

UNIVERSIDAD PERUANA CAYETANO HEREDIA

FACULTAD DE CIENCIAS Y FILOSOFIA

“ALBERTO CAZORLA TALLERI”



“Propuesta de mejoramiento de la calidad de aguas de drenaje ácido de minas (DAM), mediante un diseño de remediación combinada con tratamientos pasivos en la zona industrial de la Corporación Minera Toma La Mano S.A”.

**Trabajo De Suficiencia Profesional para obtener el Título de Licenciada en
Biología**

Chaska Izabo Asunción Calle Galindo

Lima – Perú

2021

REVISORES

Mg. Diego Venegas

Lic. Martha Ly

ASESOR(ES):

RAÚL LOAYZA MURO

Dedicatoria

Primeramente, a Dios y luego a la Santísima Virgen de la Asunción
“Mama Ashu” que son mi fortaleza y fe.

Este trabajo esta dedicado a mi familia, por haber sido un pilar en mi formación y ser mi sostenibilidad a lo largo del tiempo. A mis amados padres Jorge y Julia Magdalena que son personas de admirar, siempre me han inculcado la perseverancia para el logro de mis sueños, estuvieron atentos a mis inquietudes y me han guiado con amor y sabiduría en el camino hacia la superación. A mi hermana Kiara por sus palabras de ánimo y confianza. A mi querido asesor, Raúl Loayza, por sus enseñanzas, correcciones y fascinación por la redacción, pero sobre todo por su nobleza y el gran entusiasmo para apoyar a los sueños de otras personas.

A mis ángeles Mama Salvina y Jhair porque con su recuerdo me acompañan; más aún me alientan con sus sueños que se interpretan en metas para mí. También a mis hijos felinos “Ringuito, Botitas y Julieta” por su amor infinito.

Agradecimiento

Un agradecimiento especial a los esposos Don Cornelio Aguirre Briceño y Doña María Arteaga Ríos quienes con perseverancia y trabajo constituyeron en 1936 la empresa “Corporación Minera Toma la Mano S.A”, la misma que a lo largo del tiempo ha venido reinventándose para estar a la vanguardia y cumplir con la ley.

A su equipo de ingenieros en planta, por su disposición de ayudarme en la recolección de información y su gran interés en debatir sobre nuevas propuestas de tecnologías eco amigables.

A mi primo José, excelente ingeniero Ambiental quien ha coadyuvado en la realización de los cálculos del tiempo de retención. A mi asesor por su guía, redacción y paciencia.

Resumen

La planta concentradora de la Corporación Minera Toma la Mano S.A. se encuentra en el distrito de Ticapampa (Recuay, Áncash) a una altitud de 3600 msnm, con una capacidad de producción de 350 TM/día. El proceso genera aguas industriales, que contienen metales como Pb, Cu, Fe y Zn, y son evacuadas a pozas para su tratamiento químico, antes de ser reutilizadas en procesos de la planta.

Recientemente, se ha detectado una filtración de relave con pH 3.42, sólidos totales en suspensión elevados, y alta conductividad y concentración de As (14.84 mg/L), Al (12.47 mg/L), Zn (54.13 mg/L), Mn (123.5 mg/L) y Fe total (506.6 mg/L), los cuales superan los límites máximos permisibles (LMP). Frente a esta situación, la formación recibida en ciencias ambientales, conservación y biotecnología a lo largo de mi carrera, así como la experiencia en los laboratorios de investigación, donde se generan las competencias para la formulación de proyectos, me han brindado la capacidad para identificar el problema que motiva este trabajo y proponer una solución sostenible en el tiempo. Además de estas capacidades, la experiencia profesional adquirida durante el trabajo en esta empresa me ha proporcionado la visión, enfoque e información para diseñar una estrategia efectiva de tratamiento de aguas. Para ello, es importante conocer la formación geológica, la caracterización fisicoquímica de las aguas, meteorología y área de influencia. El objetivo de este trabajo es diseñar un sistema de “remediación combinada”, con dos procesos el primero un tratamiento fisicoquímico con piedra caliza para la neutralización del pH, precipitación de metales, y un segundo tratamiento pasivo con fases aeróbica y anaeróbica, compuesto por sedimentos, bacterias y especies

fitorremediadoras nativas. Este sistema permitirá cumplir con los LMP de la normativa ambiental del Perú para poder verter estas aguas industriales a cuerpos de agua superficial sin producir impactos negativos significativos.

Palabras clave: biorremediación, minas, remediación combinada

INDICE

I.	Introducción	1
1.	Antecedentes de la empresa	1
2.	Problema.....	2
3.	Justificación	3
4.	Mi formación	4
5.	Marco teórico	6
7.	Objetivo general:	13
7.1	Objetivos específicos	13
II.	Materiales y métodos	14
III.	Resultados	16
1.	Ubicación del proyecto	16
2.	Suelo.....	17
3.	Geología regional.....	17
4.	Clima y Temperatura.....	17
5.	Dirección y Velocidad del Viento	18
6.	Hidrografía y precipitaciones	18
7.	Diseño estructural:	20
	21
7.1.	Pozas y filtración de la relavera.....	21
7.2.	Diseño de canaleta para sistema de remediación	22
7.3.	Canaletas en acordeón	23
8.	Acondicionamiento del sistema remediador	25
8.1	Sustrato	25
8.2	Plantas remediadoras	26
9.	Evaluación de parámetros físicos y químicos.....	28
10.	Evaluación de la eficiencia del sistema de remediador	29
IV.	Discusión.....	30
V.	Conclusión.....	36
VI.	Recomendaciones	37
VII.	Bibliografía	38

VIII. Anexos	44
--------------------	----

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.Ubicación de la Planta de Beneficio Toma la Mano	16
Figura 2.Ubicación de la planta concentradora en la Quebrada Pachamaca y tipo de geología de la zona morrénica y aluvial	19
Figura 3.Ubicación de la planta concentradora y del efluente de la relavera (PMAG-10)	19
Figura 4.Ubicación del circuito de agua a partir del efluente de la relavera. La canaleta de remediación se encuentra entre la poza N° 1 y N° 2 (30 m) y entre la poza N° 2 y la salida de la concesión (15 m).....	20
Figura 5. Esquema general del diseño.....	21
Figura 6.. Efluente de la relavera (PMAG-10) y poza N° 1 con sistema de bombeo para recirculación.....	22
Figura 7.Corte transversal de la canaleta	23
Figura 8.Diseño en zig-zag de la canaleta entre la poza N° 1 y la poza N° 2.....	23
Figura 9.Sistema remediador de canaletas en forma de acordeón, desde la poza N°2 hasta el final de la concesión	24
Figura 10.Estratificación de los componentes del sustrato	25
Figura 11.Especies nativas del relave cercano Mesapata, en Catac.....	27

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.Resultado del análisis de aguas del punto PMAG -10 y comparación con los LMP	3
Tabla 2. Variables dependientes e independientes.....	15
Tabla 3.Variables físicas y químicas por evaluar en las entradas y salidas del sistema remediador	28

INDICE DE ANEXOS

Anexos 1.Tabla comparativa de los diferentes diseños	
Anexos 2.Tabla comparativa de diferentes estudios	
Anexos 3.Informe de calidad de agua de la Corporación Minera Toma la Mano S.A	
Anexos 4.Tabla de los parámetros de Límites máximos permisibles	
Anexos 5. Cálculo del tiempo de retención de las canaletas	

I. Introducción

1. Antecedentes de la empresa

La mina “Toma la Mano” se ubica en el Cerro Pacllash a 4,500 msnm, en el distrito de Marcará, centro poblado de Vicos, provincia de Carhuaz (Áncash). Su explotación en forma artesanal se inició el 10 de enero de 1936 como “Compañía Minera Toma la Mano” por los esposos Cornelio Aguirre Briceño y María Arteaga (1). En 1999 la empresa dio un giro al implementar la extracción tecnificada, uso de maquinarias y contrato de profesionales mineros, y en 2001 innovaron con el sistema de explotación subterránea sobre rieles, incrementando su productividad (1).

En 2007, con miras a la diversificación, la empresa cambió su razón social a “Corporación Minera Toma la Mano S.A”, lo que le permitió efectuar actividades previstas en la legislación peruana de acuerdo con la Ley de Formalización y Promoción de la Pequeña Minería y la Minería Artesanal N° 27651, como cateo, prospección, exploración, desarrollo, explotación, labor general, beneficio, procesamiento, comercialización y transporte de recursos mineros como materia prima o producto terminado (2). El 27 de febrero de ese año se realizó la construcción de la planta concentradora, con un área de 70 hectáreas, en el caserío de Buenos Aires, distrito de Ticapampa, provincia de Recuay (Áncash). Actualmente, mediante R.D. N°45-2007-REGIONAL DE ANCASH/DREM cuenta con la aprobación para obtener 350 TMD de polimetálicos (plomo, cobre y zinc) a través de secciones de chancado, molienda, flotación y sedimentación. Los desechos producto de los procesos mineros

son transportados por gravedad al depósito de relaves, el cual se encuentra ubicado al pie de la planta (2).

2. Problema

Durante el procesamiento de minerales, la planta concentradora genera aguas industriales que son debidamente tratadas y reutilizadas en el mismo. Sin embargo, se ha detectado una filtración de relave que converge con aguas subterráneas y que, con un análisis químico reciente, no cumple con los límites máximos permisibles (LMP). Los LMP son “la medida de la concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan al efluente líquido de actividades minero-metalúrgicas, y que al ser excedida, causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente” (3). En la actualidad, estas aguas son dirigidas a una poza de recirculación para luego ser conducidas al tanque industrial, donde son reutilizadas en el proceso de la planta en las áreas de molienda y flotación, así como en su limpieza por medio de mangueras de lona, y para los aspersores de los diques de la relavera, evitando así impactos ambientales. Sin embargo, esta no es una solución adecuada al problema debido a las fuertes precipitaciones del área, sobre todo entre los meses de diciembre y marzo, que incrementan los volúmenes del efluente (Figura 2). Por ello, resulta necesario un sistema remediador sostenible que permita mejorar la calidad de las aguas ácidas dentro de los LMP y su vertimiento en los cuerpos de agua aledaños, sin causar daños ambientales significativos.

Tabla 1.Resultado del análisis de aguas del punto PMAG -10 y comparación con los LMP

Parametro	Unidad	L.D	PMAG-10 Filtración de la relavera	LMP Limites maximos	Cumplimiento
pH	Uni pH	r	3.42	6.0-9.0	no cumple
Solidos totales suspendidos	mg/L	2	96	50	no cumple
Aceites y grasas	mg/L	0.5	<0.5	20	cumple
Cianuro total	mg/L	0.001	<0.001	1	cumple
Arsenico total	mg/L	0.00021	14.84	0.1	no cumple
Cadmio total	mg/L	0.00024	0.02864	0.05	cumple
Cromo hexavalente	mg/L	0.004	<0.004	0.1	cumple
Cobre total	mg/L	0.00037	0.02197	0.5	cumple
Hierro diseño	mg/L	0.0096	397.1	2	no cumple
Plomo total	mg/L	0.00026	<0.00026	0.2	cumple
Mercurio total	mg/L	0.00008	<0.00008	0.002	cumple
Zinc Total	mg/L	0.0009	54.13	1.5	no cumple

3. Justificación

La Corporación Minera Toma la Mano S.A tiene especial interés en la protección de los cuerpos de agua y en el desarrollo de adecuado sistema de manejo de efluentes dentro del área industrial y de influencia. Como empresa comprometida debe cumplir estrictamente con lo decretado por el Ministerio de Energías y Minas (MINEM), fiscalizado por la autoridad competente regional, la Dirección Regional de Energía y Minas (DREM), y la Autoridad Nacional del Agua (ANA).

Dentro de sus áreas de influencia, la empresa tiene relaciones comunitarias con los Caseríos Buenos Aires y Yacucancha, por lo cual es imprescindible identificar los posibles impactos ambientales y a la salud derivados de las actividades de la planta de tratamiento, y manejar los diferentes aspectos sociales para reducir al máximo

cualquier tipo de conflicto. Siendo uno de los potenciales problemas el impacto de las filtraciones con elevada carga de sólidos en suspensión y metales de la relavera, por ello la corporación está en búsqueda de opciones basadas en la biotecnología ambiental que sean innovadoras y creativas, que en conjunto se complementen para abordar estos desafíos, con ello el egresado de la carrera de biología cumple con diversas competencias; tales como integrar los conocimientos de diferentes disciplinas, aunado a la proactividad, realizando un trabajo interdisciplinario y en equipo, permitiendo que se desarrolle la capacidad del auto aprendizaje. Una de ellas es la “remediación combinada”, que permitiría un manejo sostenible de estas filtraciones y la disminución de los niveles de metales en aguas superficiales, de manera que se protejan los recursos naturales y garanticen las buenas relaciones sociales en el presente y futuro (4).

4. Mi formación

Mi etapa de formación en la Universidad Peruana Cayetano Heredia estuvo ligada a las ciencias ambientales, debido a mi elección de cursos de pregrado, como Introducción a la Metodología de Evaluación Ambiental, Contaminación Ambiental, Estudios de Impacto Ambiental entre otros seguido de mi paso por el Laboratorio De Cultivo De Tejidos Vegetales In Vitro, donde profundicé en conservación y biotecnología. Aprendí acerca de la descripción taxonómica, evaluación, potenciamiento en cultivo *in vitro* de diversas especies de orquídeas, así como de hongos comestibles y ambientales. Durante mi desempeño en el laboratorio tuve directa participación en la organización del IX Congreso Latinoamericano de Micología, cuya presidencia fuera ejercida por la Dra. Magdalena Pavlich, ejerciendo labores de coordinadora de los cursos pre-

congreso y profundizando mi aprendizaje en biotecnología, que constituye una herramienta para el mejoramiento de diversos procesos, como producción y conservación de hongos. Además, ejercí la asistencia de prácticas en el curso “Introducción In Vitro De Orquídeas Ornamentales con énfasis en el género *Vanilla*, crecimiento hasta formación de cápsulas, transformación y biocomercio”.

Mi interés en esta área me ha llevado a tomar cursos que han mejorado mi rendimiento profesional, como “Curso de Especialización en Gestión Ambiental ISO14001” en la Pontificia Universidad Católica del Perú, lo cual me ayudó a comprender la importancia del cumplimiento y respeto de la normativa ambiental; el curso “Propagación *In Vitro* Mediante el Sistema de Inmersión Temporal y Aclimatación de Especies Vegetales”, que formó parte de una pasantía en la Corporación G y G E.I.R.L en Moyobamba, donde se desarrolló el proyecto de investigación “Evaluación del efecto de las fitohormonas ANA Y BAP en las plántulas de *Cattleya rex* mediante el sistema de inmersión temporal”, la cual es una metodología adecuada para acelerar la multiplicación de la producción de orquídeas. Posteriormente, empezó mi labor en la Corporación Minera Toma La Mano S.A. como asistente del área de seguridad, salud y medio ambiente, donde pude involucrarme en proyectos con un fuerte compromiso ambiental. En este periodo, y siempre con ganas de incrementar mi conocimiento en estos temas, participé en el congreso III Peru Mining Bussiness 2019, y actualmente curso el Diplomado “Gestión Ambiental para Organizaciones Sostenibles” en la SGS Academy.

5. Marco teórico

El agua es un disolvente universal, cuya función ecológica principal consiste en movilizar y adherir una diversidad de solutos del ambiente, y cuya presencia y niveles determinan su calidad. La incorporación de partículas y sustancias puede tener un origen natural o antrópico. Un ejemplo del primer caso es el drenaje ácido de roca (DAR), que consiste en la oxidación a través del tiempo de metales sulfurosos provenientes de suelos piritosos, que al contacto con el agua y aire producen lixiviación de los metales. Esto genera aguas ácidas de colores rojizos, con pH entre 1 y 7, acidez creciente, gran cantidad de sulfatos, metales disueltos o totales, y sólidos totales disueltos, originando una severa contaminación (5).

Alrededor del mundo se tienen miles de casos de contaminación de aguas de origen antrópico, como los efluentes domésticos (con materia orgánica), agrícolas (con fertilizantes o plaguicidas) y drenaje ácido de mina (DAM), propio de los yacimientos mineros, y que contiene residuos de sus actividades. Al exponerse al agua y el oxígeno, estos residuos producen la lixiviación de minerales sulfurosos, como pirrotina y pirita en mayor concentración, y calcopirita, marcasita y esfalerita, en menor concentración debido a su solubilidad e inestabilidad (6). Si bien se conocen las reacciones químicas generales de este proceso, cada situación es única debido a la complejidad de la oxidación de sulfuros y porque sus consecuencias pueden variar de gran manera entre diferentes locaciones y condiciones (7). Por ello, para establecer estrategias de mitigación de sus posibles impactos, como la pérdida de biodiversidad, destrucción de

hábitats y contaminación ambiental, es importante conocer los procesos que influyen en la liberación de sulfuros y su interacción con los metales (6).

6. Métodos de remediación

Para el tratamiento de este tipo de contaminación, se han empleado minerales alcalinos (carbonatados), como la caliza (CaCO_3), que está presente en las rocas. En el DAM se usa el “tratamiento activo” con compuestos químicos alcalinos que consumen el ácido, como amoníaco anhidro (NH_3), cal (CaO), cal apagada o hidratada (Ca(OH)_2) o hidróxido de sodio (NaOH). A este proceso se le denomina neutralización, que incrementa el pH y precipita los iones metálicos (8). El tratamiento tiene un elevado costo debido al mantenimiento constante y a la posibilidad de liberar compuestos como el NH_3 o NaOH , que afectan los ecosistemas naturales (9).

Actualmente, se emplean también alternativas pasivas, que incluyen procesos geoquímicos, físicos y biológicos. En los geoquímicos se utiliza piedra caliza en drenajes anóxicos, canales abiertos y lechos de lixiviación, lechos de lixiviación de escoria de acero y pozos de derivación. Los procesos biológicos incluyen los diferentes tipos de humedales artificiales (‘wetlands’), lechos de remoción de Mn, biorreactores, entre otros (9).

Los humedales, clasificados como los riñones del mundo, son una estrategia eficiente de biorremediación debido a los procesos hidrodinámicos y biogeoquímicos, que incorporan una gran diversidad de componentes químicos y físicos en solución, como

metales y sedimentos (5). Los humedales naturales no requieren de aditivos químicos, como piedra caliza, siendo suficiente con la sinergia que se realiza entre sus componentes, pero sí necesita de una extensa superficie de tratamiento (10).

El diseño y la construcción de los humedales artificiales se da alrededor de 1974, luego de identificarse las capacidades de los humedales naturales para amortiguar contaminantes orgánicos e inorgánicos (11). Estos sistemas se basan en procesos biológicos y físicos, como la descomposición, nitrificación, precipitación, adsorción, filtración (12). El diseño y construcción son aparentemente sencillos, pero a la vez únicos, debido a que deben considerar la ubicación geográfica, el clima, tipo de suelo, geología, disponibilidad de área, entre otros (12). Están compuestos por pozas y canales, donde ocurre la descontaminación a través de la interacción entre el agua y el sustrato sólido, microorganismos, flora y fauna (10). Hay dos tipos de humedales, el superficial o aeróbico y subsuperficial o anaeróbico. El primero, se aplica a aguas preliminarmente tratadas, con una profundidad de 0.3 m a 0.4 m, que fluyen a través de macrófitas o plantas acuáticas que están, generalmente, expuestas. El humedal anaeróbico tiene mayor profundidad para que el agua tenga contacto con el sustrato, el cual está compuesto de varias capas de distinto material (piedra, arena, grava, materia orgánica, caliza, etc.) y texturas, que determinan su eficacia y capacidad de circulación del agua (13). En el componente vegetal, la fitorremediación se da en raíces y rizomas a través de la reducción, transformación, degradación, volatilización o estabilización de contaminantes por procesos químicos, bioquímicos y asociaciones con bacterias, para lo cual es primordial que se genere una biopelícula (14). Este tratamiento es subdividido en flujo horizontal y flujo vertical (10).

Los humedales artificiales son ampliamente conocidos, mayormente en E.U.A. y Europa Central. Esta tecnología pudo haberse iniciado en Alemania en la década de los cincuenta en el Instituto Max Planck por K. Seidel, donde se desarrollaron el “Sistema de Tratamiento de Lecho de Juncos” y el “Método De La Zona Raíz” (13). La aplicación de los humedales artificiales como sistemas depuradores denominados “Sistema de agua libre”, “Sistema de flujo subterráneo” y “Sistema de Tratamiento en Lecho de Caña”, por el uso de la especie “*Phragmites australis*” (“carrizo”) (12), es amplia en Alemania, Austria, Bélgica, Dinamarca, España, Francia, Luxemburgo, Países Bajos, Reino Unido, Suecia y Suiza (4).

La primera vez que se observó la mejora de un DAM fue en 1978, en humedales naturales de *Sphagnum* (11). Luego en Virginia Occidental y Ohio (E.U.A.) en 1985, después que un efluente atravesara un humedal natural con *Typha*. En este país se han realizado distintos estudios para conocer la eficacia de los humedales en DAM, siendo uno de ellos el que se llevó a cabo en el Bureau of Mines una mina de carbón entre 1984 y 1993, donde se construyeron 13 humedales que eliminaron más del 85 % de los metales (15). En la década de los 90, Australia implementó humedales artificiales para mejorar el DAM de sus minas de uranio, oro y polimetálicos con buenos resultados. Un ejemplo de ello fue la mina de oro Toms Gully, donde se implementaron humedales mixtos con la especie *Typha* spp para el vertido de DAM, y se obtuvo un 90% de reducción de As, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Pb y U, y 75% de Mn (16).

Varios países europeos han implementado distintos tipos de humedales. Por ejemplo, en el Reino Unido encontramos más de 14 humedales artificiales para aminorar la acidez del DAM de minas de carbón con un sistema de fase aeróbica y anaeróbica con

una efectividad de 50% de disminución de Fe (11). Otro ejemplo es el piloto a escala del primer humedal anaeróbico construido en Newcastle en 1995 para tratar las aguas del arroyo Stanley Bum, contaminado por el DAM de la mina abandonada Morrison Busty Colliery con pH 4, 40 mg/L Fe y 35 mg/L Al. Este humedal operó en una superficie de 40 m² a un flujo entre 60 y > 500 L/min por 17 años, eliminando el 80 % del Fe y Al en la descarga y la acidez a una tasa promedio de 9.6 g/m² (17).

En Noruega (1998) la mina de ilmenita Storgangen, produjo aproximadamente 8 MT de relaves con altas concentraciones de níquel disuelto. Por ello, se hizo un piloto de un humedal compuesto por tres celdas de tratamiento anaeróbico de flujo subterráneo, una celda de tratamiento aeróbico de flujo superficial, una cascada de aireación y una celda de filtración de rocas. El tiempo de retención fue de 10 h y tuvo un caudal de 35 L/min, lo que redujo hasta en 98% el Ni (entre 64% y 99% en verano, y 35% y 71% en invierno), 99% el Zn, 98% el Cd, 98% el Cu y 96% el Al (18).

En Perú, según reportes el Ministerio de Energía y Minas (MINEM), se han detectado 730 pasivos ambientales, que son instalaciones olvidadas como tajos abiertos, depósitos de relaves y bocaminas, que deterioran el ecosistema a través de la generación de DAM (4). En la Región Ancash, se encuentran cinco pasivos ambientales importantes, además de influencias naturales de drenaje ácido natural de roca (DAR), que ocurren, por ejemplo, en las Quebradas Pachacoto (Cátac) y Río Negro (Olleros), ambas en Recuay. El DAR ocurre por la oxidación y lixiviación de rocas mineralizadas, que moviliza elevadas concentraciones de metales a los cuerpos de agua, desde la

cabecera río abajo, y que se han visto aceleradas por el deshielo de la Cordillera Blanca en los últimos 40 años (19).

En la Región Ancash se tiene dos estaciones marcadas, la húmeda y la seca. Las temperaturas alcanzan al mediodía 20 °C a 4000 msnm y, en la noche, caen a menos de 0 °C. Las precipitaciones se dan en época húmeda entre los meses de octubre a abril, siendo las lluvias más fuertes entre enero y marzo (20)(20). Se han implementado desde algunos años diferentes sistemas de remediación basados en el diseño de humedales. Un ejemplo de ello se da en Canrey Chico (Olleros), donde la “Comunidad Campesina Cordillera Blanca” implementó en 2015 un sistema de biorremediación debido a la mala calidad de agua del Río Negro por el DAR. Este humedal tiene como componente físico la construcción de celdas de sedimentación y canales de conducción, con una proyección de caudal a tratar de 80 L/s; y como componente biológico, las especies remediadoras *Juncus arcticus* y la comunidad bacteriana nativa. Otro caso es el del humedal administrado por el “Comité de Usuarios de Agua del Canal Shallap Huapish Toclla”, ubicado en la localidad de Campanayoc (Huaraz), donde se usaron *Calamagrostis ligulata*, *C. ovata*, *J. arcticus*, *J. bufonius* L, y *Distichia sp*, capas de sustratos de naturaleza diversa y bacterias, y un pretratamiento con piedra caliza para acelerar la precipitación de los metales. Se proyectó tratar un caudal de 50 L/s. (5)(20).

En el estudio “Sistemas de Humedales para la Biorremediación de Drenajes Ácidos de Mina o Roca en Ancash – Perú” en 2007 se investigaron cuatro humedales artificiales y naturales con DAM y DAR, con el objetivo de evaluar la capacidad de biorremediación de cada componente. Se encontró predominancia de bacterias sulfato

reductoras (BSR) de los géneros *Desulfovibrio* y *Desulfosarcina* y una importante capacidad de remediación de *C. ligulata*, *Juncus imbricatus*, *J. bufonius*, *J. articus* y *Scirpus olneyi*. En conjunto, el sistema remediador tuvo una eficiencia de remoción de metales hasta del 99% (4).

Algunas empresas en el Perú han implementado humedales artificiales para mejorar la calidad de sus aguas. Entre ellas, la Mina Buenaventura cuenta con tratamientos pasivos de los efluentes de la Unidad de Producción Orcopampa (Arequipa) y Unidad de Producción Uchucchacua (Lima), y la Compañía Minera Antamina, con un humedal artificial en la Quebrada Tucush (Huari, Áncash). Estos sistemas hacen referencia a la importancia de la velocidad del agua en el sistema, sobre todo en época de lluvias, que permite tratar un caudal máximo de 115 L/s teniendo como caudal ideal 70L/s. Este sistema de remediación redujo el nitrato entrante en 14.3 % y el amonio en 48.9 % (21).

7. Objetivo general:

Mejoramiento de la calidad de efluentes de relave mediante tratamientos de remediación combinada en la zona industrial de la “CORPORACIÓN MINERA TOMA LA MANO S.A”

7.1 Objetivos específicos

1. Caracterizar la calidad de los efluentes de relave a través de parámetros fisicoquímicos.
2. Diseñar un sistema de remediación combinado o mixto, basado en procesos físicos, químicos y biológicos para tratar las aguas ácidas de los efluentes de relave.
3. Evaluar la eficiencia del sistema de remediación para la mejora de la calidad de los efluentes de relave tomando en cuenta los límites máximos permisibles (LMP).

II. Materiales y métodos

Para diseñar nuestro sistema remediador se debe tener en cuenta las características del área donde se va a instalar, para lo cual es importante conocer la geología regional, clima anual, geomorfología, hidrografía y tipo de suelo. Este diseño se inicia con el componente físico-químico, que constituye la caracterización de las aguas, el cumplimiento de los límites máximos permisibles (LMP), la definición de sustratos y la utilización de un pretratamiento (piedra caliza). A partir de este análisis se definen los procesos del sistema. Debido a la presencia de un efluente sumamente ácido, el primer proceso consiste en un pretratamiento con piedra caliza para incrementar el pH y ayudar a precipitar iones metálicos. El segundo, es el sistema remediador que tendrá una fase aeróbica y anaeróbica. La primera está representada por un lecho de grava y estiércol de 10 cm. La relación entre el estiércol, sustrato oxigenado, las plantas remediadoras y el efluente pretratado, favorecerá la generación de una biopelícula que acelerará la reacción de oxidación de los contaminantes y la estabilización de las plantas. La fase anaeróbica estará formada por 10 cm de arena gruesa, 20 cm de abono, lo que propicia el desarrollo de bacterias sulfato reductoras, 10 cm de arena gruesa y 10 cm de piedra para evitar la compactación.

El componente biológico, son especies fitorremediadoras que serán colectadas del relave de Mesapata, ubicado en Catac, en la cercanía del área de estudio. Las especies elegidas son *Juncus imbricatus*, *J. arcticus* (*J. Presl.*) *Steud.*, *J. bufonius* *L.*, *Calamagrostis ligulata*, *Pennisetum clandestinum* *Hotchc Ex.Chiov.*, y *Scirpus* *sp.* Al ser especies nativas, se asegura la viabilidad del proyecto y sostenibilidad

económica. Estas especies tienen una gran capacidad para remediar DAM a través de la formación de complejos orgánicos, que optimizaran el encapsulamiento de metales.

Nuestro componente estructural tendrá dos tramos; el primero entre la poza N°1 y la poza N°2, en forma de zigzag, permitiendo aumentar el área de remediación. El segundo, en forma de acordeón, estructura muy parecida a la de las lagunas de maduración con mamparas, reducirá el flujo disperso y evitará las zonas muertas debido a la poca extensión del área entre la poza N° 2 y el límite de la propiedad.

Tabla 2. Variables dependientes e independientes, elaborada en función al Estudio y selección de especies vegetales con potencial biorremediador en drenajes ácidos de roca y relaves minerales de la cuenca del río Santa (Áncash, Perú) realizado por Diana Alejandra Ñáñez Alcántara

Variables			
Independientes		Dependientes	Referencia bibliográfica
Especial vegetal	Tipo de metal	Capacidad fitorremediación (Época húmeda)	
<i>Juncus imbricatus</i>	K, Na	Tolerante	Estudio y selección de especies vegetales con potencial biorremediador en drenajes ácidos de roca y relaves minerales de la cuenca del río Santa (Áncash, Perú)(5)
	B, Ca, Hg	Hiperacumuladora	
<i>J. arcticus (J. Presl.) Steud</i>	Ag, Al, As, B, Ca, Cd, Cu, Hg	Tolerante	
	B, Ca	Hiperacumuladora	
<i>J. bufonius L.</i>	Ag, B, Ca, Cr	Tolerante	
	Al, As, B, Ca, Cd, Cr, Hg, Pb	Hiperacumuladora	
<i>Calamagrostis ligulata</i>	Ag, Al, Ce, Cu, K	Tolerante	
	B, Ca, Cr, K, Mn, Na,	Hiperacumuladora	
<i>Pennisetum clandestinum Hotchc Ex.Chiov</i>	B, Cr Cd, Cu	Tolerantes	
	Ag, As, B, Cu, Pb	Hiperacumuladora	
<i>Scirpus sp</i>	B, K, Na	Tolerante	
	Hg	Hiperacumuladora	

III. Resultados

1. Ubicación del proyecto

El proyecto se localiza en la planta concentradora de la “CORPORACIÓN MINERA TOMA LA MANO S.A” ubicada en el caserío de Buenos Aires, distrito de Ticapampa, provincia de Recuay, en el departamento de Ancash (8920000 a 8920300 N y 235400 a 235600 E) a una altitud 3675 msnm. Presenta una geomorfología relativamente accidentada, existiendo pendientes de relieve escarpado y un poco abrupto, con zonas de páramo que presentan gradientes moderadas por el efecto de la acción glacial pasada.

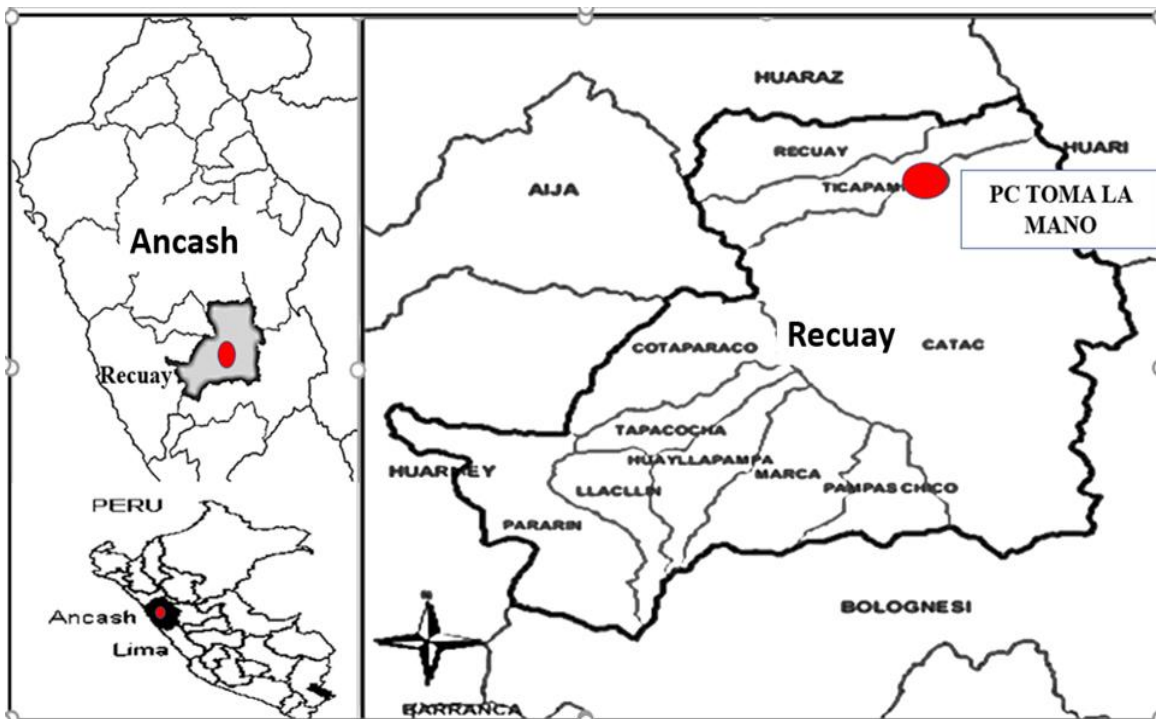


Figura 1. Ubicación de la planta de concentradora Toma la Mano

2. Suelo

En el área del proyecto predomina el suelo de clase VIII, con presencia de pastos naturales temporales, debido al clima (presencia de heladas), escasez de recursos hídricos y una topografía accidentada, por ello es un suelo con limitado potencial para propósitos agrícolas,

3. Geología regional

Depósitos morrénicos (Qh-Mo1):” antiguos y recientes: los primeros se encuentran distribuidos, mayormente, entre el río Santa y flanco occidental de la Cordillera Blanca. Muestran una morfología de lomadas y colinas de cumbres redondeadas con cierta resistencia”(22).

Depósitos aluviales (Qh-L): “constituidos, mayormente, por clastos redondeados; los depósitos coluviales corresponden a agregados de fragmentos angulosos, que se acumulan regularmente en los taludes adyacentes a los macizos rocosos, con tamaño y formas variables dependientes de la roca madre. También se incluyen los depósitos acumulados por los cursos de agua a lo largo de los lechos por donde discurren”(22).

4. Clima y Temperatura

El clima en Recuay tiene dos estaciones bien definidas, templada y seca. La temporada seca, entre mayo y septiembre, se denomina “verano andino” por mostrar con días de sol brillante y frío durante la noche. El distrito de Ticapampa cuenta con un clima de tundra, con temperaturas muy bajas, incluso en los meses más cálidos, con una media

anual máxima de 13.1°C y mínima de 7.3°C (heladas). Por ello, se tienen pastos naturales temporales (22).

5. Dirección y Velocidad del Viento

En los reportes efectuados por la Consultora Ambiental JESA E.I.R.L, se observa desde las 7 am hasta 7 pm una tendencia a la calma meteorológica. A partir de las 13 h existe una significativa predominancia del viento procedente del norte con velocidad promedio de 2 m/s (22).

6. Hidrografía y precipitaciones

En la zona del proyecto la fuente principal de agua proviene de las lagunas Querococha y Patacocha, las que discurren por las quebradas de Pachamaca y Chaupis y por el canal de Yacucancho, desembocando posteriormente en el Río Santa. El promedio máximo de precipitaciones por año es 1119 mm y el promedio mínimo es 410 mm. Las mayores precipitaciones del año corresponden a marzo, y las menores a julio, hecho que guarda relación con el comportamiento térmico (22).

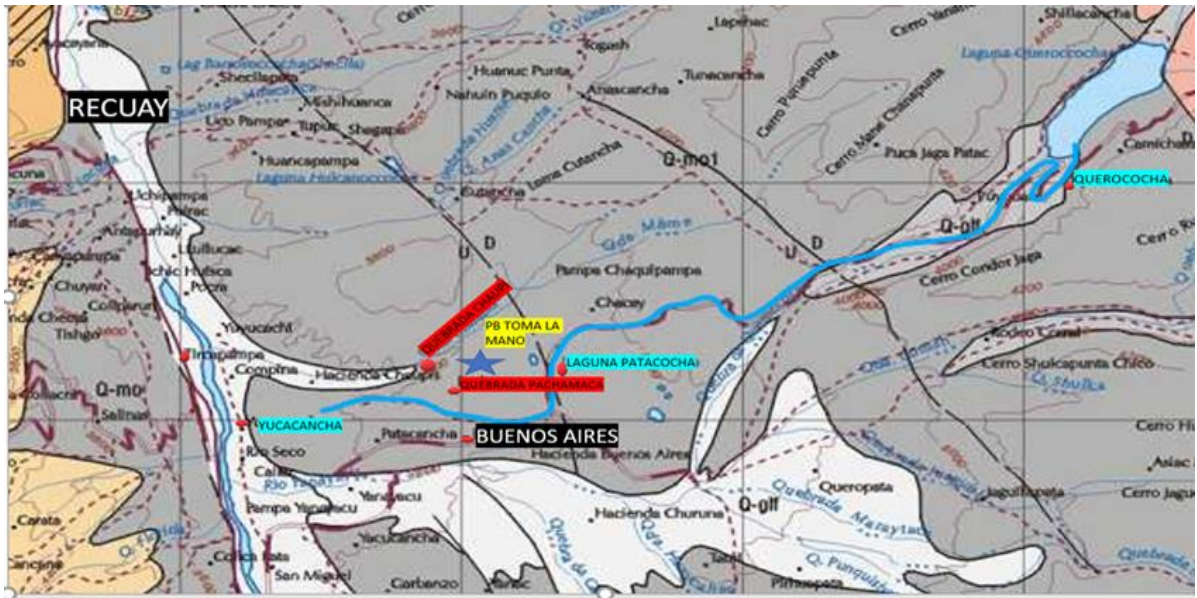


Figura 2. Ubicación de la planta concentradora en la Quebrada Pachamaca y tipo de geología de la zona morrénica y aluvial

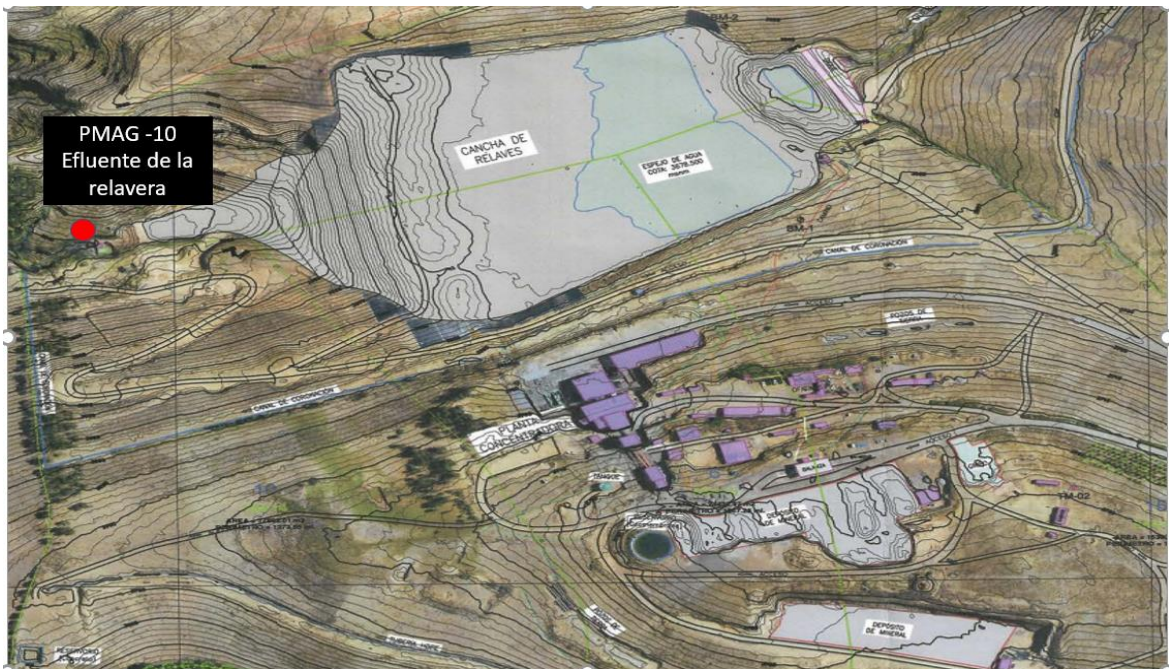


Figura 3. Ubicación de la planta concentradora y filtración de relave (PMAG-10)

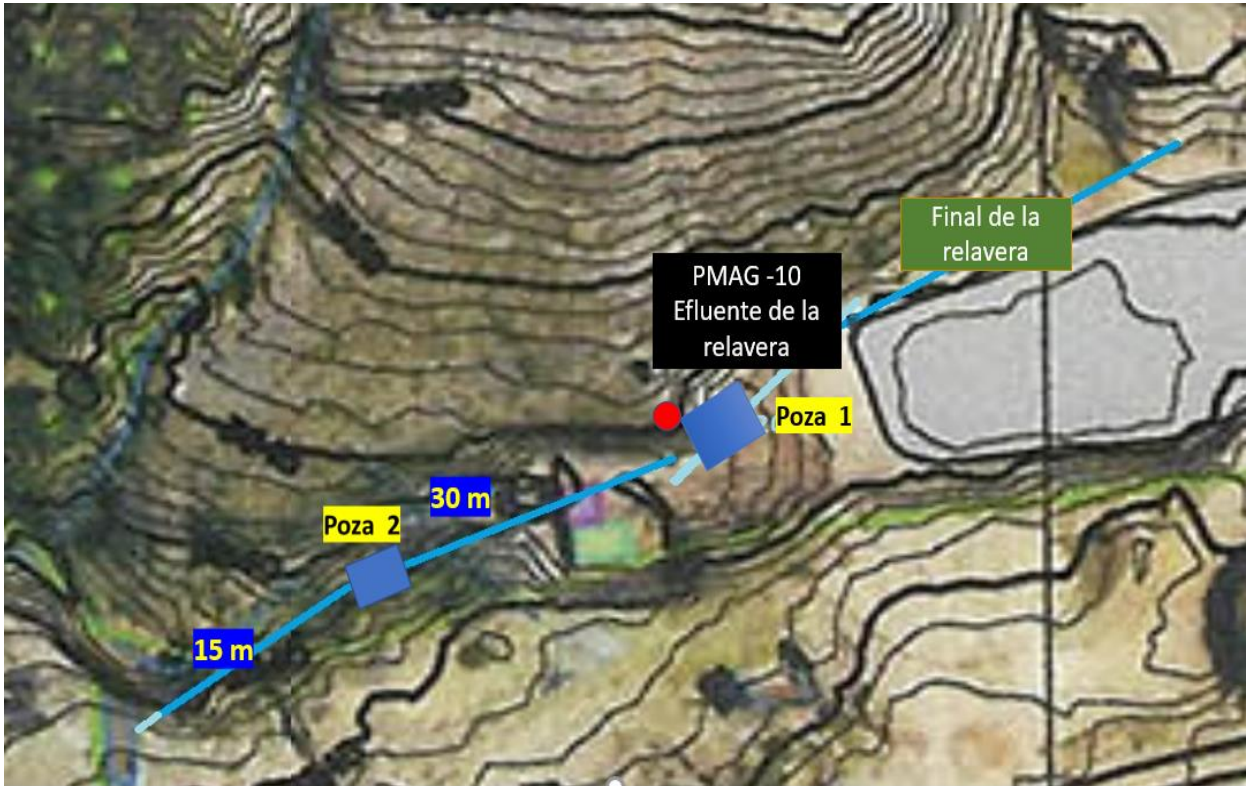


Figura 4. Ubicación del circuito de agua a partir de la filtración de la relavera. La canaleta de remediación se encuentra entre la poza N° 1 y N° 2 (30 m) y entre la poza N° 2 y la salida de la propiedad (15 m).

7. Diseño estructural:

El diseño está compuesto por 4 estructuras y constará de un sistema combinado, con una extensión de 55 m, que inicia en la filtración de relave y abarca hasta el final de la propiedad. Cuenta con dos procesos: el primero en la poza N°1 y el segundo en las estructuras denominadas canaleta en zig-zag, poza N°2 y canaleta en acordeón. El sistema remediador tendrá un caudal de $34.257 \text{ m}^3/\text{d}$, con un tiempo de retención para la canaleta en zigzag de 7 h y para la canaleta en acordeón de 30 h (Anexo 5).

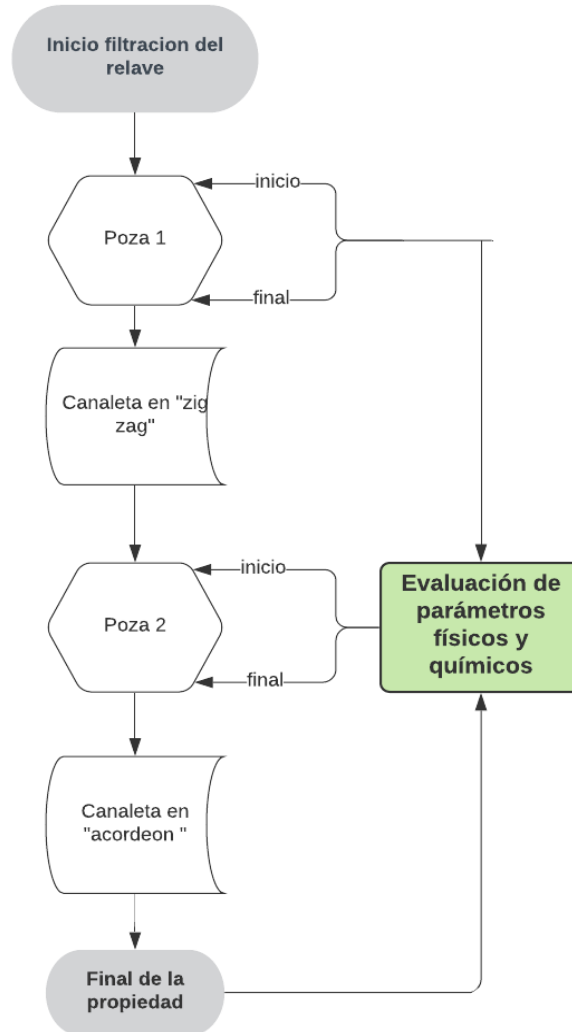


Figura 5. Diagrama de Flujo

7.1. Pozas y filtración de la relavera

La filtración está ubicada al final de la relavera, al lado de la poza N°1 (3 m ancho x 7 m longitud x 3 m profundidad), donde se iniciará el primer proceso del tratamiento con piedra caliza, un método de alcalinización muy usado para mejorar el pH del drenaje ácido de mina. Sin embargo, su eficacia es limitada

debido a que el oxígeno genera hidrólisis, oxidación del hierro y precipitación de los elementos disueltos como oxihidróxidos (23)(24). La segunda poza será utilizada para precipitar, está ubicada a 30 m (en construcción; 3.5 m de ancho x 4 m longitud x 2 m profundidad).



Figura 6. Filtración de relave (PMAG-10) y poza N° 1 con sistema de bombeo para recirculación.

7.2. Diseño de canaleta para sistema de remediación

El segundo proceso será el sistema remediador, que tiene una función de purificación del agua. El primer componente es una canaleta de concreto (1 m de ancho x 1.20 profundidad), con dos tramos, de 30 m y 15 m.

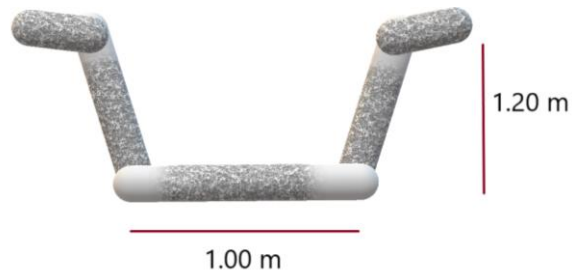


Figura 7. Corte transversal de la canaleta

Debido a que la distancia entre la filtración de relave y la poza N° 2 no es muy extensa, la canaleta tendrá un diseño en zig-zag, que permitirá aumentar el área de remediación.

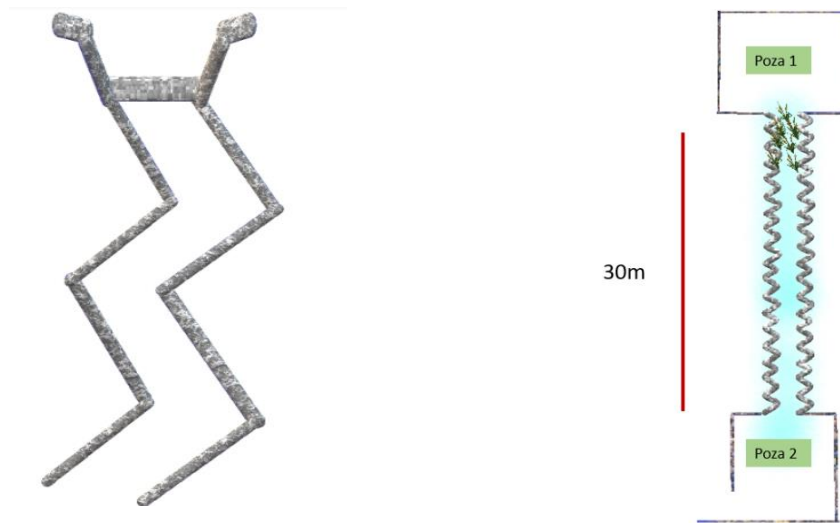


Figura 8. Diseño en zig-zag de la canaleta entre la poza N° 1 y la poza N° 2

7.3. Canaletas en acordeón

Debido a la poca extensión del área entre la poza N° 2 y el límite de la propiedad se diseñará un segundo tramo de la canaleta en forma de ‘acordeón’.

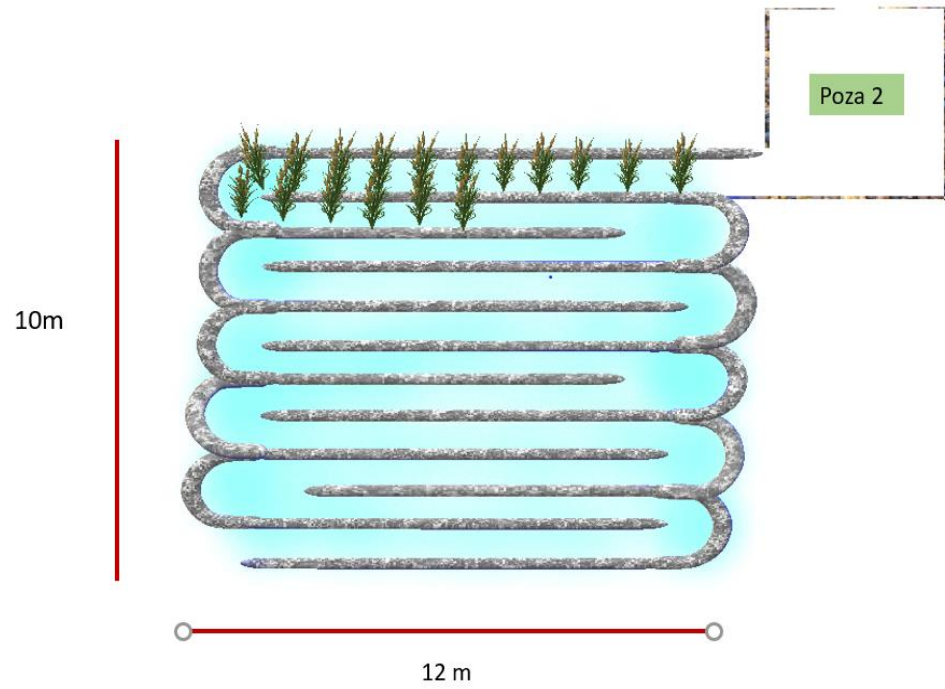


Figura 9. Sistema remediador de canaletas en forma de acordeón, desde la poza N°2 hasta el final de la concesión

8. Acondicionamiento del sistema remediador

8.1 Sustrato

El sustrato estará formado por diferentes texturas y capas para generar una adecuada circulación del efluente. Estos sustratos ayudan a la generación de complejos con Al, Fe y Ca que se encuentran en los sedimentos, además de la precipitación (13). Iniciaré con un lecho de 10 cm de grava y estiércol, que permita la estabilización de las plantas, seguido de 10 cm de arena gruesa para la protección del área anaeróbica, 20 cm de abono para el desarrollo de bacterias, 10 cm de arena gruesa, y 10 cm de piedra para evitar la compactación.

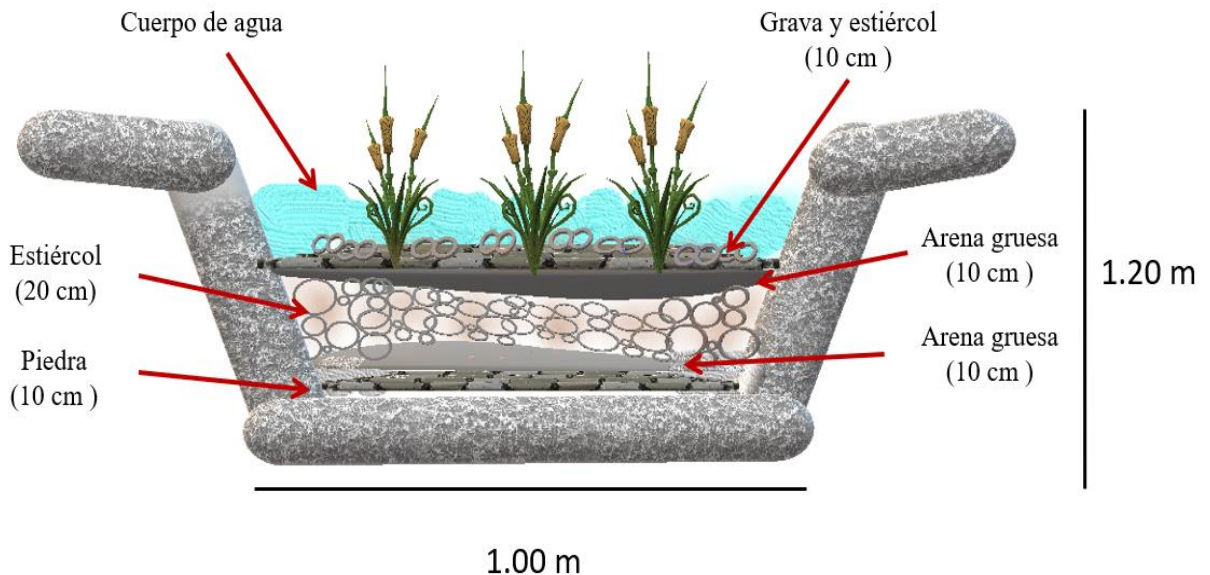


Figura 10. Estratificación de los componentes del sustrato

8.2 Plantas remediadoras

Las plantas que se usarán en el sistema remediador son *Juncus imbricatus*, *Calamagrostis ligulata* Pennisetum clandestinum Hotchc Ex.Chiov, *Scirpus sp*, *Juncus arcticus* (*J. Presl.*) Steud, y *J. bufonius* L(4) (5)(25). Estas especies son nativas de la zona, con comportamiento hiperacumulador y tolerancia a metales, y serán trasplantadas del relave cercano de Mesapata, en Catac (25)(5). Para la recolección de las plantas, se realizará la identificación taxonómica *in situ* mediante guías de flora de la región como “Las plantas comunes del Callejón de Conchucos (Ancash)”(26). Las plantas serán colectadas con su propio sustrato, evitando maltratarlas, utilizando palas de jardinería. Una vez extraídas, se colocarán en bolsas de almácigo para su traslado a la planta de concentración, y serán acondicionadas para colocarlas en el sustrato. Luego, serán trasplantadas en las canaletas a una distancia de 30 cm entre ellas, y se dará un periodo de tres meses para la adaptación al sustrato. De acuerdo con el área que se pretende abarcar, se necesitará un aproximado de 450 plantas.



Juncus arcticus



Calamagrostis ligulata



Juncus imbricatus



Juncus bufonius



Pennisetum clandestinum



Scirpus olneyi

Figura 11. Especies nativas del relave cercano Mesapata, en Catac

9. Evaluación de parámetros físicos y químicos

Serán evaluadas las entradas y salidas de cada uno de los componentes del sistema remediador: 1) efluente de la relavera, 2) entrada y salida de la poza N° 1 y poza N° 2, 3) salida del límite de la concesión. En la caracterización se medirán la conductividad (uS/cm), pH, oxígeno disuelto, sólidos totales en suspensión, flujo de agua, sulfatos y metales totales

Tabla 3. Variables físicas y químicas por evaluar en las entradas y salidas del sistema remediador

VARIABLES FISICOQUÍMICAS					
Parámetros	Equipo	Unidad	Modelo	Límite de detección del método	Referencia Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM:
Conductividad	Medidor Multiparámetro	µS/cm	HACH HQ40D	r	presencia
pH	Medidor Multiparámetro	Unidades de pH	HACH HQ40D	---	6-Set
Sólidos totales en suspensión	Medidor Multiparámetro	Mg/L	HACH HQ40D	2	50
Flujo de agua	Correntómetro	m/s	Global Water FP-111	-----	-----
Oxígeno disuelto		mg/L		0.01	
VARIABLES QUÍMICAS					
	Método	Unidad	Límite de detección del método	Referencia Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM:	
Sulfatos		mg/L SO4	1		
Cianuro total	Espectrofotometría de Masas con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP- MS)	mg/L	0.001	1	
Arsénico total		mg/L	0.00021	0,1	
Cadmio total		mg/L	0.00024	0.05	
Cromo hexavalente		mg/L	0.004	0.1	
Cobre total		mg/L	0.00037	0,5	
Hierro disuelto		mg/L	0.0096	2	
Plomo total		mg/L	0.00026	0.2	
Mercurio total		mg/L	0.00008	0.002	
Zinc total		mg/L	0.0009	1.5	

10. Evaluación de la eficiencia del sistema de remediador

Para evaluar la eficiencia en el mejoramiento en la calidad del agua, a través del porcentaje de reducción de los contaminantes, se compararán los valores de los parámetros físicos y químicos al inicio y al final del sistema remediador. Asimismo, se evaluará el contenido de metales en tejidos vegetales y sedimento al inicio y al final del proceso para saber el porcentaje de acumulación de estos metales en el sistema.

IV. Discusión

1. Diseño del sistema remediador

Nuestro diseño será un sistema combinado compuesto por dos procesos. El primero es un pretratamiento con piedra caliza para incrementar el pH, ayudara a precipitar iones metálicos y evitara la movilización de hidróxidos. El segundo es el sistema remediador, que tendrá dos fases: una aeróbica, que beneficiara la relación entre el estiércol, sustrato oxigenado, las plantas remediadoras y el efluente pretratado, y favorecerá la generación de la biopelícula que acelerará la reacción de oxidación de los contaminantes (20). La fase anaeróbica estará compuesta por las capas inferiores de sustrato, especialmente de estiércol, que añade los nutrientes necesarios para la generación de bacteria sulfato reductoras (BSR) estas son importantes para diversos procesos, debido a su adaptabilidad y a que utilizan diferentes sustratos para disolver sulfatos, metales y materia orgánica de efluentes industriales (4)(27). Por otro lado son encontrados en gran variedad de ambientes extremos como lodo volcánico, respiraderos hidrotermales, grietas oceánicas, campos petroleros, sedimentos marino y drenaje acido de mina(27). Estos componentes, sobre todo las plantas y bacterias del estiércol, están adaptados a las condiciones climáticas y de altitud de la zona, lo que garantiza el éxito de su acondicionamiento en el sistema remediador.

En el sistema remediador, se tendrá dos tipos de estructuras adaptadas al área disponible. El primer tramo tiene un diseño en zigzag para ampliar el área, ya que solo se tiene 3 m de ancho x 30 de largo, y a su vez generara rompientes que ayuden a la

oxigenación. En el segundo tramo, con un área de 14 m de ancho x 15 m de largo, se decidió que se utilizara una estructura muy parecida a las lagunas de maduración con mamparas, que reduce el flujo disperso y evita las zonas muertas (28). Luego de una búsqueda bibliográfica se han identificado cinco diseños, que se describen a continuación:

El primero es una propuesta de humedal para ser aplicado en zonas altoandinas del Perú (2007), tanto para DAM o DAR. Este tiene un pretratamiento con un desarenador, pozas de sedimentación y barreras reactivas, seguido por un humedal que incluye la biomasa (turba, compost, humus, estiércol), las especies fitorremediadoras (nativas de la zona) y BSR (4).

El segundo, en la región de Ancash, presenta dos modelos de remediación con celdas de sedimentación y canales de conducción. Como componentes incluye las plantas fitorremediadoras (nativas de la zona y hiperacumuladoras de metales), biomasa (mezcla de turba y estiércol, arena gruesa, grava) y BSR. Solo en uno de ellos se realizó un pretratamiento con piedra caliza (20).

El tercer estudio, realizado en Noruega (1998), inicia el sistema con tres celdas de tratamiento anaeróbico de flujo subterráneo, seguidas de una celda de tratamiento aeróbico de flujo superficial, y finalmente, una cascada de aireación y una celda de filtración de rocas. La biomasa estuvo compuesta de grava, astillas de madera, heno de pasto podrido y turba, y para la generación de BSR se utilizó estiércol de vaca y oveja (18).

El cuarto diseño es un estudio en la Quebrada Tucush (Áncash), con un pretratamiento de dos fases para la retención y sedimentación. La primera, para partículas grandes, seguido de un serpentín de dos filas de 8 pozas para partículas más pequeñas. El humedal estuvo compuesto de tres etapas, la primera llamada Sacrificio (S) donde llega el agua sin tratamiento, la siguiente serán las Celdas Paralelas (P) para generar fases aeróbica y anaeróbica, y por ultimo Profundas (D) creada para acrecentar la fase anaeróbica (21).

El quinto diseño es para evaluar la retención de arsénico en el mesocosmos de humedales construidos con flujo subsuperficial. Es un sistema con tres prototipos cada uno con 300 kg de arena ($\rho=1.4\text{g/cm}^3$, porosidad: 38%, conductividad hidráulica: 18.53cm/h), estuvieron sumergidos 5cm inferior de la superficie; uno de ellos el humedal control, los otros dos tuvieron los humedales A y B tuvieron plantaciones con *E. macrostachya* y *S. americanous*, respectivamente, y de biomasa se utilizó arena limosa (29).

Nuestro diseño de sistema remediador recoge algunas características de estos modelos, lo contrastamos de acuerdo con la accesibilidad con la que contábamos dentro del área industrial e influencia (anexo 1).

2. Especies vegetales para la biorremediación

De acuerdo con Palomino (2007), se tiene tres familias recomendadas para humedales artificiales para tratar DAM, las cuales son Cyperaceae (*Carex*, *Cyperus* y *Scirpus*), Juncaceas (*Distichia*, *Juncus* y *Luzula*) y Poaceas (*Agrostis*, *Alopecurus*,

Anthoxanthum, Calamagrostis, Dissanthelium, Festuca, Hierochloa, Muhlenbergia, Poa y Vulpia). Estas especies crecen en ambientes de baja tensión de oxígeno, ya que tienen hojas fasciculadas y huecas con las que consiguen aireación, y tienen un sistema radicular conspicuo. Estas características son ideales para el crecimiento de BSR, que transforman sulfatos a sulfuros metálicos, y la retención de sólidos (4). Otros géneros adaptados a los ambientes altoandinos con climas extremos, y que podrían ser utilizados en sistemas artificiales de remediación para recuperar suelos afectados por contaminantes son, *Cortaderia, Schinus, Medicago, Pennisetum* y *Scirpus* (5).

Las especies fitorremediadoras escogidas para nuestro sistema, *Juncus imbricatus, J. arcticus (J. Presl.) Steud, J. bufonius L., Calamogrostis ligulata, Pennisetum clandestinum Hotchc Ex.Chiov,* y *Scirpus* sp, serán colectadas del relave de Mesapata, en Catac, que se encuentra en la cercanía del área de estudio. Al ser especies nativas, esto asegurara que el proyecto sea viable y sustentable económicamente. Estas especies tienen una gran capacidad para remediar DAM a través de la formación de complejos orgánicos, que optimizan el encapsulamiento de metales en el humedal (4). Las altas concentraciones de metales en ciertas especies no siempre son negativas, dependiendo de los procesos de fijación, absorción y acumulación de metaloides y metales no esenciales, que se representan mediante el factor de bioacumulación y de transferencia del suelo a la planta (5).

Entre las especies escogidas, *C. ligulata* se encuentra también en el humedal de Huancapetí en la Cordillera Negra (Aija, Áncash) a 4500 msnm, con una cobertura del 95% (4), A su vez, *C. ligulata* y *J. imbricatus* han sido colectados en la Quebrada

Honda (Carhuaz, Áncash) a 4145 msnm, donde se encuentra un DAM y DAR. En época de lluvia se observó una significativa reducción de Pb (53 veces), As (47), Zn (42), Cd (24), Al (9) y Fe (5), y en el periodo de estiaje una reducción de Cd (4 veces), Zn (4), Pb (4), Ni (3) y Al (3) (25). La elevada capacidad de bioacumulación de estas especies, entre 50 a 860 veces, se puede interpretar como un potencial económico debido a la potencial recuperación de metales de importancia comercial, como el Al, Pb, Ag, Zn y Cu, de su biomasa (25).

Las especies *Scirpus olneyi*, *J. arcticus* (*J. Presl.*) *Steud.*, *J. L* y *J. imbricatus* han sido extraídas del DAM de la Cancha de Relave de la Planta Concentradora de Mesapata (Recuay, Áncash) donde tienen el 90% de la cobertura, el presente humedal obtuvo un FBC en época de lluvia para el Cd (55%), seguido del hierro (46%) y el zinc (20%). Además, tuvieron promedios anuales disminución de 28%, 23% y 10%, respectivamente (4). En un estudio en el pasivo ambiental minero del depósito de relaves de Ticapampa (Recuay, Áncash), se observó que *J. arcticus*, acumuló en sus raíces Fe (>8000 mg/kg), As (>6000 mg/kg), Zn (>5000 mg/kg), Al (2400 mg/kg), Pb (987 mg/kg) y Cu (784 mg/kg) (30). En un estudio realizado en Huancapetí, Ticapampa, Santa Rosa, Mesapata y Pastoruri (Áncash) en época de lluvias y estiaje, se encontraron especies tolerantes y/o hiperacumuladoras para Ag, Al, As, B, Fe, Cd, Cr, Cu y Pb, como *Distichia muscoides*, *J. arcticus*, *J. bufonius*, *Penicetum clandestinum*, *C. ligulata*, *C. glacialis* y *Huperzia crassa* (5).

3. Características del sustrato

Cada sustrato escogido en el presente trabajo cumple una función. Una de ellas es la retención de los metales y su precipitación. Esto se ha conseguido, por ejemplo, utilizando arena granular como sustrato, por lo que su uso en el diseño propuesto tendría una función importante en la captura de metales del DAM (29). Otro sustrato utilizado es la piedra para evitar la compactación.

Para la generación de BSR se colocará una capa superior de 20 cm de estiércol, que contiene nutrientes tanto para su crecimiento como para las plantas remediadoras, y genera coloides para inmovilizar a los metales del DAM. También se recomienda otros medios como turba, compost y humus pero, se ha escogido por su accesibilidad y menor costo (4). En el caso de diferentes humedales artificiales y/o naturales, como el Drenaje de la Cancha de Relave de la Planta Concentradora de Mesapata, el Pasivo Minero de Huancapetí, las Quebradas de Quilcayhuanca y Rúrec, que reciben DAM o DAR, se encontraron las BSF del género *Desulfovibrio* y *Desulfosarcina* (4). La función de estas bacterias en el sistema remediador propuesto es fundamental para inmovilizar metales, y es muy probable que las obtengamos en la fase anaeróbica, como se ha observado en humedales como los arriba mencionados.

Cada uno de los componentes citados líneas arriba son importantes para el funcionamiento eficiente del sistema combinado debido por su interrelación y comportamiento sinérgico. Las plantas y BSR se benefician de los nutrientes que aporta el estiércol; a su vez, las BSR favorecen la actividad de la estructura folicular de las

plantas, la retención de sólidos y la transformación de sulfatos en sulfuros de hidrógeno. Esto genera precipitación de sulfuros metálicos, que serán depurados mediante el drenaje ácido.

V. Conclusión

1. De acuerdo con las características fisicoquímicas del DAM de la relavera, la mejor opción de tratamiento es un sistema combinado, donde se apliquen métodos químicos (cal) y biológicos (plantas y bacterias).
2. El sistema de biorremediación propuesto representa un modelo anaeróbico, donde interactuarán las bacterias sulfato reductoras y especies de plantas nativas como *Juncus imbricatus*, *J. arcticus* (*J. Presl.*) *Steud*, *J. bufonius* *L*, *Calamagrostis ligulata*, *Pennisetum clandestinum* *Hotchc Ex.Chiov*, *Scirpus sp*, adaptadas a las condiciones de la zona de trabajo.
3. Sea propuesto un diseño único de sistema de biorremediación, donde sea combinado dos tipos de estructura: una en forma de zig zag y la otra en forma de acordeón con mamparas adecuadas para el área.
4. El diseño de biorremediación propuesto podrá ser replicado en otras áreas donde ocurran DAM o DAR para reducir la acidez y la concentración de metales nocivos para el ecosistema y la salud humana.
5. Luego del tratamiento de biorremediación se obtienen condiciones físicas y químicas del drenaje de la relavera, que son aceptables de acuerdo con los límites máximos permisibles.

VI. Recomendaciones

Considerando las capacidades que se han desarrollado para llevar satisfactoriamente el Trabajo de Suficiencia Profesional se considera que:

- Teniendo en cuenta que nuestro país tiene en la minería una fuente de grandes recursos, se debe implementar en nuestra universidad, cursos que a través de la biología capaciten en la mitigación y remediación de impactos generados por estos.
- La inclusión de cursos que nos enseñen sobre la normativa peruana y su debida interpretación.
- Promover la investigación incentivando a la creación de nuevas tecnologías, que incentiven la remediación de contaminaciones industriales y naturales.
- Poner énfasis en la adecuada enseñanza y búsqueda de información científica promoviendo cursos y charlas

VII. Bibliografía

1. Armando Audie Ataman Aguirre. Metodología para la evaluación de planta concentradora de minerales Mesapata (UNASAM) Corporación Minera Toma La Mano S.A. [Internet]. • Universidad Nacional Mayor De San Marcos; 2010 [cited 2020 Nov 12]. Available from: <http://ateneo.unmsm.edu.pe//handle/123456789/3639>
2. SVS Ingenieros SA. Ingeniería básica y de detalle del reforzamiento del dique principal y modificación del vaso de la relavera de la Planta Concentradora Toma La Mano. 2010.
3. Ministerio de Energía y Minas. Decreto Supremo N° 010-2010-Minam. El Peru [Internet]. 2010; Available from: http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/09/ds_010-2010-minam.pdf
4. Edwin Julio Palomino Cadenas. Sistemas de Humedales para la Biorremediación de Drenajes Ácidos de Mina o Roca en Ancash – Perú. Universidad Nacional De Trujillo; 2007.
5. Diana Alejandra Ñáñez Alcántara. Estudio y selección de especies vegetales con potencial biorremediador en drenajes ácidos de roca y relaves minerales de la cuenca del río Santa (Áncash, Perú). Universidad Peruana Cayetano Heredia; 2016.
6. Pozo-Antonio JS, Puente I, Lagüela S, Veiga M. Tratamiento microbiano de aguas ácidas resultantes de la actividad minera: una revisión. Tecnol y ciencias

- del agua. 2017;08(3):75–91.
7. Klein R, Tischler JS, Mühlhling M, Schlömann M. Bioremediation of Mine Water [Internet]. Vol. 141, Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH; 2014 [cited 2020 Nov 25]. p. 109–72. Available from: https://link.springer.com/chapter/10.1007/10_2013_265
 8. Aguinaga OE, Wakelin JFT, White KN, Dean AP, Pittman JK. The association of microbial activity with Fe, S and trace element distribution in sediment cores within a natural wetland polluted by acid mine drainage. Chemosphere [Internet]. 2019 Sep 1 [cited 2020 Nov 13];231:432–41. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045653519310690>
 9. Skousen J, Zipper CE, Rose A, Ziemkiewicz PF, Nairn R, McDonald LM, et al. Review of Passive Systems for Acid Mine Drainage Treatment. Mine Water Environ [Internet]. 2017 Mar 1 [cited 2020 Nov 26];36(1):133–53. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10230-016-0417-1>
 10. Serrano JG, Corzo Hernández A. Depuración con Humedales Construidos [Internet]. 2008 [cited 2020 Nov 23]. 108 p. Available from: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/2474>
 11. Iannacone J, Denegri-Muñoz JE. Tratamiento De Drenaje Ácido De Minas Mediante Humedales Artificiales. Biotempo [Internet]. 2020 [cited 2020 Nov 27];17(2):345–69. Available from: <http://revistas.urp.edu.pe/index.php/Biotempo/article/view/3349/4105>
 12. Dra. Heike Hoffmann, Dr.-Ing. Christoph Platzer, Dra.-Ing. Martina Winker DE

- von M. Technology Review of Constructed Wetlands Subsurface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment. Eschborn; 2011.
13. EAA Eco Agua América S . A . C. Tratamiento de aguas residuales a través de Humedales Artificiales. 2014.
 14. Medina Marcos KD, Montano Chávez YN. Determinación del factor de bioconcentración y traslocación de metales pesados en el juncus arcticus contaminadas con el pasivo ambiental. 2013;
 15. United State Environmental Protection Agency (USEPA). Constructed wetlands treatment. Engineering Bulletin. 1996;EPA/540/S-(Vifian).
 16. Noller, B.; Woods, P. & Ross B. Case studies of wetland filtration of mine waste water in constructed and naturally occurring systems in northern Australia. Sci Technol. 1994;29(December):257–65.
 17. Younger PL. Design, construction and initial operation of full-scale compost-based passive systems for treatment of coal mine drainage and spoil leachate in the UK. IMWA Proc. 1998;(R-116):413–24.
 18. Ettner DC. Pilot scale constructed wetland for the removal of nickel from tailings drainage, Southern Norway. IMWA Congr Mine, Water Environ. 1999;1:207–11.
 19. Loayza Muro, Raúl A. Duivenvoorden, Joost Kraak MH, Admiraal W. La lixiviación de metales, la acidez y la altitud limitan la composición de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos en los arroyos andinos [Internet]. Environmental Toxicology and Chemistry. 2014 [cited 2020 Nov 27]. Available

from: <https://sci-hub.ren/10.1002/etc.2436>

20. Zimmer A, K. Brito Rodríguez M, J. Alegre Oropeza C, W. Sánchez León J, Recharte Bullard J. Implementación de Dos Sistemas de Biorremediación como Estrategia para la Prevención y Mitigación de los Efectos del Drenaje Ácido de Roca en la Cordillera Blanca, Perú. *Rev Glaciares y Ecosistemas Montaña*. 2018;4(4):57–76.
21. Sociedad nacional de minería petróleo y energía (SNMPE). Programa Humedal Artificial (wetlands) de Tucush Cía. Minera Antamina S.A [Internet]. Repositorio Premio Desarrollo sostenible. 2007 [cited 2020 Dec 1]. Available from: <https://www.snmpe.org.pe/repositorio-premio-al-desarrollo-sostenible/80-2007/4291-programa-humedal-artificial-wetlands-de-tucush.html>
22. Consultora Ambiental JESA EIRL. “Plan de Cierre a la Planta de Beneficio Toma La Mano para Obtener Minerales de Plomo, Cobre y Zinc – 350 TMD.” Ticapampa – Recuay – Ancash; 2018.
23. Shirley Yessenia Torres Cabello. Determinación de la eficiencia de la remoción del plomo y cobre a través del sistema de tratamiento de los humedales en Mesapata- Catac 2014. Santiago Antúñez de Mayolo; 2014.
24. Jiménez Bermejo PJ, Llanos Rimarachín JF. Evaluación del drenaje anóxico calizo, como técnica complementaria al cierre de la bocamina BQH5 de Colquirrumi en Cajamarca, Perú [Internet]. Ucv. Universidad Privada del Norte; 2019. Available from: <http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/32303>
<http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/32303>

25. Aliaga Zegarra ED, Palomino Cadenas EJ, Yupanqui Torres E, Salvador Poma ML, Bobadilla Alvarez MC, Hilden Acuña F, et al. Capacidad de las plantas nativas en ambientes con drenaje ácido para la bioacumulación de metales pesados. *Aporte Santiaguino*. 2009;2(1):9.
26. Cano A, Torre M la, Castillo S, Aponte H, Morales M. Las plantas comunes del Callejón de Conchucos (Ancash) [Internet]. Ancash; 2006 [cited 2020 Nov 19]. Available from: <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=inperupe.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=006474>
27. De Paiva Barbosa L. Cultivo de Bacterias Reductoras de Sulfato (BRS) y su aplicación en la biorremediación de efluentes ácidos que contienen metales. [Ouro Preto, Minas Gerais]: Universidad Federal de Ouro Preto Instituto de Ciencias Exactas y Biológicas Programa de Posgrado en Ingeniería Ambiental; 2009.
28. Icela.D.Barceló-Quintal^{1*}, Magdalena García-Martínez¹ UL-C, Luis J. Osornio-Berthet¹, Adolfo Hernández-Moreno¹, Julisa García-Albortante¹ HES-C, 1. Diseño de canales en una laguna de maduración en la UAM-Azcapotzalco para evitar zonas muertas. In: 2º Congreso Nacional AMICA 2015 [Internet]. Coyoacán, México D.F; 2015 [cited 2020 Nov 23]. p. 6. Available from: <http://www.amica.com.mx/issn/archivos/137.pdf>
29. Rivas A, Coordinadores DP. Sistemas de humedales para el manejo, tratamiento y mejoramiento de la calidad del agua [Internet]. Morelia, Michoacán,; 2014. Available from: www.imta.gob.mx

30. Damacia, Medina Marcos Katy MCYN. Determinación del factor de bioconcentración y traslocación de metales pesados en el *Juncus arcticus* Willd y *Cortaderia rudiusscula* Stapf, de áreas contaminadas con el pasivo ambiental minero alianza - Ancash 2013 [Internet]. Repositorio Institucional Digital - UNASAM. Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo; 2014 [cited 2020 Nov 13]. Available from: <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/1775>

VIII. Anexos

Anexos 1. Tabla comparativa de los diferentes diseños

Autor	Título	Componentes del diseño	Pre tratamiento	Diseño	Sustrato	Monitoreo	Componentes
Edwin Julio Palomino Cadenas	Sistemas de Humedales para la Biorremediación de Drenajes Ácidos de Mina o Roca en Ancashi - Perú	<ul style="list-style-type: none"> - Caracterización del DAM (identificación del problema) - Elección del tratamiento: Se determinará el tipo de humedad. - Selección de especies fitorremediadoras. - Determinación de proporciones de biomasa remediadora - Cálculo de área superficial y tiempo de retención hidráulica. - Manejo de pendientes y taludes. 	Desarenador y pozas de sedimentación, barreras reactivas		Entre turba, compost, humus, estiércol. Estos aportan nutrientes tanto a las BSR como a las especies fitorremediadoras para que desempeñen sus roles fisiológicos en el humedal. Además son coloides importantes que también inmovilizan los metales propios de los drenajes ácidos	<ul style="list-style-type: none"> - Limpieza y disposición de sedimentos del pre tratamiento. - Signos de bioacumulación y biotoxicidad de las especies fitorremediadoras. - Eficiencia de bacterias sulfatoredutoras (caída de sulfatos). - Manejo de la densidad vegetativa. - Calidad del agua tratada (parámetros físicoquímicos y químicos y bioensayos) 	Especies Fitorremediadoras: Tenemos identificadas más de 50 especies vegetales con gran potencial para biorremediar drenajes ácidos. Estas son capaces de incorporar metales hasta 700 veces lo que se encuentra en el drenaje, inmovilizando con complejos orgánicos, potenciando la capacidad de bioencapsulamiento de metales en los humedales. Bacterias sulfatoredutoras: Transforman los sulfatos (soluble como ácido sulfúrico) en sulfuros (insolubles) metálicos que precipitan y con los otros componentes del sistema lo bioencapsulan haciendo más difícil su liberación al ambiente bajo al forma soluble.
Zimmer, Anaís K. Brito Rodríguez, Mariza J. Alegre Oropeza, Cristian W. Sánchez León, Jhon Recharte Bullard, Jorge	Implementación de dos sistemas de biorremediación como estrategia para la prevención y mitigación de los efectos del drenaje ácido de roca en la Cordillera Blanca, Perú.	<p>Comunidad Campesina Cordillera Blanca Componente físico: construcción de celdas de sedimentación y canales de conducción mediante fincas comunales. Componente biológico simuló la sinergia que existe entre las plantas fitoremediadoras, el suelo y las bacterias, usados en las celdas de humedales artificiales construidas</p> <p>Comité de Usuarios de Agua Shallah Huapish Toella Componente físico: construcción de celdas de sedimentación y canales de conducción mediante fincas comunales. Componente biológico simuló la sinergia que existe entre las plantas fitoremediadoras, el suelo y las bacterias, usados en las celdas de humedales artificiales construidas</p>	no tuvo		<p>Espejo de agua (20 cm) Arena gruesa (5cm) Mezcla de turba y estiércol (3cm) Arena gruesa (5cm)</p> <p>Espejo de Agua (12 cm) Arena gruesa (2 cm) Mezcla de turba y estiércol (10 cm) Arena gruesa (15 cm) Grava (10cm)</p>	<p>Los sistemas de biorremediación recién se está entendiendo y necesita ser explorada más en profundidad. Un área importante de investigación en el desarrollo de tecnologías de biorremediación será la observación del manejo colectivo del sistema (mantenimiento, limpieza de sedimentos, etc.)</p>	<p>El diseño de la Comunidad Cordillera Blanca consiste en tres sedimentadores, con sistemas aerobios que consisten en una serie de celdas de sedimentación que están conectadas, por las que circula el agua lentamente por flujo horizontal superficial. A la entrada de los sedimentadores están dos compuertas metálicas para controlar el caudal de entrada. Además se instalaron tres válvulas de purga para la remoción de los sedimentos acumulados</p> <p>La comunidad campesina Cordillera Blanca se componen de tres celdas de humedales de forma sinusoidal de 3 m de ancho, 0.70 m de profundidad y 51 m de largo (celda 1), 39 m (celda 2) y 83 m (celda 3). Las celdas fueron construidas con una inclinación de 0.5%, para que el agua discurre lentamente. En el caso del comité de riego Shallah Huapish Toella, el diseño consideró una celda de humedal de 16 m x 2 m x 0.6 m, construida con una inclinación de 1%.</p>
Eitner, David C	Pilot scale constructed wetland for the removal of nickel from tailings drainage, Southern Norway	Compuesto por 3 celdas de tratamiento anaeróbico de flujo subterráneo, 1 celda de tratamiento aeróbico de flujo superficial, una cascada de aireación y una celda de filtración de rocas.	los relaves tenía un pH neutro, no se utilizó piedra caliza en la construcción.		Se uso grava, astillas de madera, heno de pasto podrido y se cubrió con suelos de turberas. Para introducir bacterias reductoras de sulfatos, estos depósitos se inocularon con una mezcla de estiércol de vaca / oveja antes de llenarlos.	<p>Desafíos en la construcción de humedales que eliminarán metales durante períodos prolongados incluyen mantener las condiciones anaeróbicas y evitar el taponamiento del sistema</p>	El primer año de operación del humedal construido fue de aproximadamente 40 kg, que es alrededor del 70% del níquel total que ingresó al sistema. ¡A esta tasa de remoción, solo el 5% del volumen disponible en el humedal se llenará con sulfuros de níquel después de 100 años!
Sociedad nacional de minería petróleo y energía, (SNMPE)	Programa Humedal Artificial (wetlands) de Tucush Cía. Minera Antamina S.A	Cuenta con área de 4, 2 hectáreas y están divididas en tres: Sacrificio (S) llega el agua sin tratamiento, son las celdas de mayor tamaño, donde se promueve la sedimentación y la reducción de velocidad. Celdas Paralelas (P), con un 20 en total permiten la oxigenación, con entradas y salidas tenemos fase aerobica y anaerobica. Profundas (D) Es mas profunda y largas que las otras, siendo en el doble de la etapa celda, con mayor capacidad de retención de agua y acrecentar la fase anaerobica, albergando bacterias facultativas, despues de esto el agua continúa en cascadas, 110 cm.	Poza de sedimentación: con área de 5.530 m ² . La función es generar sedimentación de partículas grandes y reducir la velocidad. Y lo siguiente es un serpetin dos filas de 8 pozas a cada lado con un área de 12,683m ² , para sedimentar partículas de menor tamaño aca tambien se vierten aguas de los talleres de mantenimiento.		No lo mencionaron pero, si a las plantas que utilizaron como el genero <i>Juncus</i> extraido de la zona	<p>Monitoreo es diario, en tres puntos el primero ala entrada del serpetin, el segundo ingresando al humedal y el tercero saliendo de este</p>	El humedal esta mejorando la calidad de las aguas y se mejoro el habitat tanto la flora como la fauna, durante su primer año. Se redujo el nitrato entrante en 14.30%, se logro tratar el amonio con una remocion del 48.89%.
M. T. Alarcón-Herrera, M. C. Valles-Aragón, M. A. Olmos Márquez	Retención y distribución de arsénico en los humedales construidos	Se construyeron 3 prototipos: uno de ellos el HC control, los otros dos fueron plantados, uno con E. Macrostachya y el otro con S. americanus (HA y HB). todos llenados con con 300 kg de arena (ρ=1.4g/cm ³ , porosidad: 38%, conductividad hidráulica: 18.53cm/h). Con condiciones de flujo sumergido, el nivel del agua se ajustó a 5cm por debajo de la superficie de la cama de arena.	no tuvo		El medio granular fue de arena limosa con un tamaño de partículas entre 0.05-2.0 mm	No lo mencionaron	La mayor retención de arsénico fue en el suelo, siendo casi el doble la retención en el suelo de los humedales con plantas (66-73%) que en el prototipo sin plantas (32%). El suelo es el componente en donde queda retenida la mayor cantidad del metaloide. Las plantas retuvieron dentro de su estructura vegetal solo el 2% del metaloide, sin embargo, tienen un papel muy importante para la retención de arsénico dentro del complejo funcionamiento del mesocosmos de un humedal construido.

Anexos 2. Tabla comparativa de diferentes estudios

Autor	Título	año	Ubicación de los puntos de muestreo o sistema remediador	Altitud (msnm)	Toma de muestras	Drenaje	Metales	Bacterias sulfato reductoras	Plantas	Bioacumulación	Extras
Edell Doriza Aliaga Zegarra ; Edwin Julio Palomino Cadenas ; Edson Yupanqui Torres ; Martín Lucio Salvador Poma ; Miguel Constante Bobadilla Alvarez ; Farah Hilden Acuña y Magaly Noemí López Lucio	Capacidad de las plantas nativas en ambientes con drenaje ácido para la bioacumulación de metales pesado.	2009	De la Quebrada de Quilcayhuanca (Prov. Huaraz, Dpto. Ancash)	3828	Humedal natural	DAR	Al, As, Cd, Cr, Co, Cu, Fe, Pb, Mg, Mn, Mo, Ni, Ag, Zn, Bi, Sn, Li y Si	En todos los humedales y en ambos periodos se observa una disminución de la concentración de los sulfatos en el efluente, notándose el efecto remediador de los humedales gracias a las bacterias sulfatoreductoras presentes en los sustratos	<i>Cyperus sp</i>	Plantas nativas mejor adaptadas: <i>Juncus imbricatus</i> , <i>Calamagrostis ligulata</i> , <i>Cyperus</i> con potencial económico bioacumulan metales de importancia comercial como el aluminio, plomo, plata, zinc y cobre de 50 a 860 veces. que pueden ser recuperados de la biomasa. El humedal de Mesapata existe remoción de metales pesados tóxicos como el Arsénico y el Cromo principalmente por <i>Juncus imbricatus</i> . Para la mayoría de los metales pesados existe una relación inversamente proporcional entre el FBC y la concentración de metales en el afluente al humedal. Los humedales con mayor capacidad de bioacumulación son los de Quebrada Honda, Mesapata y Huancapetí	En los humedales con influencia de DAM (Huancapetí y Mesapata) se observa mayor concentración de metales pesados en periodo lluvioso debido al flujo de metales disueltos desde la bocamina y relavera respectivamente hacia los humedales, por el efecto de arrastre y disolución que ejerce la lluvia. En los humedales con influencia de drenaje ácido de roca DAR (Quilcayhuanca y Quebrada Honda) se observa mayor concentración de metales pesados en periodo de estiaje debido a la concentración que experimentan los metales al disminuir el volumen de agua. No obstante, Quebrada Honda también presenta influencia minera, pero ésta se encuentra relativamente alejada del humedal.
			De la Quebrada Honda, Dist. Marcará, Prov. Carhuaz, Dpto. Ancash	4145	Humedal natural	DAM/DAR			<i>Calamagrostis ligulata</i>		
			De la Planta Concentradora de Mesapata (Distrito de Cáitac, Prov. Recuay; Dpto. Ancash).	3539	Humedal artificial	DAM			<i>Juncus imbricatus</i>		
			Del Pasivo Minero de Huancapetí (Prov. de Aija - Dpto. Ancash.	4450	Humedal natural	DAM			<i>Calamagrostis ligulata</i>		
Medina Marcos, Katy Damacia Montano Chávez, Yeidy Nayclin	Determinación del factor de bioconcentración y traslocación de metales pesados en el <i>Juncus arcticus</i> contaminadas con el pasivo ambiental	2013	El pasivo ambiental minero Alianza, del depósito de relaves de Ticapampa se encuentra ubicado dentro del (distritos de Ticapampa y Aija, Prov Recuay y Aija , Dpto. Ancash)	4100 - 4975	Pasivo Ambiental Minero	DAM	Al, As, Cd, Cu, Fe, Mn, Pb, Sb, Zn, Ag y Ni	No se evaluó las bacterias	<i>Juncus arcticus</i> Willd. <i>Cortaderia rudiusscula Stapf</i>	Juncus arcticus Willd. acumuló la mayor concentración de Fe, As, Zn, Al, Pb y Cu en las raíces (>8000, >6000, >5000, 2400, 987 y 784 mg/kg) que la Cortaderia. rudiusscula Stapf. El promedio del BCF de cada especie, las raíces del <i>Juncus arcticus</i> Willd. fueron más eficiente que la Cortaderia rudiusscula Stapf, en extraer Zn (FBC=9.1), seguido del Cu (6.6), Mn (5.4), Cd (1.9), Sb (1.9), Al (1.7), As (1.0), Fe (1.0) y Pb (0.5). Factor de traslocación de la Cortaderia rudiusscula Stapf fue más eficiente que el <i>Juncus arcticus</i> Willd. en Mn, seguido Cd. <i>Juncus arcticus</i> Willd. fue más eficiente que la Cortaderia rudiusscula Stapf en la traslocación de Pb, Sb, As, Fe y Al	La especie Cortaderia rudiusscula Stapf es una planta acumuladora y se debería utilizar para la recuperación de cobertura vegetal de desmontes. La especie <i>Juncus arcticus</i> Willd. es acumuladora de metales en humedales, para el tratamiento de drenaje ácido de roca y drenaje ácido de mina. El <i>Juncus arcticus</i> Willd. tiene un alto potencial de tolerar Fe, Pb, Zn, Cu y Mn, mientras que la Cortaderia rudiusscula Stapf tiene un alto potencial de trastocar Pb a sus raíces a su parte aérea
Diana Alejandra Nández Alcántara	Estudio y selección de especies vegetales con potencial biorremediador en drenajes ácidos de roca y relaves minerales de la cuenca del Río Santa (Áncash, Perú)	2016	Huancapetí (Recuay , Recuay)-1 y 2	4527-4436		DAR/Relave	As, Pb, Hg, Al y Cd	No se evaluó bacterias	<i>Festuca dolichophylla</i> <i>J.S.Presl., Calamagrostis ligulata (H.B.K) Hitchc., Senecio sp</i>	Mediante el FBC, se seleccionaron 20 especies con características tolerantes y/o hiperacumuladoras para plata, aluminio, arsénico, boro, hierro, cadmio, cromo, cobre y plomo, las que se encuentran <i>Distichia muscoides</i> , <i>Juncus arcticus</i> , <i>J. bufonius</i> , <i>Penicetum clandestinum</i> , <i>Calamagrostis ligulata</i> , <i>C. glacialis</i> y <i>Huperzia crassa</i> . En esta investigación podemos considerar a los géneros <i>Festuca</i> , <i>Calamagrostis</i> , <i>Poa</i> spp, <i>Juncus</i> , <i>Cortaderia</i> , <i>Schinus</i> , <i>Medicago</i> , <i>Pennisetum</i> y <i>Scirpus</i> , que son eficaces para adaptarse a ambientes extremos y sugieren que estas especies podrían ser utilizadas para recuperar suelos afectados por metales mediante sistemas artificiales de remediación. En este estudio, se han encontrado FBC de 2.85 (Cu), 1.55 (Cr), 12.40 (Ni), 0.86 (Pb), 9.31 (Zn) y 1.18 (Cd) en el género <i>Distichia</i> y la familia <i>Poaceae</i> .	El lugar que presentó mayor concentración de uno o más metales fue Huancapetí, seguido de Mesapata, Ticapampa, Santa Rosa de Jangas y Pastoruri. El aluminio, arsénico y plomo predominantes en todos los puntos de muestreo, sobre todo en Huancapetí, tanto en época húmeda y seca. Las plantas encontradas en este estudio acumulan aluminio, arsénico, cadmio y plomo en varios órdenes de magnitud con respecto a las características del suelo. Se encontro especies con potencial biorremediador (<i>Festuca dolichophylla</i> , <i>Calamagrostis ligulata</i> , <i>Senecio sp</i> , <i>Calamagrostis brevifolia</i> , <i>Juncus arcticus</i> , <i>Juncus bufonius</i> , <i>Scirpus sp</i> , <i>Medicago polymorpha</i> , <i>Pennisetum clandestinum</i> , <i>Medicago sp</i> , <i>Scirpus sp</i> , <i>Scirpus sp3</i> , <i>Werneria sp</i> , <i>Calamagrostis glacialis</i> , <i>Senecio sp</i> , <i>Distichia muscoides</i> y <i>Huperzia crassa</i>)
			Ticapampa (Ticapampa, Recuay)	3459		Relave			<i>Juncus arcticus (J. Presl.) Steud, Juncus bufonius L., Scirpus sp</i>		
			Santa Rosa (Jangas, Huaraz)	2786		Relave			<i>Pennisetum clandestinum</i> Hotche Ex. Chio v.		
			Mesapata (Cáitac, Recuay)	3503		Relave			<i>Pennisetum clandestinum</i> Hotche Ex. Chiov., <i>Juncus arcticus (J. Presl.) Steud, Scirpus sp</i>		
			Pastoruri (Aquia, Bolognesi)-1 y 2	4964-4979		DAR			<i>Calamagrostis ligulata (H.B.K) Hitchc., Werneria sp., Calamagrostis glacialis (Weed.) Hitchc., Distichia muscoides Nees & Meyen., Huperzia crassa (Humb. & Bonpl. Ex Willd.) Rothm.,</i>		

Edwin Julio Palomino Cadenas	Sistemas de Humedales para la Biorremediación de Drenajes Ácidos de Mina o Roca en Ancash – Perú	2007	Pasivo Minero de Huancapetí, cordillera negra, Aija - Ancash	4500	Humedal	DAM	Cd, Fe, Pb, Zn	Desulfobivrio Desulfosarcina	<i>Calamagrostis ligulata</i> más del 95% de la cobertura, acompañada por <i>Plantago rigida</i> , <i>Polygonum interruptus</i> y <i>Senandrium dulce</i> .	FBC de 21% para el zinc y 14% para el cadmio (lluvia). FBC para el hierro y plomo son bajos (Fe: 6% anual, Plomo: 2% anual)	Observamos tres familias con potencial uso para la construcción de humedales para el tratamiento de drenajes ácidos. De las Poaceas se describen los géneros Agrostis, Alopecurus, Anthoxanthum, Calamagrostis, Dissanthelium, Festuca, Hierochloa, Muhlenbergia, Poa y Vulpia; entre las Cyperaceae están Carex, Cyperus y Scirpus y entre las Juncaceae están Distichia, Juncus y Luzula. El sistema de humedal artificial de Mesapata remueve los cuatro metales estudiados con porcentajes anuales que van del 53 al 92%. Las especies fitorremediadoras de mayor importancia son Calamagrostis ligulata, Juncus imbricatus, Juncus bufonius, Juncus articus y Scirpus olineyi
			Drenaje de la Cancha de Relave de la Planta Concentradora de Mesapata Cordillera Blanca, Cátac – Recuay – Ancash	3550	Humedal artificial				<i>Juncus imbricatus</i> , <i>Juncus bufonius</i> , <i>Juncus articus</i> var <i>andina</i> y <i>Scirpus olineyi</i> que representan más del 90% del consorcio	FBC más alto para el Cd (55%), seguido del hierro (46%) y el zinc (20%) para los períodos de lluvia. Los promedios anuales disminuyen a 28%, 23% y 10%, respectivamente. El plomo no alcanza valores importantes en el FBC (2% anual)	
			Quebradas de Quilcayhuanca, cordillera blanca, Huaraz – Ancash;	3950	Humedal	DAR			<i>Juncus imbricatus</i> cobertura de 90%; en las zonas menos densas y con agua más clara está <i>Myriophyllum quitense</i> y hacia los lados <i>Cortaderia</i> y <i>Lupinus</i> .	Niveles altos del FBC para el plomo (62% en lluvia y 19% en estiaje); en tanto que el hierro se bioconcentra de manera similar, tanto en el período de lluvia como en el de estiaje (7% anual).	
			Quebrada de Rúrec, cordillera blanca, Huaraz – Ancash	4000	Humedal				<i>Schoenoplectus americanus</i> y <i>Juncus imbricatus</i> más del 90% de la cobertura; alternando con <i>Polygonum interruptus</i> , <i>Senandrium dulce</i> y <i>Plantago rigida</i> y eventualmente especies de <i>Calamagrostis</i>	valores altos del FBC para el Cadmio (15%, período de lluvia); mientras que los otros metales muestran valores bajos del FBC (Hierro: 7% anual; Zinc: 2% anual; Plomo: 0,4% anual).	
Zimmer, Anaís K. Brito Rodríguez, Mariza J. Alegre Oropeza, Cristiam W. Sánchez León, Jhon Recharte Bullard, Jorge	Implementación de dos sistemas de biorremediación como estrategia para la prevención y mitigación de los efectos del drenaje ácido de roca en la Cordillera Blanca, Perú.	2018	Canal Chonta Comunidad Campesina Cordillera Blanca, Olleros, Subcuenca del Río Negro, distrito de Recuay, Provincia de Recuay, Región Ancash	3300-5000	Humedal artificial	DAR	Fe, Mn, AL, Zn	Se recolectó las muestras de lodo y agua de la misma área, manteniendo los envases de plástico llenos hasta el tope para evitar el ingreso de aire. Al ser bacterias anaerobias no pueden estar expuestas a altos niveles de oxígeno. Para la determinación cualitativa de la presencia y actividad de las BSR en el medio de cultivo se examinó la formación de precipitados de color negro en el medio mineral	<i>Juncus arcticus</i>	No se realizó análisis para el FBC. Se realizó un trasplante directo para reducir el estrés generado a los individuos.	Los humedales artificiales de los dos sistemas presentan una fase aerobia y una anaerobia. Ambas comunidades participaron del diseño e implementación de sus respectivos sistemas de biorremediación. En el caso de la Comunidad Campesina Cordillera Blanca, los miembros del CIAL y comuneros aseguran un incremento de la calidad del agua y un mejoramiento en la producción de los pastos cultivados usando el agua del sistema biorremediador. Se realizó un trasplante directo para reducir el estrés generado a los individuos.
			Canal Shallap Huapish Toclla Comité de Usuarios de Agua Shallap Huapish Toclla, microcuenca Auqui, Distrito de Huaraz, Región Ancash	4109	Humedal artificial	DAR			<i>Calamagrostis ligulata</i> , <i>Juncus arcticus</i> , <i>J. bufonius</i> L., <i>C. ovata</i> , <i>Distichia</i> sp	No se realizó análisis para el FBC. Las especies fueron recolectadas de Mesapata, luego se propagaron durante seis meses, seleccionadas por especie y tamaño, teniendo en consideración el estrés que podrían sufrir por el traslado y la fase de adaptación al nuevo ámbito.	

Anexos 3. Informe de calidad de agua de la Corporación Minera Toma la Mano S.A



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 151



**INFORME DE ENSAYO N° MA20100033
CON VALOR OFICIAL**

	Cod. Cliente	PMAG-08	PMAG-09	PMAG-10
Descripción	Agua de la misma poza	Descarga de la tubería 36"	Drenaje de agua subsuelo	
Cod. Lab.	MA20100033.01	MA20100033.02	MA20100033.03	
Tipo de Producto	Agua R. Industrial	Agua R. Industrial	Agua R. Industrial	
Fecha de Muestreo	13/10/2020	13/10/2020	13/10/2020	
Hora de Muestreo	11:08	11:20	11:30	
Cadena de Custodia	980	980	980	

Parámetros	Unidad	L. D.	Resultados		
Metales Totales (ICP-MS)					
Aluminio total	mg/L	0,005	2,480	3,062	12,47
Antimonio total	mg/L	0,00028	0,00765	<0,00028	<0,00028
Arsénico total	mg/L	0,00021	40,87	18,26	14,84
Bario total	mg/L	0,0003	0,0120	0,0219	0,0149
Berilio total	mg/L	0,0002	0,0007	0,0007	0,0039
Bismuto total (*)	mg/L	0,00019	<0,00019	0,04205	0,00743
Boro total (*)	mg/L	0,001	0,190	0,059	0,179
Cadmio total	mg/L	0,00024	0,10093	0,05055	0,02864
Calcio total (*)	mg/L	0,022	507,9	490,3	294,8
Cerio total (*)	mg/L	0,00022	0,02798	0,04792	0,19499
Cesio total (*)	mg/L	0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002
Cobalto total	mg/L	0,00029	0,16983	0,15936	0,49925
Cobre total	mg/L	0,00037	0,00124	0,00840	0,02197
Cromo total	mg/L	0,00023	<0,00023	0,00193	0,00221
Estaño total (*)	mg/L	0,00022	<0,00022	<0,00022	<0,00022
Estroncio total (*)	mg/L	0,00037	1,921	2,442	2,240
Fósforo total (*)	mg/L	0,005	0,109	0,102	0,090
Galio total (*)	mg/L	0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
Germanio total (*)	mg/L	0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
Hafnio total (*)	mg/L	0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004
Lantano total (*)	mg/L	0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002
Litio total (*)	mg/L	0,0003	0,0197	0,0093	0,0306
Lutecio total (*)	mg/L	0,00022	<0,00022	<0,00022	<0,00022
Magnesio total (*)	mg/L	0,003	36,47	40,14	66,58
Manganeso total	mg/L	0,00064	69,49	58,27	123,5
Mercurio total	mg/L	0,00008	<0,00008	<0,00008	<0,00008
Molibdeno total	mg/L	0,00018	<0,00018	0,00090	<0,00018
Niobio total (*)	mg/L	0,0007	<0,0007	<0,0007	<0,0007
Níquel total	mg/L	0,00034	0,10771	0,05667	0,20483
Plata total	mg/L	0,00021	0,00184	0,00126	0,00337
Piomo total	mg/L	0,00026	<0,00026	<0,00026	<0,00026

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

**INFORME DE ENSAYO N° MA20100033
CON VALOR OFICIAL**

Cod. Cliente	PMAG-08	PMAG-09	PMAG-10		
Descripción	Agua de la misma poza	Descarga de la tubería 36"	Drenaje de agua subsuelo		
Cod. Lab.	MA20100033.01	MA20100033.02	MA20100033.03		
Tipo de Producto	Agua R. Industrial	Agua R. Industrial	Agua R. Industrial		
Fecha de Muestreo	13/10/2020	13/10/2020	13/10/2020		
Hora de Muestreo	11:08	11:20	11:30		
Cadena de Custodia	980	980	980		
Parámetros	Unidad	L.D.	Resultados		
Metales Totales (ICP-MS)					
Aluminio total	mg/L	0,005	2,480	3,062	12,47
Antimonio total	mg/L	0,00028	0,00765	<0,00028	<0,00028
Arsénico total	mg/L	0,00021	40,87	18,26	14,84
Bario total	mg/L	0,0003	0,0120	0,0219	0,0149
Berilio total	mg/L	0,0002	0,0007	0,0007	0,0039
Bismuto total (*)	mg/L	0,00019	<0,00019	0,04205	0,00743
Boro total (*)	mg/L	0,001	0,190	0,059	0,179
Cadmio total	mg/L	0,00024	0,10093	0,05055	0,02864
Calcio total (*)	mg/L	0,022	507,9	490,3	294,8
Carlo total (*)	mg/L	0,00022	0,02798	0,04792	0,19499
Cesio total (*)	mg/L	0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002
Cobalto total	mg/L	0,00029	0,16983	0,15936	0,49925
Cobre total	mg/L	0,00037	0,00124	0,00840	0,02197
Cromo total	mg/L	0,00023	<0,00023	0,00193	0,00221
Estaño total (*)	mg/L	0,00022	<0,00022	<0,00022	<0,00022
Estroncio total (*)	mg/L	0,00037	1,921	2,442	2,240
Fósforo total (*)	mg/L	0,005	0,109	0,102	0,090
Galio total (*)	mg/L	0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
Germanio total (*)	mg/L	0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
Hafnio total (*)	mg/L	0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004
Lantano total (*)	mg/L	0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002
Litio total (*)	mg/L	0,0003	0,0197	0,0093	0,0306
Lutecio total (*)	mg/L	0,00022	<0,00022	<0,00022	<0,00022
Magnesio total (*)	mg/L	0,003	36,47	40,14	66,58
Manganeso total	mg/L	0,00064	69,49	58,27	123,5
Mercurio total	mg/L	0,00008	<0,00008	<0,00008	<0,00008
Molibdeno total	mg/L	0,00018	<0,00018	0,00090	<0,00018
Niobio total (*)	mg/L	0,0007	<0,0007	<0,0007	<0,0007
Niquel total	mg/L	0,00034	0,10771	0,05667	0,20483
Plata total	mg/L	0,00021	0,00184	0,00126	0,00337
Plomo total	mg/L	0,00026	<0,00026	<0,00026	<0,00026

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE - 151



Registro N°LE - 151

INFORME DE ENSAYO N° MA20100033 CON VALOR OFICIAL

Cod. Cliente	PMAG-08	PMAG-09	PMAG-10		
Descripción	Agua de la misma poza	Descarga de la tubería 36"	Drenaje de agua subsuelo		
Cod. Lab.	MA20100033.01	MA20100033.02	MA20100033.03		
Tipo de Producto	Agua R. Industrial	Agua R. Industrial	Agua R. Industrial		
Fecha de Muestreo	13/10/2020	13/10/2020	13/10/2020		
Hora de Muestreo	11:08	11:20	11:30		
Cadena de Custodia	980	980	980		
Parámetros	Unidad	L.D.	Resultados		
Metales Totales (ICP-MS)					
Potasio total (*)	mg/L	0,009	60,48	51,68	12,44
Rubidio total (*)	mg/L	0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
Selenio total	mg/L	0,00033	<0,00033	<0,00033	<0,00033
Silicio total (*)	mg/L	0,013	14,62	12,85	25,30
Sodio total (*)	mg/L	0,009	42,98	38,14	28,64
Talio total	mg/L	0,00029	<0,00029	<0,00029	<0,00029
Tantalio total (*)	mg/L	0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005
Teluro total (*)	mg/L	0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005
Thorio total	mg/L	0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005
Titanio total (*)	mg/L	0,0003	<0,0003	<0,0003	<0,0003
Uranio total	mg/L	0,00016	<0,00016	<0,00016	<0,00016
Vanadio total	mg/L	0,00035	0,00143	<0,00035	0,01497
Wolframio total (*)	mg/L	0,00277	<0,00277	<0,00277	<0,00277
Yterbio total (*)	mg/L	0,00021	<0,00021	<0,00021	<0,00021
Zinc total	mg/L	0,0009	31,55	18,13	54,13
Zirconio total (*)	mg/L	0,00035	<0,00035	<0,00035	<0,00035

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 151



**INFORME DE ENSAYO N° MA20100033
CON VALOR OFICIAL**

Cod. Cliente	PMAG-08	PMAG-09	PMAG-10		
Descripción	Agua de la misma poza	Descarga de la tubería 36"	Drenaje de agua subsuelo		
Cod. Lab.	MA20100033.01	MA20100033.02	MA20100033.03		
Tipo de Producto	Agua R. Industrial	Agua R. Industrial	Agua R. Industrial		
Fecha de Muestreo	13/10/2020	13/10/2020	13/10/2020		
Hora de Muestreo	11:08	11:20	11:30		
Cadena de Custodia	980	980	980		
Parámetros	Unidad	L.D.	Resultados		
Aceites y Grasas	mg/L	0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Cianuro Total	mg/L	0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Cromo Hexavalente	mg/L	0,004	<0,004	<0,004	<0,004
Hierro disuelto	mg/L	0,0096	401,4	154,6	397,1
Hierro Total	mg/L	0,0096	403,7	204,3	506,6
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	2	57	60	96
Desarrollados en campo					
Caudal (volumétrico) (*)	L/s	N.A.	1,420	1,117	0,082
Conductividad	µS/cm	r	3 570	3 130	3 400
Oxígeno Disuelto	mg/L	0,01	5,45	5,97	4,08
pH	Und. pH	r	6,11	3,28	3,42
Temperatura	° C	r	19,4	16,1	16,6

Legenda: L.D = Límite de detección r = Resolución N.A. = No aplica

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

Tiempo de Prescibilidad de Muestras	
Metales Disueltos : 28días	TSS : 7días
Cianuros : 14días	Metales Totales, Aceites y Grasas, Cr-VI, Conductividad : 28días

Lurin, 21 de Octubre del 2020

Gloria Uturunco Mamani
Supervisor de Lab Químico

Anexos 4. Tabla de los parámetros de Límites máximos permisibles

aprobado por el DECRETO SUPREMO N° 010-2010-MINAM

**LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES
PARA LA DESCARGA DE EFLUENTES LÍQUIDOS DE
ACTIVIDADES MINERO - METALÚRGICAS**

Parámetro	Unidad	Límite en cualquier momento	Límite para el Promedio anual
pH		6 - 9	6 - 9
Sólidos Totales en Suspensión	mg/L	50	25
Aceites y Grasas	mg/L	20	16
Cianuro Total	mg/L	1	0,8
Arsénico Total	mg/L	0,1	0,08
Cadmio Total	mg/L	0,05	0,04
Cromo Hexavalente(*)	mg/L	0,1	0,08
Cobre Total	mg/L	0,5	0,4
Hierro (Disuelto)	mg/L	2	1,6
Plomo Total	mg/L	0,2	0,16
Mercurio Total	mg/L	0,002	0,0016
Zinc Total	mg/L	1,5	1,2

Anexos 5. Cálculo del tiempo de retención de las canaletas

$$\text{Tiempo de retencion} = (\text{volumen} * \text{espacio vacio}) / (\text{caudal})$$

- Canaleta en zigzag

$$\begin{aligned}\text{Volumen} &= 1.00 \text{ ancho} * 1.20 \text{ alto} * 30 \text{ largo} \\ &= 36\text{m}^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Tiempo de retencion} &= (36\text{m}^3 * 0.3\text{m}) / 34\text{m}^3/\text{d} \\ &= 0.317\text{d} \\ &= 7\text{h}\end{aligned}$$

- Canaleta en acordeon

$$\begin{aligned}\text{Volumen} &= 1.00\text{m ancho} * 1.20 \text{ alto} * 120 \text{ largo} \\ &= 144\text{m}^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Tiempo de retencion} &= (144\text{m}^3 * 0.3\text{m}) / 34\text{m}^3/\text{d} \\ &= 1.27\text{d} \\ &= 30\text{h}\end{aligned}$$