

EVALUACIÓN AMBIENTAL PRELIMINAR EN LOS CAMPAMENTOS DE DIEGO DE ALMAGRO, COPIAPÓ Y TIERRA AMARILLA PRÓXIMOS A SITIOS DE MINERÍA METÁLICA

PRELIMINARY ENVIRONMENTAL ASSESSMENT ON CAMPAMENTOS OF DIEGO DE ALMAGRO, COPIAPÓ Y TIERRA AMARILLA NEAR MINING TAILINGS

Maritza Calderón^{1,3}, Francisco Miranda^{2,4}

RESUMEN

La minería moviliza una gran cantidad de materiales y genera un monto significativo residuos rocosos, cuya disposición final constituye un relave. Estos sitios no son en sí mismos tóxicos, pero sus componentes pueden reaccionar químicamente y provocar contaminación. En las comunas de Copiapó, Tierra Amarilla y Diego de Almagro se concentran 136 de los 740 relaves catastrados al 2018. Muchos de estos depósitos se emplazan en las cercanías de las ciudades, notándose una especial situación de vulnerabilidad en las familias que viven en campamentos. Se buscó evaluar ambientalmente el territorio de estos asentamientos, mediante una matriz de identificación y evaluación de aspectos e impactos ambientales, según la normativa ISO 14001. Esta evaluación se complementa con un análisis de la localización y de respuesta espectral de dichos relaves. Los resultados indican que existe un impacto ambiental significativo, observándose como principales fuentes de contaminación la suspensión de material particulado por la erosión del viento, la posible volatilización de mercurio, la pérdida de la estructura y derrame del relave. Existen 52 relaves

ABSTRACT

Mining activity involves large amount of rock-moving and generates significant rock waste. The final disposal of the latter are called mining tailing. These places are not toxic by themselves, but their components can react chemically and lead to pollution. Communes of Copiapó, Tierra Amarilla y Diego de Almagro have 136 of 740 mining tailings surveyed in 2018. Many of these deposits are located close to urban areas, and households living in campamentos are especially vulnerable to mining tailings effects. This paper aims to assess environmentally the territory of these settlements, through an identification and evaluation matrix of environmental aspects and effects according to ISO 14001 standard. Also, mining tailings were analyzed by their location and spectral response. Results confirm a significant environmental impact in this area, and main source of pollution are: matter particle in the air from wind erosion on mining tailings, a possible volatilization of mercury, loss of structure and tailing spillage. There are 52 mining deposits are poorly located because of their proximity to environmental-sensible elements. Active

¹(Chile) Geógrafa. Mg. Gestión Ambiental. Servicio Aerofotogramétrico de la Fuerza Aérea de Chile. Email: maritza.calderon@saf.cl

²(Chile) Geógrafo. Centro de Investigación Social de TECHO-Chile. Email: francisco.miranda@techo.org

³(Chile) Geographer. Mg. Environmental Management. Servicio Aerofotogramétrico de la Fuerza Aérea de Chile. Email: maritza.calderon@saf.cl

⁴(Chile) Geographer. Centro de Investigación Social de TECHO-Chile. Email: francisco.miranda@techo.org.

mal localizados debido a su cercanía a elementos ambientales sensibles. Los tranques de relave de cobre activos muestran sensibilidad a indicadores de teledetección como NDVI y FE2+.

PALABRAS CLAVE: *Campamentos; relaves; contaminación*

Recibido: 05/11/2018

Aceptado: 14/12/2018

mining tailings of copper are clearly delimited by using remote sensing NDVI and FE2+ indexes.

KEY WORDS: *Campamentos; mining tailings; pollution.*

Received: 05/11/2018

Accepted: 14/12/2018

INTRODUCCIÓN

La actividad minera implica mover mucho material estéril; roca finamente molida desde la cual los minerales deseados han sido extraídos mediante el uso de reactivos químicos. Los relaves se disponen en un tranque o depósito emplazados en desmontes en las cercanías de las minas⁵. Este residuo toma la forma de una solución acuosa compuesta al menos en un 50% de agua. Su nivel de humedad se ve modificado por el nivel de lluvias y las pérdidas de agua por evaporación que determine el clima de la zona.

Cuando los relaves son depositados la fracción sólida se asienta, formando una playa que favorece que la solución acuosa sea decantada y depositada o reciclada (CENMA, 2011). Todas las estructuras de los relaves son proclives a las filtraciones, que pueden generar la contaminación de aguas subterráneas y de superficie, o pueden presentar fallas catastróficas como el colapso del muro de contención del relave.

Las comunas de Diego de Almagro, Copiapó y Tierra Amarilla, ubicadas en la Región de Atacama, se caracterizan por la explotación minera de cobre, oro y plata desde el siglo XIX hasta la actualidad. Actualmente en estas tres comunas existen 136 relaves mineros (SERNAGEOMIN, 2018).

Estos relaves están sometidos a mecanismos físicos y químicos que pueden causar descargas de contaminantes hacia otros componentes ambientales. Dichos procesos físicos dan paso a fuentes secundarias de contaminación, las cuales se constituyen a su vez en rutas que favorecen la migración de los contaminantes hacia otros receptores. De esta manera, resulta preocupante la cercanía de estos relaves a otros elementos sensibles del entorno, tales como cultivos agrícolas y centros poblados, dado el potencial contaminante de estos depósitos mineros.

La producción silvoagropecuaria se desarrolló fuertemente en esta región a partir de la década de los 80, gracias a la introducción de técnicas de riego por goteo, siendo actualmente la producción de uva de

mesa de exportación la segunda actividad económica más relevante en Atacama (CENMA, 2011).

El crecimiento de la población, especialmente en Copiapó ha impulsado una expansión urbana, tanto de viviendas formales como de campamentos. El total de viviendas particulares ocupadas en esta comuna creció en un 72,8% entre los censos 2002 y 2017 (Observatorio Urbano, 2018), mientras que la superficie ocupada por campamentos aumentó de 21,6 ha a 57,4 ha en el periodo 2011-2017 (Calderón y Miranda, 2017).

Este crecimiento ha expandido el área urbana, acercándose hacia antiguos depósitos de minerales. Los campamentos, al situarse especialmente en las periferias, se encuentran particularmente expuestos a estos relaves. Por ejemplo, se contabilizan 28 relaves a menos de 1 km de campamentos en las Diego de Almagro, Copiapó y Tierra Amarilla. Al ampliar el radio a 2 km, la cifra aumenta a 43 relaves.

⁵ Debido a que el transporte es un factor económico de elevado precio.

⁶ Dentro de las condiciones físicas que caracterizan a este grupo de la población se encuentran la materialidad de las viviendas, que resultan predominantemente precarias, junto a una carencia en el acceso a los servicios básicos de electricidad, agua potable y alcantarillado. En cuanto a las condiciones sociales se pueden mencionar una menor escolaridad y una alta informalidad laboral de los jefes de hogar. Finalmente, con respecto a las condiciones económicas que aumentan la vulnerabilidad de la población de campamentos se destacan los bajos ingresos y limitados medios de sustento (TECHO-Chile, 2015).

⁷ Aspecto: elemento que, dentro de la actividad, genera el contacto con el medioambiente. Ejemplo: generación de gases, generación de humos, consumo de agua, otros. Impacto: probabilidad del cambio ambiental. Ejemplo: alteración de la calidad, agotamiento del recurso natural, efecto a la salud, otros. Medio impacto: elemento del medio ambiente que se ve afectado por el impacto ambiental. Ejemplo: agua, aire, flora, fauna, recursos, medio humano, otros. Normativa Aplicable: Norma o reglamento que aplica de acuerdo al medio impactado (ISO 14001).

⁸ Aquellos impactos ambientales identificados que tengan una escala de magnitud alta respecto a su grado de incumplimiento con requisitos legales ambientales aplicables, serán considerados automáticamente como impactos significativos, es decir, serán aspectos ambientales significativos.

Esta cercanía entre campamentos y relaves amerita realizar una evaluación preliminar del estado ambiental de estos territorios y su impacto a las poblaciones más vulnerables. Además, surge la necesidad de visibilizar las distintas problemáticas ambientales que enfrentan los pobladores de asentamientos precarios, quienes reúnen diversas condiciones físicas, sociales y económicas que los exponen a amenazas ambientales y disminuyen su capacidad de recuperarse una vez ocurridos los desastres.

Entenderemos por evaluación ambiental a un diagnóstico de los aspectos e impactos ambientales presentes en el territorio a partir de la actividad minera, principalmente a los residuos mineros presentes (ISO 14001). El impacto dependerá del proceso, de la ubicación de los relaves y su cercanía a centros poblados, y del manejo que se haga de cada uno de los procesos en sus distintas fases (Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de depósitos de relaves DS 248/2007 del Ministerio de Minería). Esta evaluación ambiental estará acompañada de un análisis de localización de los relaves y de la respuesta espectral de estos depósitos a indicadores ambientales de teledetección con el fin de identificar zonas prioritarias para una profundización del estudio de los impactos ambientales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Matriz de identificación y evaluación de aspectos e impactos ambientales

Para identificar y evaluar los aspectos ambientales asociados a los relaves mineros y su cercanía a los campamentos, se elaboró una matriz de evaluación y control de los aspectos ambientales, la cual se confecciona en relación a los probables impactos que se pueden generar dentro de la actividad, según el estándar ISO 14001. Esta matriz se compone de: Aspecto, Impacto, Medio impactado y Normativa aplicable. A su vez, los aspectos ambientales se dividen en Probabilidad y Consecuencia del impacto, cada uno con sus propios criterio de evaluación (Ver Tabla

Nº1). Por cada criterio se asigna una valoración del 1 al 5, siendo el valor más alto asociado con la situación más desfavorable para el ambiente.

Tabla Nº1
Criterios de evaluación de aspectos ambientales

Probabilidad	Consecuencia
Ocurrencia	Severidad
Frecuencia	Límite geográfico
Control	Estatus regulatorio
Partes interesadas	Duración recuperación

Fuente: ISO 14001.

Los valores de cada criterio de evaluación se sumaron para Probabilidad y Consecuencia, siendo luego estas clasificadas en valores Bajo, Medio y Alto. El grado de significación de cada impacto se obtuvo según la conjugación de Probabilidad y Consecuencia descritas en la Tabla Nº2.

Tabla Nº2
Grado de significación

		Probabilidad		
		Alta	Media	Baja
Consecuencia	Alta	Alta	Alta	Media
	Alta	Alta	Media	Baja
	Media	Media	Baja	Baja

Fuente: ISO 14001.

Evaluación de localización de relaves

Sobre la base de los aspectos y medios impactados desarrollados en la matriz de evaluación ambiental, se propuso analizar la localización de los relaves del área de estudio, para identificar cuales reunían condiciones de mayor peligrosidad. El detalle de estos parámetros se expresa en la **Tabla Nº3 (Anexo Nº7)**

A cada parámetro se le asignó un puntaje del 1 al 5, donde el valor más alto corresponde a una mayor

cercanía del relave o un factor de riesgo (zona de mayor pendiente o de alto riesgo de erosión). Los relaves que se encontraban más cercanos a los aspectos o medios impactados sumaban una mayor cantidad de puntos, lo que se traduce en una localización muy negativa desde un punto de vista ambiental.

Respuesta espectral de relaves

Finalmente, para caracterizar los sitios de minería metálica cercanos a los campamentos del área de estudio, se utilizaron dos indicadores de percepción remota, que son empleados para describir los impactos en la superficie del suelo que se asocian a la presencia de relaves. Estos corresponden al Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI por sus siglas en inglés) y Índice de metales pesados (Fe2+). El primero mide la vigorosidad de la masa vegetal, detectado por la diferencia entre las bandas del rojo e infrarrojo cercano. Dado que los relaves están compuestos de roca inerte dispuesta por acción humana, no tienden a desarrollar suelo capaz de albergar vegetación, por lo que se esperan valores muy bajos en este índice (Schimmer, 2008; Woldai, 2011). El segundo detecta la presencia del ion de hierro II, característico de las reacciones químicas en donde se encuentran metales pesados, según Rowan y Mars (2003). Las fórmulas usadas se describen en la Tabla N°4.

Tabla N°4
Fórmulas de indicadores de teledetección ambiental

Fórmula 1: NDVI	Fórmula 2: FE2+
$\frac{\text{NEAR INFRARED} - \text{RED}}{\text{NEAR INFRARED} + \text{RED}}$	$\frac{\text{Shortwave Infrared2}}{\text{NEAR INFRARED}} + \frac{\text{GREEN}}{\text{RED}}$

Fuente: Henrich, Krauss, Götze y Sandow (2012).

Se usaron para este cálculo imágenes Landsat 8, obtenidas desde la plataforma Earth Explorer, mientras que el software para procesarlas fue ArcMap de ArcGIS 10.4.

Una vez calculado el valor promedio para cada polígono de relave en ambos índices, se construyó un mapa de síntesis, en donde se visualizan con nitidez los sitios de Tranque de relave de cobre activo, en tanto lugares con valores extremos en ambos indicadores usados (muy bajo en NDVI y muy alto en Fe2+). Sin embargo, también mostraban otras áreas que no correspondían a depósitos, especialmente laderas de cerros que presentaban sombra en la imagen original. Debido a esto, se buscó un método para distinguir el suelo desnudo de los tranque de relave de cobre activos. Para esto se realizó una clasificación no supervisada de los suelos desnudos del área de estudio, mediante la herramienta Isoclust, la que arrojó tres grandes tipologías, las que al compararse con la geología regional, se pudieron asociar a suelos derivados de roca intrusiva, sedimentaria y metamórfica. Luego, se definieron nueve polígonos para cada tipo de suelo y nueve polígonos de tranque de relaves de cobre activos, para calcular su respuesta espectral en números digitales (DN). Mediante la herramienta Spatial Statistics as a Table se obtuvo el valor medio de cada sitio de entrenamiento según cada banda las imágenes Landsat 8. Estos DN fueron convertidos en Reflectancia, para graficar en porcentajes la firma espectral de los tipos de suelos y relaves estudiados, identificándose así las diferencias entre ambas superficies.

ANTECEDENTES DEL ÁREA DE ESTUDIO

Relaves y campamentos en Copiapó, Diego de Almagro y Tierra Amarilla

El área de estudio reúne 136 de los 740 relaves mineros catastrados en Chile al año 2018. La gran mayoría de estos se concentra en la comuna de Copiapó y se encuentra 'Inactivo'. Esta comuna también alberga un importante número de familias viviendo en campamentos en relación a las otras comunas (**Ver Anexo N°7 :Tabla N°5**).

La localización y el estado de los relaves cercanos a los núcleos urbanos y campamentos de dichas comunas se expresa en la **Figura N°1. Anexo N°1**

Figura N° 1. Estado de los relaves y localización de campamentos y relaves de las comunas de Copiapó, Diego de Almagro y Tierra Amarilla.

A partir de esta cartografía se visualiza la gran cantidad de relaves y campamentos emplazados en las cercanías de los núcleos urbanos, especialmente de la ciudad de Copiapó. Los campamentos se concentran hacia el norte de esta ciudad, mientras que los relaves se emplazan preferentemente hacia el sur, no obstante, hacia el suroeste, en las cercanías del río se emplazan campamentos cercanos a depósitos mineros activos, inactivos y abandonados. Hacia el sur de la comuna de Copiapó, en el sector de Paipote también hay campamentos cercanos a relaves activos e inactivos, mientras que en Tierra Amarilla estos dos elementos se encuentran prácticamente adyacentes. Finalmente, en la comuna de Diego de Almagro se identifica un relave abandonado cercano a cuatro campamentos.

A raíz de esta información, se estimó la cercanía de los relaves a las familias más vulnerables de cada comuna (ver Tabla N° 6).

Tabla N°6
Fórmulas de indicadores de teledetección ambiental

Comuna	N° Campamentos a 1KM	Suma de N° Familias	N° Campamentos a 5KM	Suma de N° Familias
Copiapó	2	223	21	2.197
Diego de Almagro	4	118	5	134
Tierra Amarilla	3	46	4	283
Total general	9	387	40	2.614

Fuente: Elaboración propia.

Considerando que el tamaño promedio de una familia de campamento es de 3,4 personas, se estiman en 1.315 personas de campamentos que habitan a menos de un 1 km, concentradas en Copiapó y Diego de Almagro. Esta cercanía puede causar mayor o menor impacto según el manejo que exista del depósito minero en cada una de sus fases. El actual proceso de manejo de los relaves data del año 2007, por lo que, depósitos aprobados previo a esta fecha o sin información disponible no dan certezas de seguridad para la población o si cumplen con los actuales estándares ambientales. En las tres comunas existe un total de 49 relaves formados antes del año 2007 y otros 55 sin información de fecha de resolución.

El impacto de la minería mediante los relaves

La actividad minera ha dejado históricamente residuos que tienen impactos directos o indirectos, como cambios morfológicos, afecciones a la salud, contaminación de los recursos hídricos, contaminación del aire y del suelo. Existen estudios de evaluación de riesgos en asentamientos humanos por contaminación de la industria minera que han generado evidencia sobre impactos concretos. El Centro Nacional del Medio Ambiente CENMA, en el año 2011 realizó un estudio denominado “Investigación Preliminar y Confirmatoria de suelos con potencial presencia de contaminantes (SPPC). Comunas de Copiapó y Tierra Amarilla” en donde se ejecutó un proyecto de identificación, inspección y priorización de Suelos de residuos de minería metálica abandonados y activos con potencial presencia de contaminantes. Los sitios inspeccionados se indican en la **Figura N°2 (Anexo N°2). Sitios inspeccionados.**

Las conclusiones del estudio se presentan en la Tabla N°7

Tabla N°7

Medio	Relave	Suelo cercano a relave	Aguas superficiales
ContaminanteM	oderado enriquecimiento de cobre, boro, plomo, hierro, cadmio, cobalto, molibdeno y arsénico.	Leve enriquecimiento de mercurio, cobre, molibdeno y boro.	Concentración de molibdeno y boro por sobre la NCh 1333.

Fuente: a CENMA (2011) y b DGA(2004)

De esta forma se demuestra la presencia de metales de interés ambiental en aquellos sitios que se consideran con indicios de contaminación. Asimismo, se remarca que la calidad del agua empeora posterior a la ciudad de Copiapó, principalmente por el ingreso de metales resultantes del funcionamiento de la minería y una mayor lixiviación de las sales existentes suelos desnudos. Si bien no es posible correlacionar directamente la influencia del relave en la calidad de las aguas, es plausible que la presencia de sulfuros en las rocas reaccione con la humedad y el oxígeno del ambiente, generando ácidos capaces de lixiviar metales hacia estratos inferiores del suelo, en donde entran en contacto con aguas subterráneas (CENMA, 2011).

La contaminación generada de forma regular desde los relaves hacia el ambiente puede aumentar considerablemente en situaciones de emergencia, como por ejemplo, en eventos de crecidas significativas, donde el río Copiapó puede entrar en contacto con relaves depositados en su ribera, incorporando material de este a su cauce para luego depositarlos en su lecho. En lluvias y aluviones que afectaron diversas localidades de Atacama en marzo de 2015 se generó peligro de colapso parcial de 9 tranques o relaves de las comunas de Tierra Amarilla y Copiapó. Estudios posteriores reportaron concentraciones de arsénico, cobre y mercurio con valores mayores a los reportados como adecuados para suelos chilenos (20, 150 y 2 mg/kg, respectivamente), especialmente en las cercanías de relaves mineros, por lo que dicho estudio recomendó estudiar en profundidad dado el riesgo ambiental y para la salud pública que significa la presencia de estos contaminantes (Corradini, Meza y Calderón, 2017).

Para contrastar esta información se realizó un cruce entre el área afectada por el aluvión y los relaves georreferenciados e identificados por SERNAGEOMIN, otorgando un buffer de 500 metros al área del aluvión, obteniendo como resultado la intersección de 30 relaves mineros, de los cuales 3 corresponden a la comuna de Diego de Almagro los cuales se pueden apreciar en la figura N°3, mientras que para la comuna de Copiapó se obtuvieron 12 relaves mineros ubicados principalmente en el sector oeste del Río Copiapó, y en Tierra Amarilla se identificaron 15 relaves con posibilidad de haber sido arrastrados por el aluvión.

Figura N° 3. (Anexo N°3) Arrastre del aluvión del año 2015 de los relaves catastrados comuna de Diego de Almagro, Copiapó y Tierra Amarilla.

RESULTADOS

Para evaluar el riesgo ambiental que presentan las tres comunas en estudio, se realizó la identificación de aspectos e impactos ambientales generados por los relaves mineros y su cercanía a población vulnerable que se mantienen en condición de campamentos, todo esto por medio de la elaboración de la matriz de riesgos de Impactos ambientales.

Como resultado se identificaron entre las principales fuentes primarias y secundarias de contaminación la suspensión de material particulado por la erosión del viento en las zonas secas o compactadas de los relaves; la posible volatilización de mercurio, en los casos en que este ha sido utilizado para el procesamiento de oro y la pérdida de la estructura del relave ocasionando derrame de material contaminado hacia otros sectores. Este último fenómeno puede darse por inestabilidad de relave en sí mismo, por arrastres aluviales y/o por sismos. También se identificaron la lixiviación y disolución de contaminantes hacia napas subterráneas; contaminación de aguas superficiales por aportes de material particulado o por crecidas del río que movilicen parte del relave; contaminación de frutas, hortalizas y/o ganado que se encuentren en zonas aledañas al sector en estudio.

La matriz arrojó un impacto ambiental significativo, esto a consecuencia de una escasa normativa para estos pasivos ambientales que son anteriores a la elaboración de la Ley, o que no se estudian e incluyen todos los aspectos ambientales que participan en los ecosistemas presentes en el territorio, o simplemente, ya que no existe una evaluación en una situación “anormal” o de emergencia tan propensas en el país como sismos, aluviones, tsunamis y varios fenómenos naturales y antrópicos que se han exacerbados por los impactos ambientales globales como es el calentamiento global. Además, los mecanismos de transporte como el viento y las aguas subterráneas y superficiales, propician la exposición de los receptores a estos contaminantes a los organismos, por la vía oral, por contacto dérmico o las vías respiratorias.

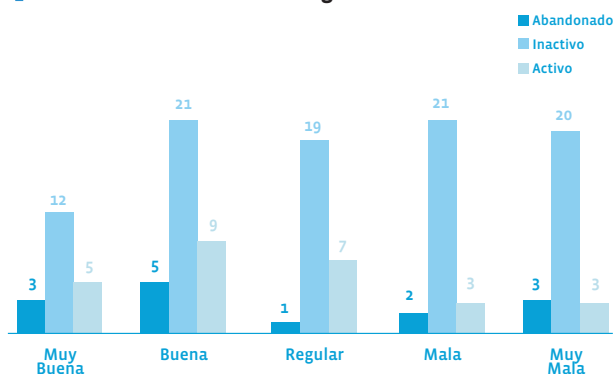
Evaluación de localización

De los 136 relaves presentes en el área de estudio, se evaluaron 134 sitios que poseían la información suficiente para el análisis de localización. De estos, 55 relaves presentan una ubicación buena o muy buena, ya que se encuentran lejanos a centros poblados, cursos de agua, áreas de protección natural, zonas de riesgo, entre otros. Por otra parte, se identificaron 52 relaves con localización mala o muy mala,

que se sitúan cercanos o incluso al interior de áreas urbanas o espacios de producción agrícola, por lo que presentan mayor peligrosidad para la salud de las personas y la conservación del medio ambiente.

En el gráfico N°1 se muestra el análisis de los relaves según su estado actual, es decir, si se encuentran abandonados, inactivos o activos. Lo más notorio es la gran proporción de relaves inactivos en relación a los otros dos estados. Este tipo de relave representa el 75% de los sitios con mala y muy mala localización. Por otra parte, los relaves activos tienden a una ubicación más adecuada, lo que puede relacionar con una menor antigüedad de estos espacios y una mayor conciencia de los impactos ambientales al momento de definir su localización. Finalmente, los relaves abandonados son el grupo más pequeño en esta área de estudio y se concentran en localizaciones de tipo bueno y regular. No obstante, este tipo de relave son los más complejos de analizar, dado que cuentan con menor información sobre el año de su formación, su composición química -mineral y los estándares usados durante su construcción, por lo que pueden presentar elementos de riesgo que son subsyacentes a este análisis de localización.

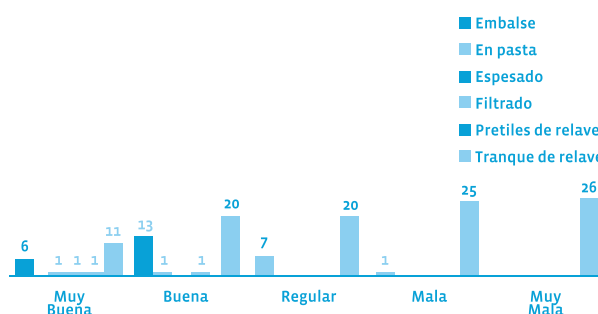
Gráfico N°1
Localización de relaves según estado



Fuente: Elaboración propia.

Otro factor interesante para analizar en los relaves fue el tipo de instalación, ya que al interior del área de estudio se identificaron diferentes tipologías de relaves, según la cantidad de agua que estos poseen y la manera en que se deposita el material. Según el gráfico N°2, el tipo de instalación más frecuente corresponde a tranque de relave, los que se localizan en sectores malos y muy malos dada su cercanía a espacios urbanos, agrícolas o de protección natural. Por otra parte, la segunda tipología corresponde a embalse y se concentran en espacios con mejor localización, de tipo buena y muy buena. Los tipos de instalaciones restantes se presentan en menor cantidad y se distribuyen en lugares con buena y muy buena ubicación.

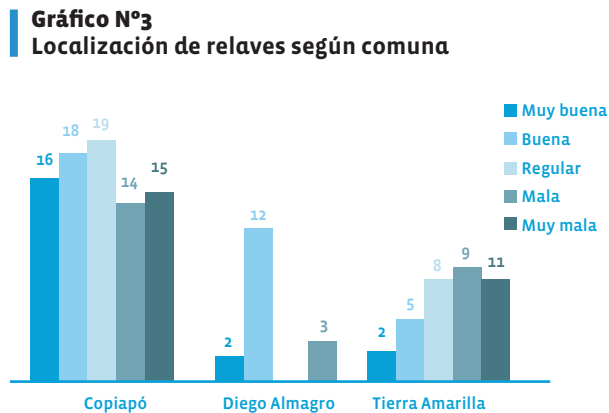
Gráfico N°2
Localización de relaves según tipo de instalación



Fuente: Elaboración propia.

A nivel comunal, se observa en el gráfico N°3 que existen diferentes niveles de localización de relaves según las comunas de estudio. En primer lugar se destaca la comuna de Tierra Amarilla, donde los depósitos de relaves se concentran principalmente en sectores con mala y muy mala localización. Copiapó, por su parte, concentra gran parte de los relaves del área de estudio, los que se encuentran distribuidos en todos los rangos de localización, siendo ligeramente superior en los niveles regular y bueno. Finalmente, Diego de Almagro presenta la menor cantidad de relaves, en donde su gran mayoría se encuentran alejados del núcleo urbano y apenas tres se localizan en las cercanías de esta ciudad. Los relaves y su clasificación según niveles de localización para las tres comunas de estudio se muestran en la

Figura N°4(Anexo N°4). Evaluación de localización de relaves en el área de estudio.



Fuente: Elaboración propia

Respuesta espectral de relaves

El análisis de reflectancia espectral de los sitios de relave a través de los índices NDVI y Fe²⁺ arrojó resultados parciales. De acuerdo a investigaciones similares en ambientes semiáridos (Schimmer, 2008; Karkush, Ziboon, & Hussien, 2014) se espera que los relaves presenten una cobertura vegetal prácticamente nula, por estar constituidos por materiales inorgánicos y de granulometría homogénea, además de la posible presencia de metales pesados y procesos de acidificación, condiciones que generan ambientes que solo muy pocas especies vegetales pueden resistir. De esta manera, para el NDVI se esperarían valores negativos, cercanos a -1.

De los 134 depósitos que pudieron ser vectorizados, solo la categoría de los tranque de relave de cobre y de estado activo mostró consistentemente valores negativos en el NDVI, además de dos categorías con un solo representante (filtrado de cobre-molibdeno activos y tranque de relave inactivo de cobre-oro-molibdeno). Estas categorías se concentran en el área comprendida entre la ciudad de Copiapó y Tierra Amarilla, por lo que las siguientes cartografías se circunscriben a dicho espacio.

A diferencia del caso de estudio realizado en Arizona (Schimmer, 2008), en donde el NDVI de los relaves

de cobre tienen valores entre -0.39 y -0.35, en el área de estudio, los relaves de las categorías descritas anteriormente mostraron valores entre -0.14 y 0. Si bien este índice permite delimitar visualmente los relaves del resto de coberturas de la superficie terrestre, existen elementos que también muestran valores negativos en NDVI, especialmente las sombras, que se identifican en laderas de exposición suroeste (debido a las características de la captura de la imagen) y en la mina a tajo abierto “Candelaria”, visible en el sector centro-inferior de la imagen izquierda de la Figura N°6.

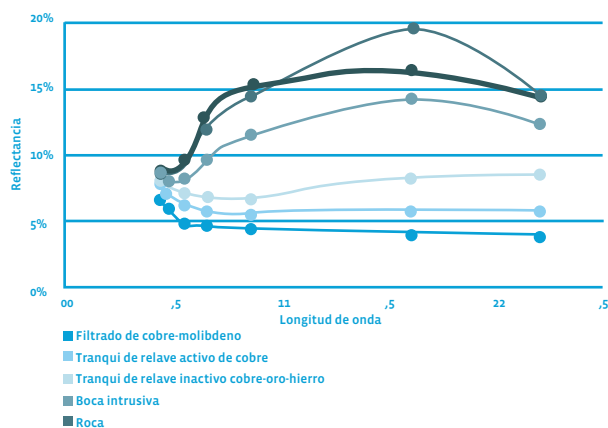
El índice de hierro férrico (Fe²⁺), que tiene aplicaciones en teledetección de metales de hierro y contaminación por metales pesados (Rowan y Mars, 2003) también fue aplicado en el área de estudio y analizado para los relaves seleccionados, presentándose valores entre 1,6 y 2. La distribución espacial de estos valores fue diferenciada en los relaves, ya que mientras algunos poseen valores más altos en la zona de los muros de contención (formado por la parte gruesa del material del mismo relave), en otros relaves el valor máximo se presentaba en la zona central del mismo (ver imagen derecha de la Figura N°5). **Figura N°5. Tranques de relave de cobre activos en los Índices NDVI y Fe²⁺**

Al seleccionar las áreas que presentan un NDVI <0 y Fe²⁺ >1,6, se delimitan claramente los relaves estudiados, sin embargo, también se destacan mucho otros lugares que no corresponden a relave, sino que a suelo desnudo, generalmente laderas de exposición sur-suroeste (ver Figura N°6) y que corresponden a sombras de relieve generadas por la inclinación del satélite con respecto al sol al momento de la captura (azimut solar = 42.78°). **Figura N°6. Relación entre Isoclust y Mapa geológico en el área de estudio**

Por esta razón, se optó por profundizar en el análisis espectral de los relaves, con el fin de distinguirlos de los suelos desnudos. A partir de una clasificación no supervisada (Isoclust) se generaron tres categorías principales de suelos en el área de estudio, los que al ser comparados con la geología regional se pueden asociar a suelos desnudos desarrollados a partir de rocas intrusivas, sedimentarias y metamórficas. En-

tonces, una aproximación para discriminar el suelo desnudo de los relave fue usar los nueve polígonos de relave seleccionados (Tranques de relave activos de cobre) y dibujar nueve sitios de entrenamiento para cada uno de los tres grandes tipos de suelos identificados (desarrollados a partir de rocas metamórficas, intrusivas y sedimentarias). Con estas áreas se calcularon los números digitales (DN) para el espectro del ultra azul (banda 1) hasta el infrarrojo de onda corta II (banda 7) del satélite Landsat 8 mediante la herramienta Spatial Statistics. Estos valores fueron convertidos a porcentaje de reflectancia para dibujar así las firmas espectrales de relaves y suelos representadas en el gráfico N°4.

Gráfico N°4
Firma espectral de relaves y suelos



Fuente: Elaboración propia

En primer lugar, se observa que suelos y relaves poseen curvas espectrales diferentes. En el espectro visible la diferencia es pequeña, pero aumenta en el infrarrojo cercano y alcanza su máxima diferencia en el infrarrojo de onda corta I (SWIR 1). En segundo lugar, se observan ligeras diferencias en la forma de la curva para cada subgrupo. Por ejemplo, los suelos desarrollados a partir de roca metamórfica presentan un valor más alto en la banda SWIR 1, mientras que los que se forman a partir de roca sedimentaria muestran valores menores para todas las bandas. Del mismo modo, existen pequeñas variaciones en-

tre los relaves según son activos de cobre, inactivos o filtrados. Esta aproximación preliminar se podría profundizar con muestras de relaves obtenidas en terreno para corroborar las curvas espectrales y así construir un índice para detectar relaves mineros.

CONCLUSIÓN Y DISCUSIÓN

El área de los campamentos de las comunas de Copiapó, Tierra Amarilla y Diego de Almagro presenta un impacto ambiental significativo como consecuencia de los depósitos de relave mineros. Al año 2018 existen al menos 387 familias en campamentos que se encuentran a menos de 1 km de relaves mineros que podrían estar interactuando negativamente tanto con el aire, agua y suelo de dichos territorios.

A raíz de la revisión bibliográfica y de la matriz de evaluación ambiental, se concluye que existen antecedentes para considerar a los relaves mineros como un desafío para la sostenibilidad del área de estudio, ya que existen evidencias concretas de contaminación provocada por procesos químicos desarrolladas al interior de estos depósitos, cuya magnitud espacial puede alcanzar escalas regionales al relacionarse con fenómenos naturales extremos, como aluviones o crecidas de río. Los campamentos, en tanto asentamientos precarios ubicados en zonas periféricas y expuestas a diversos riesgos socio-naturales, son especialmente sensibles a las consecuencias de un posible desastre ambiental. Cabe destacar también que, el riesgo ambiental provocado por los relaves mineros podría aumentar debido a la expansión urbana en general y al crecimiento de los mismos campamentos, lo que configura nuevos escenarios más complejos desde el punto de vista de las consecuencias ambientales debido a un mayor contingente de población involucrada y de características más vulnerables.

La evaluación de localización de relaves otorga una jerarquización de cuáles serían los espacios de mayor prioridad para implementar medidas eficientes de mitigación y prevención de riesgos ambientales. Esta clasificación de relaves según su ubicación podría

variar al incorporar otras variables y parámetros en su cálculo. La respuesta espectral de las zonas ocupadas por relaves mineros, en tanto, va en línea con la bibliografía, con espacios caracterizados por una muy baja vigorosidad de vegetación y una potencial presencia de contaminantes químicos. Se requiere, por lo tanto, robustecer este tipo de metodologías con muestras de terreno y uso de espectrograma para diferenciar con mayor claridad el suelo desnudo de los relaves mineros existentes en el área de estudio.

La trascendencia del presente artículo recae en la búsqueda urgente en visibilizar y difundir una problemática ambiental presente en diversas regiones del país, como es la contaminación de los pasivos ambientales y relaves activos a la salud humana y al medio ambiente.

La ausencia de una normativa nacional para definir la calidad de suelo y los criterios para establecer el grado de alteración o contaminación aceptables dificulta una correcta gestión ambiental del territorio en situaciones de prevención, emergencia o post emergencia que disminuyan los impactos. Por lo que se requiere de una normativa de forma urgente para el alcance de los objetivos sobre una planificación del territorio de forma sustentable.

El objetivo es poder dar continuidad a este estudio, completando la evaluación de riesgos realizada con la matriz de aspectos e impactos ambientales de los sitios que presentan altos niveles de contaminación, por medio del monitoreo de muestras en terreno, que permitan la caracterización del riesgo empírica, con el fin de proponer las medidas de gestión adecuadas al nivel de riesgo que sea determinado para cada comuna.

Además, es necesario desarrollar una línea destinada a la educación y entrega de información a las comunidades vulnerables y a toda la población circundante al área, con el fin de lograr concientizar sobre los peligros e informar sobre las medidas y cuidados necesarios ante eventos normales y anormales, y tener claridad que la exposición ante estos eventos han ocurrido, están presentes y seguirán ocurriendo en el futuro intensificado por el calentamiento global.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la gentileza del Servicio Aerofotogramétrico de la Fuerza Aérea de Chile por las imágenes satelitales y al Centro de Investigación Social de TECHO-Chile por la base de datos de campamentos, que por medio de un convenio firmado por ambas instituciones fue posible la colaboración de los profesionales y los insumos de esta investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahumada Mexía, R. (2017). *Identificación de residuos tóxicos mineros por percepción remota y su verificación geoquímica en El Triunfo (BCS): Propuesta metodológica para priorizar acciones de restauración*. Obtenido de Maestría en Manejo de Recursos Marinos Thesis, Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas La Paz, B. C. S.: <https://www.repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/24932>
- Alata Mollo, A. (2018). Análisis multitemporal de la explotación minera con aplicación de percepción remota y SIG en los distritos de Ananea y Cuyucuyo-Puno, entre 1975-2017. *Tesis título profesional de ingeniero agrícola Puno-Perú*.
- Barsi, J., Lee, K., Kvaran, G., Markham, B., & Pedelty, J. S.-8. (2014). The Spectral Response of the Landsat-8 Operational Land Imager. *Remote Sens*(6), 10232-10251.
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (2010). *Mapas vectoriales*. Obtenido de Mapoteca: https://www.bcn.cl/siit/mapas_vectoriales
- Castro, C., Brignardello, L., & Cereceda, P. (1995). Determinación de áreas de riesgo morfodinámico en San Juan Bautista, Isla Robinson Crusoe, Comuna de Juan Fernández, V Región. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*(40), 43-61.
- Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA). (2011). *Investigación Preliminar y Confirmatoria de suelos con potencial presencia de contaminantes (SPPC). Comunas de Copiapó y Tierra Amarilla*. Documento técnico del proyecto "Evaluación de riesgos para la salud en asentamientos humanos próximos a sitios de minería metálica.
- CIREN. (2007). *Estudio Agrológico de Suelos - Atacama*. Obtenido de <https://www.ciren.cl/descarga-de-capas/>
- CIREN. (2010). *Riesgo de Erosión Potencial - Atacama*. Obtenido de Descarga de capas: <https://www.ciren.cl/descarga-de-capas/>
- CIS TECHO-Chile. (2015). *Encuesta Nacional de Campamentos*. Santiago.
- CIS TECHO-Chile. (2018). *Actualización Catastro Nacional de Campamentos*. Santiago.
- Corradini F, Meza F, Calderón R. 2017. Trace element content in soil after a sediment-laden flood in northern Chile. *J Soils Sediments*. doi:10.1007/s11368-017-1687-3
- Dirección General de Aguas - DGA. (2004). *Diagnóstico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua Según Objetivos de Calidad, Cuenca Río Copiapó*.
- Dirección General de Aguas - DGA. (2017). *Diagnóstico y desafíos de la red de calidad de aguas subterráneas de la DGA realizado por: departamento de conservación y protección de recursos hídricos (DCPRH)*. Santiago.
- Henrich, V., Krauss, G., Götze, C., & Sandow, C. (2012). *Index DataBase*. Obtenido de <https://www.indexdatabase.de>
- INE. (2017). *Censo de Población y Vivienda 2017*. Instituto Nacional de Estadísticas.
- INIA. (2001). *Caracterización de la salinidad de los suelos y aguas del valle del río Copiapó*. Obtenido de <http://www.inia.cl/wp-content/uploads/Boletines/NR27726.pdf>
- International Organization for Standardization. (2015). *Environmental management systems - Requirements with guidance for use. (ISO 14001:2015)*. Obtenido de <https://www.iso.org/standard/60857.html>
- Karkush, M., Ziboon, A., & Hussien, H. (junio de 2014). Studying the Effects of Contamination on Soil Properties Using Remote Sensing. *Journal of Engineering*, XX(6), 78-90.
- Medvinsky-Roa, G., Caroca, V., & Vallejo, J. (s.f.). *Informe sobre la situación de los Relaves Mineros en Chile para ser presentado en el cuarto informe periódico de Chile para el Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales, perteneciente al consejo Económico Social de la Naciones Unidas*. Obtenido de Fundación Relaves Chile y Fundación Terram: https://tbinternet.ohchr.org/Treaties/CESCR/Shared%20Documents/CHL/INT_CESCR_CSS_CHL_20605_S.pdf
- Miller, M. (2017). *Series temporales de imágenes de satélite, para el análisis del cambio de la vegetación,*

en un contexto de explotación minera a cielo abierto. Obtenido de http://oa.upm.es/45707/1/TFM_Manuel_Miller.pdf

Ministerio de Bienes Nacionales. (2016). *Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE)*. Obtenido de Infraestructura de Datos Geoespaciales - IDE Chile: <http://www.ide.cl/download/capas/item/sistema-nacional-de-areas-silvestres-protegidas-del-estado-snaspe.html>

Ministerio de Bienes Nacionales. (s.f.). Infraestructura Nacional de Datos. *Archivos vectoriales de Planes reguladores Comunales y terrenos fiscales*.

Ministerio de Desarrollo Social - División Social. (2015). *Encuesta CASEN*. Santiago.

ODEPA. (2018). *Región de Atacama - Información regional*. Obtenido de <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2018/03/Atacama.xls>

Rowan, L., & Mars, J. (2003). Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data. *Remote Sensing of Environment*, LXXXIV, 350- 366.

Ruiz Fernández, L. Á. (s,f). *Métodos de detección de cambios en teledetección*. Obtenido de ETSI. Geodésica, Cartográfica y Topográfica: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/83139/Ruiz%20-%20M%C3%A9todos%20de%20detecci%C3%B3n%20de%20cambios%20en%20teledetecci%C3%B3n.pdf?sequence=1>

Schimmer, R. (2008). *A remote sensing and GIS method for detecting land surface areas covered by copper mill tailings*. Denver, Colorado.

SERNAGEOMIN. (2015). *Aluvión en Diego de Almagro, Copiapó y Tierra Amarilla, región de Atacama (marzo de 2015)*. Obtenido de Peligros geológicos y ordenamiento territorial: <http://www.sernageomin.cl/peligrosgeologicos/>

SERNAGEOMIN. (27 de MARZO de 2018). *Depósito de Relaves*. Obtenido de Datos públicos: <http://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/>

SERNAGEOMIN, Instituto federal de geociencias y recursos naturales, Agencia de Cooperación técnica Chileno Alemán. (1998). *La influencia ambiental de la minería pasiva y activa en el área de Copiapó, incluyendo aspectos geológicos ambientales*. Obtenido de <https://ciperchile.cl/wp-content/uploads/Influencia-Ambiental.pdf>

Suh, J., Kim, S., Yi, H., & Choi, Y. (2017). An Overview of GIS-Based Modeling and Assessment of Mining-Induced Hazards: Soil, Water, and Forest. *International Journal of Environmental Research and Public Health*.

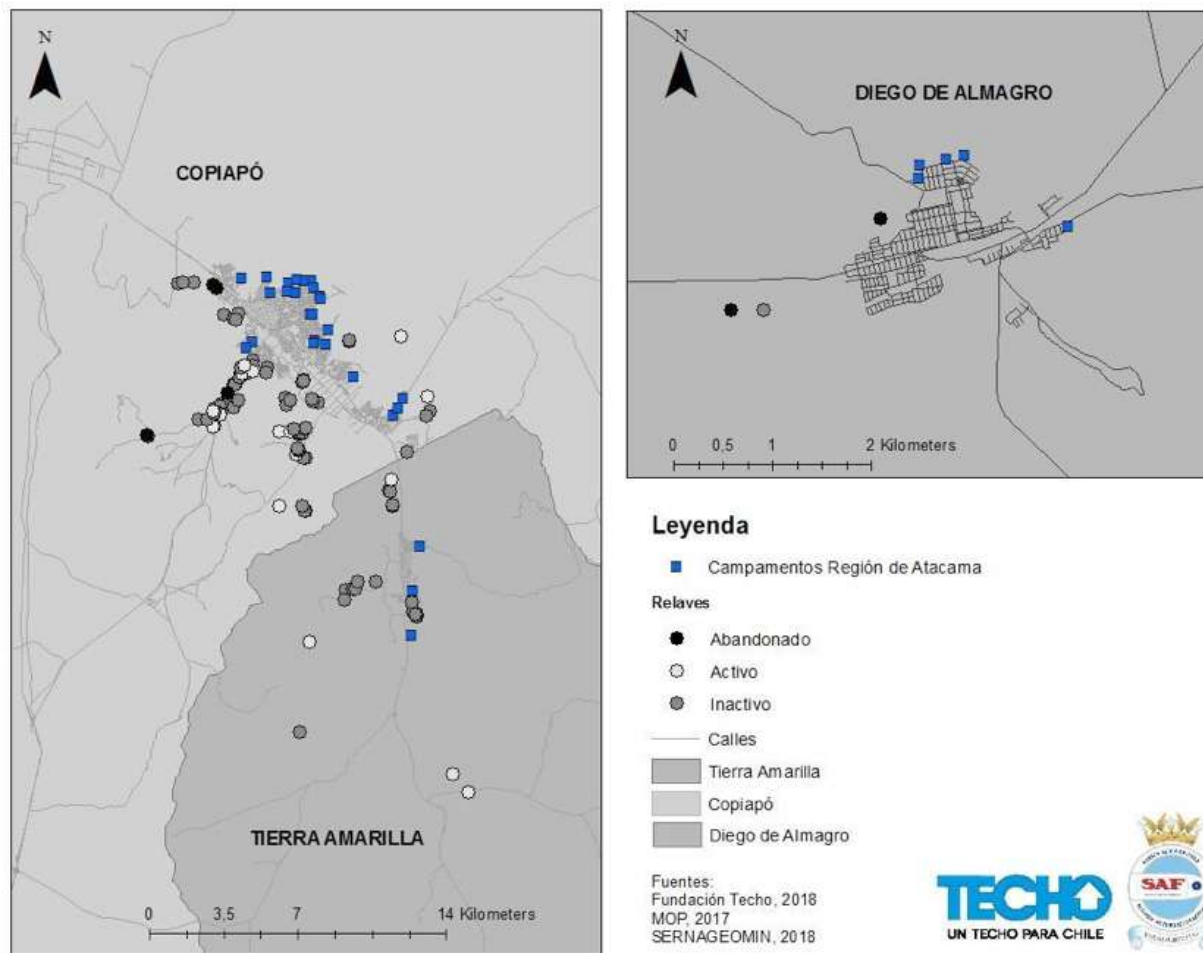
US Geological Survey. (octubre de 2018). *Landsat 8 (L8)*. Obtenido de Data Users Handbook: https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/LSDS-1574_L8_Data_Users_Handbook.pdf

Valenzuela, P. (2015). *La influencia ambiental de la minería pasiva y activa en el área de Copiapó, incluyendo aspectos geológicos ambientales*. Universidad Politécnica de Madrid - Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Obtenido de Tesis Doctoral.

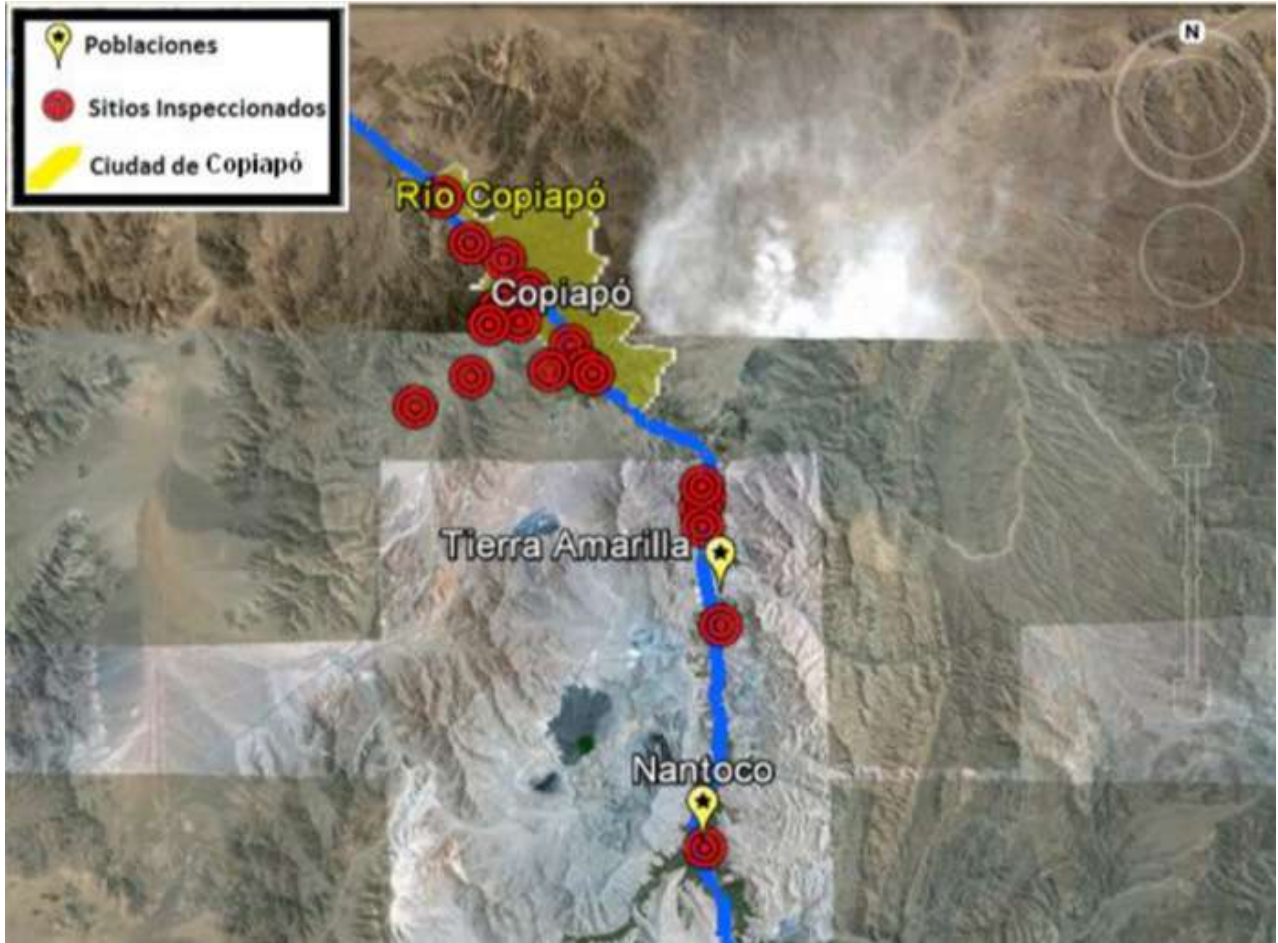
Woldai, T. (2011). *Application of Remotely Sensed Data and GIS in Assessing the Impact of Mining Activities on the Environment*. 17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey.

Anexo N°1

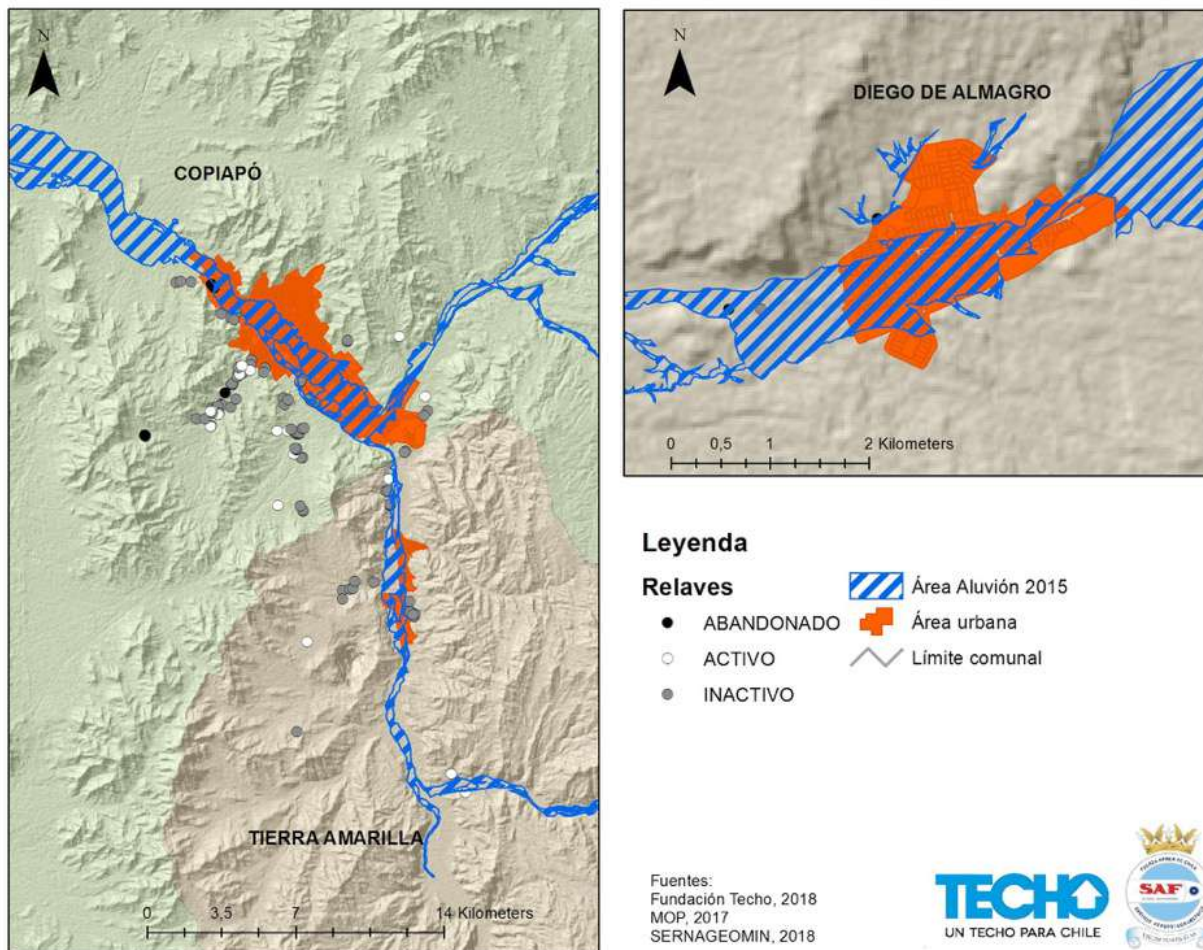
Figura N°1



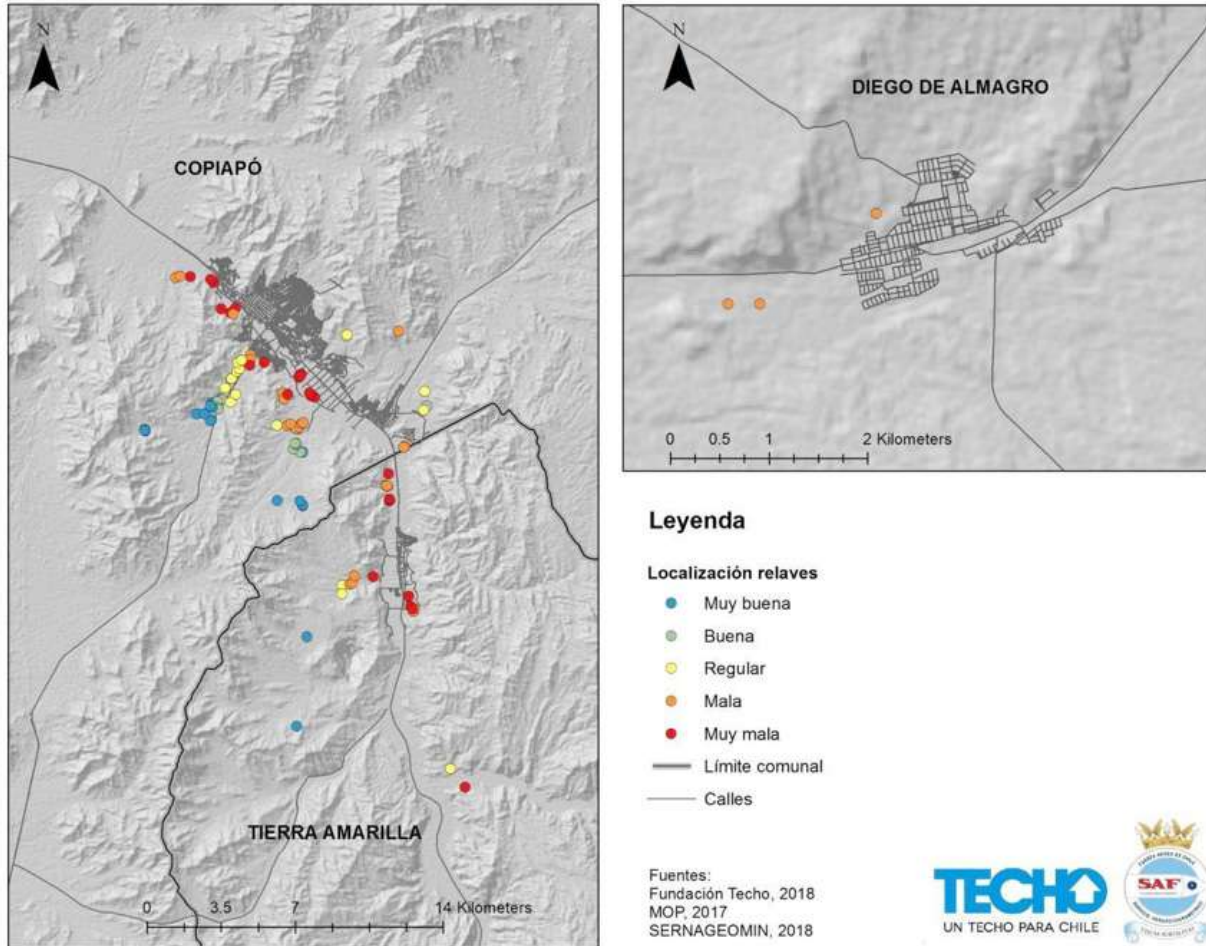
Anexo N°2
Figura N°2



Anexo N°3
Figura N°3

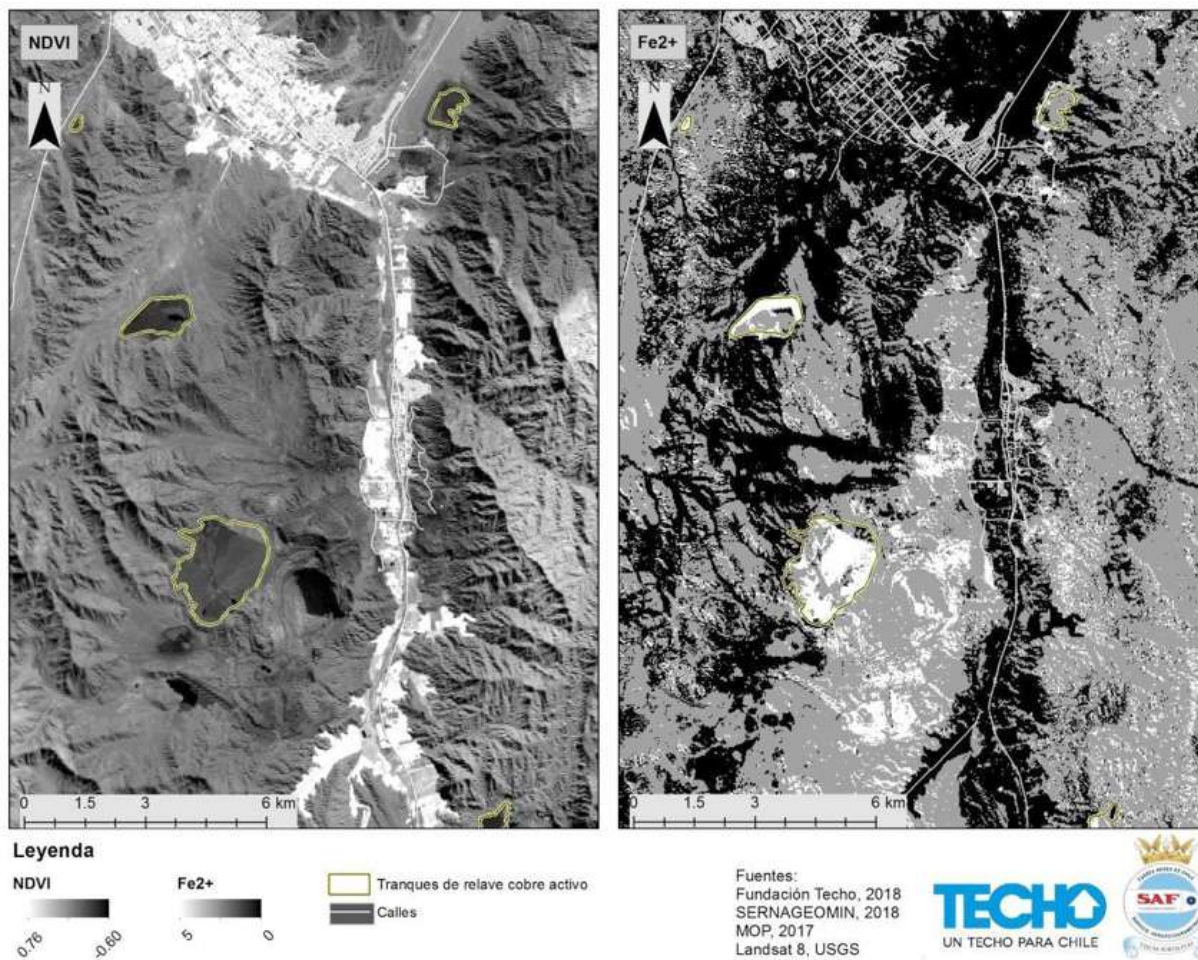


Anexo N°4
Figura N°4



Anexo N°5

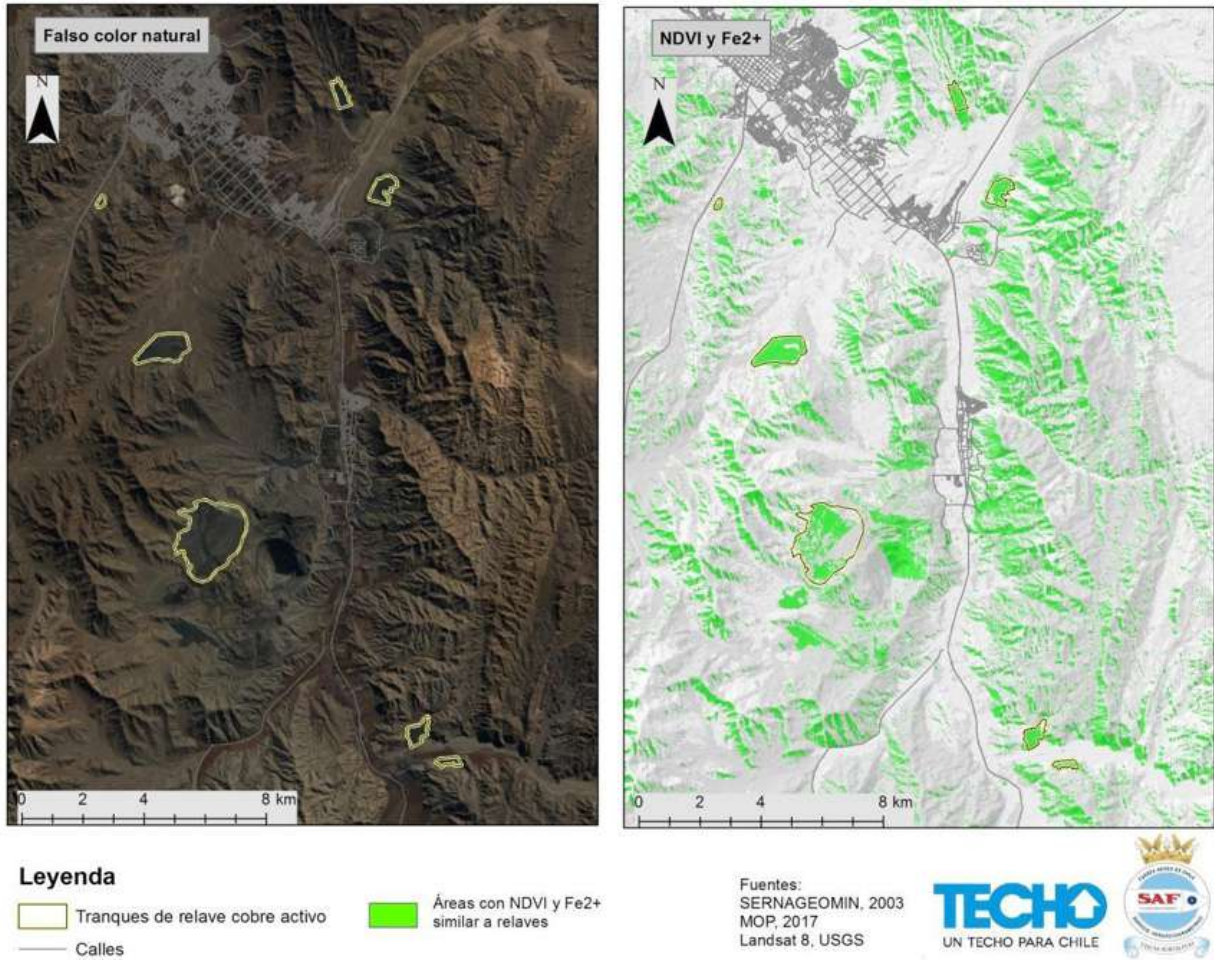
Figura N°5

**Anexo N°7: Tabla N°5**

Variable/Comuna		Copiapó	Diego de Almagro	Tierra Amarilla	Total
Relaves	Activos	16	3	8	27
	Inactivos	62	7	26	95
	Abandonados	6	7	1	14
	Total	84	17	35	136
Campamentos	N° Asentamientos	24	5	6	35
	N° Familias	2.345	134	395	2.874

Fuente: TECHO-Chile (2018) y SERNAGEOMIN (2018)

Anexo N°6
Figura N°6



Anexo N°8: Tabla N°3
Parámetros para evaluación de localización de relaves

Parámetro (Proximidad a)	Fuente	Parámetro	Fuente
Núcleos de población	INE	Zona de riesgo por crecida o aluvión	SERNAGEOMIN
Campamentos	TECHO	Zona de riesgo por erosión	CIREN
Cursos de agua	BCN	Pendiente	ASTER GDEM
Suelos de capacidad agrícola (I al IV)	CIREN	Tonelaje aprobado de cada relave	SERNAGEOMIN
Áreas de protección natural	MBN	Situación actual del relave	SERNAGEOMIN

Fuente: Elaboración propia sobre la base de Valenzuela, 2015.