidos dentro de lo recomendado para la Clase III (PH= 6-9) de la LGA.

La totalidad de las estaciones registraron valores inferiores para Cianuro Wad, presentando valores que no superan el estándar establecido en la LGA (0.1 m/L). Las concentraciones de Ni en la estación EP-1 (0.033 mg/L) y EP-2 (0.012 mg/L), superaron el estándar referencial de LGA. Clase III de 0.002 mg/L. Las concentraciones de As, Ci, Cu, Ca, Pb y Zn reportados en las 4 estaciones no superaron los estándares de la normatividad nacional.

PERÍODO: III TRIMESTRE 2009

Los resultados de los parámetros de campo obtenidos en las estaciones EP-1 y EP-2 muestran un pH de 3.31 y 3.42 respectivamente siendo aguas ácidas, la conductividad eléctrica en ambas estaciones es de 1158 y 1205 uS/cm.

En los resultados de los análisis de laboratorio realizados en aguas subterráneas se observó que para la estación EP-1 y EP-2 el Cianuro Wad no supera los límites referenciales de la LGA.

Los resultados de laboratorio por aguas subterráneas – (metales totales por ICP), muestran que el As, Cd, Cr, Pb y Zn no superan los límites permisibles mientras que el **Cu**, **Fe** y **Ni** superan las estándares referenciales.

PERÍODO I TRIMESTRE 2010 (Marzo 2010).

Los resultados de los análisis de laboratorio muestran valores de Cianuro Wad que no superan el límite establecido en la LGA (Clase III). Los metales totales también cumplen con lo establecido en la legislación, a excepción del **Ni** que supera los límites permisibles en todas las estaciones. El **Cu** supera los límites permisibles en las estaciones EP-1 y EP-4.

PERÍODO: III TRIMESTRE 2011.

Los resultados de los análisis de laboratorio realizados en aguas subterráneas obtenidos de los parámetros muestran que los valores de Cianuro Wad no superan el límite establecido en el reglamento de Ley General de Aguas (Clase III). Los metales totales también cumplen con lo establecido en la legislación a excepción del **Cu** y el **Ni** en las estaciones EP-1 y EP-4, donde se encuentran con mayores valores que lo establecido.

PERÍODO II TRIMESTRE 2012.

Los resultados de los análisis de laboratorio de las muestras tomadas en las estaciones de monitoreo EP-1, EP-2, EP-3 y EP-4, ubicados en el área de influencia directa de la mina Santa Rosa, presentan valores de Cianuro Wad, que no superaron el límite establecido en el DS N° 261-69-AP. Reglamento de Ley General de aguas (Clase III). Asimismo, los metales totales también cumplen con lo establecido en la legislación ambiental, a excepción del **Cu** en la estación de monitoreo EP-1, donde se observa un valor por encima del límite establecido.

Como **conclusión general**, se observa que la calidad de las aguas subterráneas en la zona de mina Santa Rosa, ha venido cambiando en el tiempo y el espacio y, desde el 2003 al 2009, el deterioro fue mayor, sin embargo, en la actualidad se presenta una tendencia a mejorar, considerando, entre otros aspectos, la implementación del cierre de mina en Santa Rosa, cuyos pasivos no presentan vertimientos desde sus componentes mineros, y el drenaje ácido observado en la zona es mayormente de origen natural.

**SUCUENCA DEL RÍO VIZCACHA
PIEZÓMETROS PROYECTADOS
CONTROL AMBIENTAL E HIDROGEOLÓGICO**

Cuadro 3.2.- Puntos de ubicación de los piezómetros proyectados

PUNTO	COORDENADAS		COTA (msnm)	REFERENCIA
	ESTE	NORTE		
P-1A	386384	8156687	4697	Se ubica en zona de mina; el piezómetro anterior se encuentra tapado con derrumbe (piezómetro roto). Se hará nueva perforación. Prof. proyectada : 30 a 40 m.
P-1	387510	8158290	4746	Se ubica a un costado de la carretera de acceso. Prof. Proy.: 30 a 40 m.
PP-2	385557	8155652	4681	Se ubica a un costado de la garita de ingreso. Prof. Proyectada: 30 a 40 m.
P-3	382103	8148196	4614	Se ubica aguas abajo de la confluencia del Río Patara con el Paulluni. Profundidad sugerida: 40 a 60 metros. Se instalaran 02 piezómetros (01 en acuífero libre y 01 en acuífero fracturado). Perforar con PQ.
P-4	376756	8147341	4556	Se ubica junto a la desembocadura del Río Patara y la estación hidrométrica. Profundidad sugerida: 40 a 60 metros. Se instalaran 02 piezómetros (01 en acuífero libre y 01 en acuífero fracturado). Perforar con PQ.
P-5	379333	8154052	4662	Se ubica en la cuenca naciente de la quebrada Antajarane Profundidad sugerida: 30 a 40 metros.
P-6	375139	8151579	4577	Se ubica junto a la Estación Hidrométrica del Río Hualcane. Profundidad sugerida: 30 a 40 metros.
P-7	372263	8154197	4543	Se ubica en el cruce Carretera Río Mijahuirá (en la desembocadura al Embalse . Profundidad sugerida: 40 a 50 metros. Se instalaran 02 piezómetros (01 en acuífero libre y 01 en acuífero fracturado). Perforar con PQ.
P-8	370168	8157285	4808	Punto de Referencia para direccionar con el plano. (el punto se ubicará en la zona del bofedal cerca donde se situará la planta de tratamiento).
EP-9	376976	8153132	4603	Se ubica en la cuenca media del Río Hualcane (cerca a la carretera) Profundidad sugerida: 30 a 40 metros. Se instalaran 02 piezómetros (01 en acuífero libre y 01 en acuífero fracturado). Perforar con PQ 15 metros, después perforar con HQ.

4 LAS AGUAS TERMALES EN EL PROYECTO PASTO GRANDE

4.1 GENERALIDADES

Para el aprovechamiento de recursos hídricos mediante su almacenamiento en el embalse de Pasto Grande, concurren diversos tipos de fuentes de agua, entre estos, la presencia de aguas termales de baja temperatura y dependiendo de las características de las mismas, al menos dos efectos negativos en el ambiente pueden ser considerados como los de mayor incidencia o impacto en ausencia de una infraestructura adecuada para su disposición. En primer lugar la contaminación química, puede llegar a ser particularmente importante cuando se encuentra involucrado el manejo de grandes volúmenes de agua con importante contenido salino, y en segundo lugar, la contaminación termal, consecuencia del vertido de aguas con temperaturas superiores a los valores de fondo en ecosistemas naturales preexistentes.

En el presente capítulo se resumen los resultados obtenidos a partir de las investigaciones y estudios anteriores realizados en el área de proyecto, así como de la generación de datos obtenidos a lo largo de los trabajos de geología e hidrogeología correspondientes al presente estudio se tienen. En el Mapa hidrogeológico de la Lámina 03 del Anexo 1 se presentan las formaciones acuíferas que existen en la Región e inmersas en el área de proyecto.

Dentro de los factores que contribuyen a la contaminación del embalse se tiene el impacto producido por los fluidos termales provenientes de aguas subterráneas termales de origen profundo y/o meteórico, y su vertido desde distintas fuentes hacia los cursos superficiales de drenaje natural, los que contribuyen en diverso grado con la contaminación de las aguas del embalse Pasto Grande. El sistema objeto de estudio comprendió la fuente termal de la naciente del río Millojahuirá y el curso superior de este río, así como dos surgencias de agua termal: la primera, ubicada en las inmediaciones de Caironi y la surgencia del sitio denominado Aguas Calientes, que da origen a un pequeño arroyo que desemboca en el río Patara. Todo el volumen generado por estas aguas termales, finalmente, desemboca en el embalse Pasto Grande.

El estudio termal se ha orientado a determinar el grado de influencia de los efluentes naturales provenientes de las fuentes termales existentes en el área de proyecto, y que actúan sobre el sistema hídrico afectándolo en forma directa. Para el desarrollo de esta tarea se realizaron trabajos de campo durante los meses de Abril y Julio de 2012 a cargo de los ingenieros geólogos con la colaboración de personal del proyecto.

Las tareas se orientaron a la obtención de muestras de aguas y sedimentos en el embalse, rocas y suelos representativos de toda la subcuenca, para obtener la información necesaria y establecer la interrelación de los parámetros físico-químicos y los resultados de los análisis de Laboratorio con la litología. Asimismo, analizar e interpretar las relaciones roca-suelo-agua e incidencia de los diversos factores en la hidrogeología del área de proyecto, y principalmente, su incidencia en la calidad del agua del embalse. Los sitios de muestreo termal se establecieron en base a tres (3) puntos de surgencia de agua termal previamente seleccionados por personal del proyecto, acción que permitió y permitió utilizar los datos obtenidos como puntos fijos de control y monitoreo, tanto para las condiciones en las que se realiza este estudio, como también, para futuros ensayos.

4.2 CONDICIONES DEL ESTUDIO

Los cursos de agua relevados constituyen un drenaje natural cuyo destino final próximo se encuentra en las aguas del embalse Pasto Grande. Dadas las múltiples variables (clima, caudales, temperaturas, etc.) a las que el sistema se encuentra sometido se describen a continuación las condiciones en que se realizaron dichas tareas; teniendo en cuenta que cualquier variación en las mismas puede condicionar los resultados obtenidos. Al momento de los trabajos cada una de las fuentes termales presentaba condiciones de surgencia natural con un caudal medido y una temperatura del fluido en boca de fuente variable entre 10 y 52°C.

La naciente del río Millojahuirá y su curso superior transitorio de escorrentía superficial, se halla recorrido por una mezcla de corriente menor de agua termal, con corrientes de agua natural originada por lluvias caídas durante la temporada y las aguas de deshielo. La surgencia del sitio denominado Aguas Calientes tiene una temperatura de 52° C, la más alta, se comporta como una fuente principal, cuyo drenaje superficial en el área en cuestión, solo recibe aporte subterráneo perceptible sin tributarios menores. Sus aguas tibias finalmente llegan a un gran bofedal que drena al embalse. El cauce natural del río Patara recibe las aguas contaminadas provenientes del río Cacachara y sus afluentes, entre estos el Acosiri y el Cotañani, que nacen en la cabecera de microcuenca en plena zona de actividad minera de Santa Rosa. Finalmente, la surgencia de agua termal de Caironi emana casi en el borde mismo del bofedal Pasto Grande, desembocando inmediatamente en el bofedal Pasto Grande, mezclándose con las aguas de esta gran fuente.

4.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS TERMALES DE LA MICROCUENCA ALTA DEL RÍO MILLOJAHUIRÁ

Para dimensionar el grado de influencia y el tipo de alteraciones que produce el vertido de los efluentes termales sobre el sistema se realizó, en primera instancia, una caracterización de los componentes involucrados en dicho sistema hídrico. Dentro de éste y para los fines del trabajo, se consideraron los siguientes puntos constituidos por:

- Las aguas correspondientes a la naciente
- Las surgencias de aguas termales
- La cuenca alta del río Millojahuirá
- La naturaleza del entorno geológico

Los resultados de los Análisis de Laboratorio de aguas superficiales, subterráneas y termales realizados en las dos campañas han permitido obtener los datos para la caracterización preliminar de estas aguas, que para el propósito del proyecto constituye una buena información. Los resultados de estos análisis se ubican en el Anexo No. 3

Las aguas del talweg (línea que une los puntos más bajo de una quebrada) en la naciente del río Millojahuirá son del tipo sulfatado cálcico (E-37). Su contenido de Sólidos Disueltos Totales (SDT) de 906 mg/l, indica una mineralización moderada y salinidad media y su pH de 3.2 u.e. la señala como un agua de carácter ácida. El arroyo formado por estas aguas, cauce abajo (E-39), antes de ingresar al embalse presenta un tipo composicional algo distinto que el de las surgencias termales, sin embargo su alto contenido de hierro (29.74 mg/l) disminuye a 11.45 mg/l. El contenido de sulfato también disminuye de 336.4 mg/L a 262.4 mg/l. Por sus características resultan aguas de

mineralización moderada y salinidad media pero con un pH fuertemente ácido de 3.0. Estas tendencias se confirman, y su variabilidad de explicaría solo por la temporada seca o de lluvia.

El río Millojahuira, en general, presenta un tipo químico sulfatado cálcico, es decir que, hay diferencia con los cursos en la naciente y a lo largo del río, donde el anión sulfato sigue un mayor orden de importancia frente a otros iones. El pH de 3.0, en la desembocadura y demás parámetros la caracteriza como un agua fuertemente ácida y de mineralización regular.

El otro punto a considerar es el ubicado en el mismo cauce, después de los bofedales (E-38). El tipo químico de estas aguas corresponden al tipo sulfatado cálcico con un pH de 3.2, que en función de la temperatura registrada en el punto de muestreo (10°C), puede ser considerado fuertemente ácido. La concentración de sólidos disueltos (487 mg/l) señala la regular mineralización de dichas aguas. Los valores de C.E. (662 μ S/cm), estrechamente relacionados con la salinidad la clasifican dentro del campo de las aguas salinas.

En el sistema de la cuenca alta del río Millojahuira, las formas predominantes están constituidas por sulfato, sodio, cloro, pero el contenido de hierro es realmente significativo, es decir principalmente sus formas iónicas. Para el caso de las fuentes termales se observa, un predominio de las formas iónicas, en especial sulfato, calcio y sodio. Sin embargo, además de estas especies, es posible constatar la presencia de formas entre las cuales predominan el aluminio y el silicio.

El contraste existente entre las aguas termales de la naciente y el curso superficial aguas abajo no es muy amplio, debido a que el ingreso del fluido termal al sistema provoca ligera a moderada perturbación modificando el estado natural del agua fría que finalmente llega al bofedal de Pasto Grande. Estas perturbaciones se reflejan tanto en variaciones de la temperatura como en las composiciones químicas de los puntos considerados extremos, es decir, entre la naciente y la desembocadura. El alejamiento de las condiciones naturales se da en diferentes grados a lo largo del curso influenciado, siendo dependiente de la composición original de los fluidos que son objeto de mezcla, los caudales involucrados en los diferentes puntos, velocidad de circulación de las aguas, etc.

El vertido de aguas con temperaturas variables comprendidas entre 0° y 12° C, arrojados directamente hacia el cauce del río Millojahuira constituye, dependiendo de los caudales involucrados y la calidad ácida de las aguas termales de la naciente, una potencial causa de contaminación termal. Este tipo de polución repercute principalmente sobre los organismos altamente sensitivos a las variaciones de temperatura (cambios permanentes tan leves como un grado centígrado o incluso menores) y provocando un empobrecimiento en la cantidad de oxígeno disuelto en el agua, factores que interfieren con la normal ecología del curso de agua que se forma por una mezcla de aguas de los nevados, aguas corrientes y las aguas termales.

En general, la temperatura que se registra en las desembocaduras de los arroyos o ríos menores es variable y corresponde a la temperatura ambiental del momento. En la zona de la mina Santa Rosa, de manera similar le corresponde una temperatura similar a la obtenida en las aguas del ambiente tipo periglaciario, y que obviamente es menor en las zonas de la naciente respecto de la desembocadura. Se puede decir, que el efecto local de la temperatura de los efluentes termales ejerce su mayor influencia en dicho sector. Se observa una correlación directa entre las

temperaturas de la muestra y los valores ambiente, señalando un control directo ejercido por las variaciones atmosféricas diurnas, que son mucho mayores que las temperaturas nocturnas.

Además de la variación térmica producida en los cursos de los ríos afectados, el ingreso de aguas mezcladas que llegan al embalse modifica la composición química original de las aguas corrientes que llegan finalmente al embalse. Esto, también se observa, en diferentes proporciones a lo largo del curso, cambiando de composición y clasificación. Esta variación se observa hasta dicho efecto, debido a la distancia recorrida y la mayor velocidad de circulación del arroyo o río. La variación es algo más reducida que en el tramo superior y medio curso. De acuerdo al contenido de SDT se puede observar que en el sector próximo a la desembocadura de la mezcla de aguas frías y de los efluentes termales provenientes de las nacientes se produce una dilución de aproximadamente un 25%.

A su vez, las aguas que penetran al embalse desde otras corrientes naturales, modifican la composición de este último de forma similar, pero en mucha menor proporción a lo que acontece con las aguas termales, dado el avance en el grado de dilución y los volúmenes de agua involucrados. Esto se constata en cualquier punto posterior a la confluencia curso corriente y embalse, donde la influencia se reduce a un menor porcentaje.

Si bien la proporción en que participaban los efluentes en el embalse fue inicialmente imperceptible, las aguas del mismo se han ido modificando en sus contenidos de elementos mayores, especialmente sulfatos, cloruros y, sobretudo hierro, así como de otros elementos. En cuanto el contenido de elementos minoritarios se observa valores en el contenido de Boro, de 40.11mg/L (G-85) a 0.12 mg/L (E-37); sin embargo dicha concentración se encuentra por encima del límite aceptado para aguas potables (20 mg/l) en la surgencia de Caironi/Patara y muy por debajo al tolerable para cultivos en general (de hasta 1 mg/L). No se puede decir, lo mismo para los contenidos de arsénico en G-85, y otros elementos, donde su concentración ha superado los límites permisibles y los ECA, mientras que en Millojahuira el arsénico no es detectable.

Los diagramas para las muestras localizadas en los cauces del río Millojahuira y otros ríos muestran la dilución de las aguas a lo largo del sistema de la red fluvial, en cuanto al contenido de elementos mayores. Por otro lado la conductividad eléctrica, la cual posee una relación directa con la salinidad de las aguas permite observar el grado de participación de los efluentes termales hasta el tramo en el estudio.

4.4 RIESGOS POTENCIALES

La concentración de sales y otros elementos (SO₄, F, B, As, Hg, Pb, Cd, etc.) puede resultar nociva, a diferentes niveles (según límites y aplicaciones), para actividades agrícolas, la salud y la fauna regional. En forma conjunta y como elemento comparativo se han adjuntado los resultados de los análisis de agua a través del tiempo, donde es posible comprobar con resultados concretos como ha ido evolucionando la calidad del agua del embalse.

Los contenidos de Cl, SO₄ y SDT resultan excesivos respecto de los límites permitidos o utilizables en otras aplicaciones y en particular para el uso doméstico. Las concentraciones de elementos menores, F-, B-, As, Pb y Hg no superan los valores permitidos para aguas potables, lo cual los descarta como riesgo potencial para la salud. Una excepción a esto es el Cd, que resulta elevado

con respecto a los límites tolerables. Dado que el agua termal de evaluar según la aplicación a desarrollar.

La modificación de las variables composicionales y térmicas pueden afectar el normal y natural desarrollo de los organismos pobladores de los cursos en cuestión pudiendo ocasionar efectos nocivos sobre la fauna y flora de los ecosistemas preexistentes. Si bien durante las tareas de campo (bajo las condiciones del estudio) no se constató mortandad de especies ni modificaciones importantes en la flora de los cursos, hecho que se reporta como una observación aun preliminar, se espera que con el tiempo esta situación podría cambiar.

Otro factor de riesgo potencial frente a los cultivos que se desarrollan en la cuenca media, fuera del área de proyecto, es el alto índice de salinidad y el contenido de Arsénico y otros elementos como el Boro de las aguas termales en ciertos puntos de la cuenca. La alta concentración de Sodio y sus posibles efectos nocivos se traducen en la reducción de la permeabilidad del suelo y su dureza (causados por el intercambio iónico del Calcio y el Magnesio con el Sodio en suelos arcillosos), situación que como resultado final produce daños en la estructura del suelo.

4.5 MANIFESTACIONES DE SURGENCIAS TERMALES

De acuerdo a la geología regional, en el área de estudio existe un control estructural y litológico para las manifestaciones de aguas termales. El control que la fracturación profunda ejerce sobre las surgencias de aguas termales presenta una estrecha relación espacial existente entre la localización de las manifestaciones de las surgencias de aguas termales en amplios sectores de la Cordillera de los Andes y la traza de las principales fallas profundas relacionadas con la tectónica andina.

La tres surgencias de aguas termales que se han observado en el área de estudio se encuentran ubicadas hacia la zona Norte y NNE desde el centro del embalse. La primera, se ubica en la naciente del río Millajahuira; la segunda, en la confluencia del río Patara con la quebrada Caironi; y la tercera, entre la quebrada Viscachuni. En la Lamina 05 del Anexo No.1, se presenta a través del Perfil Longitudinal A-A, un esquema de la surgencia termal en la cabecera de la microcuenca del río Millojahuirá.

En la Región se han identificado dos sistemas de flujo subterráneo. El primero por donde circulan aguas frías y el segundo por donde fluyen aguas termales, y en las zonas donde hay confluencia de aguas termales y frías se produce una mezcla entre estas.

El primer sistema consiste en flujos a través de diversos (a) acuíferos freáticos, granulares y relativamente someros, con recarga natural en los flancos de montaña y con una dirección preferencial de flujo final hacia el embalse Pasto Grande, (b) acuíferos confinados a semiconfinados, poco profundos, representado principalmente por el acuífero Capillune, y en menor proporción, por el acuífero Maure. La descarga del acuífero granular se produce luego de su almacenamiento en el embalse, así como por la evapotranspiración en la zona del embalse y vegetación de ribera y de los bofedales.

El segundo sistema es termal y se ubica y distribuye en la zona norte del embalse. En este sistema acuífero se presenta una recarga lineal por infiltración de agua superficial en algunos tramos por la gran red de pequeños ríos que componen la red de drenaje en la región. La mayor parte de la

recarga del sistema acuífero termal ocurre por precipitación pluvial y de los nevados. Este sistema es confinado y profundo, y el agua subterránea circula a través de fallas y fracturas de la zona de montaña alto- andina, y desde zonas distantes, luego los flujos ascendentes de vía subterránea aportan agua termal a surgencias de diverso tipo en esta cuenca. La recarga hacia este sistema ocurre por infiltración de 3 aguas de precipitación pluvial y de agua de los nevados en las laderas de la montaña con una captación rápida del agua de escurrimiento en las fallas y fracturas. Los sistemas de fracturas interconectadas pueden conducir el agua a profundidad variable, y los conductos más profundos llegan a sistemas de rocas calientes ubicadas a grandes profundidades. Las aguas calentadas por gradiente geotérmico, luego aparecen como hidrotermalismo en sitios topográficamente bajos como en los puntos G-85 y G-86, pero también en zonas de pie de cumbres elevadas como en Millojahuira (G-87). El confinamiento lo producen rocas de baja permeabilidad como son los derrames volcánicos y tobas. La descarga natural de este sistema ocurre de manera ascendente alimentando en superficie a los manantiales o surgencias termales de la región, y debe fluir localmente por las grandes fracturas existentes en el subsuelo hacia el acuífero confinado y acuífero granular donde se produce la mezcla de las aguas termales con las aguas frías. Este flujo es relativamente rápido y ocurre por circulación ascendente en fallas normales que cortan a las rocas de baja permeabilidad.

Finalmente, los sistemas de fracturación más profundos conectados a sistemas geotermales, pueden conducir el agua a ambientes geotermales muy profundos pero de mayor entalpía que al ponerse en contacto, las aguas se calentarán y traerán consigo elementos como litio, boro y otros, al ascender y mezclarse con las aguas frías normales, su temperatura disminuye, pero no supera los 52 grados centígrados, como ocurre en el caso de la surgencia localizada en el paraje denominado Aguas Calientes (punto G-85)

5 RELACIONES SUELO-SUBSUELO Y CALIDAD DEL AGUA

5.1 GENERALIDADES

Por medio de análisis geoquímicos, mineralógicos y petrográficos se han podido caracterizar muestras seleccionadas de suelos, sedimentos y rocas en áreas sometidas a procesos de erosión y edafogénesis en zonas específicas localizadas en la subcuenca del río Vizcachas y sus afluentes. El estudio de suelos permitió evaluar procesos de meteorización ocurridos durante la edafogénesis que reflejan cambios sucesivos en las condiciones ambientales.

El estudio de los procesos de erosión, en general, permite caracterizar posibles fuentes de aporte e identificar los materiales susceptibles al transporte. Estos últimos son: arcillas 1:1 mal cristalizadas y arcillas esmectíticas interestratificadas que forman suspensiones coloidales estables bajo clima seco. Las caolinitas bien cristalizadas, illitas y cloritas, son más difíciles de transportar por las aguas de escorrentía y sedimentan cerca de las fuentes de aporte.

El suelo y el agua son recursos naturales escasos y "renovables"; el primero, en períodos de tiempo muy largos, se ve afectado por la contaminación cada vez mayor debido la actividad antropogénica. Considerando que la contaminación del suelo es consecuencia directa de la actividad humana, que da lugar a un incremento de los contenidos de determinadas sustancias en el suelo, así como a la presencia en el mismo de sustancias que no aparecen naturalmente, se hace inevitable determinar la situación inicial del suelo, esto es, aquella que no se ha visto afectada por dicha actividad.

A partir de los contenidos totales determinados en el material original y en los horizontes del suelo sin contaminar, se puede estimar si han existido aportes consecuencia de actividades humanas en otros suelos de la zona o en otros desarrollados sobre el mismo material y con semejantes características.

En este estudio, precisamente, se tiene como objetivo realizar el reconocimiento de la situación natural de los suelos de la zona de influencia del proyecto y establecer la relación roca, suelo y agua, es decir, establecer las concentraciones de los diferentes compuestos inorgánicos de los suelos y aguas, y su variabilidad espacial en el ámbito geográfico definido como nivel de referencia. Si se supera este nivel, puede afirmarse que el suelo está afectado, mientras, que en caso contrario, no entraña riesgo alguno.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que el riesgo que un elemento puede tener no depende sólo de la concentración total, sino también de la naturaleza y proporción de formas disponibles, parámetros que habría que tener en cuenta para llevar a cabo un estudio completo de contaminación del suelo y análisis de riesgos.

Los índices de acumulación edáfica o de enriquecimiento reflejan la distribución de elementos en el suelo y orientan sobre los procesos edafogénicos que han tenido lugar en una zona determinada. De estos procesos, algunos son los mismos que controlan la composición natural del agua y, por tanto, puede afirmarse que existe una relación considerable entre la química del agua y la química del suelo.

El conocimiento de la calidad del agua es de vital importancia, no sólo por su posible utilización, sino también por la información que proporciona sobre su origen. Así, su composición química aporta información sobre su origen, tipos de roca que ha atravesado, trayectoria e incluso edad.

En este sentido, el estudio geoquímico en la subcuenca del río Vizcachas presenta un gran interés, ya que en la cuenca abajo se encuentran importantes núcleos de población, zonas industrializadas mineras y zonas tradicionalmente agrícolas. Por tanto, dado que la composición geoquímica natural de las aguas de esta subcuenca ha sido afectada mayormente por procesos naturales, y secundariamente por vertidos minero-industriales, este hecho, junto con la existencia del embalse Pasto Grande que almacena dichas aguas, enmascara la calidad y el régimen natural de estas aguas e incluso la propia composición de las aguas de las distintas fuentes de aporte.

Se ha considerado que el río Vizcachas es un modelo adecuado para el estudio de la relación roca-suelo-agua. En el Cuadro No. 5.1 se indica la ubicación geográfica de las muestras de suelos y rocas analizadas en los laboratorios para los fines del estudio

5.2 ASOCIACIONES DE SUELO

Los Grupos de suelos que forman el número de asociaciones en el área de estudio, se han desarrollado sobre el tipo de material geológico de naturaleza volcánica, pero sobre todo a partir de rocas ácidas a intermedias como andesitas, dacitas, traquitas y excepcionalmente riolitas, pues se localizan fundamentalmente en una región con abundancia de rocas volcánicas.

La característica fundamental de estos suelos es la presencia de un horizonte B o C formados por la alteración "in situ" de los minerales de las rocas, lo que da lugar a un color pardo, una estructura típica, una liberación de óxidos de hierro y presencia de minerales alterables.

En general, en las zonas de muestreo se ha podido distinguir suelos débilmente ácidos, sin carbonatos, de muy baja salinidad y escasos contenidos en materia orgánica, a excepción de las zonas fluviátiles, hidromórficas y húmedales, usualmente bien humificada. La textura suele ser arenosa o franco-arenosa y con alto grado de pedregosidad. Son muy permeables pero son los que menos retienen agua. Suelen ser también algo pedregosos dentro del perfil y con muy buena permeabilidad.

Los fluvisoles son suelos poco evolucionados edáficamente, ya que se desarrollan sobre depósitos aluviales recientes sin tiempo para alcanzar una mayor diferenciación genética y, por tanto, imposible de distinguir en cortes, calicatas o perfiles de estos suelos otros horizontes que no sea uno superficial algo más oscuro por un mayor contenido en materia orgánica y mejor estructurado. Es el denominado horizonte A.

El estudio de las aguas ha permitido establecer y relacionar la calidad de las aguas analizadas con la litología de la cuenca, es decir, considerar qué procesos han llevado a la composición actual de las aguas. Para la consecución de este objetivo general es necesario realizar previamente el estudio y caracterización geoquímica de los suelos desarrollados a partir de las principales litologías de la zona; determinar las características físicas y composición química de las muestras de agua y

Cuadro 5.1.- Ubicación geográfica de muestras de rocas y suelos analizadas en los laboratorios autorizados

en los laboratorios autorizados

MUESTREO DE ROCAS					
CAMPAÑA I					
CÓDIGO	COORDENADAS UTM			REFERENCIA	ROCA
HGR-01	0368660E	8144743N	± 4639	Margen izquierda entrada del embalse	Flujo lávico
HGR-02	0374774E	8144239N	± 4545	Grilla embalse	Toba lapilli
HGR-03	0379580E	8154311N	± 4578	Río Antajarani naciente margen izquierdo	Tobas
HGR-04	0385088E	8151060N	± 3690	Confluencia Cacachara Afluente	Lavas grises
HGR-05	0371271E	8159940N	± 4866	Cabecera Río Millojahuira	Roca silicificada
HGR-06	0371496E	8159704N	± 4844		Roca volcánica
HGR-07	0372035E	8159181N	± 4733	Surgencia de aguas termales	Brecha volcánica
HGR-08	0389017E	8159536N	± 4915	Tajo en mina Sta. Rosa Aruntani	Roca volcánica
CAMPAÑA II					
R-01	0371545E	8158163N		Junto eje proyecto presa Millojahuira	Roca volcánica
R-02	0362130E	8151761N		Quebrada Antajarani	Latita tufítica
R-03	0368874E	8147691N	± 4537	Margen derecha embalse	Andesita porfíritica
R-04				Junto a manantial Incalacayac	Andesita porfíritica

MUESTREO DE SUELOS				
CAMPAÑA I				
CÓDIGO	COORDENADAS UTM		REFERENCIA	ROCA
HGR-01	0377728E	8149592N	Margen derecha Antajarani en pampa central	Suelo pardo
HGR-02			Nuestra de referencia	
HGR-03	0371274E	8160089N	Millojahuira naciente	Suelo rojizo
HGR-04	0389017E	8159537N	Tajo en mina Santa Rosa	
CAMPAÑA II				
S1-A	0371205E	8158283N	Arriba eje presa Millojahuira	0.00-0.20m
S1-B	0371205E	8158283N	Arriba de eje presa Millojahuira	0.20-0.50m
S2-A	0376215E	8151704N	Quebrada Antajarani	Suelo de tufitita
S2-B	0376215E	8151704N	Quebrada Antajarani	Suelo de tufitita
S3	0380332E	8147741N	Cauce con conglomerados Río Patera	
S4	0382602E	8148813N	Eje quebrada Cacachara	

clasificar cada tipo de agua, según los iones predominantes; establecer algunas relaciones iónicas que permitan comprender las reacciones físico-químicas que afectan a las aguas. Debido al escaso número de muestras de suelos no se ha realizado el estudio estadístico pertinente, tanto en suelos como en aguas, para evaluar la homogeneidad de las variables y casos, así como sus relaciones con el objetivo de buscar correlaciones de interés.

En la zona altoandina de la Subregión Moquegua, en el área de influencia del Proyecto Pasto Grande, se presentan las siguientes consociaciones y asociaciones de sub-grupos de suelos:

- **ASOCIACION ENTIC CRYANDEPTS – LITHIC CRIORTHENTS (Símbolo EC-LCo)**

Cubre una extensión de aproximadamente 1,5 km². Se extiende ampliamente por encima de los 3,900 msnm. Presenta una topografía compleja (con pendientes mayores de 50 %), quebrada, asociada con grandes área de relieve suave. Se desarrolla sobre materiales esencialmente volcánicos. Está conformada por suelos e Páramo (Páramo andosol), derivados de materiales volcánicos, y por suelos muy delgados o litosólicos, presentando inclusiones de fluvisoles éutricos, en depósitos aluviales y en el fondo de quebradas y valles, e inclusiones de fluvisoles éutricos, en depósitos aluviales y en el fondo de quebradas y valles, e inclusiones de Regosoles éutricos sobre depósitos cuaternarios, arenosos. Afloramientos líticos son frecuentes de observar, así como también de suelos pertenecientes a los Grandes Grupos Gleisol húmico, Histosol y Solonchak órtico.

Por las condiciones climáticas adversas, el potencial agrícola es muy limitado, quedando relegados según su capacidad de uso mayor en tierras aptas para pastos (P) y protección (X). Las áreas con potencial pecuario sólo pueden sustentar una actividad pecuaria extensiva y temporal, dado que los pastos que se observan son muy pobres.

El sub grupo Entic Cryandepts, comprende a suelos de color pardo oscuro y de textura moderada a moderadamente fina, de matices claros que grada a un material moderadamente grueso en el subsuelo. Se ha desarrollado a partir de depósitos fluvioglaciares constituidos por materiales volcánicos, bajo por condiciones climáticas frías y húmedas, por encima de los 4,000 msnm y sobre una topografía plana a ligeramente ondulada, con pendiente entre 3 y 10%. De acuerdo a la clasificación FAO se incluye en el Gran Grupo Páramo andosol.

El sub grupo Lithic Criorthents, comprende a suelos oscuros, debido al mayor contenido de materia orgánica, en contraste con los litosoles desérticos. Tienen baja saturación de bases y grada o descansa sobre rocas continuas y coherentes. La composición litológica del material madre es predominante volcánica. De acuerdo a la clasificación FAO, se incluye en el Gran grupo Litosol andino.

- **ASOCIACION ANDIC CRYUMBREPTS – LITHIC CRIORTHENTS (Símbolo AC-LCo)**

Cubre una extensión cercana los 200 km². Se encuentra ampliamente distribuidora en la parte alta de la cuenca del río Vizcachas, conformante de la cuenca alta del río Tambo, a altitudes mayores de 3,900 msnm.

Presenta un relieve colinado a montañoso. Su contenido pedológico está conformado por suelos de los subgrupos Andic Cryumbrepts y Lithic Criorthents, con inclusiones de afloramientos rocosos muy frecuentes.

Por las condiciones climáticas muy rigurosas, el potencial edáfico de estos suelos es muy limitado, quedando relegados para sustentar una actividad pecuaria lanar extensiva y temporal, en los lugares de relieve favorable (capacidad de uso mayor apropiada para pastos: P)

El subgrupo Andic Cryumbrepts, comprende a suelos con horizonte úmbrico oscuro, delgado, ácido y dotado de materia orgánica. De acuerdo a la Clasificación FAO, se incluyen en el Gran Grupo Paramosol dístico.

El subgrupo Lithic Criorthents, fue descrito en la Asociación Entic Cryandepts-Lithic Criorthents.

- **CONSOCIACION ANDIC CRIAQUENTS (Símbolo ACa)**

Cubre la extensión cercana a los 120 km². Ocupada el área que ha sido cubierta o inundada por las aguas que constituyen el embalse de Pasto Grande. Actualmente se encuentra en los bofedales que aún quedan en sus partes adyacentes, como el formado por el río Pasto Grande en sus nacientes, y en los bofedales de Chilota, Humalso, Huachunta y otros.

Posee una pendiente entre 2-4%, relieve llano a ligeramente ondulado, drenaje imperfecto y con ligero grado de erosión hídrica lateral en los cauces. Su contenido pedológico está conformado por el subgrupo Andic Criaquentes, con inclusiones de suelos del subgrupo Entic Cryandepts, de textura franco arenosa, localizados en aquellas áreas bien drenadas de relieve convexo y con pequeños "ojos" de agua.

Por sus características morfológicas y climáticas limitativas, estas tierras son aptas para pastos (P), pudiendo mantener una actividad pecuaria extensiva.

Suelos mayormente úmbricos, oscuros y ácidos, dorados de abundante materia orgánica y húmeda. En otras zonas el suelo es de tonalidades negras, muy ácido, masivo y dotado, también de materia orgánica. De acuerdo a la clasificación FAO se le incluye en el Gran Grupo Gleisol húmico.

- **CONSOCIACION TYPIC CRYOPSAMMENTS (Símbolo TCp)**

Cubre una extensión aproximadamente de 150 km². Se le encuentra ocupando ciertas zonas aledañas al embalse de pasto Grande, a los bofedales que circulan dicho embalse y bofedales de Humalso, a alturas mayores de 4,000 msnm, constituyendo llanuras alto andinas de naturaleza volcánica (arenas y gravillas pomáceas).

Posee una pendiente entre 2-15%, relieve plano a ondulado, drenaje algo excesivo a excesivo y con moderado grado de erosión hídrica.

Su contenido pedológico está conformado por suelos del sub-grupo Typic Cryopsamments, con inclusiones de suelo del sub-grupo Entic Cryandepts y Lithic Criorthents, localizados en aquellas áreas convexas con vegetación natural.

Por sus características morfológicas y climáticas principalmente, constituyen suelos sin valor agropecuario, estando relegadas como áreas de protección (X).

El perfil del suelo tiene una influencia eólica, constituido por materiales de textura gruesa y carentes de horizontes diagnósticos, a excepción de un horizonte a débil, poco desarrollado, de tonalidades pardo a pardo oscuro y gradando a un horizonte C, que incluye fragmentos gruesos de origen principalmente pomáceo o volcánico.

- **ASOCIACIÓN LITIC – NIVAL (Símbolo R-N)**

Cubre una extensión de aproximadamente 95 km². Se localiza sobre 5,000 msnm, bajo una topografía muy abrupta, con pendientes mayores de 50%.

Se asienta sobre rocas de origen volcánico. Carece de todo uso, por sus condiciones de clima, suelo y topografía, extremadamente desfavorables para uso agrícola, pero de importancia por la presencia de nieve o hielo, como fuente de agua.

5.3 PROCESO DE EROSIÓN Y GEOQUÍMICA DE SUELOS Y SEDIMENTOS

El propósito de este tema es ilustrar el proceso de erosión en la subcuenca del río Vizcachas y su implicancia en el transporte de sedimentos y sustancias en solución desde las áreas fuente, constituidas por todos los materiales rocosos presentes en las cabeceras de subcuenca y en toda el área fluvial y su sedimentación, primero en los cauces y más tarde, en el vaso de almacenamiento del embalse Pasto Grande. Basados en estudios geoquímicos, granulométricos y mineralógicos de los sedimentos y suelos, así como en los análisis petrográficos de las rocas volcánicas que conforman la geología del área de proyecto, ha sido posible entender el fenómeno principal que origina la contaminación natural y antropogénica del embalse Pasto Grande.

El comportamiento de suspensiones finas y arcillosas en el agua que drena en la cuenca hacia el embalse hace posible explicar el proceso de contaminación por contenidos metálicos del agua fluyente que luego van a conformar los sedimentos de fondo del embalse. De esta manera ha sido posible tener una conceptualización y realizar un análisis más completo del actual proceso de contaminación del agua en el embalse, y por lo tanto, plantear alternativas de solución factibles que permitan un buen manejo ambiental y puedan contribuir con el mejoramiento de la calidad del agua.

Para cumplir plenamente con este propósito son necesarios estudios detallados de caracterización de suspensiones, coloides y de arcillas que permitan explicar las susceptibilidades de sedimentos, suelos y rocas a la erosión, transporte, depósito y el proceso de contaminación en el embalse. Por tanto, se requiere de investigaciones detalladas adicionales en el área de estudio para evaluar los procesos de erosión en zonas específicas y críticas utilizando análisis geoquímicos como herramienta de estudio sobre el origen de los materiales rocosos y suelos del entorno, y el análisis de minerales arcillosos marcadores ambientales en sedimentos de fondo del embalse.

En general, de los resultados de los análisis ICP-OES en aguas y sedimentos de fondo del embalse,, que se adjuntan en el Anexo No. 3 y de los análisis de laboratorio para suelos y rocas adjuntados en

el Anexo No. 4, se tiene una excelente información que ha permitido identificar las causas de la contaminación de las aguas del embalse Pasto Grande. De los resultados sobre sedimentos de fondo del embalse y de suelos, se sabe que existe un buen contenido de sílice en estos sedimentos de fondo y silicatos en los suelos del entorno, que son resultado de los procesos de meteorización física y química a través del tiempo geológico y actual. Objetivamente, de los resultados obtenidos se puede sostener que los elementos mayores expresados en óxidos de los elementos, muestran, en general, que las rocas en el ámbito del proyecto, así como los suelos y sedimentos son ricos en sílice, además de presentar alto contenido de hierro y aluminio, así como elementos base. Estos materiales rocosos son las fuentes principales y mayoritarias de los contenidos de hierro, aluminio y sílice que se observan en los sedimentos de fondo del embalse.

La composición aparente refleja que los materiales de los suelos analizados están constituidos por minerales arcillosos (silicatos de aluminio hidratado con buen contenido de elementos bases), sílice libre y generalmente contenido apreciable de Fe y Al. Eventualmente el hierro puede estar también asociado a la estructura de algunas arcillas. A priori, se puede decir que el alto contenido de sílice refleja el origen ígneo del material volcánico, en contraste con el origen sedimentario y volcánico de los materiales acuíferos someros en la Región. La composición de los sedimentos fluviales está controlada por la litología volcánica.

5.4 RELACIONES PRELIMINARES ROCA- SUELO –AGUA

Los trabajos de investigación geoquímica preliminares se han enfocado al estudio de las interacciones roca-suelo-agua por medio de herramientas geoquímicas y mineralógicas con el fin de entender la dinámica de los procesos de erosión, transporte y acumulación de sedimentos en el embalse y su implicancia en la contaminación del agua almacenada.

Los resultados preliminares de este estudio muestran que en la Región se produce un transporte poco activo de materiales en el ámbito de la subcuenca del río Vizcachas a partir de los afluentes, por lo que se genera relativamente poca acumulación de sedimentos en el embalse. Sin embargo, la presencia de agua termal que se mezcla con agua fría en los cauces de los ríos y quebradas, cambian la calidad del agua que finalmente llega al embalse, adicionándole elementos contaminantes. Existe, por tanto, una estrecha relación entre la mineralogía de las rocas volcánicas, tipos de suelos generados con la calidad de las aguas corrientes y las aguas del embalse y los sedimentos de fondo del mismo.

5.4.1 Caracterización de metales movilizables en mineral mediante ensayo de generación de lixiviados.

Se presentan los resultados proporcionado por el Laboratorio AGQ Perú SAC, obtenidos en el ensayo para evaluar la capacidad de movilización de metales pesados en escorrentías y aguas de lluvia de 8 muestras de rocas, las que se analizaron para cumplimiento del programa de estudio de mejoramiento de aguas del embalse de Pasto Grande en la Región. (Ver Anexo No. 4). La ubicación de las muestras de rocas se muestra en el Cuadro 5.2.

Los ensayos analíticos previstos en el alcance de los trabajos incluyen la determinación de las características genéricas de lixiviados de minerales: como son el pH de extracto, muy importante en el caso de la movilización de metales, y los contenidos de metales solubles en agua milli-Q.

De los resultados obtenidos, se puede comprobar varias características de las muestras. Por un lado se verifica que las concentraciones de los metales pesados lixiviables (movilizables con aguas de contacto directo), son muy bajas y en su mayoría se encuentran por debajo del límite de cuantificación del método analítico. Además, analizando de forma global los resultados se comprueba que las especies de mayor concentración son lo alcalinos y alcalinotérreos junto al azufre. Esto es totalmente coherente si aceptamos que las sales solubles que se incorporarán al lixiviado mediante el ensayo desde el mineral serán en su mayoría sulfatos solubles de sodio, potasio, calcio, magnesio o aluminio, además de en menor medida carbonatos, bicarbonatos o silicatos (no evaluados).

Por otro lado al no disponerse de valores legislados para este tipo de ensayo en residuos minero-metalúrgicos se utilizará legislación concerniente al contenido metálico en aguas de vertido en el sector minero-metalúrgico que se recoge en el Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM.

De la comparativa estricta con las citadas legislaciones podemos encontrar cómo solamente en el caso del Fe, una de las muestras excede la comparación con los valores incluidos en la legislación que regula los vertidos de aguas. Aun así el elemento considerado es el Fe. Para la tipología de muestras que estamos evaluando debemos ser conscientes de que el contenido de Fe de los minerales puede ser elevado (los niveles de fondo que podemos encontrar de Fe son mayores que los que podemos encontrar en suelos), por lo que en el caso puntual de una sola muestra, no se debería plantear como preocupante el nivel de Fe lixiviado.

Para garantizar dicho comportamiento se podría comparar los valores obtenidos con otras legislaciones como los límites establecidos en los estándares nacionales de calidad del agua del Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM, para las categorías de agua 3 (riesgos para plantas y animales) y 1 B1 (aguas recreacionales) o por ejemplo los valores límite que se aplica para contenidos lixiviables en residuos para su admisión a vertederos considerándolos inertes según normativa vigente europea (Decisión 2003/33/CE). Esta comparativa a todos los efectos debería considerar meramente informativa, pues el ámbito de aplicación de la misma dista mucho de poder asemejarse a un entorno minero donde las concentraciones de metales son más elevadas.

No obstante si realizamos la comparativa con los valores de calidad del agua, se comprueba cómo solamente el nivel de Fe y el nivel de Al exceden los valores recogidos en la categoría de aguas con riesgo para las plantas y los animales. En este caso la explicación es la misma. El contenido de Fe y Al movilizable es alto debido a que las muestras han estado inalteradas y el contacto con agua produce la posibilidad de que sustancias solubles que habían estado protegidas se lixivien con el contacto con agua fresca. En casos muy extremos, no es el que nos ocupa, podría ser recomendable el tratamiento de estos lixiviados de cara adecuar su calidad para su vertido, por ejemplo mediante una precipitación alcalina, aunque como se ha comentado en este caso no es indispensable por la comparativa que se realiza con respecto a la normativa de efluentes mineros según Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM.

También de forma informativa se incluyen valores que se recogen de la legislación europea donde se aprecia que existe gran similitud con respecto a la normativa D.S. N° 002-2008-MINAM, aunque salen del contexto donde nos encontramos.

CONSORCIO V-S
Ing. Víctor Díaz Sánchez
INGENIERO CIVIL
CIP. 6530

CONSORCIO V-S
Dr. César Lázcano Carreño
BIOLOGO
CIP. 5582

CONSORCIO V-S
Ing. Juan Quiroga Vite
INGENIERO GEOLOGO
CIP. 55872

Por todo ello se debe entender que estas muestras presentan una movilidad metálica muy limitada (nula en el caso de metales pesados tóxicos), y ligera en el caso de metales comunes constitutivos de la matriz del mineral (Fe y Al, además de K, Na, Mg y Ca), con lo que podrían catalogarse como muestras bastante inertes. Además en un entorno minero, se entiende por común que puedan aparecer este tipo de concentraciones y por ello la normativa que se ha de aplicar al sector minero debe tener en cuenta estas peculiaridades.

Cuadro 5.2.- Ubicación de muestras de rocas
Test de lixiviabilidad con agua (icp-oes) en rocas

	CAMPAÑA I			
CÓDIGO	COORDENADAS			OBSERVACIONES
HGR-02	374774E	8144239N	± 4545Z	Muestra en la orilla de embalse. Roca volcánica
HGR-07	372035E	8159181N	± 4733Z	Muestra en nacimiento río Millojahuira
HGR-08	389017E	8159536N	± 4915Z	Muestra de roca volcánica en tajo mina Sta. Rosa
HGR-04				Intersección Cacachara y afluentes

5.4.2 Análisis granulométricos y geoquímicos de suelos

Se presentan los resultados obtenidos en los ensayos para evaluar según criterios edafológicos, primero, tres muestras de suelo en el entorno del embalse Pasto Grande (Abril, 2012) y luego, seis muestras (Julio, 2012). Los certificados de dichos análisis se adjuntan en el Anexo No. 4. La ubicación de las muestras representativas del área de estudio se indican en el Cuadro 5.3.

De los resultados obtenidos en Abril y Julio 2012, se puede comprobar varias características de la muestra. Por un lado se comprueba mediante la medición del contenido de metales analizado determinación en el barrido ICP-OES, que la cantidad de analitos solubles mediante el ataque con agua regia es muy baja. Tan solo se justifica mediante esta determinación el 5-15 por ciento de la masa total del material.

De la observación de los ataques se comprueba que se mantiene gran cantidad de muestra una vez digestionada, lo que indica por los ácidos utilizados, que se establece la hipótesis de que este residuo no solubilizable al agua regia sea principalmente silicatos insolubles. Para haber sido capaces de digestionar este contenido en sílice, deberíamos haber efectuado una digestión empleando en uno de sus pasos ácido clorhídrico para destruir la matriz de silicatos.

Por otro lado en cuanto a la parte solubilizable, se comprueba que existe un alto contenido de los componentes mayoritarios que conforman el suelo con Ca, K, Mg y Fe. Especial mención tiene el contenido de Fe, que es el componente mayoritario de los suelos con un porcentaje del orden del 3 por ciento.

En cuanto al contenido de metales pesados los niveles son muy escasos, siendo valores asumibles en suelos de origen natural inalterado. El nivel de azufre total es también lo suficientemente bajo,

como para considerar que los efectos que pudiera tener el material en cuanto a la posibilidad de generación de aguas ácidas es muy limitado.

En cuanto a la granulometría, los tamices permiten conocer objetivamente desde el punto de vista edafológico, la porción de limos (menor de 64 micras), arenas y gravas (2-64mm). Puesto que toda la muestra pasaba por un tamiz de 1 pulgada y que el porcentaje de muestra inferior a 64 micras es del orden de 15-40 por ciento, podemos considerar que la fracción mayoritaria es la compuesta por arenas, con lo que refuerza la hipótesis de suelo moderadamente arenoso, y de un origen de material sedimentable, donde las sales solubles de Ca, Mg, K y Na se han disuelto (en menor medida Ca y Mg que se pueden encontrar asociados a carbonatos), y donde quedan restos insolubles, principalmente silicatos y también Fe, que podría encontrarse asociado a silicatos solubles tipo jarosítico, y/o oxi-hidroxidos.

Cuadro 5.3- Ubicación de muestras para análisis de suelos

- 1) Análisis granulométrico, malla 200, 325, 400.
- 2) Determinación de multielementos ICP-OES.

MUESTRA	COORDENADAS			OBSERVACIÓN	SUELO
	ESTE	NORTE	COTA		
HGS-01	377728E	8144592	4638Z	Suelo en pampa central entre quebrada Antajarani y Río Patera.	
HGS-03	371274E	8160089	4912	Suelo rojizo en cabecera de la quebrada Millojahura	
HGS-04				Suelo junto a tajo abierto en mina Sta. Rosa Aruntani.	

5.5 ANÁLISIS DE AGUA Y SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN

Las aguas que drenan a la zona de estudio fueron analizadas en periodos diferentes (Abril y Julio 2012). Los resultados muestran que el pH es menor de 7 u.e., yendo de carácter neutro a ligeramente ácido, y las conductividad eléctrica son realmente bajas, valores considerados propios para estas aguas corrientes, lo que refleja aporte de iones en solución por interacción con las rocas de afloramiento de naturaleza volcánica. Solo en las microcuencas altas, las aguas contaminadas presentan un pH ácido.

La turbidez y los sólidos en suspensión son variables pero bajos, lo que indica poco aporte de sedimentos en todo el sistema de drenaje, por las características morfológicas y litológicas de los territorios de la zona altoandina. El transporte de sedimentos sería principalmente de materiales muy finos del tipo arcilla y limos, y sustancias en disolución, conforme a los resultados de granulometría.

No se tienen resultados sobre la mineralogía de la carga sedimentaria ni de sus volúmenes en el agua, pero se puede decir, que dada la baja energía que tienen estos pequeños ríos en las pampas, la carga principal es de sedimentos muy finos en suspensión, probablemente arcillas de menor cristalinidad y esmectitas, que han sufrido procesos de hidrolisis.

5.6 INFLUENCIA DE FACTORES AMBIENTALES EN LA GEOQUÍMICA DE SUELOS Y AGUAS

5.6.1 Contaminación Ambiental en Suelos

En el área de la subcuenca del río Vizcachas, los niveles de contaminación del ambiente han aumentado considerablemente solo en las zonas mineras, asociándose este incremento, primero, al nivel de desarrollo de la actividad industrial, generadora creciente de elementos y sustancias difícilmente biodegradables y, segundo, por la contaminación natural, debido a la presencia de zonas mineralizadas abiertas y surgencias de aguas termales conteniendo elementos peligrosos.

La contaminación ambiental del suelo puede asociarse, bien a un incremento en los contenidos de los componentes del suelo por causa antropogénica, bien a un incremento de los riesgos al provocar efectos negativos en el funcionamiento del suelo o en la calidad de los productos agrícolas aguas debajo de embalse, causando riesgo para la salud humana.

La contaminación en la subcuenca del río Vizcachas ha afectado en diverso grado a los recursos hídricos y suelos. El suelo es un medio variable y complejo en su composición, tratándose de un sistema abierto en el espacio y en el tiempo que evoluciona hasta alcanzar el equilibrio. Así, el suelo puede considerarse un sistema depurador capaz de degradar o inmovilizar sustancias contaminantes, actuando (a) como fuente para los contaminantes, (b) como filtro retardador del paso de dichos contaminantes a las aguas subterráneas o (c) como birreactor en el que los compuestos orgánicos pueden descomponerse. Los suelos, como parte de un ecosistema, se comportan generalmente como sistemas que bajo condiciones naturales son estables y resistentes a grandes cambios.

Lamentablemente, algunas acciones del hombre y/o eventos naturales influyen negativamente alterando el equilibrio ecológico y causando, a corto o mediano plazo, daños drásticos al sistema suelo que son, en muchos casos, irreversibles. La contaminación del suelo hace referencia a la presencia de un elemento o sustancia en concentración superior a la natural, como resultado de la actividad humana y que, por lo tanto, tiene un efecto negativo en el ambiente y sus componentes.

Entre los posibles elementos o sustancias contaminantes se encuentran los metales pesados, los cuales forman parte de la corteza terrestre como constituyentes naturales (contenido litológico) y se distribuyen por la atmósfera, hidrosfera, litosfera y biosfera a través de ciclos biogeoquímicos.

Los metales pesados pueden dividirse en:

- Oligoelementos o micronutrientes: requeridos a nivel de trazas por parte de los organismos para completar su ciclo vital, siendo tóxicos a niveles superiores, tales como el As, Co, Cr, Cu, Mo, Mn, Ni, Se y Zn.
- Metales pesados sin función biológica conocida: son altamente tóxicos y tienden a acumularse en los organismos, tales como el Cd, Hg, Pb, Sb y Bi.

El incremento incesante de la contaminación ha conducido a la necesidad del estudio y comprensión de la evolución y destino de los contaminantes presentes en el ambiente y de sus posibles efectos sobre los organismos vivos. En suelos no contaminados los contenidos en metales están relacionados con los contenidos en el material original y se incrementan cuando existen aportes

antropogénicos, pudiéndose alcanzar niveles de contaminación. Sin embargo, el riesgo que un elemento puede tener para el ambiente y la cadena alimenticia no depende sólo del contenido total sino también de la naturaleza y proporción de formas disponibles de dicho elemento.

5.7 CALIDAD DEL AGUA EN LA SUB CUENCA DEL RIO VIZCACHAS

5.7.1 *Calidad del agua en el embalse y sus afluentes*

- **Calidad del agua en el embalse Pasto Grande y afluentes-Ministerio de Salud- Periodo 2004-2007.**

Los ríos Cacachara y Antajarane, presentan concentraciones elevadas de hierro, considerando el límite de la norma que especifica 5 mg/l para agua de uso de riego. Los ríos Cacachara, Patara y Hualcane, tienen altas concentraciones de manganeso, ocurriendo algo similar en el embalse, llegando a concentraciones de 1.2 mg/l, valor que sobrepasa el límite de 0.5 mg/l establecido en la legislación para agua de uso pecuario.

Tomando en cuenta la base de datos sobre los resultados de análisis (2004 - 2007), quedan identificados los ríos afluentes Millojahuira, Cacachara y Hualcane, con características ácidas.

En el Embalse Pasto Grande según muestreos del año 2007 el agua presenta variación en cuanto al parámetro de pH, llegando a valores de 5.36 a 5.94 u.e., caracterizada dentro del rango ácido.

El río Patara, tiene concentraciones de arsénico de 0.32 a 0.72 mg/l, valores que superan el límite de 0.2 mg/l establecido para el agua de clase III, en la Ley General de Aguas (Ley derogada).

El río Cacachara, registra concentraciones de arsénico y plomo en valores que sobrepasan los valores establecidos en los ECAs en las Categoría 3 y 4.

Se confirma que los ríos que aportan grandes concentraciones de hierro son el Millojahuira, Cacachara y Antajarane, existiendo un alto riesgo para el parámetro manganeso, tanto en los afluentes como en el embalse.

El 21 de setiembre de 2006, la Universidad Nacional "Jorge Basadre Grohman" de Tacna, a través de la Facultad de Ingeniería Pesquera, emite un certificado de análisis físico-químico, puntualizando (entre otros detalles) que las aguas de la Presa Pasto Grande contienen un pH de 5.17 u.e., cantidad que dista mucho de los niveles permisibles. El documento que lleva la firma de Reyna Cancino Angulo (Encargada del Laboratorio) y Walter Ibárcena Fernández (Jefe de laboratorio), se refiere además a los niveles de concentración de carbonatos, bicarbonatos, conductividad eléctrica, cloruros, anhídrido carbónico, alcalinidad (CaCO₃), dureza (CaCO₃) y salinidad. Al contener un pH de 5.17 u.e., a decir de los estudiosos de la calidad del recurso hídrico, estas aguas no son aptas ni recomendables para la crianza de trucha, sin descartar además un latente riesgo para la población consumidora.

- **Calidad de agua 2007-2008. Afluentes al Embalse Pasto Grande**

De acuerdo a la evaluación realizada en los ríos Acosiri, Antajarane, Cacachara aguas abajo, Cacachara Inicio, Cacachara después de la confluencia de los ríos Acosiri y Cotañani, Millojahuira y

salida del túnel Jachacuesta, se ha identificado como aguas en condiciones ácidas cuyos pHs fluctúan entre 3-5 u.e., de acuerdo a lo especificado en la Ley General de Aguas, clase III.

El oxígeno disuelto en las 16 estaciones de monitoreo identificadas se encuentran por encima del valor límite de la Ley General de aguas cumpliendo con esta norma.

Las concentraciones de Cobre, Zinc, Cromo en todas las estaciones de muestreo afluentes al embalse Pasto Grande no presentan ningún riesgo sanitario encontrándose dentro de la normatividad aplicada.

Cabe mencionar que en algunas estaciones de muestreo se realizó la evaluación de Cianuro Wad, Mercurio, Fosfatos, Nitratos y Nitritos encontrándose que dichas concentraciones se encuentran dentro del valor límite.

Los niveles de **Plomo** en todos los afluentes al embalse Pasto Grande no presentan riesgo sanitario excepto en la estación ubicada en el río Cacachara aguas abajo, a 40 m aguas abajo de la garita de control de la Unidad Santa Rosa- Minera Aruntani cuyo riesgo sanitario es Moderado lo cual significa presencia de este metal pesado.

Para el parámetro Arsénico en las estaciones de muestreo Río Patara y Cacachara sus concentraciones presentan riesgo sanitario alto sobrepasando los niveles permisibles, asimismo en la estación Río Cacachara aguas abajo de la garita de control de la Unidad Santa Rosa-Minera Aruntani presenta riesgo sanitario Moderado indicando la presencia de este metal.

El nivel de Hierro en los ríos Acosiri, Antajarane, Río Cacachara aguas abajo, Río Cacachara unión ríos Acosiri-Cotañani y río Millojahuirá presentan riesgo sanitario Alto logrando sobrepasar los límites permisibles; asimismo en el Río Patara Inicio el nivel de hierro indica riesgo sanitario Moderado.

La concentración de Manganeseo en las estaciones de muestreo ubicadas en Humalso, Río Antajarane, Río Cacachara aguas abajo, Río Millojahuirá, Río Patara, Río Patara Inicio y Salida Túnel Jachacuesta presentan riesgo sanitario Alto observándose niveles elevados de este metal.

Para el caso del parámetro Aluminio en las estaciones ubicadas en los Ríos Antajarane, Cacachara Aguas abajo, Millojahuirá y Patara Inicio presentan concentraciones que superan los límites permisibles.

En el caso de los niveles de Boro, solo el río Patara presenta concentraciones que no cumplen con el valor límite.

Además de la evaluación de los parámetros arriba mencionados se realizó el análisis de Nitrógeno Total y Fósforo total en algunas estaciones de monitoreo los cuales no tienen norma de comparación para este tipo de uso de agua.

En el Cuadro 5,4 se muestra el riesgo sanitario de las aguas de los afluentes al embalse.

Cuadro 5.4.- Riesgo Sanitario de las Aguas de los Afluentes al Embalse

ESTACIONES DE MUESTREO	RIESGO SANITARIO		
	NINGUNO PARA	MODERADO PARA	ALTO PARA
Humalzo	Cu, Zn, Cr, Colif Tot., Colif Termot.		Mn
Salida Túnel Jachacuesta	Cu, Zn, Cr, Colif Tot., Colif Termot.		pH, Mn
Río Acosiri	Cu, Zn, Cr, Mn, CN Wad, Colif Tot., Colif Termot.		pH, Fe
Río Cotañani	Cu, Zn, Cr, Mn, CN Wad, Colif Tot., Colif Termot.		
Río Apacheta	Cu, Zn, Cr, Mn, CN Wad, Colif Tot., Colif Termot.		
Río Cacachara unión ríos Acosiri - Cotañani	Cu, Zn, Cr, Mn, CN Wad, Colif Tot., Colif Termot.		pH, Fe
Río Cacachara Inicio	Cu, Zn, Cr, Mn, CN Wad, Colif Tot., Colif Termot.		pH
Río Cacachara aguas abajo	O ₂ , Cu, Zn, Cr, CN Wad, Hg, Fosfatos, Nitratos, Nitritos, Colif Tot.,	Colif Termot., Pb, As,	pH, Fe, Mn, Al
Río Antajarani	O ₂ , Cu, Zn, Cr, Hg, Fosfatos, Nitratos, Nitritos, Colif Tot., Colif Termot.		pH, Fe, Mn, Al
Río Huiscalljico	Cu, Zn, Cr, Mn, CN Wad, Hg, Fosfatos, Nitratos, Nitritos, Colif Tot., Colif Termot.		
Río Incacachi	O ₂ , Cu, Zn, Cr, Mn, CN Wad, Hg, Fosfatos, Nitratos, Nitritos, Colif Tot., Colif Termot.		
Río Millojahuira	O ₂ , Cu, Zn, Cr, CN Wad, Hg, Fosfatos, Nitratos, Nitritos, Colif Tot., Colif Termot.		pH, Fe, Mn, Al
Río Patara	O ₂ , Cu, Zn, Cr, CN Wad, Hg, Fosfatos, Nitratos, Nitritos, Colif Tot., Colif Termot.		As, Mn, B
Río Patara Inicio	O ₂ , Cu, Zn, Cr, CN Wad, Hg, Fosfatos, Nitratos, Nitritos, Colif Tot., Colif Termot.	Fe	As, Mn, Al
Río Queñuani	O ₂ , Cu, Zn, Cr, Mn, CN Wad, Hg, Fosfatos, Nitratos, Nitritos, Colif Tot., Colif Termot.		
Río Tocco	O ₂ , Cu, Zn, Cr, Mn, CN Wad, Hg, Fosfatos, Nitratos, Nitritos, Colif Tot., Colif Termot.		

• **Calidad del Agua en la Zona Minera de Santa Rosa**

La ubicación de la zona de estudio en la naciente del río Cacachara, afluente del Patara, sobre los 4,680 m.s.n.m., le da una connotación especial, ya que, si bien los usos actuales en dichos espacios no son muy significativos, éstos, a través del ecosistema de "bofedales", regulan y almacenan el agua de escorrentía o precipitada en forma natural, para luego descargar lentamente aguas abajo, cuyo destino inicial será el embalse Pasto Grande y, luego la ciudad de Moquegua (uso para consumo y agrícola).

En el ámbito de estudio existen tres quebradas pequeñas: Cacachara, Cotañani y Acosiri (Mauruma). Estas quebradas tienen sus nacientes a altitudes que sobre pasan los 5 000 msnm, lugar caracterizado por la formación de nevados perpetuos o temporales, los mismos que aportan al cauce de las quebradas, deshielos y filtraciones que afloran no sólo por el fondo del cauce, sino también por los ojos de agua en las laderas de los cerros.

La calidad del agua, es uno de los parámetros más importantes para el diagnóstico de los recursos hídricos, toda vez que su uso puede limitarse, si las concentraciones de los elementos que la componen se encuentran por encima de los límites permisibles para los diferentes usos. La calidad de las aguas está en función de las características físicas y antrópicas de la cuenca del río Cacachara y sus afluentes (quebradas Acosiri, Cotañani y Cacachara); los procesos de erosión, las actividades mineras abandonadas, son los que de una u otra manera modifican sustancialmente las condiciones naturales de las aguas. Con el fin de caracterizar la calidad actual de las aguas en las diversas quebradas en el área del Proyecto; durante el estudio de impacto ambiental se tomó un conjunto de muestras puntuales o al azar ubicadas estratégicamente para poder evaluar en forma integral las condiciones de la calidad del agua. Se considera seis puntos de muestreo que se describe a continuación:

E-1: localizada aguas arriba de la quebrada Cotañani aproximadamente a una altitud de 4800 msnm. Se trata de agua transparente con caudal de 1.5 l/s y pH de 5.76 u.e., en medio del bojedal.

E-2: localizada aguas arriba de la confluencia con la quebrada Acosiri, aproximadamente a una altitud de 4720 msnm. Es un agua transparente, con un caudal de 68 l/s y un pH de 5.90 u.e, presenta vegetación típica de bofedal en las riberas.

E-3: localizada aguas arriba de la quebrada Acosiri aproximadamente a una altitud de 4760 msnm. Es un agua transparente con un caudal de 80 l/s y un pH de 3.95. en medio del bofedal que presenta en la margen derecha una contaminación natural por la oxidación del mineral (principalmente pirita) de los cerros Chopiparque, Quinaquinani y Cotañani.

E-4: localizada en la quebrada Acosiri aguas arriba de la confluencia con la quebrada Cotañani, aproximadamente a una altitud de 4720 msnm, tiene agua transparente, con un caudal de 174 litros por segundo, presenta vegetación típica de bofedal en las riberas, pH= 5.22.

E-5: Localizada aguas arriba de la confluencia con el río Cacachara, aproximadamente a una altitud de 4 710 msnm, tiene agua transparente, con un caudal de 50 litros por segundo, presenta una contaminación de drenaje de agua ácida que sale de la bocamina de la mina Cacachara, pH = 4.90 u.e.: en su lecho no existe vida acuática.

E-6: Localizada aguas abajo de la quebrada Jacosive, aproximadamente a una altitud de 4 680 msnm, es una agua transparente, la quebrada Jacosive aporta gran cantidad de sales, por la blancura que existe en su lecho, pH = 4.46 u.e., en sus riberas existe poca vegetación ribereña típica (ichu y gramíneas)

Los resultados del muestreo de parámetros de calidad del agua en las estaciones de monitoreo son presentados en los Cuadros 6.2 y 6.3. Algunos de los parámetros se utilizan para evaluar el nivel de toxicidad del agua, ya sea para la salud humana, recursos acuáticos y para riego agrícola; estos principalmente son los metales totales y disueltos en las aguas. En el Cuadro 6.4 es muestra la calidad del agua subterránea en el área de la mina Santa Rosa.

La calidad de las aguas de la quebrada Cotañani, según los niveles máximos permisibles de la ley general de aguas vigente, presenta niveles superiores para aguas de clases I, II y III de concentraciones de nitratos, hierro y manganeso.

La calidad de las aguas de la quebrada Acosiri, según los niveles máximos permisibles de la ley general de aguas vigente, presenta acidez menor al rango de 5 a 9 unidades para todos los usos; también tienen niveles superiores para aguas de clases I, II, III y VI de concentraciones de nitratos, cadmio, hierro, manganeso y plomo.

La calidad de las aguas de la quebrada Cacachara, según los niveles máximos permisibles de la ley general de aguas vigente, presenta acidez menor al rango de 5 a 9 unidades para todos los usos; también tienen niveles superiores para aguas de clases I, II, III y VI de concentraciones de nitratos,

cadmio, hierro, manganeso y plomo. Asimismo, tiene valores de coliformes totales y fecales superiores para aguas de clase I.

Se recuerda que en general, en forma natural en toda la microcuenca de la quebrada Cacachara tiene valores de manganeso y hierro altos originados por procesos de lixiviación natural

Durante la etapa de explotación se ha realizado monitoreos trimestrales de calidad del agua superficial en la unidad minera Santa Rosa. Las estaciones de monitoreo se muestran en el Cuadro 5.5 y la ubicación de las mismas se encuentra en el Anexo de planos.

Cuadro 5.5.- Estaciones de Monitoreo de Calidad del Agua

EM1:	Quebrada Acosiri-1	En la parte alta de la quebrada Acosiri
EM2:	Quebrada Acosiri-2	En la quebrada donde se encuentra el PAD de lixiviación, aguas arriba de la confluencia con la quebrada Acosiri.
EM3:	Quebrada Acosiri-3	En la parte media de la quebrada Acosiri
EM4:	Quebrada Acosiri-4	Aguas arriba de la confluencia con la quebrada Acosiri
EM5:	Quebrada Cotañani-1	Aguas arriba de la confluencia con la quebrada Cotañani
EM6:	Río Cacachara	Aguas abajo de la confluencia de las Quebradas Cacachara, Cotañani, Acosiri, Jacosive.
EM7:	Quebrada Cotañani-2	En la parte alta de la quebrada Cotañani
EM8:	Quebrada Cacachara-2	Aguas arriba de la confluencia con la quebrada Acosiri
EM9:	Quebrada Cacachara-1	Aguas arriba del campamento base Cacachara.

En las estaciones de monitoreo la temperatura del agua superficial varía entre 0.5 °C y 14.7 °C, El rango de temperatura es apropiado para aguas superficiales para altitudes entre 4600 y 5000 msnm.

En cuanto a los registros históricos de pH de las aguas en las estaciones EM1, EM2, EM3 varía entre 3 y 4.5, debido a la presencia de material argílico. En las partes altas de las quebradas. Para el resto de estaciones el pH varía entre 3.5 y 6.

Las concentraciones de sulfatos se encuentran por encima de los 100 mg/L excepto para las estaciones EM4, EM9. El rango en que se encuentran las concentraciones de sulfatos fluctúa entre 24 mg/L y 298 mg/L, en la estación EM1 para Septiembre del 2005 se registró un valor extremo. En la mayoría de estaciones la concentración de Cianuro fluctúa entre 0.001 mg/L a 0.005 mg/L.

Las concentraciones de Arsénico varían entre 0.005 mg/L y 0.2 mg/L, resultando en niveles por debajo del límite permisible para aguas de clase I, II y III. Las concentraciones de Cobre fluctúan entre 0 mg/L y 0.1 mg/L, resultando en niveles por debajo del límite permisible para aguas de clase I, II y III. En cuanto a la variación de las concentraciones de Plomo y Zinc fluctúan entre 0.001 mg/L

y 0.169 mg/L, resultando en niveles por debajo del límite permisible para aguas de clase I, II y III para el Zinc.

La concentración de Hierro varía entre 0.09 mg/l y 16.41 mg/l. Las concentraciones de Manganeseo varían entre 0.001 mg/l y 0.592 mg/l, resultando que para ambos parámetros en la mayoría de estaciones se encuentra por encima del límite permisible para aguas de clase I, II y III. Esto se puede explicar a que en forma natural en toda la microcuenca de la quebrada Cacachara ocurren procesos de lixiviación natural.

• **Calidad Del Agua En La Quebrada Millojahuirá**

El río Millojahuirá en su drenaje superficial presenta afloramientos de aguas termales ácidas, y como producto de la mezcla de las aguas termales con aguas frías, desde su cabecera moviliza todos los iones metálicos lixiviados de las rocas volcánicas del lecho y las paredes del valle por el cual discurre, hasta el Embalse de Pasto Grande. A lo largo del lecho del cauce de este río se puede observar la coloración rojo oscuro a marrón rojiza, producto de la formación de compuestos oxidados de hierro. Así, la goethita puede haberse generado a partir de la precipitación de Fe^{3+} que venía con el drenaje ácido natural. Existen acuíferos en los depósitos cuaternarios que captan principalmente aguas procedentes de las precipitaciones en forma de lluvia, granizo o nieve, infiltrándose y almacenándose, formándose las aguas subterráneas, las que descargan hacia el exterior a través de manantiales, los cuales incrementan su caudal principalmente durante la época de avenidas y disminuyen hacia el final del periodo de estiaje. Estas aguas tienen bajos valores de pH entre 3 y 5 u.e.

Las rocas volcánicas que conforman las paredes del valle se encuentran fuertemente meteorizadas y fracturadas, lo que permite la existencia de un acuífero rocoso, pero estas rocas volcánicas presentan en su composición petrográfica contenidos de minerales con Fe y Mg y óxidos de hierro, que al ser disueltos o lixiviados por las aguas ácidas permiten el transporte de estos elementos, particularmente Fe y Al, hacia el embalse.

De las observaciones de campo, se puede deducir que el nivel del agua subterránea se encuentra cerca de la superficie en el fondo de las quebradas y que la dirección del flujo del agua subterránea es casi paralela al drenaje superficial.

Los sistemas hidromórficos se consideran como ecosistemas y a la vez depósitos captadores de agua, se recargan principalmente de las filtraciones y manantiales que afloran en la parte baja de las quebradas, la recarga de todo el sistema se produce desde las precipitaciones a través de las fracturas y porosidad propia de la roca en las partes altas, las velocidades de evacuación y los caudales estarán en función a los parámetros hidrogeológicos que presente la roca, de los gradientes hidráulicos y de sus condiciones estructurales.

Cuadro 5.6.- Parámetros de Calidad del Agua

Parámetros		Numero de Las Muestras					
Nombre	Unidades	E-1	E-2	E-3	E-4	E-5	E-6
Temperatura Ambiental	°C	5	11	14	10	2.5	-1
Temperatura del agua	°C	6	12	7.5	13	4	2.5
Caudal	l/s	1.5	50	80	150	50	
pH	Mv	5.76	5.90	3.95	5.22	4.90	4.46
Potencial Redox	µs/cm	-3	-12	85	25	42	72
Conductividad Eléctrica	mg/l CaCO ₃	144.8	105.5	280	279	741	258
Dureza Total	mg/l	60	60	40	60	130	50
Sólidos Totales	mg/l SO ₄ ⁻²	152	124	332	328	644	276
Sulfatos	mg/l	49.74	47.53	171.61	140.15	355.0	105.0
Sulfuros de Hidrogeno	mg/l CN ⁻	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Cianuro Total	mg/l	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Aceites y Grasas	mg/l		<0.01		<0.01	<0.01	
Nitritos	mg/l	0.411	0.092	0.131	0.200	0.661	0.142
0.142Nitratos	mg/l	0.013	<0.01	0.011	0.011	0.021	0.012
Fosfatos	mg/l	0.014	0.013	0.015	0.024	0.018	0.02
Acidez	mg/l	36	38	93	96	191	68
Cloruros	mg/l Cl ⁻	0.75	0.75	1.00	1.00	0.75	0.75
Arsénico	mg/l As	0.012	<0.01	<0.01	0.012	0.021	0.015
Boro	mg/l B	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Cadmio	mg/l Cd	0.002	0.02	0.02	0.09	0.022	0.005
Calcio	mg/l Ca	12.66	6.44	5.90	5.48	40.80	10.16
Cobre	mg/l Cu	0.010	<0.01	0.013	0.012	0.137	0.024
Cromo	mg/l Cr	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Hierro	mg/l Fe	2.100	0.336	1.212	1.331	8.675	2.862
Magnesio	mg/l Mg	2.752	3.014	2.311	2.556	2.863	2.146
Manganeso	mg/l Mn	0.993	0.094	0.298	0.283	2.075	0.961
Plomo	mg/l Pb	0.012	0.025	0.135	0.003	0.144	0.015
Potasio	mg/l K	4.57	1.83	3.98	3.38	4.23	4.10
Sodio	mg/l Na	12.50	4.85	5.80	6.55	5.80	9.40
Zinc	mg/l Zn	0.009	0.046	0.123	0.136	6.925	0.737
Coliformes Totales	NMP/100ml					20	
Coliformes Fecales	NMP/100ml					<2.2	

6 RELACION DE LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRANEA CON LA CALIDAD DEL AGUA DE LOS AFLUENTES DEL EMBALSE Y CON LAS AGUAS DEL EMBALSE MISMO

6.1 GENERALIDADES

El funcionamiento del Embalse Pasto Grande data de aproximadamente 15 años atrás y de 10 años de utilización de los recursos hídricos regulados para asegurar el uso poblacional en las ciudades de Moquegua e Ilo y otros centros poblados, en el afianzamiento hídrico del riego en los valles de Moquegua, Torata e Ilo, y en los planes de ampliación de la frontera agrícola y generación de energía. En los últimos 6 años, ya se tenía conocimientos claros sobre el proceso de desmejoramiento de la calidad del agua en el embalse de acuerdo a los análisis de agua preliminares realizados por el mismo proyecto y otras entidades.

Desde la década pasada, ya se había determinado exceso de sustancias y elementos químicos contaminantes en el embalse Pasto Grande. Las aguas superficiales provenientes del sector Norte y NNE de la subcuenca, de manera particular las provenientes de las micro cuencas de los ríos que drenan directamente al embalse como el Millojahuirá, Hualcane y Antajarane presentaban niveles de contaminación natural desde ámbito de las cabeceras de cuenca en los cerros que anteriormente estaban cubiertos con nieve. Debido al proceso de desglaciación se tiene presencia de zonas mineralizadas con alteración hidrotermal, así como surgencia de aguas termales ácidas.

El desarrollo de la actividad minera en la microcuenca del río Cacachara y sus afluentes menores, es un factor al que se le atribuía la posible causa de este proceso, pero a la luz de los actuales resultados de los diversos análisis de aguas, suelos y rocas de la subcuenca, la contaminación causada por la actividad minera es menor frente a la contaminación natural. Si bien en la microcuenca del Cacachara existe fuerte grado con la contaminación de las aguas, estas al desembocar al Patara originan la dilución de la contaminación, siendo así que las aguas del Patara que desembocan directamente al embalse lleguen con buena calidad. Sin embargo, se requiere de estudios geológicos, hidrogeológicos y geoquímicos detallados adicionales que permitan obtener un conocimiento más integral de todos los procesos que vienen ocurriendo y, de esta manera, realizar una gestión integrada de los recursos hídricos de la subcuenca para plantear nuevas y diversas alternativas de mejoramiento de las características y condiciones hidroquímicas en los aprovechamientos de las aguas que provienen de estas zonas y que se almacenan y acumulan en el embalse.

Los sedimentos finos que rellenan el fondo de valle o uebrada y, el fondo del embalse son originados por la meteorización y erosión de las rocas volcánicas y sedimentarias presentes en la subcuenca, y su acarreo o transporte fluvial puede elevar relativamente el contenido salino de las aguas de los afluentes del río Vizcachas, más no de manera significativa a las aguas subterráneas, por las propias condiciones naturales en que se produce el flujo en el medio subterráneo y la autodepuración que se produce en el medio geológico.

Los estudios realizados para el proyecto de mejoramiento de la calidad del agua del Pasto Grande se han dirigido correctamente en la perspectiva de explicar las relaciones entre la calidad de las aguas subterráneas con la calidad de las aguas de los afluentes y la calidad de las aguas del embalse mismo. El trabajo realizado ha servido para lograr este objetivo planteado para lo cual se

analizaron los resultados obtenidos en los análisis de laboratorio corroborando las observaciones de campo.

6.2 HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA

El clima de la Región, donde se ubica el embalse Pasto Grande, es riguroso con precipitaciones pluviales y de nieve regulares en invierno y fuertes vientos durante el año, con intensa insolación en verano, que provoca una moderada evaporación, por las características peculiares del clima en el altiplano.

La zona de proyecto cuenta con una importante recarga anual proveniente de ramificada red hídrica que drenan las áreas montañosas de cabecera de cuenca. Aunque las precipitaciones son escasas, no superan los 550 mm anuales, la red de riachuelos permanentes y temporales en las zonas altas y las crecidas de verano que se infiltran en los terrenos permeables en los acuíferos porosos y fracturados de la subcuenca, permiten la acumulación de importantes reservas de agua subterránea, que afloran a través de manantiales en diversos puntos de la subcuenca.

El flujo subterráneo está bien definido por las fuertes a regulares pendientes existentes en la cumbres y cerros nevados que descienden hacia las zonas de mayor depresión de los pequeños valles andinos, que confluyen hacia la cuenca del río Vizcachas.

La evaluación hidrogeológica de la subcuenca y cuencas de orden menor, actualmente se encuentra limitada, pues se carece de datos históricos suficientes y no se ha tenido acceso directo a la información hidrogeológica existente. Si bien existen perforaciones o piezómetros disponibles en la microcuenca del río Cacachara, no se tiene información hidrogeológica de toda la cuenca, lo que no ha permitido caracterizar plenamente la hidrogeología del sistema acuífero. Solo ha sido posible revisar información sobre monitoreos ambientales de algunos piezómetros ubicados en el área de la mina Santa Rosa de Minera Aruntani. Sin embargo, de algunos estudios realizados por la Southern Peru Copper Corporation en la Región, en relación al área de estudio se ha obtenido información valiosa sobre el acuífero Capillune, compuesto de sedimentos lacustres y material volcánico. Los materiales rocosos acuíferos de naturaleza volcánica en la zona de Titijones y de otras zonas han servido para establecer las relaciones hidrogeológicas en la subcuenca.

Por otra parte, existen acumulaciones de agua subterránea en el medio poroso disperso en las quebradas y bofedales presentes en los pequeños valles andinos, destacándose el área comprendida en la zona de depresiones y los bofedales del valle. Las acumulaciones más importantes en el medio fracturado sedimentario y volcánico por donde discurre agua subterránea confinada a semiconfinada se presenta en el acuífero Capillune,

De acuerdo a las investigaciones de campo llevadas a cabo, se ha podido comprobar que la mayoría de los manantiales que dan origen a los diversos cursos de aguas superficiales en la cuenca colectora (río Tocco, Millojahuirá, Patara, etc) son de carácter permanente y emanan de determinados estratos líticos de la formación Capillune. Igual importancia que éste, pero de menor cuantía, le corresponde a los estratos líticos de la Formación Maure, los cuales alimentan el flujo hídrico de los cauces de la zona en la época de estiaje.

La recarga de aguas del sistema Acuífero Capillune proviene de la precipitación, que en forma de lluvia, nieve y granizo se infiltra en las rocas volcánicas y en los materiales fluvioglaciales que conforman las serranías de la zona altiplánica y que constituyen más del 50% del área del terreno.

6.3 EVOLUCIÓN GEOQUÍMICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

La composición química de las aguas subterráneas puede aportar una información muy valiosa sobre el comportamiento hidrogeológico regional, principalmente del flujo subterráneo. Para ello se requiere contar con una buena red de pozos y piezómetros, que permitan proporcionar información sobre el flujo de agua en el subsuelo y la calidad de la misma. En el área de estudio no existe este tipo de infraestructura vital para la evaluación hidrogeológica del sistema acuífero, y solo ha sido posible analizar local y parcialmente la calidad hidroquímica del acuífero superficial en la zona de cabecera de la microcuenca del río Cacachara en la zona de mina Santa Rosa, cuyos resultados de los análisis permiten concluir que existen aguas subterráneas afectadas por la contaminación antropogenica y natural.

Para el resto de la subcuenca del río Vizcachas, solo se cuenta con escasos datos de la calidad del agua de algunos manantiales y bofedales. Si bien estos últimos son manifestaciones del agua subterránea, por ser receptores de agua de los diversos afluentes de la red hidrográfica, los resultados de los análisis de agua no son representativos sobre la calidad del agua subterránea propiamente dicha. Solo el agua de los manantiales podría proporcionar una idea general sobre la calidad de estas aguas, basándose en los análisis ICP-OES con los cuales se podría establecer algunas relaciones preliminares entre suelo, subsuelo y agua subterránea y su incidencia sobre la calidad de las aguas del embalse.

El estudio de la infiltración a través del suelo es muy importante para conocer la composición química del agua subterránea. La geoquímica del agua subterránea se adquiere en los primeros metros de su recorrido. El agua en el subsuelo es prácticamente ácida por la reacción del CO₂ con el agua. Esta acidez hace que el agua sea muy agresiva con los componentes de la roca: silicatos, micas, piroxenos, anfíboles, etc. El agua disuelve o altera los minerales que encuentra si tiene suficiente poder para ello.

De acuerdo a los resultados de los análisis físico químicos se tiene que el agua de los manantiales, que es una manifestación muy importante de las aguas subterráneas en la zona de proyecto, tienen un pH neutro a ligeramente alcalino entre 7.5 y 7.9 u.e., variando la conductividad eléctrica entre 127 y 151 uS/cm. Los análisis ICP-OES de los manantiales muestran escasos valores en el contenido de los elementos mayores como Fe y Al, así como de As y Ca. En general se trata de aguas de buena calidad y contribuyen a mejorar por dilución la calidad de las aguas superficiales contaminadas.

La influencia del agua subterránea vertida en superficie sobre la calidad de las aguas del embalse simplemente es positiva por ser aguas de buena calidad. La incidencia de las aguas subterráneas contaminadas como las provenientes de las cuencas Cacachara y Millojahuirá, definitivamente son negativas, y su incidencia depende de factores como volúmenes vertidos al medio. La evaluación final solo es posible mediante el monitoreo hidrogeológico y ambiental en piezómetros, que aun no se tienen instalados pero ya se ha realizado la ubicación de sus puntos de localización.

Definitivamente, para establecer la influencia de las aguas subterráneas en el acuífero superficial o profundo, desde la zona de mina hasta el embalse se requiere un monitoreo desde la cabecera de microcuenca ya través de los ríos Cacachara y Patara. Se estima que la influencia de estas aguas subterráneas de la zona de mina sobre la calidad de las aguas del embalse es nula, dada la lejanía entre ambos puntos y por que el flujo de aguas subterráneas es demasiado lento ocurriendo, además, un proceso de autodepuración de las aguas en el subsuelo de manera natural.

Las aguas superficiales presentan una situación diferente pues el impacto es mediato a inmediato dependiendo de la distancia y las condiciones particulares de la zona. Así, por ejemplo, el flujo menor de aguas fuertemente contaminadas del río Cacachara al vertirse en el río Patara, de mayor caudal y buena calidad, diluye el nivel de contaminación con que llegan las aguas del Cacachara, teniéndose como resultado final, que las aguas del río Patara lleguen al embalse en buenas condiciones. La evaluación de su carga metálica así lo confirma. De igual manera, se ha investigado la influencia de las aguas termales procedentes de la microcuenca del río Millojahuira y, la incidencia de las aguas subterráneas sobre las aguas del río Hualcane. Las aguas del río Tocco son de buena calidad y en su microcuenca deben existir aguas subterráneas de similar naturaleza..

La calidad de las aguas subterráneas con la calidad de los afluentes del embalse esta en relación directa, es decir, si las aguas de los flujos subterráneos son de buena calidad ayudaran a mejorar la calidad de las aguas de los afluentes del embalse, como es el caso de los manantiales existentes en la subcuenca, Contrariamente, las aguas termales, como las existentes en la cabecera de microcuenca del Millojahuira, en general, contribuyen negativamente en el desmejoramiento de la calidad de las aguas superficiales, crean condiciones para la generación de drenaje ácido, es decir, incrementan la mala calidad de las aguas superficiales ya contaminadas por otros procesos. Por tanto, en la subcuenca del río Vizcachas solo las aguas termales, por su mala calidad, inciden negativamente en la calidad de las aguas de los afluentes, y por tanto, en la calidad de las aguas del embalse mismo.

En general, las aguas subterráneas frías, por su buena calidad inciden positivamente en el mejoramiento de la calidad de las aguas de los afluentes, relación que depende directamente de los volúmenes de agua que fluyen de los manantiales y bofedales alimentados con aguas subterráneas. Los manantiales ubicados al Este del embalse en la zona de Incalayoc, de donde fluyen grandes volúmenes de agua subterránea, definitivamente contribuyen a mejorar la calidad de las aguas superficiales, que drenan finalmente al embalse Pasto Grande,

7 RELACION ENTRE LA COMPOSICION DEL SUELO Y SUBSUELO Y LAS AGUAS SUBTERRANEAS CON EL COMPORTAMIENTO DE LOS SEDIMENTOS DE FONDO DEL EMBALSE

7.1 CALIDAD DEL SUELO Y VALORES DE REFERENCIA

Las definiciones más recientes de calidad del suelo fueron sintetizadas por el Comité de Salud del Suelo de la Soil Science Society of America (Karlen et al., 1997), al establecerla como la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, sostener la productividad de plantas y animales, mantener o mejorar la calidad del aire y del agua, y sostener la salud humana y el hábitat.

El suelo, en la mayoría de los casos, es receptor directo de contaminantes, vía aérea, aguas superficiales, vertidos directos o incorporación desde el subsuelo vía meteorización geoquímica. La dinámica de los procesos de sorción-desorción de los contaminantes dependerá de las propiedades hidrológicas del suelo, composición del suelo y propiedades físico-químicas.

La capacidad de amortiguación de un suelo es decisiva a la hora de valorar el riesgo de que los contaminantes pasen a la cadena trófica o dañen otros compartimentos medioambientales.

Un suelo de buena calidad no debe producir daños a seres humanos u otras especies en cualquier uso que hagan del mismo, debe poder funcionar sin restricciones en los procesos naturales y no debe contaminar otros elementos del medio ambiente (Moen, 1988). La calidad del suelo queda definida de acuerdo a su adecuación para la consecución tanto de funciones naturales como de uso. La calidad de un suelo, por tanto, puede definirse conforme a tres criterios: 1) la protección de la salud humana, 2) la protección de los ecosistemas y 3) la prevención de la dispersión de la contaminación y consiguiente protección del resto de los compartimentos ambientales.

Los suelos juegan un importante papel en el funcionamiento y en la sostenibilidad a largo plazo de los ecosistemas. Para conseguir tal objetivo se debe actuar preferentemente sobre la prevención y la recuperación urbana e industrial. La prevención de la contaminación es el elemento clave y objetivo prioritario. La regeneración urbana e industrial exige la recuperación paulatina de los suelos contaminados, a través de una gestión basada en la evaluación de los riesgos que suponen para la salud humana, los ecosistemas y el resto de compartimentos ambientales.

Debido a que los cambios que se producen en el suelo son lentos y difíciles de cuantificar, durante mucho tiempo se ha ignorado el desarrollo de estándares de calidad de suelos, comparado con el desarrollo de estándares de calidad de agua o aire.

Para poder cuantificar la calidad de un suelo se debe disponer de Índices de Calidad de Suelos o Valores de Referencia, de acuerdo al uso del mismo (Cuadro 7.1) (Canadian Environmental Quality Guidelines, 2003).

Los criterios sobre calidad del suelo reflejan los objetivos de calidad para el suelo y, por tanto, los objetivos finales de la política a desarrollar en este campo. Estos criterios deben traducirse a estándares de calidad científicamente defendibles y prácticos.

Los estándares de calidad reciben el nombre de valores indicativos de evaluación (VIE), pues permiten una evaluación genérica rápida de la calidad del suelo.

Cuadro 7.1 Estándares de Calidad de Suelos (mg/kg)

Parámetro	Uso agrícola	Uso residencial y áreas verdes	Uso comercial e industrial
Arsénico	12	12	12
Bario	750	500	2000
Cadmio	1.4	10	22
Cromo total	64	64	87
Cromo (+6)	0.4	0.4	1.4
Cobre	63	63	91
Plomo	70	140	260-600
Mercurio	6.6	6.6	24-50
Níquel	50	50	50
Vanadio	130	130	130
Zinc	200	200	360
Fenoles	3.8	3.8	3.8
Cianuro	0.9	0.9	8
Benceno	0.05	0.5	5
Tolueno	0.1	0.8	0.8
Xileno	0.1	1	17-20
Etilbenceno	0.1	1.2	20
Etilglicol	960	960	960
Bifenilos policlorados	0.5	1.3	33
Benzopireno	0.1	0.7	0.7
Nafteno	0.1	0.6	22

De los tres criterios definitorios, sólo la protección de la salud humana y la protección del funcionamiento de los ecosistemas se han tenido en cuenta para establecer los VIE. El tercer criterio, la prevención de la dispersión y afección a otros compartimentos ambientales, se considera tan dependiente de factores locales que no estima oportuno la deducción de unos valores de aplicación general y únicamente se evalúa a través de análisis de riesgos.

Los valores indicativos de evaluación (VIE) se definen en función de los riesgos potenciales que comportan a los objetos protegidos. Se establecen 3 niveles de riesgo:

- Nivel A o Nivel de Referencia: por debajo del cual se considera que no existe riesgo o éste es despreciable.

- Nivel B: marca el límite inferior de aceptabilidad del riesgo; por debajo de este valor y por encima del A puede aceptarse, con una cierta fiabilidad, como suelo de buena calidad; mientras que por encima de este valor existe riesgo de afección para la salud humana y medio ambiente.
- Nivel C o de máximo riesgo tolerable: representa el límite superior de aceptabilidad del riesgo. Su superación indica un peligro grave para la salud pública y el funcionamiento de los ecosistemas.

7.2 CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN AGUAS SUPERFICIALES.

7.2.1 Fuentes de contaminación

Las fuentes de contaminación del agua pueden ser difusas, como la acidificación por lluvia ácida o contaminación por nitrato debido al uso de fertilizantes; o localizadas, como son los vertederos y depósitos de residuos químicos, vertimiento de efluentes de mina, a partir de los cuales compuestos orgánicos y metales pesados pueden llegar a las aguas.

La contaminación de las aguas superficiales se produce principalmente por acción del hombre, directamente a través de la eliminación de residuos no tratados y de compuestos químicos orgánicos o inorgánicos a ríos y lagunas o indirectamente, por ejemplo, por el excesivo crecimiento de algas al añadir nutrientes a los ríos y lagos, por la intrusión de agua de mar a los pozos o por un aumento de carga de sedimentos en ríos, debido a la deforestación o sobrepastoreo.

Es importante entender ciertos procesos relacionados con los procesos naturales que controlan la calidad del agua para hacer frente a los cada vez mayores y crecientes problemas relacionados con la contaminación ambiental del agua. Así, por ejemplo, las aguas de ríos que se encuentran bien oxigenadas van a ser capaces de convertir residuos orgánicos en formas inocuas. Sin embargo, en un río sobrecargado de residuos orgánicos el proceso natural de purificación se va a ver colapsado.

Existen especies inorgánicas, como el cloruro, que pueden ser dispersadas en el ambiente sin causar serios problemas. Sin embargo, otros solutos tienden a acumularse y concentrarse en sedimentos del río o en la biota y pueden llegar a liberarse de manera inesperada causando concentraciones locales problemáticas.

A veces, el material añadido a un río no se ajusta al término de contaminante, pero puede producir un efecto medible en mayor o menor medida en la concentración de iones disueltos. La adición de materia orgánica en aguas subterráneas disminuye el potencial redox produciéndose un cambio en el balance geoquímico del sistema. Cambios en el pH pueden causar la disolución de los minerales de una roca.

Las actividades mineras y las obras civiles de diverso tipo traen consigo, en muchos casos, la afección a la calidad de las aguas del entorno, fundamentalmente a las aguas superficiales, pero también, directa o indirectamente, a las subterráneas. El problema radica en que cuando el hombre actúa provocando, por ejemplo, un drenaje, tratamiento minero o movimiento de tierra, entran en juego una serie de circunstancias desencadenantes de la contaminación de las aguas que perduran por muchísimo tiempo después incluso del abandono de la actividad.

Las aguas de mina procedente de explotaciones metálicas pueden presentar pH ácidos debido a la reacción entre las piritas (u otros sulfuros) existentes en el yacimiento explotado, aire y agua donde la bacteria *Thiobacillus* actúa como catalizadora. Característica de las aguas ácidas es la elevada conductividad, contenido total de sólidos disueltos, contenido de sulfatos procedentes de la oxidación de los sulfuros y, por supuesto, tasas relativamente elevadas de metales, que son solubles por dichas aguas con pH bajo. El problema que presenta esta agua es que, una vez disueltos los metales, la reacción de precipitación no siempre tiene lugar al recuperar un pH neutro sino que exige un tratamiento para su eliminación.

7.2.2 Factores Ambientales Que Controlan La Composición De Las Aguas Naturales

El estudio de los factores ambientales relacionados con la composición del agua concierne sobre todo a la Hidrogeología y entre estos factores se encuentran el clima, efectos geológicos y factores bioquímicos.

La influencia del clima en la calidad del agua depende de procesos como la alteración de las rocas asociada a la temperatura y a la cantidad y distribución de lluvias. Ciertos constituyentes iónicos del agua están más influenciados por los efectos climáticos que otros, como es el caso del bicarbonato, el cual tiende a predominar en las aguas de zonas donde la vegetación es abundante.

Los factores geológicos se relacionan con la pureza y tamaño de cristal, textura de la roca y porosidad, estructura regional, grado de fracturación, etc. La temperatura de la roca aumenta con la profundidad, por lo que el agua que circule a cierta profundidad tendrá una temperatura más elevada que el agua cercana a la superficie de la tierra. Este sería el caso de aguas termales cuyo contenido en solutos es, generalmente, mayor que en aguas superficiales más frías.

Los factores bioquímicos hacen referencia a la influencia, en mayor o menor grado, de los procesos vitales de plantas y animales en la composición del agua, tales como:

- Procesos que capturan energía procedente del sol u otra fuente, que promocionan reacciones químicas que requieren energía. Ejemplo: fotosíntesis.
- Procesos que redistribuyen químicamente la energía almacenada. Ejemplo: metabolismo.
- Procesos sin una transferencia de energía significativa. Ejemplo: reacciones que favorecen la reducción y oxidación química.

Finalmente, mencionar que algunos de los procesos formadores del suelo son los mismos que controlan la composición natural del agua y, por tanto, existe una relación considerable entre la química del agua y la química del suelo. Gran parte de la precipitación atmosférica que llega a la tierra cae sobre la superficie del suelo.

Generalmente, la fracción que aparece como escorrentía o agua subterránea ha tenido algún contacto con el suelo y gran parte de ella ha pasado bastante tiempo como humedad del suelo. Entre los factores que influyen en la composición química de la humedad del suelo se encuentran la solución o alteración de silicatos u otros minerales, la precipitación de sales muy poco solubles (carbonato cálcico), eliminación selectiva y circulación de nutrientes por las plantas, reacciones bioquímicas productoras de dióxido de carbono, adsorción y desorción de iones en superficies orgánicas y

minerales, concentración de solutos por evapotranspiración y conversión del gas nitrógeno a formas disponibles para la nutrición vegetal. De estos, uno de los más importantes es la producción de dióxido de carbono. El aire en los intersticios del suelo es entre 10-1000 veces más rico en CO₂ que en el aire común. El agua que se mueve a través del suelo disuelve parte de este CO₂ y los iones H⁺, HCO₃ son iones muy fuertes en el control del pH del agua y en el ataque de los minerales de roca

7.2.3 Distribución De Las Especies Metálicas En Solución

El comportamiento de los elementos metálicos en aguas naturales condiciona su biodisponibilidad y, por tanto, su capacidad de incorporación a la biomasa, condicionando su efecto como macronutrientes o micronutriente esencial y su biotoxicidad. Dentro de los macronutrientes esenciales se incluyen elementos metálicos como el Ca, Mg, Na y K, importantes en funciones metabólicas o enzimáticas en microorganismos, animales y vegetales.

La presencia de metales no esenciales como el Hg, Pb, Cd, Ag, Cr, As y Se, sin embargo, suele tener efectos tóxicos. En aguas naturales no contaminadas el contenido de estos metales no esenciales es de trazas. Concentraciones anormalmente elevadas se asocian al estudio de los efectos tóxicos. Sin embargo, debe tenerse presente que una disminución de la concentración de los elementos metálicos esenciales por debajo del óptimo necesario puede provocar también problemas.

Tradicionalmente, los límites de toxicidad se han establecido en función de los contenidos totales, tanto en aguas como en suelos. Estos contenidos totales, sin embargo, van a estar controlados por numerosos procesos de formación de complejos en solución, disolución, precipitación o coprecipitación, sorción y desorción (Drever, 1997).

La formación de complejos de los metales disueltos es esencial en la determinación de su biodisponibilidad, biotoxicidad y efecto sobre los organismos. La biodisponibilidad de iones metálicos libres es, generalmente, mucho mayor que la de sus complejos, de tal manera que no es la concentración total de un determinado metal en el agua la que determina su efecto, sino su concentración como forma iónica libre simple. A este concepto se le denomina, en la literatura biogeoquímica, Modelo de Actividad de Iones Libres (FIAM o FIM, Free-Ion Activity Model o Free-Ion Model; Morel y Hering, 1993). Consecuencia directa de este Modelo es que la formación de complejos en solución (por ejemplo, quelatos o complejos orgánicos) va a disminuir la biodisponibilidad o biotoxicidad de los elementos metálicos. Sin embargo, este Modelo de Actividad de Iones Libres presenta excepciones como, por ejemplo, las especies metiladas de Hg son más tóxicas que las especies inorgánicas del Hg. En cualquier caso, se sigue verificando que el efecto tóxico no depende del contenido total de un elemento disuelto, sino de la concentración de una determinada especie de dicho elemento. Son ejemplos, las especies de As³⁺ cincuenta veces más tóxicas que las especies de As⁶⁺, o el Cr³⁺ mucho menos tóxico que el Cr⁶⁺.

En cuanto al pH, el rango más común en aguas superficiales es de 7-8, predominando en la mayoría de los casos las formas libres de muchos metales pesados en condiciones de pH ácido, mientras que las formas complejas lo hacen en condiciones de pH básico, de ahí la magnitud de la problemática de las aguas ácidas en medio natural.

7.2.4 Relación calidad agua-litología

La calidad de un agua queda definida por su composición y el conocimiento de los efectos que puede causar cada uno de los elementos que contiene, o el conjunto de todos ellos, permite establecer las posibilidades de su utilización, clasificando así, de acuerdo con límites estudiados, su destino para bebida, usos agrícolas, industriales, etc. (Custodio y Llamas, 1983. pág. 1884). El estudio de la calidad del agua destinada a ser consumida por el hombre supone tener en cuenta distintas características del agua (físico-químicas, bacteriológicas, biológicas y radiactivas) y que se cumplan los criterios de calidad establecidos para cada una de ellas. En el caso de usos agrícolas, el análisis de una muestra de agua no es suficiente para dictaminar sobre su posible utilización para riego, ya que deben considerarse también otros factores, como son la permeabilidad y calidad del suelo, tipo de cultivo, etc. En aguas para uso industrial, la calidad se ve afectada principalmente por la agresividad y el poder incrustante del agua.

El grado en el que la composición de un agua se relaciona con la litología de una zona ha sido estudiado por muchos investigadores. La composición del agua, por un lado, va a depender del material por el que circule. Así, por ejemplo, rocas ultrabásicas son ricas en olivino y piroxeno, por lo que el Mg^{2+} será el catión dominante de esta agua. Del mismo modo, el Ca^{2+} es el catión dominante en suelos calcáreos y cuando el Ca^{2+} y el Mg^{2+} están presentes en concentraciones similares, probablemente deriven de la dolomita ($CaMg(CO_3)_2$).

El Cuadro 7.2 muestra los intervalos de concentración de elementos derivados de minerales así como las posibles fuentes del elemento en muestras de agua no contaminadas.

Cuadro 7.2 Rangos de Concentración Normal en Muestras de Agua No Contaminadas y Fuentes de Elementos

Elemento	Concentraciones (mmol/l)	Fuente
Na+	0.1-2	Feldespatos, zeolita, atmósfera
K+	0.01-0.2	Feldespatos, mica
Mg ⁺⁺	0.05-2	Piroxeno, anfíbol, olivino, mica
Ca ⁺⁺	0.05-5	Carbonatos, feldespatos, piroxeno, anfíbol
Cl-	0.05-2	Sal, atmósfera
HCO ₃ ⁻	0-5	Carbonatos, materia orgánica
SO ₄ ²⁻	0.01-5	Atmósfera
NO ₃ ⁻	0.001-0.2	Atmósfera, materia orgánica
SiO ₂	0.02-1	Silicatos
Fe ²⁺	0-0.5	Silicatos, siderita, hidróxidos, sulfuros
PO ₄ ²⁻	0-0.02	Materia orgánica, fosfatos

Es importante tener en cuenta el tiempo de residencia, el flujo (o cambios de flujo) y las características de la procedencia del agua analizada, con el fin de demostrar cómo adquiere el agua su composición y describir los procesos que van a modificar esta composición.

Los procesos implicados en la formación del suelo y la composición del suelo en una zona determinada influyen considerablemente tanto en la composición de las aguas superficiales como

subterráneas. La mayoría de las rocas son mezclas complejas de minerales que difieren ampliamente en su estabilidad o solubilidad en el agua. La mayor parte de las rocas, a excepción de las evaporitas, se componen de minerales poco solubles.

Entre los procesos más importantes que afectan a la química del agua se encuentran:

a) Evaporación y evapotranspiración: conducen a un aumento en las concentraciones proporcional a la cantidad de agua que se evapora.

b) Toma selectiva de iones por la vegetación y almacenamiento: afectan profundamente a las concentraciones de elementos. Elementos como el P influyen fuertemente en el ciclo biológico, mientras que otros elementos como el Mg y el S son menos importantes. El fósforo se encuentra en aguas naturales y residuales, casi exclusivamente en forma de fosfatos, en solución, partículas o detritus, o en los cuerpos de organismos acuáticos. Los ortofosfatos aplicados como fertilizantes agrícolas son arrastrados a las aguas superficiales con las lluvias y, en menor proporción, con la nieve derretida. La vegetación puede además adsorber gases de la atmósfera (SO_2 , NH_3 y NO_2). La toma y liberación de elementos por parte de la planta presenta variaciones estacionales y varía entre una planta joven y una planta madura.

c) Descomposición de la materia orgánica: consiste en una reacción de oxidación donde se produce ácido carbónico. La descomposición de la materia orgánica puede derivar en otras reacciones como la reducción de óxidos de hierro, sulfato y nitrato o la formación de metano. Además, la producción de CO_2 va a influir en las reacciones relacionadas con los minerales carbonatados. La materia orgánica contiene elementos minoritarios como P, K, N, S, etc.

d) Alteración y disolución de carbonatos, silicatos o minerales evaporíticos liberan elementos al agua. El origen de los bicarbonatos es principalmente la disolución de la caliza. En un agua natural existen iones CO_3 y CO_2 disueltos, en parte como tal y en parte como H_2CO_3 .

El carbonato cálcico en forma de calcita es poco soluble en agua pura mientras que el bicarbonato cálcico presenta un producto de solubilidad más elevado y, por tanto, precipita más difícilmente que el carbonato cálcico. Los carbonatos y evaporitas se disuelven rápidamente modificando considerablemente la composición del agua en el suelo, mientras que los silicatos lo hacen lentamente. La sílice está asociada a la descomposición de los silicatos. Las aguas procedentes de esquistos, cuarcitas, etc., suelen tener contenidos en sílice moderados, generalmente inferiores a 30 mg/l.

e) Precipitación de minerales: La alteración de silicatos da lugar, generalmente, a la formación de minerales de arcilla secundarios, los cuales consisten básicamente en silicatos de Al con o sin otros cationes.

f) Reacciones de intercambio iónico: entre los cationes disueltos y el complejo de cambio (arcillas, minerales alterados y materia orgánica) de sedimentos tienen un efecto importante en la composición química del agua. El intercambio iónico tiende a suavizar los gradientes de concentración en mezclas de agua.

El potasio, al igual que el sodio, presenta una solubilidad muy elevada y es fácilmente afectado por el cambio de bases. Se absorbe de forma muy poco reversible por las arcillas en formación (paso de montmorillonita a illita), para formar parte de su estructura, circunstancia que los diferencia notablemente del sodio. Por ello las aguas naturales, a pesar de la mayor abundancia de K en muchas rocas, tienen mucho menos K⁺ que Na⁺, excepto en las muy diluidas (Custodio et al. 1983, pág. 203). El origen del sodio y potasio presente en estas aguas se debe posiblemente a una fuente de sodio diferente a la halita o albita y al intercambio iónico.

g) Mezcla de diferentes calidades de agua: es importante cuando el agua transporta sustancias contaminantes.

Respecto al área de estudio, los constituyentes del agua que más se relacionan con la composición mineral de rocas y suelos son la sílice disuelta y los cationes. Aunque el balance de cationes y aniones debe mantenerse en todas las soluciones, los aniones pueden derivar en gran parte de fuentes no litológicas. Algunas rocas son fuentes de cloruro y sulfato por solución directa. La circulación del sulfuro está influida en gran medida por oxidación y reducción biológica, La composición del agua va a depender del tipo de roca asociado, pero existen otras interrelaciones con las aguas termales que le confieren o adicionan iones metálicos que afectan su calidad.

La mineralogía de las rocas volcánicas que prevalecen sobre gran parte del área de estudio, se componen predominantemente de silicatos. En función de la proporción de sílice, generalmente en forma de cuarzo, se clasifican en:

- a) Rocas ricas en cuarzo, SiO₂>10%
- b) Rocas pobres en cuarzo y feldespatoideos, ambos < 10%
- c) Rocas ricas en feldespatoideos y pobres en cuarzo.

La cartografía adjunta muestra el Mapa Geológico con las unidades litológicas respectivas, así como el Mapa Hidrogeológico de la zona de estudio (escalas 1:100.000), de donde se puede concluir que las características de las aguas superficiales y subterráneas están en estrecha relación con la geología de la zona

Las aguas superficiales originadas en zonas expuestas a rocas ígneas volcánicas son pobres en sólidos disueltos, debido a que la descomposición de estas rocas es lenta. Las concentraciones son probablemente función del tiempo de contacto y área de superficie sólida expuesta al agua.

La fácil meteorización de las rocas volcánicas en condiciones atmosféricas favorece su capacidad de disolución, especialmente en presencia de CO₂, en mayor proporción que en otras rocas bajo las mismas condiciones. Dentro de la meteorización, tienen gran importancia los procesos Redox que ocurren durante la meteorización edafocimica (en el suelo) pero también en menor grado en los materiales rocosos (por debajo del horizonte C), originando un fenómeno muy importante en la solubilidad del hierro de los minerales primarios y estos se concentran en concreciones de diferentes tipos.

El aporte de CO₂ de origen volcánico en áreas de vulcanismo reciente puede producir un agua subterránea con elevadas cantidades de sólidos disueltos, ricas en sodio, en bicarbonato

magnésico, o ambos a la vez, y a veces incluso con elevados contenidos de Fe^{2+} disuelto. La presencia de boro y arsénico están referidas a algunas fuentes afectadas por los estadios de volcanismo edad.

Respecto a la calidad del agua y la litología, de acuerdo a los análisis ICFP-OES y los análisis petrográficos de las rocas volcánicas presentes en el área de proyecto, en general, la composición química del agua superficial en las cuencas altas varía respecto a las aguas en las cuencas bajas. Se observa que ciertos elementos minoritarios incrementan sus valores como el Al y Si, pero existe variabilidad especialmente en Pb, As y Zn.

Los estudios de la hidroquímica de las aguas de la región evidencian que existe un control litológico y climático, pero localmente en las zonas mineralizadas existe incidencia de la actividad antropogénica y los procesos naturales y presencia de aguas termales. Las condiciones climáticas de ser una zona fría y semidesértica determina el grado incipiente de alteración de los silicatos, componente mineralógicos de las rocas volcánicas, la litología netamente volcánica presente en la subcuenca del río Vizcachas constituye el factor dominante que impone una señal de la química de las aguas superficiales de la Región, y la misma naturaleza de los remanentes de esta misma actividad volcánica a nivel regional incide en la presencia de aguas termales.

7.2.1 Análisis de Agua y Sólidos en Suspensión

Las aguas que drenan a la zona de estudio fueron analizadas en periodos diferentes (Abril y Julio 2012). Los resultados muestran que el pH es menor de 7 u.e. yendo de carácter neutro a ligeramente ácido, y las conductividad eléctrica son realmente bajas, valores considerados propios para estas aguas corrientes, lo que refleja aporte de iones en solución por interacción con las rocas de afloramiento de naturaleza volcánica. Solo en las cuencas altas contaminadas el pH es ácido.

La turbidez y los sólidos en suspensión son variables pero bajos, lo que indica poco aporte de sedimentos en todo el sistema de drenaje, por las características morfológicas y litológicas de los territorios de la zona altoandina. El transporte de sedimentos es principalmente de materiales muy finos del tipo arcilla y limos, y sustancias en disolución, conforme a los resultados de granulometría.

No se tienen resultados sobre la mineralogía de la carga sedimentaria ni de sus volúmenes en el agua, pero se puede decir, que dada la baja energía que tienen estos pequeños ríos en las pampas, la carga principal es de sedimentos muy finos en suspensión, probablemente arcillas de menor cristalinidad y esmectitas, que han sufrido procesos de hidrólisis.

7.2.2 Contenido metálico de los sedimentos de fondo

Se considera la geoquímica de sedimentos como un aspecto muy importante dentro del estudio de la calidad del agua del embalse Pasto Grande, debido a la incidencia de los mismos procesos relacionados con el aumento de la turbidez, color y lo estrictamente de naturaleza mecánica como es la erosión, transporte de sedimentos, la colmatación del vaso de almacenamiento, y su relación con los posibles cambios en las condiciones físico químicas del sedimento que pueden causar impactos de contaminación sobre el agua del embalse y los sedimentos de fondo.

El ingreso de los metales al ciclo hidrológico procede de dos fuentes principales: la de origen geoquímico, cuyo aporte se da a partir de los minerales, que por causas de meteorización y erosión son arrastrados al agua y, la fuente de origen antropogénico, mediante los residuos procedentes de la actividad humana. Una vez que estos metales ingresan a los sistemas acuáticos se fijan rápidamente en los sedimentos, por lo que estos pasan a ser un almacén con un contenido de metales superior en varios órdenes de magnitud al del agua. Además de las fuentes litogénicas y antropogénicas, la concentración de los sedimentos también dependen de las características texturales, contenido de materia orgánica, composición mineralógica y ambiente de depósito sedimentario.

Los metales presentes en los sedimentos pueden ser liberados a la columna de agua por cambios en las condiciones ambientales, tales como pH, potencial redox, concentración de oxígeno disuelto y presencia de quelatos orgánicos o al ser ingeridas con las partículas orgánicas por los organismos acuáticos. Los sedimentos de fondo presentan altos contenidos de Al y Fe.

En el estudio de acumulación y enriquecimiento de metales pesados en sedimentos, se emplean técnicas de normalización geoquímica, las cuales permiten determinar el enriquecimiento del sedimento en relación al metal, el grado de contaminación e, incluso la toxicidad del sedimento; además, permite obtener los índices de evaluación pertinentes. Esta tarea es motivo de un estudio geoquímico detallado que no está en el alcance de este estudio hidrogeológico o de hidrología, por lo que si se desea tener resultados detallados finales sobre este tema se requiere de estudios adicionales de Geoquímica de sedimentos en el embalse.

Los resultados de los análisis de sedimentos de fondo realizados durante las dos campañas de muestreo y monitoreo han brindado la información pertinente para la caracterización preliminar de estos sedimentos, los cuales contienen elevados niveles de Fe que contribuyen con formación de floculos de hierro, que se resuspenden temporalmente proporcionando la coloración rojiza a marrón rojiza que muestran las aguas del embalse frente a un cambio en la dinámica ambiental.

7.2.3 Evaluación de la Contaminación de Sedimentos en el Embalse

Los sedimentos de fondo en el embalse Pasto Grande presentan anomalías en la concentración de elementos traza y elementos mayoritarios, debido a procesos naturales como la meteorización y erosión de los materiales adyacentes al embalse y/o aporte antropogénico, debido a la actividad minera como el procesamiento industrial de menas y metales, presencia de depósitos de relave, depósitos de desmonte y antiguos pasivos ambientales.

En el área de estudio se ha investigado la problemática ambiental de la contaminación de los sedimentos de fondo, por la gran importancia que tiene este embalse en el desarrollo de la Región Moquegua, y por la magnitud de la problemática de deterioro de las aguas. Por tanto, se requiere de una evaluación integral de las causas que afectan la calidad de las aguas para valorar el nivel de contaminación por elementos trazas y elementos mayoritarios.

Los instrumentos para determinar la relación entre la composición del suelo, aguas y el comportamiento de los sedimentos de fondo del embalse son variados y, entre estos, los que se han utilizado es la Espectrometría Óptica de Plasma y Acoplado inductivamente, realizado en la fracción menor de 2 mm para el análisis químico de suelo para los elementos traza y mayoritarios (ver

Anexos No. 3 y No. 4 correspondientes a los análisis granulométrico y geoquímico de suelos y rocas (ICP-OES), y sedimentos de fondo del embalse.

La toma de muestras de sedimentos en el embalse se efectuó en dos campañas, de forma aleatoria dentro del perímetro y centro del embalse, poniendo énfasis en aquellas zonas donde posiblemente se pueden producir aportes de contaminantes como son las desembocaduras de los ríos Millojahuirá, Antajarani y Patara, y sus tributarios. En función de los resultados obtenidos en el análisis químico de los elementos traza y mayoritarios se han analizado las muestras con mayores concentraciones, que permiten definir preliminarmente el estado actual de la contaminación en los sedimentos de fondo.

Para evaluar la posible contaminación de los sedimentos del embalse se ha utilizado la Tabla Holandesa, de donde se conoce que los elementos más contaminantes de los sedimentos de fondo son el Fe, Al y As. Si se utilizara el Índice de geoacumulación se tienen los mismos resultados. Sin embargo, se requiere de mayor información para obtener resultados definitivos. Las fuentes que producen estas concentraciones de elemento traza y mayoritarios pueden ser de origen natural, tales como son el proceso de meteorización de suelo y lixiviación de elementos (As, Pb) o por aporte de fuentes cercanas asociadas a surgencias de aguas termales, que aportan elementos contaminantes (As, Bo, Li).

Por otra parte, la tendencia de las distribuciones de los valores muestra gradientes regulares desde la zona Norte y Noreste del embalse, donde las concentraciones son máximas y ocurren frente a los ríos Antajarani, Hualcane-Millojahuirá y el centro del embalse, diluyéndose hacia la salida del mismo.

De singular mención, se tiene las altas concentraciones del hierro (Fe), cuyo origen es litogénico, y su área de mayor aporte proviene del lado Norte y Noreste del embalse, donde en la cabecera de cuenca se ubican zonas mineralizadas y remanentes de actividad minera antigua y minería reciente. Solo un mínimo porcentaje de Fe tendría origen antropogénico. La fuente del hierro, aluminio y silicio son los mismos materiales rocosos, en cuya composición petro-mineralógica presentan minerales de óxidos de hierro y minerales silicatados con componentes de hierro, que alcanzan porcentajes entre el 2 hasta 8 % en las andesitas y latitas. (Ver resultados de los análisis petrográficos realizados en muestras de rocas volcánicas presentes en el área de estudio)

CONSORCIO V-5

Ing. Víctor Díaz Nuñez
INGENIERO CIVIL
CIP. 6530

CONSORCIO V-5

Dr. César Lazcano Carreño
BIOLOGO
CBP. 269

CONSORCIO V-5

Ing. Juan Quiroga Vite
INGENIERO GEÓLOGO
CIP. 55872

8 INCIDENCIA DE LA COMPOSICIÓN DEL SUELO Y SUBSUELO EN EL FUNCIONAMIENTO DE LAS DIVERSAS ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN PLANTEADAS.

Las obras hidráulicas proyectadas para mitigar la contaminación de las aguas represadas en Pasto Grande, se encuentran emplazadas en áreas con diferente comportamiento geológico y geotécnico. Específicamente, las áreas de estudio se encuentran en las sub cuencas de los ríos Millojahuirá, Hualcane-Antajarane y Cacachara. En general, el medio geológico en el área de proyecto se encuentra constituido mayormente por rocas volcánicas y volcánico-sedimentarias, que han sido afectadas en diverso grado por procesos de volcanismo, meteorización, glaciación y alteración hidrotermal, que les proporcionan diversas características y condiciones geotécnicas, presentando un comportamiento mecánico anisótropo y heterogéneo, donde las estructuras planteadas, livianas y medianas, no presentaran mayores problemas de estabilidad en rocas como lavas o derrames lávicos, brechas volcánicas, conglomerados, areniscas duras. En cambio, las rocas piroclásticas como tobas sueltas o poco consolidadas, y rocas sedimentarias o suelos como areniscas tobaceas, limos y arcillas, frente a estructuras, aun livianas, estarán expuestas a riesgos de colapso.

En lo que sigue, se describen los aspectos de los trabajos de reconocimiento geotécnico realizados con el propósito de determinar las condiciones de fundación de las obras que componen las alternativas planteadas para el sistema de mejoramiento de la calidad del agua del embalse Pasto Grande. Los trabajos realizados (y por realizar) se orientan al análisis del suelo y subsuelo en el sitio del proyecto y su incidencia en el funcionamiento de las alternativas de solución planteadas, actividades que se deben ejecutar de acuerdo a lo que establecen las especificaciones técnicas pertinentes.

Para conocer la implicancia de las características geológicas locales en las micro-cuencas de los ríos Millojahuirá, Antajarani y Patara durante el reconocimiento geológico de campo de las principales unidades litológicas presentes en cada una de las micro-cuencas, se definieron características y condiciones geológicas, hidrogeológicas y geotécnicas dentro del marco del proyecto de mejoramiento de la calidad del agua.

En general, de acuerdo a lo planteado en las especificaciones, a través de estos estudios se debe obtener la información básica requerida para desarrollar el diseño de fundaciones y obras civiles contempladas en la alternativa que se decida desarrollar por parte de la Región Moquegua. Parte de esta información se tiene desarrollada en los capítulos de geología y geomorfología de los diversos estudios desarrollados hasta el presente determinando principalmente lo siguiente:

- Estratigrafía del sector, con su reconocimiento hasta una profundidad de aproximadamente 2 m, o hasta alcanzar la profundidad de la roca basamento, cuando se requiera
- Propiedades mecánicas de los estratos de suelo/roca, que comprende la determinación de los parámetros relevantes de los materiales que permiten describir el comportamiento esperado de los materiales, tanto para situación de cargas estáticas como para cargas sísmicas y cargas dinámicas asociadas a la operación de los equipos de la planta.

En conjunto con lo anterior, en base a los antecedentes obtenidos de las prospecciones a ejecutar y análisis realizados, se proporcionaran las bases para el diseño de las fundaciones y obras civiles que estén contempladas en el proyecto específico.

- Tipo de fundaciones y profundidad de sello de fundación recomendada para los equipos principales de la planta (edificaciones) y para equipos menores y edificios auxiliares.
- Presiones de contacto admisibles, para los distintos estratos identificados y diferentes condiciones de carga (estática, dinámica de operación)
- Valores de los coeficientes de balasto, para diferentes condiciones de carga (estática, dinámica de operación, sísmica).
- Estimación de asentamientos de largo plazo.
- Valores de los coeficientes y metodología para determinar los empujes de tierra y sobrecarga para muros de contención y/o estructuras enterradas. Caso estático y caso sísmico.
- Parámetros que definen el comportamiento del suelo para realizar modelos para el análisis dinámico de fundaciones y estructuras (módulo de elasticidad, E; módulo de corte, G; módulo de Poisson).
- Recomendaciones para el desarrollo de trabajos de excavaciones y rellenos (taludes y procedimientos recomendados).

Para obtener la información que permite la determinación de los parámetros antes descritos, se debe desarrollar las actividades siguientes:

- Los análisis geológicos, geotécnicos y de riesgo geofísico requeridos para dar el adecuado fundamento geotécnico a la validación del esquema de obras y sus fundaciones.
- La ejecución de las prospecciones y ensayos, de acuerdo a una campaña de prospecciones que permitan reconocer las características del subsuelo donde se fundarán las obras.
- La supervisión permanente de la ejecución de las prospecciones y ensayos.
- El análisis e interpretación de los resultados obtenidos de las prospecciones y la realización de los cálculos correspondientes.
- La elaboración de los mapeos geológicos correspondientes. La participación en la definición del esquema de obras más conveniente al proyecto.
- Los diseños geotécnicos de las obras.
- Elaboración del presente informe.

La incidencia geotécnica de los tipos de suelos y rocas en el área de proyecto se ha verificado preliminarmente de manera simultánea durante las investigaciones de campo durante las dos campañas de muestreo y estudio. Se ha tratado de analizar el comportamiento mecánico de estos materiales de fundación frente a las cargas de las estructuras a proponer.

8.1 INVESTIGACIONES DE CAMPO

Durante los meses de Abril y Julio del presente año se realizaron trabajos de reconocimiento, toma de datos y muestreos de roca, suelos y sedimentos en la zona de proyecto para obtener información adicional de las condiciones geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas y de la relación roca-suelo-aguas. La información obtenida brindó mayor conocimiento no solo sobre la naturaleza de los

procesos naturales que inciden en la calidad del agua en el embalse Pasto Grande, sino que también permitió el estudio de los principales materiales de rocas y suelos en el entorno del área de proyecto. Esta información también ayudó a conocer el origen de las aguas subterráneas y los tipos de roca que ha atravesado durante su movimiento en el sistema acuífero y su incidencia en las obras civiles a proponer como alternativas de solución.

De acuerdo a los resultados obtenidos de este reconocimiento preliminar se ha podido explicar la incidencia que tienen los materiales del suelo y subsuelo en el comportamiento de las obras planteadas como alternativas de solución, entre las que contemplan el uso de tecnologías de tratamiento químico, fito-remediación, sistemas hidráulicos de separación de aguas contaminadas, entre otras.

El estudio geotécnico para las obras del proyecto definitivo constituye todavía uno de los temas por definir y resolver con mayores investigaciones de detalle, tanto en los aspectos geotécnicos como hidrogeológicos.

8.2 TRABAJOS REALIZADOS.

Se realizó el reconocimiento hidrogeológico y las investigaciones geotécnicas de campo ya señaladas. En gran parte de la cuenca del río Vizcachas, las aguas provenientes de los manantiales. Debido a la falta de pozos y piezómetros es urgente la construcción de al menos de 10 piezómetros ubicados estratégicamente en las zonas más críticas con problemas de contaminación, en donde se pueda monitorear la calidad del agua y los niveles piezométricos. Con esta información y la obtención de los parámetros hidráulicos respectivos se podrá elaborar el modelo hidrogeológico conceptual definitivo del sistema acuífero.

El muestreo de rocas, suelos y sedimentos de las quebradas se adicionó al trabajo de campo hídrico para tener una mejor visión de las relaciones entre éstos y la calidad de las aguas que finalmente llegan al embalse. Los análisis geoquímicos complementarios han permitido ver con mayor objetividad las inter-relaciones entre aguas subterráneas, aguas superficiales y los materiales rocosos no consolidados (suelos) y consolidados (rocas).

Finalmente, se realizó un reconocimiento geológico y geotécnico en la zona del proyecto de obras hidráulicas en la quebrada Millojahuira, lo que ha permitido conocer las principales características y condiciones naturales del sitio de presa, donde se verificó la posibilidad de emplazamiento, fundación y construcción de dicha estructura proyectada. Se tomaron datos de campo del macizo rocoso y su estructura, así como muestras de suelos y rocas del sitio, cuyos resultados se muestran en los análisis petrográficos de rocas y análisis de suelos. (Ver Anexos)

8.1 ASPECTOS GEOLOGICOS Y GEOTECNICOS

- **Formaciones Capillune**

Está constituida por una serie sedimentaria lacustre, compuesta por conglomerados areniscas, piroclastos, limolitas y arcillas, con coloraciones grises, blanco amarillentas y verdosas.

La uniformidad litológica y textural de la formación, es frecuente en extensos afloramientos. Se encuentran en posición horizontal a ligeramente inclinadas, sin ofrecer mayores deformaciones estructurales.

Esta unidad está constituida por una serie alternante de areniscas arcósicas, de grano fino, pobremente diagenizadas, con colores grises a amarillentos, que mayormente se presentan en capas de 30 a 40 cm de arcillas blanco amarillentas, en capas delgadas; de lentes de areniscas conglomerádicas, dentro de una matriz tobacea, cuyos elementos son subangulosos a subredondeados; también es frecuente la ocurrencia de limolitas de color amarillento, en capas de 20 – 25 m, de rocas piroclásticas consistentes en tobas líticas, lapilli y pómez, que se presentan en bancos de carácter lenticular dentro de la secuencia.

Es importante destacar la ocurrencia de un conglomerado de base que se presenta en la quebrada labrada por el río Vizcachas. Dicho conglomerado consiste de cantos gruesos, angulosos, sin estratificación clara; el tamaño de los guijarros varía de 10 a 50 cm de diámetro, en escasa matriz areno tobacea, de color gris amarillento.

Por las características antes indicadas, esta unidad presenta un comportamiento mecánico heterogéneo, soportando normalmente cargas medias.

- **El Grupo Barroso y el Complejo Volcánico Cacachara.**

Está constituido por lavas andesíticas, en estratos volcánicos de rocas de color gris oscuro a gris claro; por efecto de la meteorización química se transforman en colores rojizos y marrones. Las capas o estratos son muy inclinados y se presentan en bloques fracturados; estas rocas se apoyan sobre una discordancia erosional de la formación Capillune y se exponen con una amplia propagación en la región sur.

La subunidad presenta variaciones litológicas aun en áreas próximas, cambiando de una fase traquítica a una tranqueandesita y mayormente andesítica y con intercalaciones de bancos de tobas volcánicas y algunos bancos de brechas lenticulares.

Esta secuencia volcánica presenta mayormente alternancia de derrames lávicos de andesitas, dacitas, traquitas con rocas piroclásticas en los niveles superiores constituidas de tobas blanquecinas, de naturaleza riolítica, duras y compactas.

Los volcánicos se caracterizan por presentar disyunción columnar, a manera de columnas rocosas cuyos bancos oscilan de 35m sobre los 50m de potencia. Una de sus particularidades que adoptan estos volcánicos en cuanto a planos de inclinación son superiores de los 50°. Por el grado de fracturación que presenta, a veces actúan como canales preferenciales de aguas subterráneas originando acuíferos en medio fracturado, de las cuales afloran como ojos de agua o manantiales. Esta secuencia estratigráfica regional corresponde al Grupo Barroso.

- **Depósitos del Cuaternario.**
- **Depósitos Morrénicos y Fluvioglaciares**

En las cadenas de cerros ubicados al Norte de la Laguna Pasto Grande, se encuentran en sus flancos y en colinas de baja alturas grandes acumulaciones de materiales morrénicos y fluvioglaciares.

En las laderas occidentales de los nevados Istahueco, Arichua y Quenamichini los fluvioglaciares cubren a los flujos de barro, mientras al resto del área generalmente se halla, sobre el Grupo Barroso; asimismo en varios lugares de este derrame lávico rocoso se encuentran cubiertos por materiales glaciares y clásticos recientes.

Las morrenas terminales se perciben desde los 4,800 msnm hasta los 3,900 msnm aproximadamente; y entre las morrenas laterales hay algunas que llegan hasta tener 3.5 Km de longitud, constituyendo formas alargadas con relieve moderado.

Los elementos que constituyen estos depósitos, son netamente de origen volcánico y mayormente sub-angulares, hallándose dentro de una matriz limo-arcillosa.

- **Depósitos Aluviales**

Estos depósitos recientes cuyos materiales han sido arrancados y transportados por el agua y depositados a poca distancia de su lugar de origen. Se presentan estos depósitos aluviales no consolidados, y sus elementos no tienen ninguna selección, los clastos son angulosos a sub-redondeados en escasa matriz fina. Se presentan también como conos de deyección tramos finales de quebradas de sección amplias cubren una gran extensión y se presentan en las depresiones de la quebradas como en Huiscacollo, Millojahuira, Chapoco, Queñuani, Hualcani, Antajarani, Vizcachuni, Patara, etc.

Estos depósitos se componen de conglomerados, gravas, arenas, arcillas, y algunos niveles de tufos. El conjunto muestra una estratificación oscura, que en algunos lugares se intercalan con materiales coluviales heterogéneos.

- **Bofedales**

En la mayoría de las quebradas Huiscacollo, Millojahuira, Chapoco, Queñuani, Hualcani, Antajarani, Vizcachuni y Patara suelen presentarse como depósitos de arenas arcillosas con materia vegetal descompuestas en zonas pantanosas altamente saturadas de humedad donde crecen variedades de pasto natural. A estas zonas localmente se le conoce con el nombre de "Bofedales". Los pastos se utilizan para la crianza de los auquénidos y las raíces secas como combustible doméstico.

- **Depósitos Fluviales**

Los fondos de los valles actuales se encuentran ocupados por este tipo de depósitos no consolidados, que consisten en la acumulación caótica de piedras de diferentes tamaños y naturaleza. Por el tamaño de los clastos se les clasifica en: Cascajo, grava, arena y limos. Los bordes de los clastos de piedras por la erosión sufrida por efecto de las corrientes de agua de los ríos adoptan sus aristas formas sub-angulares sub-redondeadas a redondeadas según las distancias transportadas.

8.1.1.- Obras hidráulicas en las quebradas Millojahuira y Hualcane.

En las áreas de proyecto de obras hidráulicas en estas quebradas, por ser de similar ámbito dentro de un ambiente de rocas volcánicas, los parámetros geotécnicos que se debe contar es conocer la estanqueidad o impermeabilidad y la estabilidad en la zona de obras, es decir, que el área de cimentación donde se va a tratar la masa de agua debe ser totalmente hermética e impermeable y/o sellada, de tal manera no se generen grandes pérdidas negativas por efecto de infiltración de agua.

Estabilidad de laderas

El comportamiento mecánico de los materiales alrededor y dentro del área de obras hidráulicas debe ser estable frente a cualquier fenómeno dinámico que las perturbe. En el área de proyectos, las rocas volcánicas si bien están fracturadas, se encuentran estables por su propia naturaleza con talud natural de 20°, 25° a 55°. Los taludes naturales para el lado ladera derecha se encuentran dentro del rango 25° - 55°.



Foto N° 8.1

Vista más elocuente sobre la estabilidad de taludes en roca, muy cerca de la zona de cierre en el Eje de Presa proyectada

Así mismo, se observa buen grado de fracturación. En el cauce se observa la coloración rojiza del río Millojahuir.

Los depósitos fluvioglaciares y morrenas que predominan dentro del área de la quebrada Millojahuir están localizados en las laderas. Estos materiales podrían probablemente causar problemas geotécnicos por efectos hidráulicos del movimiento del agua, erosión interna, socavación y arrastre, debido a la no consistencia del suelo de agua.

La heterogeneidad y anisotropía son características típicas de estos materiales, pues existen materiales desde las arcillas hasta las gravas gruesas y grandes bloques, por tanto, las propiedades geotécnicas son altamente variables. Al estar la permeabilidad directamente relacionada con la granulometría, estos suelos son muy sensibles a los incrementos de presión intersticial cuando se produzcan lluvias torrenciales y por efecto del deshielo. En estos depósitos son muy frecuentes los fenómenos de solifluxión y de inestabilidad de taludes.



Foto N° 8.2

Visualización del fenómeno de Solifluxión en ladera de la quebrada Millojahuirá.

Generalmente, los deslizamientos más frecuentes en las laderas de son de escaso tamaño, y se producen en materiales de alteración como en el caso de la zona de obras proyectadas (Suelos morrenas y fluvioglaciares). Los deslizamientos no presentan riesgo en la mayoría de los casos, tanto por su volumen como por su lento movimiento, pero realmente no deben ser desestimados, ya que producen aportes de materiales sólidos,

Hidrogeología de la zona de obras.

Dentro de la zona de obras de Millojahuirá, el curso fluvial ocurre como escurrimiento de agua superficial por efecto de la presencia de manantiales o puquíos. El curso de agua corresponde básicamente al río Millojahuirá que tiene su nacimiento en la cabecera del nevado cerro Istahueco de aproximadamente mayor de los 4,800 msnm. Es alimentado por la cuenca hidrográfica por los deshielos, pero este curso del río es alimentado simultáneamente por aguas subterráneas que mayormente predomina como puquíos o manantiales provenientes de los nevados de cerros volcánicos. Alrededor del área de obras, los materiales rocosos presentan alta permeabilidad por fracturación. característica general del Grupo Barroso) y por acción pluvial durante épocas de verano (Diciembre-Abril) que se infiltran en el subsuelo.

Foto N° 8.3

Presencia de surgencias o manantiales, ubicados en la cabecera del embalse con presencia de aguas btermales.



90

CONSORCIO V-5

Ing. Víctor Díaz Nuñez
INGENIERO CIVIL
CIP. 6530

CONSORCIO V-5

Dr. César Lázcano Carreño
BIOLOGO
CBP. 269

CONSORCIO V-5

Ing. Juan Quiroga Vite
INGENIERO GEÓLOGO
CIP. 55872

Proviene de la cadena de cerros volcánicos fracturados localizados al Nor-Este (Cerro Istahueco y cerro Quenamachini).

Respecto a la estanqueidad de la zona de obras se tiene deformaciones o perturbaciones estructurales presentes en el macizo rocoso volcánico, que actuarían como canales preferenciales de infiltraciones, dando a lugar pérdidas considerables de masas de agua del embalse, y por consiguiente pérdidas económicas del proyecto. Según evaluación de campo se ha percibido fracturas abiertas y cerradas, predominando la primera en consideración.

Condiciones geotécnicas

Las rocas volcánicas del Capillune y del Volcánico Barroso son geotécnicamente favorables por su apreciable resistencia a compresión simple (Producto de ensayos prácticos de campo) están dentro de los rangos estimados de campo de 50 a 200 MPa, es decir, roca de resistencia dura a muy dura, roca muy aceptable para cimentaciones de soporte, cuyas deformaciones no van a ser considerables ante cargas que serán sometidas por las obras hidráulicas a instalarse. Obviamente, para tener una evaluación detallada se deberá someterse a un estricto rigor de estudios geotécnicos

Para los fines del proyecto en el Millojahui y el Hualcane, las condiciones geotécnicas de los materiales son estructuralmente favorables por la buena resistencia mecánica de rocas. Se estima que tienen una resistencia a la compresión simple de 50-200 MPa, roca regular con RQD= 60 - 75% de resistencia dura a muy dura.

En cuanto a suelos no consolidados como son bofedales, y materiales consolidados (masas rocosas) presentes en los cauces del Hualcane y del Millojahui, se considera que la participación de la geofísica a través de la Prospección Geoelectrica (SEVs) en el Millojahui ha definido bien el espesor del material de cobertura, y así como también sobre la profundidad a la que se encuentra el basamento rocoso e identificar los suelos y rocas diferenciándolos, así mismo con dichos resultados se podrá definir la presencia de fallas geológicas o descártalas, fracturas, grado de alteraciones e interceptar niveles freáticos, etc. Con estas investigaciones, nos permitirá también conocer si es necesario extraer, remover el material hasta llegar a la masa de roca buscada para la cimentación deseable, y si fuera en este caso, se procederá previa limpieza de capas de alteración hasta quedar con la roca completamente sana.

En la sección natural contando con taludes favorables no pasan de los 40-60° de inclinación, lo que es indicativo de una buena estabilidad. En el área de obras en el Hualcane no se ha percibido ningún fenómeno de la geodinámica externa que pueda afectar a las obras proyectadas en este punto.

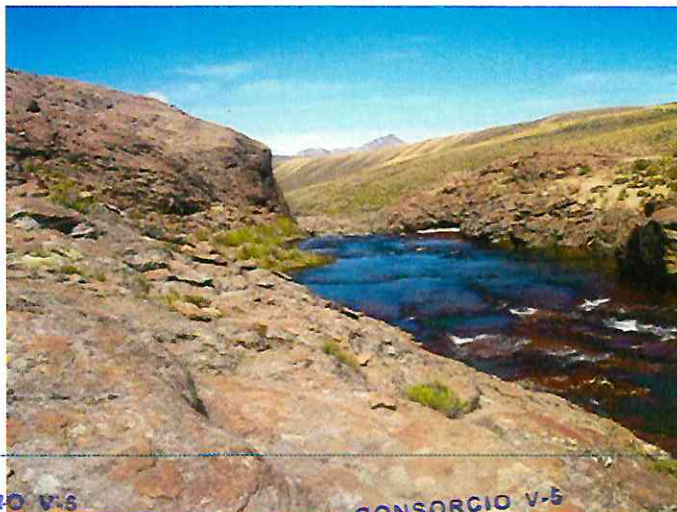


Foto N° 8,5

CONSORCIO V-5

Ing. Víctor Díaz Nuñez
INGENIERO CIVIL
CIP. 6530

CONSORCIO V-5

Ing. Asir Guzmán Carreño
INGENIERO GEÓLOGO
CIP. 102

CONSORCIO V-5

Ing. Juan Quiroga Vite
INGENIERO GEÓLOGO
CIP. 102

Se observa la buena estabilidad de estribos de la zona de cierre.

8.2 TRABAJOS REALIZADOS

Tomando en consideración los antecedentes derivados de los trabajos geológicos y de prospección y ensayos granulométricos y petrográficos, que se muestran en los Anexos respectivos, en lo que sigue se ha tratado de integrar estos resultados, con miras a evaluar preliminarmente la capacidad de los materiales rocosos naturales presentes en el sitio de proyecto y que constituyen los materiales de fundación de las estructuras contempladas.

Análisis de materiales de suelo

Los suelos existentes en el sitio del proyecto consisten en lo principal de arenas con grava angulosa y gravas arenosas con algo de material fino, y se disponen como un manto de poco espesor, sobre el lecho rocoso. Ocasionalmente están cubiertos por un manto de vegetación ralo de ichu y otros tipos de vegetación de gramíneas. A través de las prospecciones realizadas, se pudo comprobar que esta es una situación bastante general en el sitio de proyecto y varía en la zona de Millojahuirá y Antajaranew respecto de Patara y Cacachara, de tal forma que, para los efectos de la mayor parte de las fundaciones livianas previstas, el material donde éstas se apoyarán será principalmente suelo y ocasionalmente la roca volcánica fundamental.

Calicatas

En esta fase se efectuaron un total de 7 pequeñas calicatas, todas las cuales solo alcanzaron el subsuelo no consolidado hasta una profundidad variable entre 0,50 y 0,80 metros. Los materiales de suelos atravesados consistieron principalmente de arenas gravosas con algo de finos y gravas arenosas con fino (bajo malla N° 200). En los Anexos se resumen los resultados de las granulometrías obtenidos en las calicatas realizadas.

Este análisis es válido solo para las profundidades a que llegaron las prospecciones y para zonas cercanas a ellas. Se debe considerar que los suelos son esencialmente heterogéneos y que no necesariamente serán iguales a los encontrados en puntos razonablemente alejados.

Perfiles Geoelectricos.

Dentro de los estudios realizados para el proyecto se tiene antecedentes relacionados a un estudio geofísico. Los resultados parciales hasta ahora obtenidos indican que existe un horizonte superficial de suelo poco profundo, al que le sigue un material rocoso muy meteorizado y fracturado, para luego tener la roca fundamental de naturaleza volcánica. Estos perfiles geoelectricos muestran con cierto detalle la electro-estratigrafía de las zonas donde se han llevado a cabo: Millojahuirá, Patara.

CONSORCIO V-5

Ing. Víctor Díaz Nuñez
INGENIERO CIVIL
CIP. 6530

CONSORCIO V-5

Dr. César Lazcano Carreño
BIOLOGO
CBP. 269

CONSORCIO V-5

Ing. Juan Quiroga Vite
INGENIERO GEÓLOGO
CIP. 55872

Análisis de material de roca

El macizo rocoso que conforma el basamento de las zonas de llanura o altiplanicies andinas donde se ubica el sitio del proyecto de obras para el mejoramiento de la calidad del agua ha sido reconocido a través de los reconocimientos de campo. El basamento rocoso volcánico aflora en toda el área de estudio, y puede correlacionarse con los distintos afloramientos que existen.

A. Sondajes

En esta etapa del estudio no se han realizado sondeos geotécnicos exploratorios que permitan definir con precisión el tipo de roca presente en el subsuelo por consideraciones obvias, dado que aún no se define la alternativa óptima que construirá la Región Moquegua. Las rocas atravesadas por los sondajes en la zona de mina Santa Rosa corresponden mayormente a materiales volcánicos de textura afanítica, con su matriz natural a silicificada y algunos rasgos de metamorfismo hidrotermal. En relación con la matriz, aunque esta tiene un cierto grado de meteorización, los procesos de silicificación le confieren una dureza media a alta, correspondiente a una roca de calidad media (III), según lo que establece la Clasificación Geomecánica de Bieniawsky.

En cuanto a los parámetros generales principales que indican la condición geotécnica general de las rocas en las zonas del proyecto de mejoramiento son las siguientes:

Los valores promedio de resistencia al martillo obtenidos en las Latitas (Muestra R-1) del eje de presa propuesto para un embalse es de regular a buena resistencia, y demuestran que se trata de una roca que tiene una matriz sana a levemente meteorizada, y que está fracturada en forma importante. Se ha podido establecer que las fracturas (4 a 7 fracturas/1m), al menos las mayores y de mayor persistencia hasta los 20-25 metros de profundidad se encuentran abiertas e intercomunicadas. Presentan porcentajes entre 2 y 4 % de minerales de hierro, así como buen contenido de ferro-magnesianos, los que al lixiviarse son llevados por las corrientes de agua hasta el embalse.

Las tobas existentes en la quebrada Antajarane (Muestra R-2), y en otros sitios de la cuenca, tienen una dureza menor, pero presentan un mayor contenido de minerales de hierro (7-10 %) y aluminio, así como contenidos de arcilla como resultado de los procesos de meteorización de los feldespatos. Su resistencia mecánica es baja y debe ser tratada para resistir cargas altas.

Las andesitas porfídicas son rocas de mayor resistencia mecánica (Muestras 3 y 4) pero tienen contenidos de arcillas variables entre 0.5 y 15 %, de la misma manera sucede con los minerales de hierro variando entre 6 y 10 %, que aunado al contenido de Fe en los ferro-magnesianos, el porcentaje de hierro en estas rocas es alto. Esto explica plenamente las relaciones roca - suelo - agua (superficial y subterránea) con la calidad de las aguas del embalse Pasto Grande caracterizadas por contener un alto porcentaje de hierro y aluminio y en los sedimentos de fondo también.

B. Calicatas

Como ya se sobreentiende, las calicatas solamente entregaron información sobre la posición en profundidad de la zona somera del perfil del suelo. En efecto, todas las calicatas excavadas no alcanzaron el substrato rocoso, pero obviamente éste aflora en toda el área de proyecto.

CONDICIONES DE FUNDACION.

De acuerdo a los antecedentes antes descritos, es claro que el material de fundación de las obras para el mejoramiento de la calidad del agua, que se distribuirán en varios frentes y lugares en la cuenca corresponden tanto a la roca fundamental como a suelos. El espesor de horizonte del suelo es variable y se encuentra muy cerca de la superficie. En los puntos prospectados, demuestra que corresponde a un plano irregular, donde existen depresiones importantes en las quebradas, existiendo grandes diferencias en la profundidad a la cual se encuentra en las laderas respecto de las zonas más bajas de la altiplanicie.

CONDICIONES PARA LA EXCAVACION

De acuerdo al grado de fracturación que está afectando al macizo rocoso demandaría la construcción de excavaciones con taludes laterales inclinados, para alcanzar los niveles de fundación previstos. Como normalmente, por razones de espacio disponible y costos, las excavaciones para las fundaciones en estos casos se realizaran con taludes verticales, se recomienda considerar refuerzos de construcción en aquellos taludes que alcancen alturas mayores de 4 metros.

Estos refuerzos podrán consistir en pernos de anclaje, malla de acero y/o hormigón proyectado (con o sin fibras de acero), elementos que podrán aplicarse individualmente o combinados entre sí, de acuerdo a lo que se decida durante el avance de las excavaciones, a la luz de las condiciones reales de la roca encontrada. En relación al método de excavación, se estima que el grado de fracturación y dureza que muestran las rocas tobáceas en las prospecciones realizadas, permitirá su remoción utilizando máquinas convencionales, sin el uso masivo de explosivos, mas no así las andesitas porfídicas.

CONSIDERACIONES GEOTÉCNICAS para la construccion

Los materiales de fundación de las obras contempladas en el proyecto de mejoramiento de la calidad del agua del embalse Pasto Grande corresponden principalmente a suelos y a rocas volcánicas.

En consecuencia, los materiales de suelo correspondientes a las arenas gravosas con algo de finos y gravas arenosas con finos que recubren en un manto delgado (no más de 2,00 metros de espesor en los puntos prospectados de laderas y mayor profundidad en las zonas bajas a las rocas fundamentales, deberán ser completamente removidos.

Las rocas reconocidas mediante las prospecciones y el reconocimiento en terreno corresponden a formaciones geológicas volcánicas, andesitas y latitas así como volcánico sedimentarios, algunas con alteración hidrotermal, que yacen con poca disturbación.

En el subsuelo reconocido (hasta 25 metros de profundidad, interpolado de los afloramientos), estas rocas se presentan con una matriz regular a dura y muy fracturadas, pero conformando un cuerpo que se encuentra en su sitio, sin evidencias de haber sufrido los efectos de una gran perturbación

tectónica severa ni las consecuencias de la ocurrencia de fenómenos catastróficos tales como deslizamientos, reptaciones, colapsos, entre otros.

En cuanto a la situación hidrogeológica del sitio del proyecto y sus alrededores, existen evidencias de la presencia de napas freáticas cercanas a la superficie en las zonas de depresión como quebradas y bofedales. En pozos perforados en la región (Titire y otros lugares) se ha encontrado una napa confinada a semiconfinada algo profunda (aproximadamente 60-100 metros), correspondiente al Acuífero Capillune.

Considerando la condición general del terreno, la solución adecuada es fundar las estructuras a una profundidad mínima, de 1,00 metro, o interceptar la roca en aquellos lugares en que esta se encuentre poco profunda.

Aunque no se han detectado específicamente franjas de roca argilizada que podrían provenir de la presencia de fallas, si en los sellos de fundación descubiertos aparecieran sectores con estas características, será necesario profundizar en ellos la limpieza, aunque esto signifique aumentar la profundidad del sello en el sector afectado.

En relación con la matriz, aunque esta tiene un cierto grado de meteorización, los procesos de silicificación le confieren una dureza media a alta, correspondiente a una roca de calidad media (III), según lo que establece la Clasificación Geomecánica de Bieniawsky.

Se recomienda considerar a la roca volcánica como el material para la fundación de obras que están contempladas en la construcción de las obras civiles para el proyecto.

En consecuencia, se recomienda remover completamente todos los materiales que recubren a la roca fundamental, los que consisten en arenas gravosas y gravas arenosas con finos dispuestas sobre ella, en un depósito de poco espesor.

De acuerdo a las condiciones geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas, considerar el sitio apropiado para el proyecto de mejoramiento como un lugar que presente la mejor situación de seguridad física.

9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo a los estudios realizados se puede concluir en lo siguiente:

- El sistema acuífero presente en el área de estudio está conformado por dos tipos de acuífero. Primero, por acuíferos en medio poroso dispersos sobre las quebradas y pampas en toda el área altiplánica, constituyendo acuíferos freáticos detríticos en depósitos fluvioglaciales, coluviales, aluviales y bofedales no consolidados. Segundo, por acuíferos fracturados en lechos rocosos sedimentarios y volcánicos, destacando en especial el acuífero Capillune
- El acuífero Capillune constituye un reservorio natural de recursos hídricos renovables de buena calidad. Está conformado por una secuencia de materiales clásticos con intercalación de aglomerados, tobas y flujos volcánicos. Tiene un espesor promedio de 100 m y sus coeficientes de transmisividad y almacenamiento son de 3.6×10^{-3} m²/s y 0.001 respectivamente.
- Las surgencias termales en el área de estudio son alimentadas por un sistema de flujos subterráneos profundos, cuya recarga se realiza a través de discontinuidades mayores interconectadas hidráulicamente como son las fallas y las facturas de bajo grado, a partir de las aguas de escorrentía superficial producto de las precipitaciones en las zonas montañosas circundantes y de las aguas provenientes de los nevados. Este sistema profundo descarga convectivamente en los manantiales de la región y hacia el acuífero somero donde ocurre una mezcla entre diferentes aguas.
- La conexión hidráulica entre los dos sistemas de flujo es directa, por ello existe un probable impacto de las aguas termales sobre las aguas frías, cuya mezcla llega hacia los bofedales de pampa Pasto Grande y de esta hacia el embalse. La magnitud del impacto debe estudiarse con detalle pues al no haber pozos ni piezómetros para el control y monitoreo se hace necesario construir una red piezométrica para tal fin.
- Es importante caracterizar con detalle los sub sistemas acuíferos somero y profundo, y se hace necesario construir posteriormente un modelo numérico de simulación hidrodinámica. De esta manera será posible determinar cualitativa y cuantitativamente la magnitud del impacto y si es necesario, tomar las medidas necesarias para el control, mitigación y remediación. Actualmente no se cuenta con suficiente información hidrogeológica.
- Se recomienda realizar un estudio geofísico en puntos estratégicos para la ubicación de los piezómetros y la posterior perforación de los mismos, con lo cual será posible obtener mejores datos para la caracterización hidrológica detallada, se señala enfáticamente que este estudio hidrogeológico todavía es de carácter preliminar, pues para tener un estudio de detalle se deberán realizar investigaciones cuando estén contruidos los pozos o piezómetros. Los piezómetros en la microcuenca del río Cacachara y Patara son de vital importancia para el control hidrogeológico y ambiental en esta cuenca muy afectada por la contaminación natural y antropogénica. .

- Las actividades recomendadas a futuro inmediato o a corto plazo son de vital importancia y se deben orientar para tener la hidrogeología detallada de los acuíferos señalados en zonas estratégicas de interés. Así, se recomienda un estudio de geología, estructura e investigaciones geoquímicas y geotérmicas adicionales, perforación de pozos o piezómetros para la realización de pruebas hidráulicas, toma de muestras y los respectivos análisis fisicoquímicos y de calidad del agua subterránea fría y de las surgencias termales, haciendo uso de las mejores herramientas para la adquisición de los datos que se requiere.
- La actividad minera antigua que se realizó en la zona no fue manejada de manera responsable en la zona de la cuenca del río Cacachara, por lo que existen pasivos ambientales que son la causa de los drenaje de ácidos de mina, de la acumulación y circulación de sustancias tóxicas, así como depósitos de desmonte, que han contaminado los recursos hídricos en la zona de antiguas operaciones. Por tanto, con el cierre de la mina Santa Rosa se debe tener un buen control por parte de las autoridades competentes a fin de evitar que esta situación vuelva a repetirse, con lo cual se evitaría que las aguas del río Cacachara que drenan mezcladas con las del Patara hacia el embalse a través del río Patara, contribuyan a desmejorar su calidad por elementos o sustancias contaminantes que puedan alcanzar el embalse como carga química.
- El análisis de la carga química de las aguas del río Cacachara que ingresa al Patara y luego se vierten en el embalse proporcionan bajos porcentajes de participación en la contaminación del embalse, dado que la mayor contaminación se recibe del río Millojahuirá y del Hualcane, dadas las particularidades que presentan estas cuencas con presencia de aguas termales ácidas, formación de aguas ácidas por afloramientos de terrenos mineralizados, muchos de los cuales han quedado expuestos por la desglaciación que ha venido ocurriendo en estos últimos 30 -35 años.
- El agua del embalse Pasto Grande muestra un evidente impacto por metales pesados con una asociación hacia sedimentos con partículas tipo lodo arcilloso (limo y arcilla). Las concentraciones de los elementos metálicos dentro del embalse, presentan de forma general, un gradiente decreciente desde la zona Norte y Noreste en la desembocadura de los ríos Millojahuirá, Hualcane - Antajarane y Patara, pero hacia la desembocadura del embalse disminuye.
- Las acumulaciones de metales en los sedimentos, a futuro, probablemente se incrementen debido a la escasa circulación que presenta el agua en este ecosistema artificial. Los elementos con mayores concentraciones están asociados principalmente con el hierro. Se recomienda realizar estudios avanzados sobre las relaciones mineralógicas de los sedimentos de fondo y las concentraciones de elementos metálicos, a fin de obtener los índices de contaminación de los sedimentos de fondo.
- Los valores de las concentraciones del hierro son bastante altos, y los niveles más elevados fueron apreciados en las estaciones frente a los ríos Millojahuirá, Hualcane - Antajarane y mucho menos frente al Patara, existiendo una relación directa entre la concentración del hierro con el aluminio y el arsénico, manteniéndose la siguiente relación:
Fe mayor que el Al, mucho mayor que el As.

- Los estudios geoquímicos iniciales muestran con claridad las relaciones roca-suelo-agua y las relaciones suelo-subsuelo-agua subterránea, por lo que se recomienda continuar con estudios más detallados utilizando esta herramienta, a fin de caracterizar la dinámica del proceso de erosión con el transporte de sedimentos y elementos metálicos y sustancias contaminantes desde las áreas fuente hacia el embalse. Además, existe una compleja relación entre las aguas frías y termales, la mezcla entre éstas, y su incidencia en la contaminación de las aguas que circulan superficialmente en la subcuenca del río Vizcachas.
- Definitivamente, la naturaleza del ambiente geológico volcánico con presencia de zonas mineralizadas que por procesos naturales producen contaminación de suelos y aguas, tiene la mayor incidencia en el comportamiento de las aguas y sedimentos en el embalse Pasto Grande.
- De manera categórica, y a la luz de los análisis hidroquímicos, geoquímicos y la naturaleza geológica y las características del clima de la subcuenca del río Vizcachas, se puede inferir que la causa de la contaminación de las aguas del embalse es mayormente de origen litogénico o natural, siendo la participación antropogénica, debido a la actividad minera, de un orden mucho menor. Con el cierre de mina en Santa Rosa, las condiciones del cese de actividades permitirán una remediación lenta y paulatina que incidirá en la calidad de las aguas, por tanto, habrá una tendencia al mejoramiento de la calidad de estas aguas en su entorno en el tiempo,
- Es de gran importancia iniciar de inmediato no solo la implementación de las alternativas propuestas en este proyecto, sino también iniciar un estudio integral sistemático de las condiciones actuales del embalse con miras a obtener los datos pertinentes que no se tienen, y poder realizar estudios de simulación bajo escenarios diversos con la finalidad de lograr un buen manejo y la gestión integral del recurso hídrico actualmente en riesgo.

BIBLIOGRAFÍA

ESTUDIOS

Mariño, Jersy. Oct. 2005. Actividad volcánica del Ticsani. Crisis sísmica del Calococa. INGEMMET. Dirección de Geología Ambiental.

Oikos S.R.Ltda. Oct. 1966. Estudio de Impacto Ambiental del Cultivo Extensivo de Trucha en la Represa Pasto Grande para Empresa Comunal de Producción y Servicios "Lago Azul".

Tovar J. Set. 1983. III Seminario de Hidrología. Memoria Vol. II 1986. Lima Perú. Extracción Planificada de Aguas Subterráneas y Operación del Campo de Bombeo de Titijones. Moquegua.

TEXTOS

E. Custodio, M.R. Llamas, 1976. Hidrología Subterránea. Tomos I y II. Segunda edición. Edic. Omega SA. Barcelona.

C.A. Sierra R. 2011. Calidad del Agua Evaluación y Diagnóstico. Universidad de Medellín. Primera Edición.

ANÁLISIS DE LABORATORIO

AGQ Perú S.A.C. Informe de Caracterización de Metales Movilizables en Mineral mediante manejo de generación de lixiviados.

AGQ Perú S.A.C. Análisis Granulométricos y Geoquímico de Suelos. Comentarios Adicionales.

AGQ Perú. S.A.C. Análisis Granulométricos. Campaña Julio 2012.

BISA, Ago. 2012. Estudio petrográfico de centro muestras. Consorcio VS.S.A.