

EVALUACIÓN DE RIESGOS DE PASIVOS AMBIENTALES MINEROS EN LA COMUNIDAD DE CONDORAQUE - PUNO

MSc. Ing. Mario Cuentas Alvarado¹, Ing. Owal Velasquez Viza², MSc. Ing. Américo Arizaca Avalos¹,
MSc. Ing. Fidel Huisa Mamani²

¹Facultad de Ingeniería de Minas, Universidad Nacional del Altiplano, Av. Floral 1153 Ciudad Universitaria email: mcuentas@unap.edu.pe

²Laboratorio de Monitoreo y Evaluación Ambiental, Universidad Nacional del Altiplano

Resumen

La minería, genera impactos ambientales y sociales no importa donde ocurra. En el pasado generalmente no se realizaba el cierre de las minas y solo se abandonaban; generándose los llamados pasivos ambientales mineros (PAMs). En la Comunidad de Condoraque se encuentra la mina Palca XI, importante productor de tungsteno en el pasado, en la zona existen importantes PAMs que constituyen un riesgo permanente y potencial para las personas, el ambiente y las actividades económicas de la comunidad. El objetivo del proyecto fue la evaluación simplificada de riesgos por contaminación utilizándose la metodología propuesta por Golder Associates. Se identificaron siete PAMs. Los resultados indican que, el drenaje que fluye de la rampa San Marcelo y la infiltración del mismo en la napa freática tiene índices de probabilidad de ocurrencia alto, pero sus consecuencias son: alta con respecto a la vida acuática, moderada con respecto a la vida terrestre, baja con respecto a las personas y despreciable con respecto a la agricultura y la ganadería; El depósito de relaves y el botadero de desmonte presentan un índice de probabilidad de ocurrencia medio y con consecuencias bajas para las personas, el ambiente y las actividades económicas; El bofedal presenta impactos negativos de los efluentes ácidos que han discurrido sobre el mismo proveniente de la laguna Choquene; Los restos de infraestructura presentan ocurrencia y consecuencias bajas, en algunos casos despreciables. Finalmente, se recomienda la evaluación de riesgo detallado con respecto a personas, bofedales, fauna terrestre y acuática y la actividad ganadera de la zona.

Palabras clave

Pasivos ambientales mineros, contaminación, riesgo, minería, palca XI, Condoraque.

RISK ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL MINING LIABILITIES IN CONDORAQUE COMMUNITY - PUNO

Abstract

Mining generates environmental and social impacts no matter where it occurs. In the past, mines were generally not closed and only abandoned, generating so-called mining environmental liabilities (PAMs). In the Community of Condoraque is the Palca XI mine, an important producer of tungsten in the past, in the area there are important PAMs that constitute a permanent and potential risk for people, the environment and the economic activities of the community. The objective of the project was the simplified assessment of contamination risks using the methodology proposed by Golder Associates. Seven PAMs were identified. The results indicate that the drainage that flows from the San Marcelo ramp and its infiltration into the water table has high probability of occurrence indices, but its consequences are: The tailings deposit and the waste dump have a medium probability of occurrence index with low consequences for people, the environment and economic activities; The wetlands have negative impacts of acid effluents that have flowed into them from the Choquene lagoon; The infrastructure remains have low occurrence and consequences, in some cases negligible. Finally, a detailed risk assessment is recommended with respect to people, wetlands, terrestrial and aquatic fauna, and livestock activity in the area.

Key words

Environmental liabilities, pollution, risk, mining, Palca XI, Condoraque.

1. Introducción

La región de Puno tiene un importante potencial minero de oro, estaño y uranio principalmente, debido a que en su territorio se encuentran: la franja de Au en rocas metasedimentarias del Ordovícico y Silurico-Devónico, la franja de depósitos de Sn-Cu-W relacionados con intrusivos del Permiano-Triásico-Jurásico, Oligoceno-Mioceno y depósitos epitermales de Ag-Pb-Zn, la franja de pórfidos-skarn de Cu-Mo (Au, Zn) y Fe relacionadas con intrusivos del Eoceno-Oligoceno, la franja de yacimientos estratoligados de Cu tipo capas rojas del Eoceno-Oligoceno, la franja de depósitos epitermales de Au-Ag y de depósitos polimetálicos con superposición epitermal del Mioceno, la franja de depósitos epitermales de Au-Ag del Mio-Plioceno y depósitos de Au tipo placer lluvio-aluvial Plio-Cuaternarios [1].

El inicio de la actividad minera en la región de Puno se remonta al Período Arcaico, prueba de ello es el descubrimiento de un collar de oro encontrado en Jiskairumoko, en la cuenca del río Ilave, que data entre 2155 a 1936 años A.C. (3776 a 3690 años de antigüedad) siendo el artefacto de oro trabajado más antiguo recuperado hasta la fecha, no sólo en los Andes, sino de América. Lo que indica que la primera actividad metalúrgica

en los Andes fue el laminado en frío de oro nativo [2].

La comunidad campesina de Condoraque se encuentra ubicada en la región de Puno, provincia de San Antonio de Putina y distrito de Ananea, en la zona de estudio, se encuentra ubicada la mina Palca 11, cuyos minerales económicos fueron: ferberita, scheelita, calcopirita, esfalerita y galena argentífera; los minerales de ganga: cuarzo, pirita, especularita y caolinita [3]. Durante los años 90 tuvo una producción mensual de 7,900 toneladas de mineral de cabeza con una ley de 1.09% y un promedio de 100 TM de concentrado, logrando producir alrededor de 75 toneladas de ferberita con leyes del 65% y 65 toneladas de sheelita con leyes de 76%. El material de relave fue del orden de las 1,700 toneladas mensuales con una ley de 0.70%. [4] La Minera Regina S.A., operadora de la concesión minera Regina Palca 11, suspendió sus actividades mineras en el año 1999. Minsur S.A. adquirió los derechos de propiedad sobre la concesión minera "Palca 11" y la concesión de beneficio "Hacienda de Beneficio Rocío N° 2". Luego de su adquisición, Minsur S.A. transfirió los derechos de propiedad a la Minera Sillustani S.A, la que, el 2006 presentó el proyecto "Plan de Cierre de Pasivos ambientales de la Unidad Minera Regina" y realizado las respectivas

absoluciones a las observaciones efectuadas por el Ministerio de Energía y Minas.

Debido que no se realizó el cierre de actividades oportunamente y solo se abandonaron las mismas; en la zona existen importantes pasivos ambientales mineros que constituyen un riesgo permanente y potencial para las personas, el ambiente y las actividades económicas de la comunidad [5].

El impacto de los pasivos ambientales mineros (PAM) sobre las aguas se manifiesta en dos aspectos: contaminación química, debido a la solubilización de metales u otros elementos por meteorización química de los elementos presentes en los PAM, y contaminación física, debido al arrastre de los finos. La primera puede afectar tanto a aguas superficiales (cauces y/o cuerpos de agua) como a los recursos hídricos subterráneos, mientras que la segunda solo afecta a los primeros. El escurrimiento y la circulación de agua por la superficie de los PAM pueden dar lugar a que las aguas se carguen de metales o sales, o a la generación del llamado drenaje ácido de roca o de mina. Otro de los grandes problemas asociados a los PAM, y en particular a los depósitos de relaves abandonados, es el arrastre de material particulado por la acción del viento o erosión eólica. La que puede contribuir de forma significativa a la pérdida y dispersión en el entorno del material almacenado en este tipo de depósitos. Las sustancias contaminantes potencialmente presentes en ese material removido por el viento pueden representar un daño directo por contaminación de los suelos, las aguas y los cultivos próximos, o dañar la vegetación y afectar por inhalación, ingestión o contacto dérmico a personas y animales. Este escenario de riesgo puede presentarse también en botaderos de desmonte con presencia de abundantes materiales finos en superficie. Las actividades fuertemente alteradoras del terreno, como la minería, pueden dar lugar a severos problemas de erosión hídrica y emisión de sedimentos, debido a la masiva exposición de material disgregado, suelo desnudo o materiales granulares sin estructura ni protección, conformados muchas veces con fuertes pendientes. Además, hay que tener en cuenta que, comparados con terrenos inalterados, los depósitos de relaves y botaderos de desmonte son

más fragmentados, superficialmente más compactos, más erosionables y están menos protegidos por una cubierta vegetal. El arrastre de sedimentos procedentes de los depósitos de residuos puede afectar a terrenos adyacentes, y a cauces o cuerpos de agua cercanos [6]. También existe la posibilidad de que se produzca un contacto directo por inhalación, ingestión accidental o contacto dérmico, para aquellos casos en los que exista una elevada accesibilidad para animales y personas, o se advierta que los PAM son utilizados para el desarrollo de diversas actividades (recreativas, deportivas u otras), generalmente cuando estas se encuentren ubicados cerca de ciudades o centros poblados [7].

Los impactos a la salud producidos por minas abandonadas han sido reportados en varios países: Bolivia [8], México [9] y Polonia [10].

Los pobladores de la comunidad campesina Condoraque han denunciado que las aguas del río y la laguna Choquene se encuentran contaminadas sin que nadie haga algo al respecto, también indican problemas en la salud de los animales mayores seguido por la muerte, bofedales y pastos en estado de descomposición y sedimentos de materiales sólidos depositados en el cauce del río [11]. El 2009 la congregación Maryknoll, junto a miembros de la Oficina Derechos Humanos y Medio Ambiente visitaron la zona y el 13 y 14 de mayo del 2010, en la 18ª sesión de la Comisión de Desarrollo Sostenible de la ONU, realizada en Nueva York, expusieron como un caso emblemático ante los representantes de los estados miembros [12].

El objetivo de la investigación fue realizar la evaluación de riesgos simplificada por contaminación de los PAMs ubicados en la comunidad de Condoraque.

2. Materiales y métodos

2.1 Descripción del sitio de estudio

La mina Palca XI se encuentra ubicada en la denominada pre-cordillera de Carabaya, perteneciente a la Cordillera Oriental dentro de un valle glaciar denominado quebrada Choquene. Presenta relieves suaves a moderados, propios de la superficie de Puna, con algunas escarpas. La acción glaciar ha dejado muchas huellas, pudiéndose observar morrenas a lo largo de la

quebrada Choquene, las mismas que se encuentran parcialmente erosionadas. En la parte alta del valle se aprecia un antiguo circo glaciar. Otro relieve sobresaliente lo constituye el afloramiento de la veta que sobresale del fondo de valle glaciar. El drenaje en el área de la mina es de norte a sur por lo general, con un control estructural bien marcado. Existen varias lagunas pequeñas de origen glaciar. Asimismo, el río Choquene, luego de unirse con el río Toco Toco, se constituye en un afluente del río Ramis. En su curso, los mencionados ríos conforman una cuenca que atraviesa los territorios de varias comunidades. Entre ellas se encuentran: Condoraque y Peña Azul, además de Tiquirine, Alvarizani, Ticani, Quilcapuncu, Janansaya, Huayllapata y Mijani, entre otras [13].

2.2 Evaluación de riesgos en pasivos ambientales mineros

Para propósito de la presente investigación se ha definido a los PAM como aquellas labores, instalaciones, edificaciones, efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuos producidos por operaciones mineras abandonadas o inactivas. También se considera a las superficies, cuerpos de agua, tramos de cauces y humedales afectadas por vertidos, que, estando en la actualidad en entornos de las minas, constituyen un riesgo permanente y potencial para la salud y seguridad de la población, los ecosistemas circundantes (terrestre y/o acuático), la propiedad y el desarrollo económico social del área de influencia de la operación minera.

El reglamento de pasivos ambientales de la actividad minera (Decreto Supremo N° 059-2005-EM) define riesgo como “ Probabilidad o posibilidad de que un contaminante pueda ocasionar efectos adversos a la salud humana, en los organismos que constituyen los ecosistemas o en la calidad de los suelos y del agua, en función de las características y de la cantidad que entra en contacto con los receptores potenciales, incluyendo la consideración de la magnitud o intensidad de los efectos asociados y el número de individuos, ecosistemas o bienes que, como consecuencia de la presencia del contaminante, podrían ser afectados tanto en el presente como en el futuro”

Los PAM presentan o pueden presentar un riesgo de seguridad o de contaminación tanto para la salud humana como para el medioambiente. El riesgo por contaminación se debe a la presencia de sustancias tóxicas, como por ejemplo el arsénico, el cianuro o los metales pesados en los residuos mineros como son los relaves y los desmontes y a la liberación de ellos al medio ambiente. El riesgo por seguridad se debe sobre todo a la estabilidad física de las instalaciones remanentes [14]. La definición de riesgo según el reglamento arriba mencionado, se refiere solamente al riesgo derivado de la probabilidad de contaminación y no al riesgo por seguridad como puede ser por ejemplo, la caída de una persona en una labor minera abierta [15].

La importancia de evaluar y priorizar los riesgos asociados a los PAM, se refiere a la toma de decisiones referidas a un diagnóstico preliminar, indicando para que casos sería necesario realizar estudios detallados y como priorizar los riesgos [16]. Entonces se debe considerar realizar la evaluación de riesgo en dos niveles diferentes: a) la evaluación de riesgo simplificada (ERS), a través de la cual, los profesionales, con la ayuda de criterios técnicos específicos y procedimientos evalúan los riesgos de los PAM, y b) la evaluación de riesgos detallada (ERD), a aplicar para riesgos específicos y en casos debidamente justificados en los que exista incertidumbre y dudas sobre la validez de los resultados obtenidos en la ERS [17]. Así, la metodología base de evaluación de riesgos para todos los Pasivos Ambientales Mineros será la ERS y sólo en algunos casos se realizará una ERD. Con este modo de proceder se pretende optimizar la asignación de recursos durante el proceso de identificación de los PAM, evitando la realización de una evaluación más costosa en todos aquellos casos en que pueda estimarse con claridad la magnitud de los riesgos que presenta un PAM.

2.3 Evaluación de riesgos simplificada por contaminación

La ERS por contaminación permite la evaluación de los riesgos de un PAM cuando en él hay sustancias químicas nocivas que potencialmente podrían causar efectos no deseados.

Para que existan escenarios de riesgo por contaminación, deben concurrir las siguientes

circunstancias: a) Tiene que haber un contaminante presente en concentraciones tales que pueda generar efectos no deseados en los receptores, b) Tiene que haber un medio de transporte y/o residencia que promueve el traslado del contaminante desde la fuente hacia el receptor (aire, agua, transporte por el hombre, animal, etc.), c) Tiene que haber una vía de exposición mediante el cual el receptor entre en contacto directo con el contaminante (ingestión, contacto dérmico, inhalación), y d) Tiene que haber por lo menos un receptor. De modo que la ausencia de cualquiera de estos cuatro elementos hace que no exista el riesgo. Por el contrario, al constatar la presencia de los cuatro elementos procede la evaluación de riesgo.

La magnitud del riesgo se define por la probabilidad de ocurrencia del escenario de peligro y por la severidad de las consecuencias.

Para la estimación cualitativa de la ERS relacionada con contaminación se utilizó la siguiente metodología [18], la que comprende 5 pasos principales, que son:

Paso 1 - Formulación del problema, consiste en establecer el modelo conceptual de contaminación mediante un diagrama que relacione la fuente emisora en que está presente la sustancia contaminante (minerales, desmontes, relaves, residuos de lixiviación, restos de infraestructura y obras civiles, cuerpos de aguas, humedales, cauces perturbados, etc.), el mecanismo que permite la liberación del contaminante (erosión hídrica, erosión eólica, lixiviación, etc.), el medio de transporte y/o residencia que promueve el traslado del contaminante desde la fuente hacia el receptor (aire, agua, sedimentos, transporte por el hombre y/o animales, etc.), las vías potenciales de exposición (inhalación, ingesta o contacto dérmico), y los receptores potenciales que pueden ser afectados (personas, vida silvestre terrestre, vida acuática, etc.).

Paso 2 - Identificación de los escenarios de peligro presentes en un PAM. Deben reconocerse las sustancias químicas potencialmente nocivas, los medios de transporte y residencia, los receptores y las vías de exposición.

Paso 3 - Estimación del índice de probabilidad de ocurrencia del escenario de peligro.

Paso 4 - Estimación de la severidad de las consecuencias, a partir de la información reunida en el área de estudio y del apoyo cartográfico disponible.

Paso 5 - Evaluación de la magnitud del riesgo, mediante la aplicación de la matriz de riesgo. Este proceso finaliza con el registro de los riesgos evaluados a lo largo de la ERS para cada medio ambiental (aire, agua, suelo, etc.) y cada receptor (personas, medio ambiente, actividades económicas).

2.4 Pasivos Ambientales Mineros en Condoraque

La primera actividad desarrollada, consistió en la inspección del área, constatando la existencia de PAMs, los que fueron agrupados de la siguiente manera:

Labores Mineras (M): en la zona existe varias labores mineras abandonadas, entre ellas tenemos la rampa San Marcelo que sirvió de acceso principal a la mina Palca XI, algunas bocaminas y chimeneas de poca profundidad, ubicadas al lado derecho de la quebrada y aguas arriba del depósito de relave. La rampa San Marcelo, se encuentra inundada y es la única que presenta efluentes de interior mina, por ella sale aguas ácidas con un pH igual a 4. Estas instalaciones mineras están inundadas debido a la elevación del nivel freático, y ésta a su vez por las precipitaciones pluviales que se producen en los meses de enero a marzo. El caudal de agua es aproximadamente 0.3 m³/s, discurriendo hacia la laguna Choquene [13]. Solo consideraremos la rampa San Marcelo para la evaluación del riesgo.

Residuos Mineros (R): Existen residuos mineros dispersos en un área extensa, donde se pueden apreciar desmontes de material de mina y relaves. El botadero de desmonte (R01), se encuentra expuesto al ambiente, lo que podría ocasionar impacto negativo en las aguas subterráneas y superficiales por el drenaje ácido de mina producido por la presencia de minerales sulfurados y otros elementos contenidos en los botaderos y también impactar negativamente la calidad del aire debido a la emisión de material particulado. La mayor cantidad de estos residuos son materiales abandonados en un área no menor a 20,000 m². También observamos que el depósito de relaves (R02) se encuentra aguas abajo de las

antiguas instalaciones y aguas arriba de la laguna Choquene; llegando a estar en contacto con esta última y se desconoce si éste depósito de relaves cumplió con las disposiciones reglamentarias en sus etapas de diseño y construcción; no se observó vegetación en la superficie del depósito de relaves; observándose un color amarillo rojizo supuestamente debido a la oxidación de minerales sulfurados. Se estima un área de 2 Ha y una altura promedio de 4 m, se calcula que puede haber no menos de 80,000 m³ o unas 180,000 ton de relaves. El depósito no cuenta con protección para precipitaciones pluviales, como son los canales de coronación, sistemas de drenajes superficiales y de interior de la presa; tampoco se conoce sobre el método constructivo y las características originales del terreno donde fue depositado el relave.

Residuos Mineros No Masivos e Industriales (N): Se observaron residuos industriales (en su mayoría metálicos) dispersos por las instalaciones de la mina que presentan signos de oxidación y de deterioro. No se considerarán para la evaluación.

Restos de Infraestructura y Obras Civiles (I): Existen construcciones de obra civil abandonadas (IO1) que formaron parte de las instalaciones metalúrgicas. Una de estas instalaciones se encuentra en el lado izquierdo de la quebrada y aguas arriba de la presa de relaves. Estas edificaciones corresponden a la antigua planta concentradora, campamento de obreros, campamento de empleados, tanques, canales, etc. El acceso principal a la mina consistía en una vía afirmada, que sigue siendo utilizada, con un ancho aproximado de 4 m, presentando erosión en algunos tramos de su recorrido y no cuenta con cunetas lo que ocasiona el acumulamiento y desborde del agua sobre el acceso.

Cuerpos de Agua: Laguna Choquene (L): La laguna Choquene ha sido impactada directamente por la deposición de los relaves en ella y el ingreso de efluentes de la mina durante el periodo de operación de la mina y su posterior abandono. Por otro lado, durante el periodo de inactividad minera, la presencia de pasivos ambientales en el área de la mina ha generado drenaje ácido, lo que ha contribuido en forma continua con la

contaminación de la laguna. El nivel de contaminación de dichas aguas ha hecho que sus descargas también tengan valores bajos de pH de tal manera que el bofedal contiguo, así como, los 2 primeros km de quebrada (aguas abajo de la laguna), muestran un impacto negativo por acción de aguas ácidas. Es importante señalar que los suelos que conforman el entorno de la laguna en un ancho no menor de 20 m se encuentran alterados; este ancho de corona aún puede ser mayor para el periodo de estiaje o una disminución del nivel de la laguna. La laguna es de forma irregular, en promedio tiene un largo de 600 m y un ancho de 500 m aproximadamente; con una extensión de espejo de agua de 12,82 Ha. Sobre el margen superior de la laguna se ubica el depósito de relaves de la antigua explotación minera.

Bofedales (B): Los bofedales constituyen los ecosistemas de pastizales más importantes en las zonas áridas y semiáridas del altiplano peruano boliviano, zona que se encuentra sobre los 3800 msnm. Proporcionan varios servicios ambientales como el de regulación del ciclo del agua y protección del suelo. Poseen grandes reservas de carbono y tienen una alta productividad, proveyendo de pastos frescos en cantidad y de buena calidad para la crianza del ganado, principal actividad de la zona. Este ecosistema sustenta a la mayor parte de los camélidos sudamericanos, especialmente alpacas y constituyen parte de la belleza escénica del paisaje [19]. En Condoraque junto a la laguna (aguas abajo) existe un sector de bofedales impactado por aguas ácidas. La fauna y flora presenta indicios de daño, los suelos presentan un color pardo negruzco y tiene un área aproximada de 8,000 m².

Tramos de cauce perturbados: Quebrada y Río Choquene (Q): Aguas debajo de la laguna Choquene fluye el río Choquene, que en algunos tramos de su cauce forma quebradas y gargantas, en cuyas paredes y lecho se observa la presencia de hierro en colores amarillo rojizos, producto de la evaporación de aguas ácidas y la deposición de óxidos. Se estima una extensión de 1 km y con un ancho irregular de 2 a 5 m impactado.

Figura 1 a) Bocamina San Marcelo, b) Deposito de relaves, c) Laguna Choquene, d) Bofedal, e) Rio Choquene y f) Quebrada Choquene



Tabla 1. Pasivos ambientales mineros identificados

COMPONENTE	TIPO	NOMBRE	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL TIPO DE INSTALACIÓN, ACOPIO U OBRA
Mina	Labores Subterráneas	Rampa San Marcelo	M01	Labor minera que servía de ingreso principal a la mina Palca XI
Residuos Mineros	Labores Superficiales	Botadero de desmonte	R01	Zona de material disperso, con contenido metálico reaprovechable, localizados principalmente en tres sectores.
	Labores Superficiales	Depósito de relaves	R02	Depósito de relaves

Infraestructura Anexa	Instalaciones Superficiales	Restos de infraestructura y obras civiles	I01	Construcciones de obras civiles abandonadas que formaron parte de la planta concentradora, campamento de obreros y empleados, restos de tanques, canales, etc.
Cuerpo de agua	Laguna	Laguna Choquene	L01	Laguna contaminada debido a los drenajes ácidos provenientes de la rampa San Marcelo y aguas de escorrentía que discurren a través de la relavera.
Bofedal	Bofedal	Bofedal aguas abajo laguna Choquene	B01	Bofedal impactado por aguas ácidas proveniente de los PAMs
Cauce Perturbado	Quebrada y cauce de río	Quebrada y cauce de río Choquene	C01	Quebrada aguas debajo de la laguna Choquene y el Bofedal.

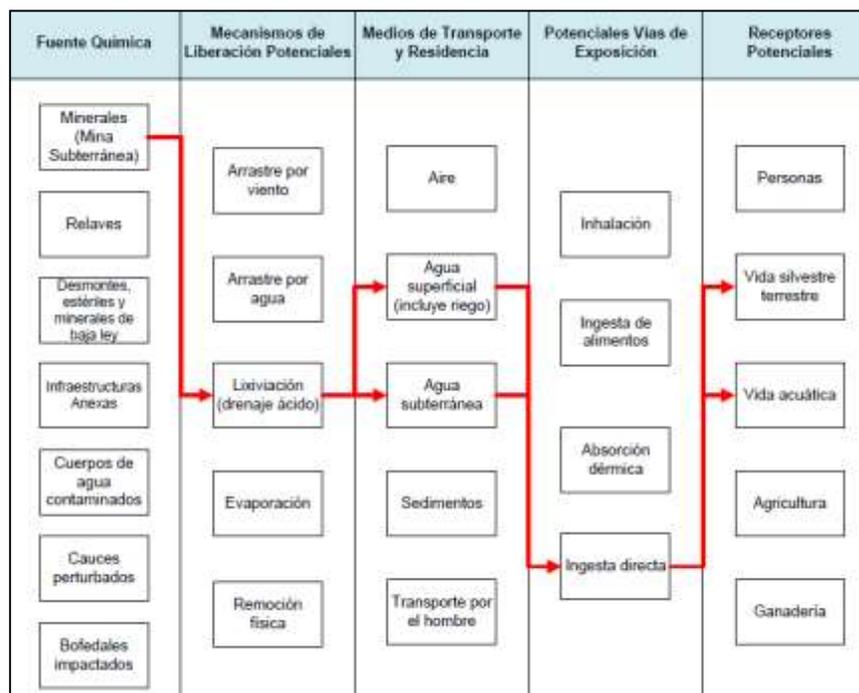
3. Resultados

3.1 Formulación del problema

En la rampa San Marcelo, los minerales existentes en el interior de la mina, generalmente sulfuros, los que al ser expuestos al oxígeno del aire y el agua forman el drenaje ácido de mina que es el efluente que sale por la bocamina. Este efluente al

ingresar a la laguna Choquene, impacta en la calidad del agua de la misma; también probablemente debe haber infiltración en las aguas subterráneas de la zona. Este efluente puede ser bebido por animales silvestres y/o impactar en el ecosistema acuático de la laguna. El modelo conceptual de contaminación se muestra en la Fig. 2.

Figura 2. Modelo de contaminación de la bocamina San Marcelo M01



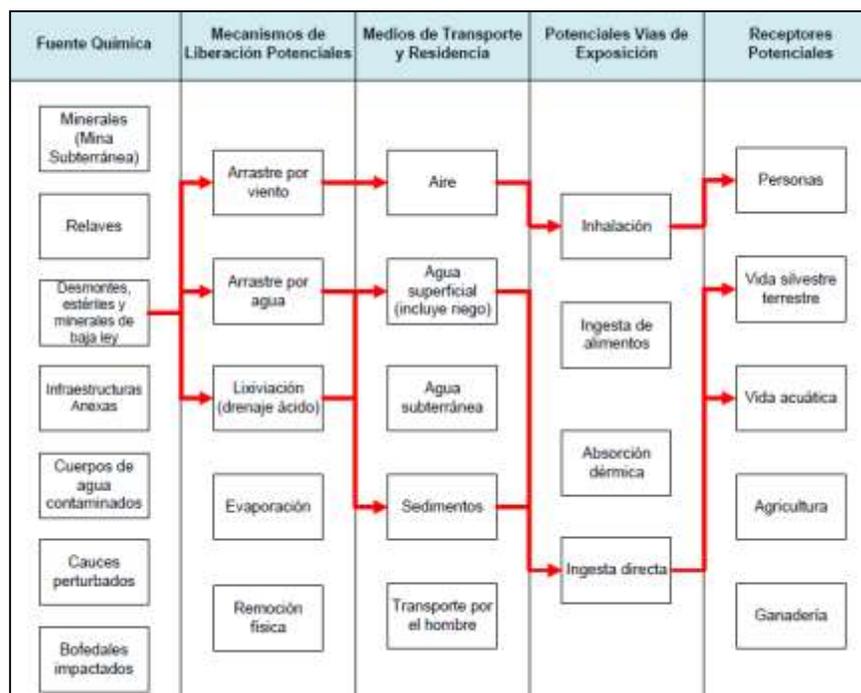
Los desmontes están constituidos principalmente por minerales de baja ley y material estéril, que se ha depositado paulatinamente en zonas cercanas a las labores mineras. Las partículas que se encuentran en la superficie son liberadas y transportadas a otros sitios por acción del viento y de la lluvia. Los minerales por acción del agua y del oxígeno se lixivian, generando aguas ácidas

que pueden disolver los metales pesados existentes en el depósito. Las partículas pueden ser inhaladas por personas y animales que se encuentran en áreas cercanas a los depósitos. De la misma manera las aguas pueden ser consumidas por los animales silvestres e impactar ecosistemas cercanos (Fig 3)

El modelo de contaminación del depósito de relaves es similar al del botadero de desmonte, con la diferencia, que, en el caso del depósito de relaves, este puede impactar la calidad de las aguas subterráneas debido a la lixiviación de los relaves y la infiltración a la napa freática de la zona, debido a que no existe impermeabilización en la base del depósito de relaves.

Existen restos de infraestructura industrial y obras civiles abandonadas, que pueden ser erosionadas por acción del viento y de la lluvia y transportadas a otros sitios. Las partículas pueden ser inhaladas por personas y animales que se encuentran en áreas cercanas a los depósitos. De la misma manera las aguas pueden ser consumidas por los animales silvestres e impactar ecosistemas cercanos.

Figura 3. Modelo de contaminación del Botadero de Desmonte R01



La laguna Choquene ha sido impactada directamente por la presencia de botaderos de desmontes, deposición de los relaves y los efluentes de la mina durante el periodo de operación de la mina y su posterior abandono. El agua de la laguna presenta niveles bajos de pH, los que alimentan al humedal contiguo y dan origen al río Choquene, los que son impactados negativamente.

En la zona de estudio, los humedales son utilizados para el pastoreo del ganado camélido, pero debido a su contaminación esta actividad cada vez disminuye.

El agua que corre por la quebrada Choquene es principalmente ácida, lo que ha ocasionado el colapso de la vida acuática en la mayor parte de

su recorrido, sin embargo, se ha observado que algunos tributarios disminuyen la acidez del agua de manera gradual, pues hay zonas donde las aguas pasan por afloramiento de rocas de características básicas, como los carbonatos. Las aguas del río Choquene fueron utilizadas para actividades como la ganadería.

3.2 Identificación y registro de los escenarios de peligro

Una vez formulados los modelos de contaminación, se identificó los escenarios de peligro por contaminación (EPC), pudiendo observarse que un mismo componente puede presentar uno o más escenarios de peligro.

3.3 Estimación del índice de probabilidad

Para estimar el índice de probabilidad, se utilizó las guías que correspondían a cada escenario de peligro. La asignación de categorías es de tipo cualitativo y las clases del índice de probabilidad posibles a asignar son: “despreciable”, “bajo”, “medio” y “alto”. Un índice de probabilidad “despreciable” corresponde a aquellos casos en que, o bien la concentración de sustancias peligrosas en los PAM es insignificante; o bien no existe posibilidad de que las sustancias químicas

nocivas puedan trasladarse por el aire, el agua o el suelo; o bien éstas no alcanzarían más allá que en calidad de trazas hasta los receptores. El índice de probabilidad “alto” se reserva para aquellos casos en que se presume la existencia de concentraciones elevadas de las sustancias químicas de interés en los PAM, siendo posible la movilización de éstas a través del aire, el suelo o el agua, con distancias hasta los receptores menores y en circunstancias en que la exposición es frecuente.

Tabla 2. Escenarios de Peligro por Contaminación

TIPO DE INSTALACIÓN O COMPONENTE	NOMBRE	CÓDIGO	CÓDIGO ESTÁNDAR EPC	DESCRIPCIÓN DEL EPC (según el manual)	CÓDIGO EPC	DESCRIPCIÓN DEL EPC
Labores Subterráneas	Bocamina San Marcelo (rampa)	M01	EPC 1	Presencia de drenaje que podría contaminar los recursos hídricos superficiales, afectando a personas, medio ambiente o actividades económicas.	M01EPC 1	Bocamina inundada con drenaje ácido de mina.
		M01	EPC 2	Infiltración de drenaje que podría contaminar los recursos hídricos subterráneos, afectando a personas, medio ambiente o actividades económicas.	M01EPC 2	Bocamina inundada con drenaje ácido de mina con nivel freático cercano a superficie del suelo.
Labores Superficiales	Botadero de desmonte	R01	EPC 1	Presencia de drenaje que podría contaminar los recursos hídricos superficiales, afectando a personas, medio ambiente o actividades económicas.	R01EPC 1	Botadero de desmonte sin canales de coronación, sistemas de drenaje superficial y expuesto a lluvias.
		R01	EPC 8	Movilización de material particulado por acción del viento, que podría afectar por inhalación a personas, medio ambiente o actividades económicas.	R01EPC 8	Botadero de desmonte expuesto a la intemperie sin cobertura de vegetación
Labores Superficiales	Depósito de relaves	R02	EPC 1	Presencia de drenaje que podría contaminar los recursos hídricos superficiales, afectando a personas, medio ambiente o actividades económicas.	R02EPC 1	Depósito de relaves sin canales de coronación, sistemas de drenaje y con acumulación de agua en parte de la superficie.
		R02	EPC 2	Infiltración de drenaje que podría contaminar los recursos hídricos subterráneos, afectando a personas, medio ambiente o actividades económicas.	R02EPC 2	Depósito de relaves sin canales de coronación y sistemas de impermeabilización en la base.
		R02	EPC 8	Movilización de material particulado por acción del viento, que podría afectar por inhalación a personas, medio ambiente o actividades económicas.	R02EPC 8	Depósito de relaves expuesto a la intemperie sin cobertura de vegetación
Instalaciones Superficiales	Restos de infraestructura y obras civiles	I01	EPC 4	Movilización de residuos peligrosos remanentes en estructuras, equipos o en suelo contaminado, que podrían contaminar los recursos hídricos superficiales, afectando a personas, medio ambiente o actividades económicas.	I01EPC 4	Restos de infraestructura sin sistemas de drenaje y canales de coronación.

Evaluación de riesgos de pasivos ambientales mineros en la comunidad de Condoraque - Puno

		I01	EPC 6	Movilización de residuos peligrosos remanentes en estructuras, equipos o en suelo contaminado, que podrían contaminar el suelo y afectar por ingestión o contacto dérmico a las personas, medio ambiente o actividades económicas.	I01EPC 6	Área sin cobertura de protección.
		I01	EPC 8	Movilización de material particulado por acción del viento, que podría afectar por inhalación a personas, medio ambiente o actividades económicas.	I01EPC 8	Área sin cobertura de protección contra vientos.
Laguna	Laguna Choquene	L01	EPC 1	Presencia de drenaje que podría contaminar los recursos hídricos superficiales, afectando a personas, medio ambiente o actividades económicas.	L01EPC 1	Laguna con drenaje hacia el río Choquene, receptora de agua de mina, escorrentías y efluentes del depósito de relaves, botadero de desmonte y restos de obras civiles
		L01	EPC 2	Infiltración de drenaje que podría contaminar los recursos hídricos subterráneos, afectando a personas, medio ambiente o actividades económicas.	L01EPC 2	Las aguas subterráneas son producto de la infiltración de las aguas de los cuerpos de agua superficiales
Bofedal	Bofedal aguas abajo laguna Choquene	B01	EPC 9	Presencia de aguas contaminadas en el humedal que podrían ser empleadas para bebida u otros usos (riego, baño, bebida de animales).	B01EPC 9	Los análisis de la calidad de agua muestran bajo pH y alta conductividad.
		B01	EPC 10	Desarrollo de actividades en la superficie del humedal contaminado, que podrían afectar a las personas, medio ambiente o actividades económicas por inhalación, ingestión accidental o contacto dérmico.	B01EPC 10	Proporcionan alimento permanente a la fauna de la zona en épocas de sequía.
Quebrada y cauce de río	Quebrada y cauce de río Choquene	C01	EPC 1	Presencia de drenaje que podría contaminar los recursos hídricos superficiales, afectando a personas, medio ambiente o actividades económicas.	C01EPC 1	Los análisis de la calidad de agua muestran bajo pH y alta conductividad.
		C01	EPC 11	Movilización de residuos peligrosos remanentes en sedimentos contaminados, que podrían contaminar el suelo y afectar por ingestión o contacto dérmico a las personas, medio ambiente o actividades económicas.	C01EPC 11	Coloración amarillo rojiza (presencia de hierro y otros) de los sedimentos, grava y piedras del cauce del río.
		C01	EPC 8	Movilización de material particulado por acción del viento, que podría afectar por inhalación a personas, medio ambiente o actividades económicas.	C01EPC 8	Superficie del cauce expuesto a la intemperie en épocas de sequía.

Tabla 3. Índice de probabilidad de ocurrencia del escenario de peligro

NOMBRE INSTALACIÓN O COMPONENTE	CÓDIGO EPC	DESCRIPCIÓN DEL EPC	ÍNDICE DE PROBABILIDAD	JUSTIFICACIÓN
Bocamina San Marcelo (rampa)	M01EPC 1	Presencia de drenaje que podría contaminar los recursos hídricos superficiales, afectando a personas, medio ambiente o actividades económicas.	ALTO	El efluente (drenaje ácido de mina) ingresa a la laguna Choquene y es permanente durante todo el año.
Bocamina San Marcelo (rampa)	M01EPC 2	Infiltración de drenaje que podría contaminar los recursos hídricos subterráneos, afectando a personas, medio ambiente o actividades económicas.	ALTO	Napa freática a nivel de la bocamina, en la actualidad se encuentra inundada.
Botadero de desmonte	R01EPC 1	Presencia de drenaje que podría contaminar los recursos hídricos superficiales, afectando a personas, medio ambiente o actividades económicas.	MEDIO	El drenaje ingresa a la laguna Choquene durante la época de lluvias.
Botadero de desmonte	R01EPC 8	Movilización de material particulado por acción del viento, que podría afectar por inhalación a personas, medio ambiente o actividades económicas.	BAJO	El material es transportado principalmente en la época de vientos, el contenido de minerales es mínimo.
Depósito de relaves	R02EPC 1	Presencia de drenaje que podría contaminar los recursos hídricos superficiales, afectando a personas, medio ambiente o actividades económicas.	MEDIO	El drenaje ingresa a la laguna Choquene durante la época de lluvias.
Depósito de relaves	R02EPC 2	Infiltración de drenaje que podría contaminar los recursos hídricos subterráneos, afectando a personas, medio ambiente o actividades económicas.	BAJO	El depósito de relaves no tiene una base impermeabilizada que impida que los lixiviados ingresen a las aguas subterráneas.
Depósito de relaves	R02EPC 8	Movilización de material particulado por acción del viento, que podría afectar por inhalación a personas, medio ambiente o actividades económicas.	MEDIO	El relave es transportado a zonas cercanas, donde existen evidencias, principalmente en la época de vientos, el contenido de minerales es mayor que el desmonte.
Restos de infraestructura y obras civiles	I01EPC 4	Movilización de residuos peligrosos remanentes en estructuras, equipos o en suelo contaminado, que podrían contaminar los recursos hídricos superficiales, afectando a personas, medio ambiente o actividades económicas.	BAJO	Presencia de restos metálicos y otros que pueden lixiviar y ser transportados a la Laguna Choquene.
Restos de infraestructura y obras civiles	I01EPC 6	Movilización de residuos peligrosos remanentes en estructuras, equipos o en suelo contaminado, que podrían contaminar el suelo y afectar por ingestión o contacto dérmico a las personas, medio ambiente o actividades económicas.	MEDIO	Presencia de restos metálicos y otros que pueden lixiviar y contaminar el suelo.
Restos de infraestructura y obras civiles	I01EPC 8	Movilización de material particulado por acción del viento, que podría afectar por inhalación a personas, medio ambiente o actividades económicas.	BAJO	El material particulado existente en el área puede ser transportado a zonas cercanas.
Laguna Choquene	L01EPC 1	Presencia de drenaje que podría contaminar los recursos hídricos superficiales, afectando a personas, medio ambiente o actividades económicas.	ALTO	La laguna Choquene alimenta al río del mismo nombre durante todo el año.
Laguna Choquene	L01EPC 2	Infiltración de drenaje que podría contaminar los recursos hídricos subterráneos, afectando a personas, medio ambiente o actividades económicas.	BAJO	La laguna Choquene se encuentra en la cabecera de la micro cuenca, por lo que las aguas de la laguna pueden estar ingresando a la napa freática.
Bofedal aguas abajo laguna Choquene	B01EPC 9	Presencia de aguas contaminadas en el humedal que podrían ser empleadas para bebida u otros usos (riego, baño, bebida de animales).	ALTO	Las aguas circulan entre el bofedal y discurren hacia el río Choquene.

Bofedal aguas abajo laguna Choquene	B01EPC 10	Desarrollo de actividades en la superficie del humedal contaminado, que podrían afectar a las personas, medio ambiente o actividades económicas por inhalación, ingestión accidental o contacto dérmico.	ALTO	El bofedal es visitado por fauna silvestre y por ganado camélido de los pobladores de la zona
Quebrada y cauce de río Choquene	C01EPC 1	Presencia de drenaje que podría contaminar los recursos hídricos superficiales, afectando a personas, medio ambiente o actividades económicas.	MEDIO	El caudal del río varía durante todo el año.
Quebrada y cauce de río Choquene	C01EPC 11	Movilización de residuos peligrosos remanentes en sedimentos contaminados, que podrían contaminar el suelo y afectar por ingestión o contacto dérmico a las personas, medio ambiente o actividades económicas.	MEDIO	El caudal del río Choquene en época de lluvias arrastra sedimentos que son depositados aguas abajo
Quebrada y cauce de río Choquene	C01EPC 8	Movilización de material particulado por acción del viento, que podría afectar por inhalación a personas, medio ambiente o actividades económicas.	MEDIO	Los sedimentos y componentes de la base del río, en épocas de estiaje quedan sin agua, al secarse son trasladados por el viento a las zonas cercanas.

3.4 Estimación de la severidad de las consecuencias

La severidad de las consecuencias se evaluó considerando 5 tipos de receptores posibles: personas, vida acuática, vida silvestre terrestre, agricultura y ganadería. Para cada escenario de peligro, la severidad de las consecuencias está determinada por la cantidad de receptores presentes dentro del área del proyecto. La

3.5 Registro de riesgos por contaminación

Para determinar la magnitud de riesgo de cada escenario de peligro se combinó los dos factores

evaluación conduce entonces a disponer de un valor de la severidad de las consecuencias para cada posible receptor, y para cada escenario de peligro. Los valores que se asignan son también cualitativos, como ocurría en el caso del IP, y comprenden las siguientes categorías: despreciable, baja, moderada, alta y catastrófica. Una asignación de “despreciable” es asignada para los casos en que no existen. Ver tabla 4.

involucrados, probabilidad de ocurrencia y severidad de las consecuencias, en la matriz de riesgos.

Tabla 5. Riesgos por Contaminación

		SEVERIDAD DE LAS CONSECUENCIAS			
INDICE PROBABILIDAD	DESPRECIABLE (A)	BAJA (B)	MODERADA (C)	ALTA (D)	CATASTROFICA (E)
ALTO (4)	M01EPC1ag, M01EPC1ga, M01EPC2pe	M01EPC1pe, M01EPC2va, M01EPC2vt, M01EPC2ag, M01EPC2ga, L01EPC1pe, L01EPC1ag, L01EPC1ga, B01EPC9ag, B01EPC10ag	M01EPC1vt, L01EPC1vt, B01EPC9pe, B01EPC9vt, B01EPC9ga, B01EPC10pe, B01EPC10va, B01EPC10vt, B01EPC10ga	M01EPC1va, L01EPC1va, B01EPC9va	

<p>MEDIO (3)</p>	<p>I01EPC6ag, I01EPC6ga</p>	<p>R01EPC1pe, R01EPC1va, R01EPC1vt, R01EPC1ag, R01EPC1ga, R02EPC1pe, R02EPC1va, R02EPC1vt, R02EPC1ag, R02EPC1ga, R02EPC8pe, R02EPC8ag, R02EPC8ga, I01EPC6pe, I01EPC6va, I01EPC6vt, C01EPC1ag C01EPC11va, C01EPC11vt, C01EPC11ag, C01EPC11ga, C01EPC8va, C01EPC8vt, C01EPC8ag</p>	<p>R02EPC8va, R02EPC8vt, C01EPC1pe, C01EPC1va, C01EPC1vt, C01EPC1ga, C01EPC11pe, C01EPC8pe, C01EPC8ga</p>		
<p>BAJO (2)</p>	<p>R02EPC2pe, R02EPC2va, R02EPC2vt, R02EPC2ag, R02EPC2ga, I01EPC4ag, I01EPC4ga, I01EPC8ag, I01EPC8ga, L01EPC2pe, L01EPC2va, L01EPC2vt, L01EPC2ag, L01EPC2ga</p>	<p>R01EPC8pe, R01EPC8ag, R01EPC8ga, I01EPC4pe, I01EPC4va, I01EPC4vt, I01EPC8pe, I01EPC8va, I01EPC8vt</p>	<p>R01EPC8va, R01EPC8vt</p>		
<p>DESPRECIABLE (1)</p>					

4. Discusión

La presencia y/o generación de aguas ácidas, que pueden contaminar los recursos hídricos superficiales, procedentes de la rampa San Marcelo, los depósitos de desmonte y relaves, la laguna Choquene y el río Choquene son los escenarios de contaminación de mayor probabilidad de ocurrencia. El riesgo por contaminación de la laguna Choquene por el drenaje que fluye de la rampa San Marcelo tiene una alta probabilidad de ocurrencia y la severidad de las consecuencias con respecto a la vida acuática es alta y moderada con respecto a la vida terrestre. El drenaje que fluye de la rampa San Marcelo y la infiltración del mismo en la napa freática tiene índices de probabilidad de ocurrencia alto, pero sus consecuencias son: alta con respecto a la vida acuática, moderada con respecto a la vida terrestre, bajo con respecto a las

personas y despreciable con respecto a la agricultura y la ganadería, pues no se usa para dichas actividades. Las aguas que fluyen de la laguna Choquene y originan el río del mismo nombre son aguas con pH de 2,7 promedio, que impiden la vida acuática en el bofedal y el río Choquene próximo a la laguna por lo que se califica con riesgo de probabilidad de ocurrencia alta y consecuencia alta. El bofedal presenta impactos negativos de los efluentes ácidos que han discurrido sobre el mismo proveniente de la laguna Choquene, presenta un riesgo alto de contaminación. La contaminación de las aguas subterráneas debido a los depósitos de desmontes y relaves presenta una probabilidad de ocurrencia y consecuencia baja.

El riesgo por contaminación de las actividades que se desarrollan en la superficie del bofedal evaluado tiene un índice de probabilidad alto y la

severidad de las consecuencias con respecto a las personas, vida acuática, vida terrestre y el ganado es moderado.

El depósito de relaves y el botadero de desmonte presentan índices de riesgo de contaminación con un índice de probabilidad de ocurrencia bajo y con consecuencias bajas sobre las personas, el ambiente y las actividades económicas.

Los restos de infraestructura y obras civiles presentan riesgos bajos de ocurrencia con consecuencias bajas y en algunos casos despreciables.

Finalmente, la rampa San Marcelo, la laguna Choquene y el Bofedal son los PAM que más riesgo presentan para la salud de las personas, el ambiente y el desarrollo local de la comunidad de Condoraque,

5. Conclusiones

La complejidad de los PAM hace imposible que puedan ser descritos con un único modelo conceptual, por ello, fue necesario realizar la división de los mismos en siete (07) distintos tipos, para poder emplear modelos adecuados y específicos para la evaluación de cada pasivo ambiental. La utilidad de un modelo o de una metodología no depende del hecho que sea cuantitativo o cualitativo, sino depende esencialmente de su adecuación a la realidad de los receptores y del PAM analizado.

La opinión de los expertos no puede ser reemplazada por ningún otro método de evaluación de riesgos, se requiere de la experiencia y el conocimiento de ellos para discriminar la información, darle consistencia y orden, para después usarla metodológicamente e interpretar los resultados, sacar conclusiones y presentar un documento útil para la(s) persona(s) que tomará(n) decisiones. Las dificultades de valoración de los PAM crecen desde los factores cuantificables directamente hasta los factores valorados cualitativamente con criterios subjetivos.

Los resultados obtenidos para los PAM: rampa San Marcelo, laguna Choquene y el bofedal estudiados en la presente evaluación deberán ser complementadas con evaluación de riesgo detallados con respecto a personas, vida terrestre, vida acuática y la actividad ganadera; estos

estudios deben permitir realizar una predicción numérica de cada uno de los riesgos individuales (a diferencia de la predicción lingüística realizada en la evaluación de riesgo simple), que luego deberá agruparse para obtener una predicción numérica del riesgo total. También se debe realizar un estudio de restauración detallado de los bofedales debido que son fuente fresca para la vida terrestre en época de estiaje y posiblemente un filtro para la movilización de los metales pesados que se encuentran en solución en las aguas ácidas.

Finalmente, se debe realizar estudios de toxicología ambiental en las personas y ganado de la zona, utilizando procedimientos científicos validados en situaciones similares en otras zonas del país o en el extranjero.

Agradecimiento.

Esta investigación se realizó en el marco de un proyecto de investigación financiado por la Universidad Nacional del Altiplano.

Referencias Bibliográficas:

- [1] Sistema de Información Ambiental Regional Puno, «Mapa Metalogénico del Departamento de Puno», 2014. [En línea]. Disponible en: <http://siar.regionpuno.gob.pe/index.php?action=verMapa&idElementoInformacion=305&verPor=tema&idTipoElemento=41&idTipoFuente=&idfuelleinformacion=61>. [Accedido: 05-ene-2015].
- [2] M. Aldenderfer, N. Craig, R. Speakman, y R. Popelka-Filcoff, «Four-thousand-year-old gold artifacts from the Lake Titicaca basin, southern Peru», *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 105, n.º 13, pp. 5002-5005, 2008.
- [3] M. Moscairo, «Operaciones de perforación en la Unidad Palca 11 de la Cia. Minera Regina S.A.», Universidad Nacional del Altiplano, Puno, 1998.
- [4] A. Chávez, G. Salas, J. Cuadros, y E. Gutiérrez, «Geología de los cuadrángulos de Putina y La Rinconada 30-x, 30-y – [Boletín A 66]», Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico - INGEMMET, Lima, 1996.

- [5] R. Cidu, C. Dadea, P. Desogus, L. Fanfani, P. P. Manca, y G. Orrù, «Assessment of environmental hazards at abandoned mining sites: A case study in Sardinia, Italy», *Appl. Geochemistry*, vol. 27, n.º 9, pp. 1795-1806, sep. 2012.
- [6] E. Alberruche, J. Arranz-González, R. Rodríguez, y L. Vadillo, *Manual para la evaluación de riesgos de instalaciones de residuos de industrias extractiva cerradas o abandonadas*, 1.ª ed. Madrid: IGME, 2014.
- [7] E. Hamilton, «Environmental variables in a holistic evaluation of land contaminated by historic mine wastes: a study of multi-element mine wastes in West Devon, England using arsenic as an element of potential concern to human health», *Sci. Total Environ.*, vol. 249, n.º 1-3, pp. 171-221, abr. 2000.
- [8] M. Aparicio, «Los riesgos de la contaminación minera y su impacto en los niños», *Tinkazos*, vol. 12, n.º 27, pp. 83-101, 2009.
- [9] J. Mejía, L. Carrizales, V. Rodríguez, M. Jiménez, y F. Díaz, «Un método para la evaluación de riesgos para la salud en zonas mineras», *Salud Publica Mex.*, vol. 41, n.º 2, pp. 132-140, 1999.
- [10] E. Weislo, D. Ioven, R. Kucharski, y J. Szdzuj, «Human health risk assessment case study: an abandoned metal smelter site in Poland», *Chemosphere*, vol. 47, n.º 5, pp. 507-515, may 2002.
- [11] Muqui, «Condoraque, el lugar donde las aguas queman», 2011. [En línea]. Disponible en: <http://www.muqui.org/component/content/article/104-casos-emblematicos/casos-emblematicos1/3752-condoraque-el-lugar-donde-las-aguas-queman>. [Accedido: 12-abr-2012].
- [12] O. Bermeo, «Signos», *Voces de Condoraque (Puno) en la ONU*, Puno, p. 47, mar-2010.
- [13] S. Vector Perú, «Plan de cierre de pasivos ambientales – Unidad minera Regina: Empresa Minera Sillustani SA», 2006.
- [14] A. Oblasser y E. Chaparro, *Estudio comparativo de la gestión de los pasivos ambientales mineros en Bolivia, Chile, Perú y Estados Unidos*, 1.ª ed. Santiago de Chile: Naciones Unidas, 2008.
- [15] M. Figueroa, «Evaluación preliminar de riesgos medioambientales de faenas mineras abandonadas paralizadas mediante sig en la II región de Antofagasta Chile», Universidad de Chile, 2011.
- [16] M. Arango, «Requerimientos para el diseño de una metodología que permita estimar el valor de pasivos ambientales mineros», Universidad Nacional de Colombia, 2011.
- [17] I. Hasheela *et al.*, «Risk assessment methodology for shut-down and abandoned mine sites in Namibia», *J. Geochemical Explor.*, vol. 144, pp. 572-580, sep. 2014.
- [18] Golder Associates, *MANUAL DE EVALUACIÓN DE RIESGOS DE FAENAS MINERAS ABANDONADAS O PARALIZADAS (FMA/P)*, 1.ª ed. Santiago de Chile, 2008.
- [19] P. Zorogastúa-Cruz, R. Quiroz, y J. Garatuza-Payan, «Dinamica de los bofedales en el altiplano peruano-boliviano», *Rev. Latinoam. Recur. Nat.*, vol. 8, n.º 2, pp. 63-75, 2012.

Artículo recibido en: 09.08.2019

Artículo aceptado: 16.09.2019