



# **IMPACTOS FÍSICOS DE LA MINERÍA EN EL MEDIO HIDROLÓGICO**

## **PHYSICAL IMPACTS OF MINING ON THE HYDROLOGICAL ENVIRONMENT**

### **MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

**Presentado por:**

**J. GEOVANNY HEREDIA FUENMAYOR**

**Dirigido por:**

**Dr. JAVIER LILLO RAMOS**

**Alcalá de Henares, a 5 de Septiembre de 2021.**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a los profesores de la Maestría en Hidrología y Gestión de Recursos Hídricos por incentivar y promover el conocimiento continuo además del fortalecimiento de las habilidades ingenieriles necesarias para poder ser parte del cambio en un mundo disruptivo y complejo.

Especial agradecimiento al profesor Javier Lillo por su tiempo, confianza y paciencia para revisar y aportar con sus conocimientos a este TFM.

*Dedicado a mi amada esposa y a mis hijos, que son la excusa perfecta para aprender y nunca dejarse vencer por las adversidades de la vida.*

## ÍNDICE

ABREVIATURAS Y SIGNIFICADOS.....	vii
RESUMEN.....	viii
SUMMARY .....	ix
1. INTRODUCCIÓN.....	10
1.1. JUSTIFICACIÓN .....	11
1.2. OBJETIVOS .....	12
1.2.1. Objetivo general .....	12
1.2.2. Objetivos específicos .....	12
2. MÉTODOS Y HERRAMIENTAS.....	13
3. DESARROLLO.....	15
3.1. EL MEDIO HIDROLÓGICO EN EL ENTORNO MINERO.....	15
3.2. ETAPAS MINERAS Y ACTIVIDADES DESARROLLADAS .....	17
3.2.1. Cateo y prospección.....	18
3.2.2. Exploración.....	18
3.2.3. Desarrollo .....	19
3.2.4. Explotación.....	20
3.2.5. Beneficio.....	22
3.2.6. Transporte y almacenamiento.....	22
3.2.7. Cierre de Mina .....	23
3.3. IMPACTOS DE LA MINERÍA EN EL MEDIO NATURAL .....	24
3.3.1. Impactos en la atmósfera .....	26
3.3.2. Impactos en los suelos .....	27
3.3.3. Impactos en el agua .....	32
3.4. CARACTERIZACIÓN DE IMPACTOS FÍSICOS EN EL MEDIO HIDROLÓGICO .....	37
3.4.1. Alteraciones en la dinámica fluvial .....	38

3.4.2.	Pérdidas de masas de agua.....	43
3.4.3.	Alteraciones en el régimen hidrogeológico .....	45
3.4.4.	Caso de estudio: Mina Henderson .....	51
4.	CONCLUSIONES.....	55
5.	BIBLIOGRAFÍA .....	57

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Componentes de un sistema hidrológico.....	17
Figura 2. Ciclo de vida de un proyecto minero .....	18
Figura 3. Esquema de ciclo de vida de una mina .....	20
Figura 4. Elementos de una explotación subterránea .....	22
Figura 5. Fases de inversión minera .....	24
Figura 6. Patrones esquemáticos de las interacciones entre los procesos mineros (minería superficial, desechos en vertederos, transporte, procesamiento, acopio del mineral) y el ambiente. ....	25
Figura 7. Impacto a la atmosfera por voladuras en procesos extractivos .....	27
Figura 8. Impactos en los suelos causados por la deforestación y perdida de cobertura vegetal .....	29
Figura 9. Afectación en suelos y aguas de metales pesados Pirita y Cobre en una zona minera abandonada en Bagacay, Islas Samar - Filipinas.....	30
Figura 10. Deslizamientos de tierra por actividad minera ilegal en la provincia de Esmeraldas – Ecuador.....	31
Figura 11. Hundimiento provocado por actividades mineras en el poblado de Zaruma - Ecuador.....	32
Figura 12. Drenaje ácido de mina. La imagen de la izquierda muestra una pequeña laguna ocurrente en el Distrito Minero de Mazarrón en Murcia ( <i>España</i> ); mientras en la imagen de la derecha, se observa la creación de un arroyo ácido en el Grupo Minero San Quintín, en donde se explotaron recursos de plomo y zinc. ....	36
Figura 13. Influencia en la parte baja de la ladera de una llanura aluvial perturbada por la minería artesanal en Ruanda.....	39
Figura 14. Esquema mostrando varios efectos de erosión y sedimentación debido al represamiento de un cauce fluvial a causa del desarrollo de proyectos mineros. ....	40
Figura 15. Imágenes del río Ok Tedi uno de los causes más estudiados en Papua New Guinea .....	42
Figura 16. Imágenes aéreas mostrando las variaciones de los glaciares Toro 1 y Toro 2 en Atacama. ....	43
Figura 17. Imagen mostrando los impactos causados en el arroyo Warath Rivulet por minería subterránea.....	44
Figura 18. Esquema representando las fluctuaciones de los niveles freáticos y piezométricos	

como a causa de proyectos mineros. ....	47
Figura 19. Subsistencia influenciada por cuerpos de agua superficial y subterránea .....	49
Figura 20. Imagen aérea mostrando un sinkhole de 3.5 kilómetros al este de Solikamsk-2 potash mine.....	49
Figura 21. Imágenes de la mina Wiepa en Australia mostrando procesos de compactación y aspersión periódica debido a la intensa actividad y tránsito de equipo pesado. ....	50
Figura 22. Mina de Molibdeno Henderson en Colorado, Estados Unidos de América. ....	53
Figura 23. Diagrama esquemático de la mina Henderson mostrando 2 niveles de explotación .....	54

**ABREVIATURAS Y SIGNIFICADOS**

<b>Bofedales:</b>	Paramos, humedales de altura.
<b>Block Caving:</b>	Método de explotación subterránea por hundimiento de bloque por gravedad.
<b>DAR:</b>	DAM: Drenaje Acido de Mina.
<b>Dewatering:</b>	Desaguado de mina subterránea.
<b>High sulfidation:</b>	Alto en azufre.
<b>Open Pit:</b>	Tajo abierto.
<b>PHC:</b>	Probable Hydrologic Consecuences = Consecuencias hidrológicas probables.
<b>Sinkhole:</b>	Hundimiento por subsidencia.
<b>Tailings:</b>	Relaves mineros.
<b>TFM:</b>	Trabajo de Fin de Máster.
<b>UNESCO:</b>	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.
<b>Mineral Dumps:</b>	Escombreras.

## RESUMEN

El presente TFM ha sido desarrollado en el contexto de una investigación exploratoria bibliográfica de tal manera de recopilar a través de diversas fuentes y datos públicos el estado del conocimiento de las afecciones al medio físico hidrológico debido a proyectos mineros y brinda al lector los elementos necesarios para el entendimiento de la problemática y plantea nuevos retos a los interesados en investigar las ciencias ambientales y de la tierra.

Una de las premisas fundamentales al considerar la interacción del agua con las actividades mineras es el entender que las aguas superficiales como las subterráneas en conjunto, son un único recurso y que impactos negativos sobre cualquiera de estas, inevitablemente, generara efectos negativos sobre las otras.

Los impactos físicos sobre el medio hidrológico se pueden resumir en: 1) alteraciones en la dinámica fluvial de los cuerpos superficiales locales y regionales, 2) perdidas de masas de agua y variaciones en el ciclo hidrológico y 3) alteraciones en el régimen hidrogeológico causante de variaciones de niveles de agua y fenómenos de subsidencia

Las variaciones en la dinámica fluvial pueden deberse a los cambios en las tasas de sedimentación por erosión, los cambios en los trazados fluviales y variaciones de perfil. Las actividades de bombeo y *dewatering* para dar seguridad geotécnica y estabilidad estructural a los macizos sin duda causan variaciones, por un lado, se pueden crear conos de depresión pronunciados en la napa freática, reduciendo el nivel del agua subterránea, además de fenómenos de descompresión de acuífero que pueden traducirse en subsidencias y hundimientos. Actividades como modificación del relieve, remoción de la cobertura vegetal y compactación del terreno pueden provocar indirectamente disminuciones en la capacidad de infiltración disponible del suelo, alteraciones en la dinámica de la evapotranspiración, aumento de la escorrentia superficial, disminuciones en el contenido de humedad de los suelos entre otros.

Las actividades mineras tienen la capacidad de desencadenar una serie de impactos físicos al recurso hídrico, incluso algunos de estos impactos pueden ser irreversibles y/o requerirán de tiempo y grandes esfuerzos para alcanzar el equilibrio hidrológico original.

**Palabras clave:** *Hidrología, hidrogeología, impactos mineros, impactos físicos, ciclo hidrológico.*

## SUMMARY

This TFM has been developed in the context of an exploratory bibliographic research to compile, through various sources and public data, the state of knowledge of the effects on the physical hydrological environment due to mining projects. This document provides the reader with the necessary elements to understand the problem and poses new challenges to researchers in environmental and earth sciences.

One of the fundamental premises when considering the interaction between water and mining activities is to understand that both surface water and groundwater are a single resource and that a negative impact on any of these will inevitably generate negative effects on the others.

The physical impacts on the hydrological environment can be summarized as: 1) alterations in the fluvial dynamics of local and regional surface bodies, 2) loss of water masses and variations in the hydrological cycle and 3) alterations in the hydrogeological regime causing variations in water levels and subsidence phenomena.

Variations in fluvial dynamics may be due to changes in sedimentation rates due to erosion, changes in fluvial patterns and profile variations. Pumping and dewatering activities to provide geotechnical security and structural stability to the massifs undoubtedly cause variations; on the one hand, they can create pronounced cones of depression in the water table, reducing the groundwater level, in addition to aquifer decompression phenomena that can lead to subsidence and subsidence. Activities such as relief modification, removal of vegetation cover and soil compaction can indirectly cause a loss of soil infiltration capacity, alterations in the dynamics of evapotranspiration, increased surface runoff, decreases in soil moisture content, among others.

Mining activities have the capacity to trigger a series of physical impacts on water resources, and some of these impacts may even be irreversible and/or require time and significant efforts to reach the original hydrological balance.

**Key words:** *hydrology, hydrogeology, mining impacts, physical impacts, hydrological cycle, aquifer.*

## 1. INTRODUCCIÓN

*El agua es un caos sensible. Novalis (1172 – 1801).*

Al 2019 un reporte de la Organización Mundial de las Naciones Unidas para la Educación, 2019 menciona que “Más de 2.000 millones de personas viven en países que experimentan un alto estrés físico por el agua. Aunque el estrés hídrico promedio mundial es solo del 11%, 31 países experimentan estrés hídrico entre el 25% (que se define como el umbral mínimo de estrés hídrico) y el 70%, y 22 países están por encima del 70%, y por lo tanto están bajo un estrés hídrico severo. El creciente estrés hídrico indica un uso sustancial de los recursos hídricos, con mayores impactos en la sostenibilidad de estos y un creciente potencial de conflictos entre los usuarios”.

“En la actualidad, el cuidado y la protección de los recursos hídricos, y en especial del agua dulce, se ha convertido en una tarea primordial no sólo para los países, sino también para los organismos intergubernamentales tales como la Organización de las Naciones Unidad, dado que se trata de un problema que está directamente relacionado con el desarrollo y la salud humana” (UNESCO World Water Assessment Programme (WWAP), 2003).

Los proyectos mineros indudablemente representan un motor para el desarrollo de la economía de los países que tienen la posibilidad de extraer recursos minerales para su aprovechamiento, sin embargo estos no solamente provocan alteraciones químicas en el medio hidrológico superficial y subterráneo sino además se han evidenciado constantes cambios físicos que por su naturaleza no han sido estudiados en rigor y en la mayoría de los casos tampoco suelen ser detallados en los estudios de impacto ambiental (EIAs) de aplicación regulatoria necesarios en la ejecución de cada una de las fases del ciclo de vida minero. Generalmente el grado de contaminación y afectación producida por ciertas actividades mineras ha sido tratada y ampliamente difundida como un impacto crítico sobre el medio hidrológico, se han creado rutinas y planes de obtención de información, caracterización, modelamiento y programas de remediación eficientes para su tratamiento, esto contrasta con una temática poco abordada por la comunidad científica y profesional sobre como ciertos impactos físicos afectan la dinámica de las aguas de manera local y regional y cuales medidas pudieren ser implementadas para la mitigación de tales efectos.

Entre los impactos principales podemos mencionar efectos por subsidencia debido a depresión de niveles freáticos / piezométricos, pérdidas de propiedades físicas de suelos por variaciones del régimen hídrico, alteraciones de la dinámica fluvial entre otros.

Se puede nombrar algunos trabajos relevantes y recientes que hacen alusión al tema en cuestión como las publicaciones “Minería Ambiental: Una introducción a los Impactos y su Remediación” (Oyarzun, et al., 2011), “Mine Water, Hydrology, Pollution, Remediation” (Younger et al., 2002), “Methods for assessing mine site rehabilitation design for erosion impact” (Evans, 2000) y “Impacts of mining on physical hydrogeology” (Younger, 2004), aunque en términos generales la escasez de investigaciones específicas es generalizada.

El presente Trabajo de Fin de Máster (TFM) se enfoca, a través de una investigación exploratoria, en abordar el conocimiento de dichas alteraciones producidas por las actividades extractivas sobre el medio físico hidrológico en particular, las cuales son evidentes aún luego de culminadas las fases de cierre y restauración, y que han sido escasamente estudiadas o entendidas dentro del contexto de las evaluaciones ambientales típicas, así varios procesos relacionados con la modificación de los cursos de agua superficial, variaciones en las reservas de embalses naturales de agua subterránea, cambios en los gradientes hidráulicos naturales entre otros, deben ser motivo de investigaciones más profundas y concretas para asegurar que los efectos que estos producen sobre la dinámica del ciclo hidrológico sean constantemente monitoreados.

## **1.1. JUSTIFICACIÓN**

La selección del tema para la ejecución del presente TFM está plenamente justificado dado que se ha planteado una solución inicial a un problema de falta o escasez de información acerca de la influencia de la minería sobre el medio físico hidrológico, un tema particular que a la fecha no ha sido al menos sumariado o sintetizado en publicaciones similares o textos de acceso público, como toda investigación científica, pretende ser una herramienta de apoyo para aquellos que estén interesados en ahondar en investigaciones descriptivas o explicativas de mayor detalle en aras de mejorar el estado del conocimiento de la temática propuesta.

En términos generales los estudios ingenieriles y ambientales llevados a cabo para la industria minera han enfatizado sus esfuerzos en obtener información valiosa en cuanto a las

alteraciones químicas que los cuerpos hídricos sufren para poder gestionar su mitigación y evitar impactos mayores, pero poco se ha registrado sobre los impactos físicos que prácticamente ocurren desde el inicio del ciclo de vida minero y se extienden incluso posterior al final de dicho ciclo, por tanto es necesario también caracterizarlos, gestionarlos, y mitigarlos de tal manera de resolver problemas que pueden estar relacionados con la disponibilidad del recurso, vulnerabilidad por cambios importantes en los niveles de agua, problemas de subsidencia, por cambios de cauces fluviales entre otros. Es debido a este razonamiento que se propone un documento técnico-científico cuya finalidad es avanzar en el conocimiento y exponer el estado de este en un tema muy importante para la sostenibilidad y conservación del recurso.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivo general**

El objetivo principal del presente TFM es revisar el estado de conocimiento actual sobre los principales impactos físicos en el medio hidrológico superficial y subterráneo que ocurren en cada una de las fases o etapas de las actividades mineras.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

Para lograr el objetivo general propuesto es necesario establecer los siguientes objetivos específicos:

- Identificar las actividades mineras que afectan a diferentes componentes o elementos del medio hidrológico.
- Reconocer y describir las principales características del medio físico hidrológico que interactúan en cada una de las fases del ciclo de vida en proyectos mineros, y como esas características se ven afectadas.
- Resumir las características relevantes de los impactos físicos.
- Mediante un caso de estudio analizar los impactos físicos ocurridos.

## 2. MÉTODOS Y HERRAMIENTAS

“La investigación exploratoria tiene como objetivo examinar o explorar un problema de investigación poco estudiada o que no ha sido analizado antes. Por esa razón, ayuda a entender fenómenos científicamente desconocidos, poco estudiados o nuevos, apoyando en la identificación de conceptos o variables potenciales, identificando relaciones posibles entre ellas (Cazau, 2006)”.

El presente TFM ha sido desarrollado utilizando lineamientos basados en una investigación del tipo exploratorio o de enfoque de teoría fundamentada de tal manera de promover en el futuro estudios más profundos que permitan mejorar el estado del conocimiento de las ciencias hidrológicas y ambientales en el contexto minero.

Los criterios y herramientas utilizadas fueron los siguientes:

- Uso de bases de datos y motores de búsqueda científicos reconocidos como la biblioteca online de la Universidad de Alcalá, Google Scholar®, Microsoft Academic®, Dialnet®, Science.gov® y SciELO®.
- Uso de palabras clave como hidrología minera, medio físico hidrológico, *physical impacts of mining*, *environmental hydrology of mining*, ...
- No existieron restricciones con respecto a las fechas de las publicaciones consultadas ni al idioma de los textos citados.
- La selección de las publicaciones de referencia se basó en las lecturas de los resúmenes o abstractos y las revisiones de los lectores con respecto al tema específico para proceder a discriminar los textos de mayor relevancia para el TFM.

Para cubrir la temática principal referente a la caracterización de los impactos físicos, es necesario abordar brevemente los siguientes acápites:

- El medio hidrológico en el entorno minero, de tal manera de resumir aquellos conceptos básicos más importantes, su dinámica, el ciclo general y las características principales del flujo hídrico interactuante en prácticamente todas las fases actividades mineras.
- Las principales fases o etapas del ciclo de vida de un proyecto minero típico, que

suelen estar formados por la prospección, exploración, evaluación del proyecto, construcción, explotación, producción y cierre.

- La clasificación de los impactos generales de las actividades mineras sobre el medio natural, de esta manera se aborda brevemente los impactos a la atmosfera, a los suelos y a las aguas superficiales y subterráneas.
- Desarrollo del tema objetivo relacionado con la caracterización de los impactos físicos sobre el medio hidrológico.
- Discusión de los resultados obtenidos durante el desarrollo del tema objetivo y análisis.
- Conclusiones principales del TFM.

### **3. DESARROLLO**

#### **3.1. EL MEDIO HIDROLÓGICO EN EL ENTORNO MINERO**

En el entorno minero el estudio de las principales características del medio hidrológico suele ser de gran importancia tanto para el reconocimiento de su aprovechamiento en las actividades extractivas como en los potenciales impactos sociales y contaminación que pudieren afectar su ciclo. La minería y el medio hidrológico están directamente relacionados ya que los cambios que ocurran en el suelo debido a las actividades extractivas pueden afectar de manera directa o indirecta tanto a cuerpos de agua superficial como subterránea en sus características fisicoquímicas. Estas afecciones pueden depender de una serie de factores incluyendo el tipo de yacimiento mineral y como se ha desarrollado (o se desarrollara) su extracción, de manera general se puede hablar de una minería metalúrgica de extracción de minerales metálicos como el oro, plata, cobre, hierro, aluminio entre otros y una minera no metalúrgica de explotación de minerales no-metálicos utilizados para la construcción e industria en general.

Los procesos mineros pueden causar un desequilibrio en el ecosistema y a su vez el ciclo hidrológico puede verse afectado ((Jhariya y Choraisia, 2010). Varios afectos como la reducción de la humedad en el suelo y el aire, alteración de los sistemas de drenaje natural, deforestación, etc., pueden ser responsables de un ciclo hidrológico errático y lluvias impredecibles (Jhariya y Choraisia, 2010; Karmakar y Das, 2012).

Una de las premisas fundamentales al considerar la interacción del agua con las actividades mineras es el de entender que tanto las aguas superficiales como las subterráneas como un único recurso ya que un impacto negativo sobre cualquiera de estas acabara indudablemente generando varios efectos negativos sobre las otras (Winter et al., 1998).

Prácticamente en todos los ciclos de vida de la minería existe una constante interacción entre las actividades desarrolladas y los sistemas de aguas superficiales y subterráneas, estas interacciones pueden interferir tanto en el equilibrio hidrológico como en el balance hídrico además de su calidad, por lo que resulta indispensable comentar brevemente como estos interactúan en el entorno minero.

El ciclo hidrológico se define como una sucesión continua de etapas que atraviesa el agua al

pasar de la atmosfera a la tierra y volver a la atmosfera: evaporación desde el suelo, mar o aguas continentales, condensación de nubes, precipitación, acumulación en el suelo o masas de agua, infiltración, escorrentia y re-evaporación (Campos Aranda, 1998).

Como todo ciclo, el hidrológico no tiene ni principio ni fin; y su descripción puede comenzar en cualquier punto (Aparicio, 1992), igualmente el medio hidrológico presenta heterogeneidades en tiempo y espacio sobre todo por los procesos de interacción del sistema con la flora, fauna, el clima y también los antropogénicos. Ocurre como un sistema, como una estructura coherente o volumen en el espacio, que se encuentra delimitada por una frontera, en donde los componentes internos se encuentran interactuando entre sí o con otros sistemas adyacentes (Chow, 1965), además se trata de un sistema en donde la radiación solar sirve de fuente de constante energía (Fetter, 2014).

En el entorno minero y dependiendo de la geografía donde se ubique pueden existir precipitaciones que generen importantes cuerpos de agua superficiales, los mecanismos de evaporación y transpiración pueden sufrir cambios debido a la apertura y adecuaciones de sitios para el levantamiento de infraestructura y explotación. Los bosques desempeñan un papel importante en el ciclo hidrológico a través de la evapotranspiración y de esta manera contribuyen en gran medida a la producción de aguas atmosféricas que conducen a la precipitación (Jhariya y Choraisia, 2010; Dubey y Dubey, 2011; Frelich, 2014).

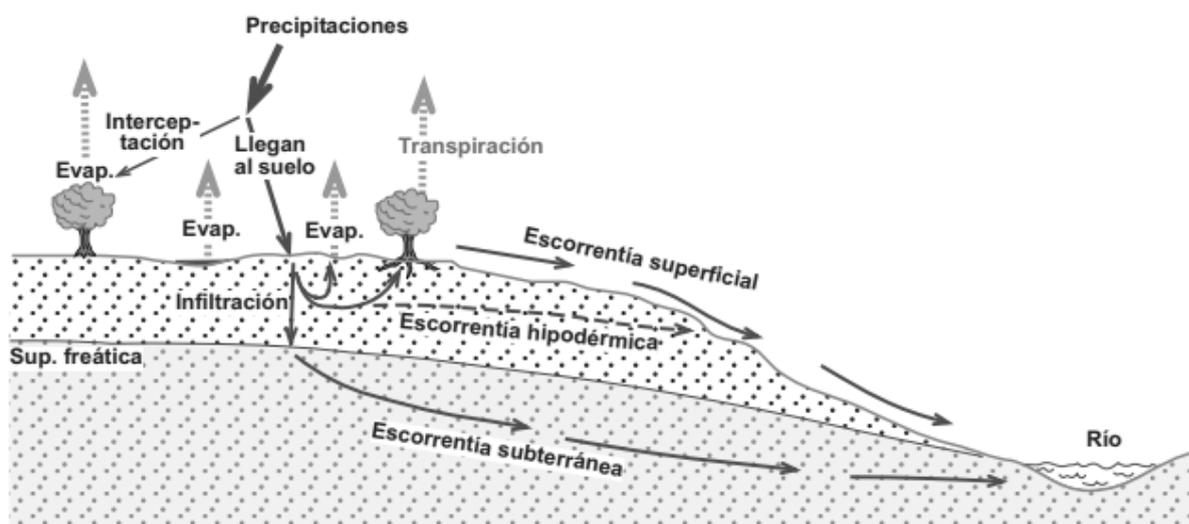
La dinámica de la escorrentia superficial e infiltración también puede variar de manera significativa si se considera que en las actividades mineras es común la remoción de cobertura vegetal, apertura de tajos o cambios en la topografía para la adecuación de infraestructura y frentes de explotación.

La movilidad de los contaminantes procedentes de fuentes como vertederos, pilas de lixiviación, escombreras de material estéril entre otros, se ve magnificada por exposición a lluvias y nevadas. La descarga final de la escorrentía superficial, producida a partir de la lluvia y el derretimiento de la nieve, es un mecanismo por el cual los contaminantes se liberan en las aguas superficiales según lo mencionado por MINEO Consortium (2000).

El flujo subsuperficial es generalmente local y es un proceso importante entre diferentes variables dentro del subsistema (Díaz et al., 2005) por lo que las masas de agua superficiales

y subterráneas están conectadas en función del tipo de material y la conductividad hidráulica, la apertura de frentes de excavación, galerías, túneles y aumento de la densidad de fracturación en macizos rocosos puede influir sobre dicha interacción, además es de relevancia considerar la interacción entre los sistemas acuíferos presentes y su abatimiento y despresurización cuando existe actividad minera subterránea.

En la Figura 1, se presentan los componentes típicos del sistema hidrológico.



**Figura 1.** Componentes de un sistema hidrológico

(Tomado de [https://hidrologia.usal.es/temas/Ciclo\\_hidrol.pdf](https://hidrologia.usal.es/temas/Ciclo_hidrol.pdf).)

### 3.2. ETAPAS MINERAS Y ACTIVIDADES DESARROLLADAS

En esta sección se abordarán las principales etapas mineras y sus actividades de tal manera de disponer de una visión general sobre cuáles de estas pueden estar asociada o ejercer presiones sobre el medio natural causando impactos de manera directa o indirecta.

“Los proyectos mineros asocian distintas fases que se desarrollan de manera secuencial y que inician con la exploración del recurso mineral y termina con el periodo de post-cierre del proyecto” (Environmental Law Alliance, 2010). Estos pueden ser clasificados en función de varios criterios, pero sobre todo se ha tomado en cuenta si las labores se desarrollan por encima o por debajo de la superficie del terreno, de esta manera pueden ser divididos en proyectos mineros a cielo abierto o subterráneos.

En la Figura 2, se presentan la división de las etapas mineras según la Ley General de Minería

Texto Único Ordenado (Decreto Supremo No. 014-92-EM, Perú, 2016)



**Figura 2.** Ciclo de vida de un proyecto minero

(Tomado de Decreto Supremo No. 014-92-EM, Perú, 2016).

### 3.2.1. Cateo y prospección

El cateo es la acción conducente a poner en evidencia indicios de mineralización por medio de labores mineras elementales (Ministerio de Energía y Minas, Perú, 2016). Uno de los fundamentos es buscar y el objetivo es descubrir (Lewis y Clark, 1964)

La prospección es la investigación conducente para determinar áreas de posible mineralización, por medio de indicaciones químicas y físicas, medidas con instrumentos y técnicas de precisión (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2016).

### 3.2.2. Exploración

Apaza, 2018 menciona que “La exploración es el proceso de búsqueda de depósitos de minerales, correspondiente a la etapa de identificación de un proyecto minero. El ciclo de vida de cada mina comienza con la exploración, ubicar dónde pueden estar presentes los minerales, evaluar el tamaño y la calidad del depósito y observar las realidades económicas de la extracción”.

En esta fase se hacen investigaciones de la exploración del mineral y ciertos factores económicos que pueden ser influyentes en el proceso. Una de las actividades es el de levantar un estudio de la ocurrencia de nuevos depósitos minerales y cuales factores económicos rigen su desarrollo, todo esto relacionado con las actividades siguientes:

- Geofísica
- Geoquímica
- Perforación
- Economía de la exploración

La exploración minera se divide en exploración inicial donde se recopila información regional y exploración avanzada en donde se suelen llevar a cabo labores mucho más focalizadas y específicas de recopilación de información geológica, geofísica; geoquímica, perforación minera y evaluación ambiental

### **3.2.3. Desarrollo**

El propósito fundamental del desarrollo es la delimitación de los cuerpos mineralizados y su preparación para el trabajo (Lewis y Clark, 1964). Si durante la etapa de exploración se concluye que existe la posibilidad de un yacimiento mineral de extensión y grado suficientes, implicaría que el proyecto puede comenzar con la fase de planeamiento de desarrollo de la mina (Environmental Law Alliance, 2010). Esta fase del proyecto tiene varios componentes como la construcción de infraestructura vial de accesos y facilidades iniciales y la preparación del lugar y desbroce de tal manera de hacer posible la explotación del mineral contenido en el yacimiento.

En la Figura 3, se presenta un esquema tipo de construcción de instalaciones en donde se puede observar la ocupación de la zona de extracción mineral, el depósito de estériles y la zona de acopio mineral.



**Figura 3.** Esquema de ciclo de vida de una mina

(Modificado de <http://segemar-intemin-bibliotecaagro.blogspot.com/2014/05/esquema-de-la-mina-ciclo-abierto.html>, Ministerio de recursos no renovables y Ecuacorriente, 2014).

### 3.2.4. Explotación

Todos los tipos de explotación minera se encuentran compartiendo aspectos comunes como lo es la extracción y concentración del recurso de la superficie terrestre. Los proyectos mineros difieren considerablemente en los métodos propuestos para la extracción y concentración del mineral metálico. “En casi todos los casos, los minerales que son metálicos se entierran por debajo de una capa de suelo o roca común (denominado ‘excedente’ o ‘desecho de roca’) que debe ser removido o excavado para acceder al depósito de mineral metálico. La primera forma en la que los proyectos mineros propuestos se diferencian entre sí es, por lo tanto, en el método propuesto para sacar o excavar la sobrecarga o cubierta de material (suelo) encima del yacimiento”. (Environmental Law Alliance, 2010).

Los métodos de explotación en general pueden ser agrupados en explotación a cielo abierto o de explotación subterránea.

En lo que se refiere a minería superficial podemos mencionar los siguientes tipos de

explotación (López , 1994):

- Explotación a Tajo Abierto (*Open Pit*)
- Explotación por Canteras (*Quarry Mining*)
- Explotación Aluvial (*Alluvial Mining*)
- Explotación por Destape (*Strip Mining*)
- Explotación por Recolección (*Harvesting Mining*)

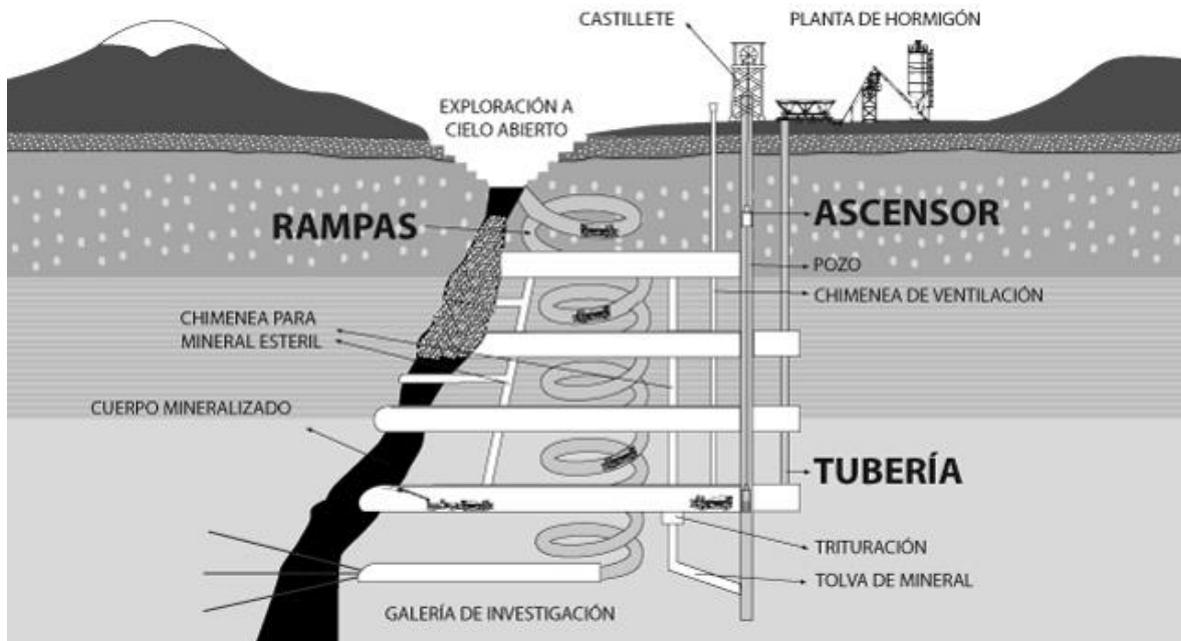
Entre los tipos de explotación de minería subterránea podemos mencionar los siguientes (López, 1994):

- Rebajes abiertos
- Salones y pilares
- Tumbe por subniveles
- Tumbe sobrecarga
- Rebajes abiertos con trancas horizontales
- Corte y relleno
- Cuadros conjugados
- Frentes largas
- Frentes cortas
- Rebanadas descendentes
- Hundimiento por subniveles
- Hundimiento de bloques y paneles

Durante la etapa de explotación también existen varias actividades que están relacionadas con la formación y disposición de relaves, disposición del desmonte o desecho de roca y los procesos extractivos del mineral en sí mismo.

Los relaves son remanentes que resultan del proceso de molienda del mineral a partículas finas y luego que se extraen el/os metal(es) valioso(s) (Environmental Law Alliance, 2010).

En la Figura 4, se describen los elementos básicos de una explotación subterránea.



**Figura 4.** Elementos de una explotación subterránea

(Tomado de, [www.minerielibrosycursos.com](http://www.minerielibrosycursos.com), 2019)

### 3.2.5. Beneficio

“El siguiente paso que ocurre en la minería está relacionado al chancado, la trituración (o molienda) del mineral de tal manera de separar las cantidades relativamente pequeñas de metal del material no metálico en un proceso que se denomina ‘beneficio’” (Environmental Law Alliance, 2010)

Durante esta etapa los procesos de molienda resultan ser las más costosas y las técnicas están relacionadas a separación físico/química de concentrados sea por gravedad o separación magnética entre otros. Los desechos generados incluyen rocas, relaves y lixiviados que deberán ser tratados o dispuestos según las exigencias legales.

### 3.2.6. Transporte y almacenamiento

El transporte y almacenamiento de los minerales corresponde a todo el proceso que implica el movimiento desde la zona donde se ha implementado la infraestructura de beneficio hasta los sitios de almacenamiento. El transporte puede ser a través de fajas transportadores, volquetas o equipos especiales. Además, también se considera el transporte desde el sitio de acopio hacia las terminales marítimas o puertos de donde se exportará el mineral a otras localidades.

### 3.2.7. Cierre de Mina

El cierre de minas se define como un conjunto de actividades a ser implementadas a lo largo de todo el proyecto minero con la finalidad de dar cumplimiento con los criterios ambientales específicos para el sitio y además lograr los objetivos sociales deseados luego de la etapa de minado. “El cierre de minas es un proceso progresivo que empieza en la primera etapa del proyecto con el diseño conceptual y termina sólo cuando se han alcanzado de manera permanente los objetivos específicos de cierre” (Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros del Perú, 2006).

“Todo proyecto minero eventualmente se cerrará. Algunas minas se cierran debido a razones económicas o logísticas, mientras que otras simplemente se quedan sin mineral viable para extraer. En algunos casos, las minas pueden cerrar temporalmente hasta que los mercados mejoren. En un proyecto minero, antes de que un sitio de mina pueda devolverse a la comunidad, debe hacerse seguro y la tierra debe rehabilitarse a un nivel aceptable, un proceso que puede llevar varios años. Las empresas mineras deben poder avanzar al próximo sitio viable de la mina, asegurando que la industria siga siendo sostenible” (Apaza, 2018).

La fase del cierre es una parte natural del ciclo de vida de cada proyecto minero o la mina en sí. En esta parte se debe hacer un estudio de cómo la economía y las fuerzas del mercado pueden influir en la decisión de cerrar una mina, relacionados con:

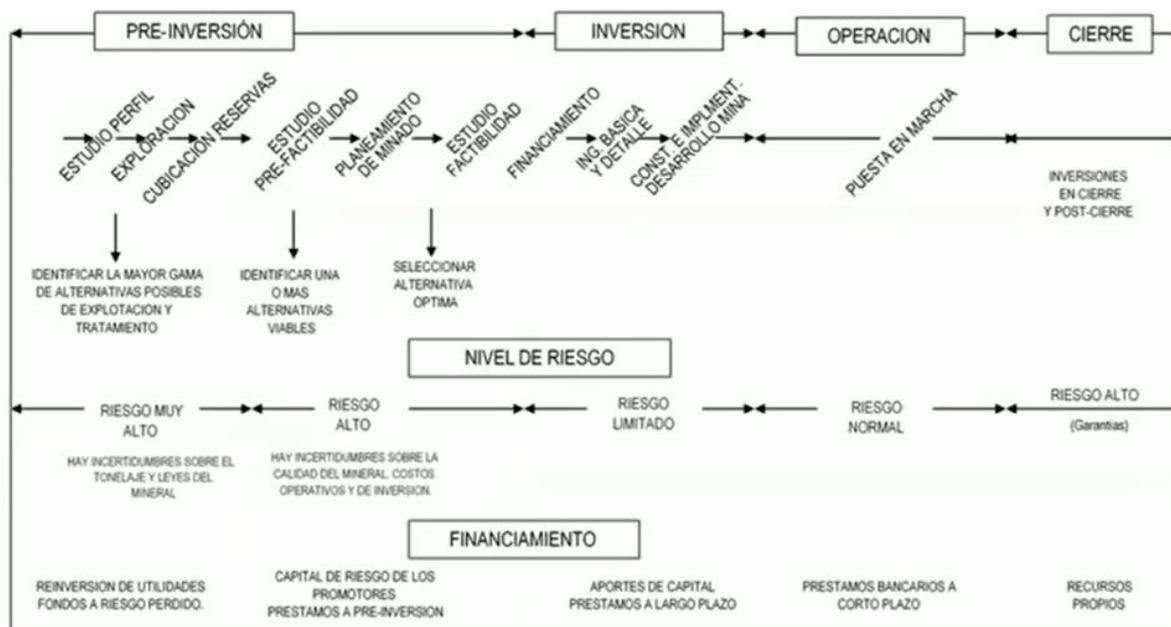
- Cierre temporal
- Economía del cierre de la mina
- Impactos y logística de cierre
- Ciclos de minería sostenible

Los proyectos mineros necesitan de inversiones financieras importantes para ser desarrollados y en consecuencia en las primeras fases que están relacionadas con la exploración y estudios de factibilidad es donde el nivel de riesgo es muy alto por lo que resulta necesario el conocimiento integral geológico, ambiental y social para que durante las fases de operación y cierre sean exitosas.

En la minería los tiempos entre etapas son largos y las inversiones son enormes, entre el

descubrimiento y el inicio de la operación (la ‘puesta en marcha’) pueden pasar décadas, el costo de inversión en exploración y estudios puede ser de cientos de millones de dólares y las inversiones totales podrían ser miles de millones de dólares.

En la Figura 5, se describe de manera general las fases de inversión minera y su nivel de riesgo.



**Figura 5.** Fases de inversión minera

(Tomado de [https://www.slideshare.net/JhonJairoCiezaAranda/tema-1-20171-valor-de-una-empresa-minera-1?from\\_action=save](https://www.slideshare.net/JhonJairoCiezaAranda/tema-1-20171-valor-de-una-empresa-minera-1?from_action=save), Cieza, 2017.)

### 3.3. IMPACTOS DE LA MINERÍA EN EL MEDIO NATURAL

Un artículo publicado por la BBC (<https://www.bbc.com/news/av/world-africa-58119653>) menciona que alrededor del 60% de los cuerpos de agua en Ghana están contaminados debido a las actividades de minería ilegal. Las actividades mineras comprenden diversas etapas, cada una de las cuales conlleva impactos ambientales particulares (Movimiento Mundial por los Bosque Tropicales (WRM), 2004).

En este capítulo se abordará de manera breve, el impacto que producen las actividades mineras en el medio físico o natural, impacto puede clasificarse de diversas formas atendiendo su tipología como puede ser por la afectación positiva o negativa, por la intensidad, por la extensión, por el momento en que se manifiesta, por su persistencia, por la

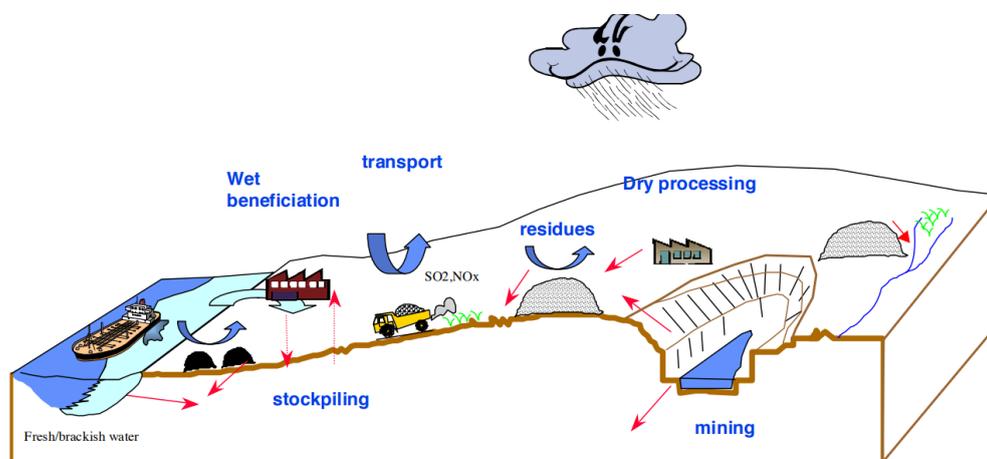
capacidad de recuperación del medio, por la relación causa – efecto, por la periodicidad, por la necesidad de aplicación de medidas correctoras entre otras,. e incluso los aspectos socioeconómicos, humanos y culturales que resultan ser complejos y no son motivo de estudio en este TFM.

Todos los factores, procesos o propiedades que ocurren o constituyen el medio natural pueden verse afectados en mayor o menor medida por las acciones humanas. Estas propiedades se pueden sintetizar en los siguientes grupos (Conesa et al., 1997), que engloban la totalidad de los factores medioambientales como son clima, agua, suelo, flora, fauna, valores culturales, etc.

- Factores físicos – químicos
- Factores biológicos
- Factores paisajísticos
- Factores sociales, culturales humanos y económicos (los cuales no han sido abordados en este TFM)

De esta manera y acorde con el tipo de proyecto minero extractivo los componentes del medio natural como la atmosfera, los suelos, las agua superficiales y subterráneas pueden verse afectadas en mayor o menor medida.

En la Figura 6, se expone un esquema general de las interacciones que ocurren entre los procesos mineros y el ambiente.



**Figura 6.** Patrones esquemáticos de las interacciones entre los procesos mineros (minería superficial, desechos en vertederos, transporte, procesamiento, acopio del mineral) y el ambiente.

Las principales vías están representadas por las flechas rojas para agua (infiltración, escorrentía, descarga...) y en flechas color azul para aire (erosión, emisiones contaminantes...).

*Tomado de: (MINEO Consortium, 2000).*

### **3.3.1. Impactos en la atmósfera**

La atmósfera puede verse afectada por alteraciones físicas y químicas relacionadas con la calidad de aire, el transporte de emisiones en el aire sucede durante todas las etapas del ciclo minero, “Las operaciones mineras requieren maquinaria pesada, las pilas o depósitos de desechos contienen partículas pequeñas que pueden ser fácilmente dispersadas por el viento y alcanzar cuerpos de agua cercanos produciendo efectos sobre sus características físico-químicas”.(Environmental Law Alliance, 2010).

La minería produce una serie de emisiones a la atmósfera en diferentes formas (Oyarzun et al., 2011):

- Sólidas, como polvo de las voladuras de roca, el de carga y transporte, además de material particulado que levanta el viento de los relaves no controlados en regiones secas áridas o semiáridas. Además puede existir remoción eólica de material fino en escombreras y balsas abandonadas (Lillo, 2006), lo que puede incurrir en que el material particulado alcance fuentes de agua superficiales, esto puede producir a su vez un aumento en la carga de sedimentos de los cuerpos hídricos cercanos causando nuevos impactos indirectos.
- Gases relacionados a los procesos de extracción, los relacionados con la quema de combustibles, gases implicados en las voladuras entre otros que a su vez pueden interactuar con fases acuosas presentes.

La alteración del nivel de ruido también puede ser considerado un impacto en la atmósfera en el sentido que la atmósfera es un medio que el ruido utiliza para moverse como una onda y puede causar afecciones sobre las personas y en el comportamiento de la fauna.

Los aerosoles que se producen durante la explotación minera, y sobre todo, durante procesos de hidrometalurgia, que implican el riesgo por aspersión de pilas de mineral con compuestos a menudo de alta toxicidad (Lillo, 2013), pueden afectar a la atmósfera a grandes distancias e incluso alcanzar cuerpos de agua distantes.

La minería a gran escala potencialmente puede contribuir de manera importante a la contaminación del aire, especialmente durante la etapa de operación. Las actividades durante la extracción de mineral, procesamiento, manipulación y transporte dependen del equipo, procesos y materiales pueden generar contaminantes atmosféricos peligrosos tales como material particulado, metales pesados, monóxido de carbono, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno (Environmental Law Alliance, 2010). Estas partículas pueden precipitarse en cuerpos de agua superficiales cercanos causando sedimentación extra y variaciones en la calidad de las mismas.

En la Figura 7, se presenta una fotografía en donde se observa el levantamiento de material fino hacia la atmosfera producto de voladuras en minería.



**Figura 7.** Impacto a la atmosfera por voladuras en procesos extractivos

(Tomado de: [https://www.ecoportat.net/temas-especiales/mineria/entre\\_los\\_venenos\\_mineros\\_esta\\_el\\_polvillo\\_de\\_las\\_explosiones/](https://www.ecoportat.net/temas-especiales/mineria/entre_los_venenos_mineros_esta_el_polvillo_de_las_explosiones/), 2013).

### **3.3.2. Impactos en los suelos**

Los suelos se convierten en receptores inminentes de la contaminación que es transportada en fase sólida, líquida además de gaseosa (Oyarzun et al., 2011). Prácticamente durante todas las fases de laboreo minero existe interacción con el suelo y la roca, lo que implica que se presenten una serie de potenciales afectaciones y que pueden ser agrupada de forma física o química entre las cuales podemos mencionar la erosión, deforestación, la contaminación y alteraciones químicas, modificación del relieve y su morfología, alteración de la dinámica de los procesos de ladera, fenómenos asociados a subsidencia, pérdida de propiedades físicas

y estabilidad de los terrenos afectados entre otros. Un estudio encargado por la Unión Europea al consorcio MINEO menciona que las operaciones mineras continuamente se encuentran modificando el paisaje circundante mediante la remoción de materiales previamente no perturbados. La erosión que ocurre por la exposición de suelos, extracción de minerales, relaves y materiales finos que se encuentran en las pilas de desechos favorece el aumento de la carga de sedimentos en las aguas superficiales y drenajes (MINEO Consortium, 2000).

La deforestación que puede ocurrir por el desarrollo de las actividades mineras implica la remoción y destrucción de la cobertura boscosa, con el consiguiente cambio de uso de la tierra, lo que ocasiona su pérdida cuantitativa, cualitativa y genera fragmentación. La fragmentación corresponde al estado de división al que fue sometido un hábitat continuo. La pérdida de continuidad conlleva a la disminución de la conectividad, es decir, se limita la posibilidad de que las plantas y animales puedan dispersarse o moverse, según el caso, entre los fragmentos de bosques remanentes; además se comprometen todas las funciones de los ecosistemas, incluyendo los procesos biogeoquímicos (Llamozas et al., 2003). La destrucción de la cobertura boscosa favorece los cambios en la textura de los suelos y esto a su vez afecta que los procesos de infiltración causando impactos en los regímenes de los cuerpos hídricos subterráneos por disminuciones importantes en las propiedades de retención de agua

La erosión de los suelos en zonas mineras puede causar alteraciones temporales en los regímenes hidrológicos debido al aporte de materiales hacia los cuerpos hídricos (Mollere et al., 2000), así también los procesos erosivos pueden favorecer las inundaciones por aumento de sedimentos que pueden causar represamientos aguas abajo.

Por otra parte, la pérdida de estos ecosistemas, en especial los boscosos, por eliminación total o parcial de su capa vegetal traerá consigo un aumento de la temperatura ambiental (que acrecienta el aumento de la evaporación del agua), así como la liberación al ambiente de CO<sub>2</sub> (gas invernadero), por la pérdida de su biomasa vegetal. Los ecosistemas naturales tienen un papel clave en la protección del suelo y del agua, el control y estabilidad de la temperatura, así como en el almacenamiento de carbono. Esto lleva irremediablemente a la pérdida en la capacidad de los sistemas para almacenar agua (y controlar su flujo), así como a la imposibilidad de volver a fijar carbono en proporciones similares, aún luego de milenios,

dadas las características muy pobres de estos suelos (Oliveira y Morón, 2018).

En la Figura 8, se observa una imagen de la erosión en la amazonia causada por una intensa actividad de deforestación por actividades mineras irregulares.



**Figura 8.** Impactos en los suelos causados por la deforestación y pérdida de cobertura vegetal (Tomado de: *Deforestación y Fragmentación de hábitat: amenazas de la minería*, Oliveira y Morón, 2018).

La contaminación de suelos y por tanto las alteraciones químicas que estos sufren pueden causar afectaciones al ambiente y a la salud humana, según un estudio encargado por la Unión Europea al consorcio MINEO se menciona que los suelos pueden ser contaminados por partículas arrastradas por el viento o por la existencia de derrames de compuestos químicos y residuos. Algunas partículas de polvo pueden causar una serie de afecciones al ambiente y a la salud humana en algunas minas debido al grado de toxicidad que pueden presentar como lo son material particulado con contenidos de arsénico, plomo y radionucleidos, además la posibilidad de que vertidos de residuos químicos de mina interactúen con el suelo pueden ser riesgosos cuando estos son utilizados como materiales de relleno u ornamentales en las instalaciones de la mina.

Lillo (2013), menciona que las actividades mineras pueden causar la pérdida de propiedades

químicas en el suelo debido a la interacción con metales pesados, metaloides e hidrocarburos que pueden ser generados por efluentes líquidos y sólidos, además puede ocurrir la acidificación de suelos por la acumulación de sulfuros y drenaje ácido.

En particular varias zonas que han sido afectadas por actividades relacionadas con proyectos mineros presentan elevados contenidos de metales pesados, los que estarían asociados a las fases de minerales primarios y secundarios del suelo; de igual manera se pueden encontrar elevadas concentraciones de estos metales en la vegetación. “La migración de los metales pesados desde una zona de acumulación o vertido de residuos a través de la zona no saturada está considerada como uno de los problemas más graves desde el punto de vista medioambiental” (Carmona, 2012). Los metales pesados pueden quedar atrapados en el suelo en forma de disueltos en la solución del suelo o fijados por adsorción, pueden ser absorbido por las plantas y formar parte de las cadenas tróficas, pueden pasar a la atmósfera por volatilización y además pueden moverse a través de las aguas superficiales o subterráneas.

En la Figura 9, se observa la presencia de metales pesados en sedimentos producto de actividades mineras afectando el suelo y cuerpos de agua.



**Figura 9.** Afectación en suelos y aguas de metales pesados Pirita y Cobre en una zona minera abandonada en Bagacay, Islas Samar - Filipinas.

(Tomado de: <http://soil-environment.blogspot.com/2009/06/heavy-metal-pollution-and-nutrient.html>, 2009)

La morfología y relieve de las locaciones mineras puede variar debido a los impactos físicos

que conlleva el desaparecer los suelos por excavaciones, variando sus propiedades físicas por la compactación debido a efectos de los ingentes volúmenes de residuos mineros, a través de la construcción de infraestructuras tales como edificios para plantas de tratamiento de minerales, oficinas, y redes de vías de transporte para tráfico rodado (Oyarzun et al., 2011).

La compactación del suelo además es un problema que restringe el crecimiento de las raíces de las plantas, el movimiento del agua y la absorción de nutrientes (Chen y Weil, 2010).

Las modificaciones del relieve originadas por las actividades mineras pueden causar un aumento en la escorrentía y pérdida de propiedades físicas lo que a su vez generara erosión, impactos visuales, alteración en la dinámica de los procesos de ladera favoreciendo el riesgo de deslizamientos, desprendimientos, hundimientos, incremento de la sedimentación aguas abajo por la presencia de escombreras, sobrecargas y otras infraestructuras.

En la Figura 10, se observa un importante deslizamiento de tierra ocurrido en Ecuador producto de actividades mineras ilegales en donde fallecieron varias personas a causa del impacto.

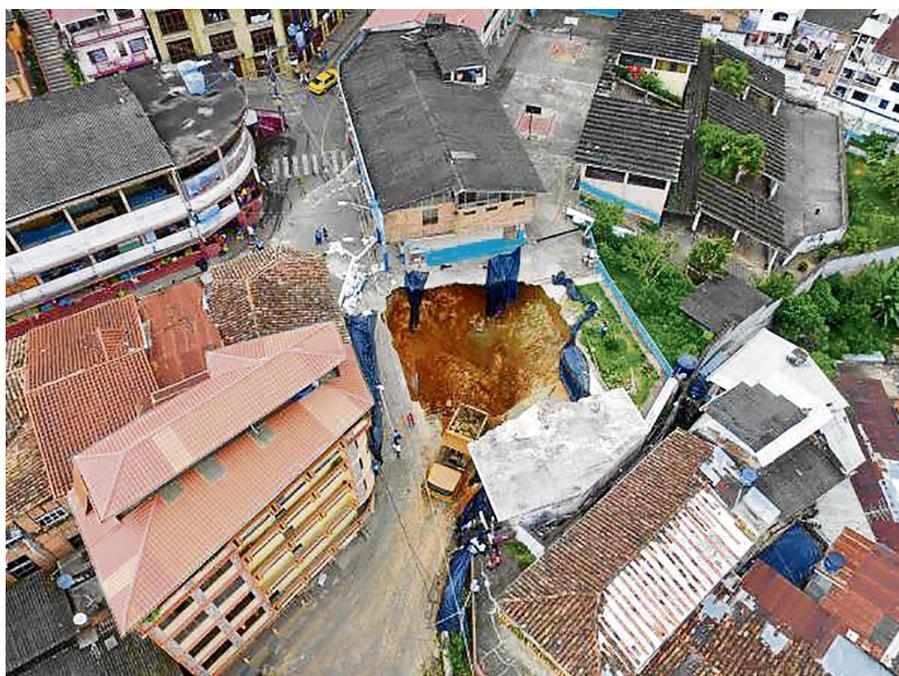


**Figura 10.** Deslizamientos de tierra por actividad minera ilegal en la provincia de Esmeraldas – Ecuador.

(Tomado de: "<https://ecuadorendirecto.com/2020/11/19/cinco-personas-fallecieron-por-deslizamiento-de-tierra-a-causa-de-la-mineria-ilegal-en-esmeraldas/>", 2020).

“Algunos impactos al terreno están relacionados con procesos de subsidencia de las actividades extractivas de mineral en galerías subterráneas, la construcción de túneles, la extracción de fluidos (agua, petróleo o gas) acumulados en reservorios subterráneos, el descenso de nivel freático por estiajes prolongados, la disolución natural del terreno y lavado de materiales por efecto del agua, los procesos morfotectónicos y de sedimentación o los procesos de consolidación de suelos blandos u orgánicos” (Vallejo et al., 2002).

En la Figura 11, se observan hundimientos importantes de tierra en un sector céntrico del poblado de Zaruma en Ecuador causado por minería artesanal histórica en la zona.



**Figura 11.** Hundimiento provocado por actividades mineras en el poblado de Zaruma - Ecuador

(Tomado de: “<https://www.eldiario.ec/noticias-manabi-ecuador/423873-hundimiento-de-unos-15-metros-mantiene-en-zozobra-a-zaruma/>”, 2017)

### 3.3.3. Impactos en el agua

Uno de los impactos más significativos de un proyecto minero es el efecto en la calidad y disponibilidad de los recursos hídricos en la zona del proyecto (Environmental Law Alliance, 2010). Oyarzun et al. (2011), indican que “se suele pensar que las aguas son solamente un medio receptor de la contaminación, pero poco cómo transportadoras de la misma, y que además estas pueden presentarse como “inductoras” relacionadas a eventos de contaminación”.

Varios impactos pueden ser nombrados cuando se trata del recurso hídrico superficial y subterráneo pero en términos generales se puede hablar de impactos físicos relacionados a alteraciones en la dinámica fluvial, pérdidas de masa de agua, alteraciones en el régimen hidrogeológico por interceptación de napas entre otros, e impactos químicos relacionados a la contaminación de aguas superficiales y subterráneas por vertidos en general de metales pesados y variaciones de la calidad por drenaje ácido de mina (DAM).

Oyarzun et al, (2011), mencionan que, en todos los casos, los efectos desarrollados por las actividades de la minería sobre las aguas provocan, por un lado, el transporte de partículas sólidas, la adición de sales en el agua y la variación del pH de las aguas. Al respecto de las partículas sólidas, Castro y Reckendorf Frank (1995) mencionan que los efectos de la minería incluyen no sólo un aumento de los sedimentos, sino también una introducción de toxinas. Estas toxinas, muy a menudo metales pesados, se une al sedimento que se erosiona y se lava en el sistema hidrológico.

Karmakar y Das (2012), indican que los impactos de la minería tanto en el agua subterránea como en la superficial están relacionados con los efectos que se indican a continuación.

#### Aguas subterráneas

- Descenso del nivel freático
- Subsistencia
- Reducción del contenido de humedad en el suelo y la atmósfera
- Aumento de la temperatura debido al efecto albedo
- Perturbaciones en el ciclo hidrológico, lluvias y clima

#### Agua superficial

- Cambios en estados iniciales de la evaporación
- Percolación debido a la subsistencia y redes de fisuras
- Desequilibrios físicos – químicos
- Efectos en el ciclo hidrológico, lluvias y clima.
- Contaminación por polvo

Los impactos físicos asociados al medio hidrológico a causa de las actividades mineras serán

abordados en detalle en el capítulo siguiente, mientras los impactos asociados a la contaminación y los cambios en la calidad del agua se exponen de manera breve en este acápite.

Las masas de agua superficial como los son ríos, lagos e incluso océanos en algunos casos pueden ser degradados accidentalmente por derrames de compuestos químicos tóxicos, erosión de residuos de materiales o la descarga de contaminantes desde las minas (Jhariya et al., 2016).

Karmakar y Das (2012), mencionan que los constituyentes químicos del suelo y minerales disueltos en aguas regionales mantienen un balance químico que puede ser perturbado por la minería. Esto es debido a la ruptura y degradación del suelo y a las interrupciones en los sistemas de drenaje natural entre otros. olvidares importante mencionar que el agua es el principal agente responsable de la alteración química de minerales así también del transporte de los componentes liberados en ellas, tanto en coloides y partículas, como en especies en disolución (Oyarzun et al., 2011).

Los efectos causados en el agua pueden ser relativamente leves como cambios en el olor y sabor hasta severos como los relacionados a una alta turbidez, acidez y toxicidad, e incluso pueden favorecer la proliferación microorganismos que a su vez causen impactos en el ambiente y la salud. Al respecto, MINEO Consortium (2000), manifiesta que, tanto tajos (cortas) abiertos, estanques de relaves, depósitos de minerales, vertederos de rocas de desecho (escombreras) y pilas de lixiviación suelen ser fuentes significativas de contaminación por sustancias tóxicas que pueden ser vertidos al medio natural y causar afectaciones al recurso hídrico, no solamente de manera local, sino también regionalmente ya que la movilidad de los contaminantes puede verse magnificada por un aumento de la escorrentia superficial gracias a la exposición a lluvias y nevadas.

Oyarzun et al. (2011) mencionan, además, que las actividades relacionadas con la excavación y remoción de la zona no saturada con fines extractivistas también alterar la tasa de respuesta a posibles variaciones hidrogeológicas en los cuerpos de agua subterráneos presentes ya que esta cobertura ejerce un efecto de filtro frente a la contaminación por vertidos en la superficie. Así, se incrementa la vulnerabilidad de los acuíferos frente a la contaminación química y la inevitable pérdida de calidad como sucede, por ejemplo, en el

caso del DAM, donde la acidificación de las aguas va acompañada de la incorporación de metales pesados a la solución ácida.

Uno de los principales problemas ambientales en la industria minera es la formación del DAM y la asociada movilización de contaminantes (MINEO Consortium, 2000). Earthworks en su página web (<https://www.earthworks.org>) menciona que el DAM es una de las más serias amenazas al recurso hídrico, con capacidad de causar devastadores efectos sobre ríos, lagos y vida acuática por cientos e incluso (bajo ciertas condiciones) miles de años.

Galindo (2015), menciona que el DAM es un lixiviado tóxico que se desarrolla a partir de la lixiviación de sulfuros metálicos y de la pirita (pieza clave en el proceso de oxidación – lixiviación) presente en carbones por la acción del agua y del aire. Para ello existen dos fuentes principales: 1) el mineral sulfurado “*in situ*” (causa no antropogénica), y 2) las acumulaciones de residuos como escombreras (*mineral dumps*)” o depósitos de balsas de lodos o relaves (*tailings*). También indica que las reacciones mineralógicas pueden solamente dar a entender que las condiciones son puramente inorgánicas pero que en el entorno biológico existen elementos que juegan papeles decisivos como lo es la presencia de la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* responsable mayoritaria de la contaminación relacionada con el drenaje ácido procedente de explotaciones mineras y mineralizaciones en general.

Oyarzun et al. (2011) indican que el DAM en los residuos mineros en periodos de escasa pluviosidad causan incrementos en la acidez y además en la concentración de metales, mientras que los eventos de alta precipitación causan diluciones en la solución como sucede en el Distrito Minero de Mazarrón ubicado en Murcia (España) en donde los valores extremos de acidez como de altas concentraciones de metales alcanzan antes de que comiencen las lluvias.

En la Figura 12, se observan los efectos del DAM en el Distrito Minero de Mazarrón y en el Grupo Minero San Quintín en España.



**Figura 12.** Drenaje ácido de mina. La imagen de la izquierda muestra una pequeña laguna ocurrente en el Distrito Minero de Mazarrón en Murcia (*España*); mientras en la imagen de la derecha, se observa la creación de un arroyo ácido en el Grupo Minero San Quintín, en donde se explotaron recursos de plomo y zinc.

(Tomado: “*Minería Sostenible: Principios y Prácticas*”, Oyarzún y Oyarzun, 2011).

Finalmente cabe destacar que el tipo de los yacimientos minerales es un factor importante para la generación del DAM ya que pueden existir materiales neutralizantes de la acidez del drenaje, tal y como mencionan Oyarzun et al (2007) que indica, “es significativo prever que un yacimiento aurífero epitermal del tipo “alto en azufre” (*high sulfidation*) que se asocia a una alteración argílica avanzada puede implicar serios riesgos de generación de drenaje ácido. En cambio, estos riesgos serán moderados en el caso de un pórfido cuprífero hospedado por rocas volcánicas máficas con una alteración potásica y propilítica”.

Resulta evidente pensar que los impactos químicos que afectan el medio hidrológico no se presentan solos y existe una estrecha relación con los impactos físicos que se describen en el siguiente capítulo.

### **3.4. CARACTERIZACIÓN DE IMPACTOS FÍSICOS EN EL MEDIO HIDROLÓGICO**

En la sección anterior se ha comentado brevemente sobre los impactos más importantes y recurrentes que la minería puede causar en el medio natural, y que están en dependencia de una serie de factores naturales y antrópicos que, en conjunto, generalmente, se vuelven complejos de gestionar o controlar. En esta sección se abordará con mayor detalle los impactos físicos sobre el medio hidrológico que a través del tiempo han sido evidenciados y relacionados de manera directa e indirecta con las actividades mineras.

La mayoría de los estudios e investigaciones disponibles han sido desarrollados atendiendo los fenómenos y efectos que los impactos mineros ejercen sobre la calidad del agua y la salud humana, los cuales pueden ser reconocidos a menudo de manera inmediata. Pero, por otro lado, se advierte una carencia de investigaciones detalladas (al menos disponibles al público en general) acerca de las presiones y alteraciones hidráulicas de carácter físico ejercidas sobre el medio hidrológico, algunas no tan evidentes y que pueden exponerse luego de periodos extendidos de tiempo incluso posteriores a la fase de cierre de mina. Autores e investigadores como Younger P, Higuera P, Oyarzun R, Lillo J, Oyarzún, J, Blodgett S, Hawkins J, han abordado el tema exponiendo no solamente los fundamentos y características de dichos fenómenos, sino que, además, presentan casos de estudio que permiten al lector comprender de manera holística los compromisos ineludibles que los proyectos mineros deben concebir en cada una de las etapas para la protección y preservación integral del recurso hídrico. Acorde con lo mencionado, en esta sección se pretende conceptualizar los aspectos conformantes, caracterizarlos y exponer un estudio de caso breve para su comprensión integral.

Con respecto a la manera de como clasificar los impactos físicos en el medio hidrológico, aun no existe un criterio unificado. Lillo (2013), los agrupa en función de los efectos macro. Oyarzun et al. (2011), lo agrupan en función de las causas de la variación de los gradientes energéticos del agua. Younger et al. (2002), hacen un análisis en función de los impactos por excavación tanto en los sistemas de agua superficial como subterráneo. Para conceptualizarlos, en este TFM se ha optado por seguir los criterios expuestos por Lillo (2013), de acuerdo a:

- Las alteraciones en la dinámica fluvial;
- La pérdida de masas de agua;
- Las alteraciones en el régimen hidrogeológico

#### **3.4.1. Alteraciones en la dinámica fluvial**

El equilibrio del régimen hidrológico de una cuenca puede verse afectado por las actividades de laboreo minero, sobre todo durante la fase de exploración y beneficio que es donde interactúan una serie de procesos que pueden causar desequilibrios físicos tanto en superficie como en el subsuelo. Oyarzún y Oyarzun (2011), mencionan que la estabilidad física de terrenos que han sido intervenidos por la actividad minera puede favorecer procesos de remoción en masa, subsidencia y erosión lo que provoca un incremento en la carga sedimentaria causando alteraciones en la dinámica fluvial de los cuerpos hídricos superficiales; indican además que se puede comprometer la estabilidad de la red de drenaje superficial y subterránea. Lillo (2013), indica que entre los impactos en la dinámica fluvial se encuentran las variaciones del perfil y trazado fluvial, las variaciones en el nivel de base local y alteraciones de la dinámica en general debido a excavaciones, diques y represas, así como la presencia de partículas sólidas en la corriente, y el aumento de sólidos en suspensión y de fondo.

##### **Variaciones en el perfil y trazado de la corriente fluvial**

La extracción de materiales del lecho del río: arena, grava y cantos rodados para fines de construcción es una de las más grandes industrias mineras en el mundo. Hoy en día, el aumento de la población ha incrementado las demandas de materiales de construcción procedentes del cauce del río para desarrollar el sector urbano e industrial (Sreebha y Padmalal, 2011). Esta situación provoca una serie de afecciones a los perfiles y trazados de las corrientes fluviales entre otras derivadas de la extracción y la eliminación de los materiales del lecho del río y en el área de la llanura de inundación durante las fases de explotación y beneficio y en la corriente de los ríos muestra el peligro de la actividad minera (Sreebha y Padmalal, 2011).

Los cambios en la dinámica de la corriente fluvial pueden ser diferentes según el lugar donde ocurran, así en la cabecera fluvial (en zonas de cuenca alta) pueden existir un aumento de la erosión y modificación de niveles de base locales del agua, en los tramos medios la energía de arrastre de sedimentos puede ser muy variable y en las zonas de desembocadura puede

ocurrir que la tasa de sedimentación decrezca. Los cambios en la morfología del río y la erosión del canal, pueden extenderse en el río en aguas arriba y aguas abajo por varios kilómetros (Kamboj y Kamboj, 2019; Kondolf, 1994).

La Figura 13, presenta una imagen en donde se puede observar las variaciones de los perfiles y cambios en los trazados de ríos a causa de las actividades mineras artesanales.



**Figura 13.** Influencia en la parte baja de la ladera de una llanura aluvial perturbada por la minería artesanal en Ruanda

(Tomado de: "Alluvial artisanal and small-scale mining in a river stream-Rutsiro case study". Macháček, 2020).

### **Alteraciones por excavaciones, diques, represas y embalses**

Oyarzun et al (2011), mencionan que las alteraciones de los cursos fluviales pueden generar la modificación del perfil original y de implantación o modificación de los niveles de base locales, esto implica que existan variaciones al balance entre la tasa de erosión y las de sedimentación tanto aguas abajo como aguas arriba del sitio donde se origina la alteración del curso. Lo más frecuente ocurre con los embalsamientos relacionados con la instalación de presas con estación de balsas.

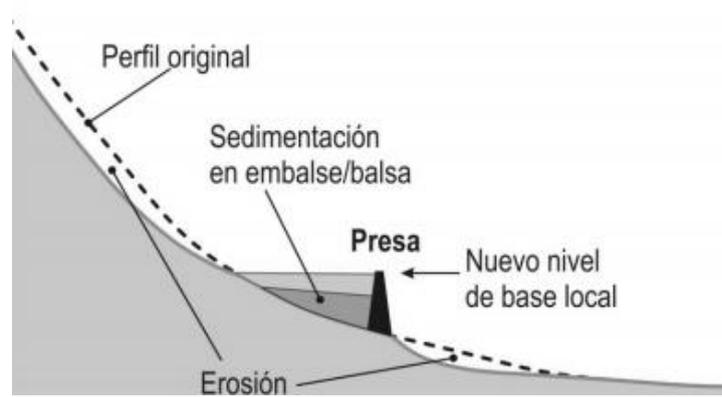
Los ríos transportan sedimentos desde las tierras altas erosionadas hasta las zonas de depósito cercanas al nivel del mar. Si la continuidad del transporte de sedimentos se ve interrumpida por las presas o la eliminación de sedimentos del canal mediante la extracción de grava (pudiendo ser producto de las actividades de laboreo minero, por ejemplo), el flujo

puede volverse “hambriento” de sedimentos y propenso a erosionar el lecho y los bancos del canal, produciendo incisión del canal, engrosamiento del material del lecho y pérdida de gravas (Kondolf, 1997).

Las represas y la minería han reducido la entrega de sedimentos de los ríos a muchas zonas costeras, lo que ha llevado a una erosión acelerada de las playas. La extracción de materiales en el lecho comúnmente causa incisión, que puede propagarse río arriba y abajo de la mina, socavando los puentes, induciendo inestabilidad del canal y reduciendo las corrientes (Kondolf, 1997).

La detención del agua debido a creación de embalses o estructuras de desviación de agua (como ocurre para el aprovechamiento en las labores mineras) puede ser otra importante consecuencia en la alteración de la dinámica fluvial. Como menciona Ibáñez (2001), el fenómeno con mayor impacto es la disminución de la irregularidad de caudal por la disminución de las crecidas, hecho que se ve reforzado por la regulación fluvial. Todo ello afecta notablemente las características del ecosistema fluvial, especialmente del bosque de ribera y de las especies de fauna acuática que se reproducen en las épocas de crecida creando fenómenos subsecuentes asociados a la alteración del régimen fluvial.

En la Figura 14, se observa un esquema de las variaciones del perfil por efectos de la erosión y sedimentación debido a la construcción de una presa.



**Figura 14.** Esquema mostrando varios efectos de erosión y sedimentación debido al represamiento de un cauce fluvial a causa del desarrollo de proyectos mineros. Nótese que por esta causa se genera además la acumulación de materiales químicamente reactivos en el curso de agua.

(Tomado de: “*Minería Ambiental Una introducción a los impactos y su remediación*”, Oyarzun et al., 2011).

Las infraestructuras superficiales pueden jugar un papel importante, una de las principales presiones sobre la integridad de una estructura de contención es la erosión, que causa inestabilidad en la forma del terreno, lo que resulta en la exposición de contaminantes encapsulados, la entrega elevada de sedimentos en las salidas de captación y la consiguiente degradación de la calidad del agua aguas abajo (Evans, 2000).

### **Aumento de la carga de fondo y en suspensión**

El aumento de la carga de fondo debido a la incorporación de partículas sólidas en la corriente y sólidos en suspensión está ligada principalmente a la erosión que puede ser provocada prácticamente en todas las etapas mineras, en especial en las de explotación, beneficio, transporte y almacenamiento sea por la eliminación de vegetación, voladura, uso de equipos pesados que crean dicha erosión e introducen sedimentos en los arroyos. La minería es responsable de la mayor producción sedimentaria incluso por encima de los sectores constructivos y agricultura (Hooke, 1994)

Las principales fuentes de erosión en los proyectos mineros pueden incluir áreas de extracción a cielo abierto, relaves, escombreras, carreteras para acarreo, vías de acceso y transporte, áreas de mantenimiento vehicular y equipos, áreas de explotación, entre otros (Sills et al., 2006).

Environment Australia (2002) menciona que existen efectos adversos que han sido causados debido a un mal y manejo poco adecuado de aguas en minas que incluyen entre otros: concentraciones no aceptables de sólidos suspendidos, así también sólidos disueltos en la escorrentía superficial, además de erosiones tanto en el lecho y bancos de los cursos de agua.

Estas aguas cargadas de sedimentos debido a la erosión descontrolada pueden causar corrientes laminares que se van colectando en canales, zanjas u otros medios conductores que finalmente pueden depositarse en zonas inundables o valles. Esta acumulación de gruesas capas de partículas finas de sedimentos pueden a su vez provocar importantes alteraciones en el hábitat acuático, pérdida de capacidad de almacenamiento en las aguas superficiales (e incluso afecciones a infraestructuras cercanas) (MINEO Consortium, 2000).

El aumento de la carga de fondo puede causar efectos negativos sobre las plantas de tratamiento, los arroyos que han aumentado en sedimentos pueden perder su capacidad de

transportar la escorrentia después de épocas de lluvias intensas lo que lo hace al cauce más propenso a inundaciones, de igual manera estos arroyos cargados pueden colmatar los embalses reduciendo su vida útil además de favorecer abarrancamientos por carga sólida arrastrada por la corriente (Jhariya et al., 2016).

Se cree que estos efectos solamente ocurren en el laboreo minero en zonas húmedas, sin embargo estudios realizados por Wray (1998), mencionan que en el complejo minero de Rodalquilar (Almería, España,) se ha comprobado la contaminación tanto de suelos como de sedimentos fluviales con presencia elevadas de As, Pb, Cu y Zn aguas debajo de la zona de vertido de los lodos producidos por el proceso de concentración de metales.

La Figura 15, muestra 2 fotografías que muestran los contrastes naturales a causa de aportes intensos de carga sedimentaria en el río Ok Tedi y sus vecindades.



**Figura 15.** Imágenes del río Ok Tedi uno de los causes más estudiados en Papua New Guinea

A la derecha se puede observar una imagen de la afectación de la carga de sedimentos producidos por los tailings del complejo minero de oro y cobre Ok Tedi en las vecindades del río Fly. A la izquierda el río Fly cercano a Kiunga aguas arriba de su unión con Ok Tedi. El río y la selva tropical se notan visiblemente intactos.

(Tomado de: <https://www.rettet-die-elbe.de/oktedi/environ2.htm>. 2021)

Strip Mining handbook (<https://sites.google.com/site/stripmininghandbook/chapter-2-1>), menciona que uno de los impactos que han comenzado a ser estudiados con mayor rigor se refiere a los efectos que produce la introducción de sólidos en suspensión en el medio acuático y su interferencia con la cantidad de luz en el agua y alteración de la temperatura, fenómenos que estarían causando cambios importantes en el hábitat acuático.

### 3.4.2. Pérdidas de masas de agua

Las actividades mineras que no disponen de controles legales e institucionales apropiados pueden causar impactos importantes sobre los volúmenes de agua de las cuencas hídricas en las que interactúan, no solamente puede ocurrir por la necesidad de utilizar el recurso para las actividades propias de laboreo minero durante las fases de exploración, explotación y desarrollo (sobre todo para el procesamiento mineral, asentamiento de polvo y facilidades para trabajadores), con la creación de embalses, túneles y tomas, sino además pueden existir pérdidas de masa de agua subterránea causando desequilibrios en el balance hídrico de la cuenca e incluso pérdidas de masas glaciares como indica la Comisión Investigadora sobre Glaciares en Chile (Programa Chile Sustentable, 2016), durante la etapa de explotación minera ha existido una intervención prolongada de equipos pesados para la remoción de hielo y sepultación de glaciares bajo una serie de botaderos estériles. Esto sin duda ha generado la pérdida de enormes reservas de agua dulce además de la exposición a contaminación y DAM de las aguas que a su vez percolan hacia los acuíferos y se mueven hacia ríos y esteros afectando la dinámica de consumo humano, en los ecosistemas y agricultura. A su vez esta situación también agrava la desertificación y aporta a la gravedad de la estrechez hídrica que está causando el cambio climático (Programa Chile Sustentable, 2016).

En la Figura 16, se muestran una serie de fotografías multitemporales de la situación de los glaciares Toro 1 y Toro 2 en Chile afectados por la intensiva actividad minera.



**Figura 16.** Imágenes aéreas mostrando las variaciones de los glaciares Toro 1 y Toro 2 en Atacama.

*(Tomado de: Comisión Investigadora sobre Glaciares en Chile, Programa Chile Sustentable, 2016.)*

Varias actividades extractivas provocan la ocupación y colmatación de masas de agua. Además, fenómenos de percolación (infiltración) del agua, pueden ocurrir debido a la

presencia de fracturas y microfracturas creadas o modificadas en el subsuelo, lo que puede originar a su vez, pérdidas de cuerpos de agua superficiales ((Karmakar y Das, 2012).

Otro de los fenómenos asociados con la pérdida de masas de agua subterránea es la subsidencia debido a las actividades de bombeo intenso durante las fases de explotación y desarrollo y pueden afectar negativamente la disponibilidad de agua subterránea de pozos de abastecimiento para poblaciones cercanas a la mina o incluso llegar a afectar a los cuerpos de aguas superficiales que estén interconectados (Blodgett y Kuipers, 2002).

Tovar (2007), indica que en el Perú varios bofedales (humedales) han desaparecido en los entornos donde se desarrolla minería subterránea debido al descenso de la napa (nivel) freática o, a su vez, porque estos fueron drenados artificialmente con la finalidad de establecer áreas de servicios e infraestructuras. Por acción del drenaje inducido, se producen variaciones de los niveles freáticos y cambios localizados en el caudal de los manantiales y en la dirección de flujo.

La Figura 17, muestra una fotografía donde se puede observar los efectos de secamiento y perturbaciones en el lecho del río a causa de actividades extractivas intensas.



**Figura 17.** Imagen mostrando los impactos causados en el arroyo Warath Rivulet por minería subterránea

El arroyo está ubicado al oeste de Helensburg cercano a la presa de Worona en Sidney Australia muestra evidencias de secamiento y fisuraciones en el lecho.

Tomado de: <https://www.illawarramercury.com.au/story/4867524/damaged-mining-takes-toll-on-water-supply/>

### 3.4.3. Alteraciones en el régimen hidrogeológico

El diagnóstico oportuno de las condiciones hidrogeológicas regionales y locales de los sitios de emplazamiento de proyectos mineros, y la cuantificación de las potenciales presiones a los que podrían estar sometidos los sistemas acuíferos pueden marcar la diferencia en cuanto a su sostenibilidad ya que los efectos pueden ser irreversibles a mediano o largo plazo (P. L. Younger, 2004).

Una serie de factores, que van relacionados al tipo de yacimientos, al tipo de terrenos y a las técnicas de exploración, pueden dificultar una observación directa de los fenómenos asociados a los cambios hidrogeológicos. Así por ejemplo, se puede mencionar los efectos asociados a la minería a cielo abierto (tipo *open pit*) las cuales, finalizadas las operaciones extractivas, los materiales estériles van “acomodándose” hasta alcanzar el equilibrio, aunque esto a su vez puede causar nuevas sobrecargas con creación de nuevas zonas de fracturamiento en el material subyacente creando cambios en el flujo local de las aguas subterráneas (P. L. Younger, 2004).

Lillo (2013), menciona que estas alteraciones físicas como las variaciones en el nivel freático, variaciones en el régimen de recarga y modificaciones en el flujo subterráneo, están relacionados con la modificación del relieve, la deforestación, y la compactación del terreno, entre otros. Karmakar y Das (2012), mencionan además algunas otras causas como la reducción del contenido de humedad en el suelo y atmósfera, aumento de la temperatura (efecto “*Albedo*”) y calentamientos espontáneos de remanentes carbonáceos.

#### **Alteraciones en los niveles de agua subterránea**

Las demandas de agua en las actividades mineras a menudo son satisfechas mediante la captación de cuerpos de agua superficial, aunque en ocasiones se suele utilizar el agua subterránea (aunque es necesario recordar que estas están interconectadas), cuyos excesos, por el contrario, necesitan ser intervenidos mediante bombeos para facilitar las obras de ingeniería y seguridad geotécnica previstas para la extracción del recurso mineral.

Tovar (2007), indica que tanto las actividades de bombeo (drenaje o despresurización) producen variaciones en los niveles freáticos y cambios localizados en el caudal de los manantiales y en la dirección de flujo, e incluso menciona un detrimento en la extensión de bofedales que conforman importantes áreas de recarga andina.

Uno de los prerrequisitos básicos en la seguridad geotécnica de operaciones a cielo abierto y en minería subterránea es mantener el control sobre la entrada de agua en la mina mediante bombeo y lo que puede afectar los niveles de los acuíferos locales (Hanzlik, 1985). Este autor indica, además, que las obras de drenaje pretenden mantener la estabilidad geotécnica de las pendientes reduciendo los efectos negativos de las presiones hidrostáticas de en el acuífero intervenido, mediante el descenso del nivel de agua lo más bajo posible.

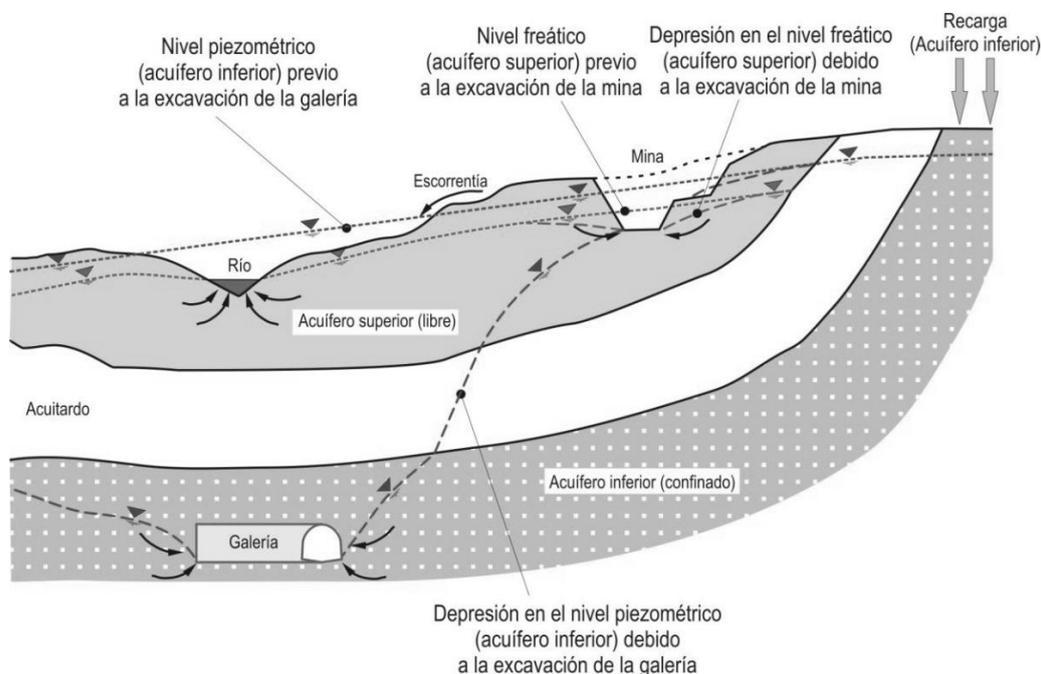
Durante las tareas de apertura del tajo a cielo abierto, cuando se intercepta el nivel freático, el agua fluye hacia el tajo abierto si la excavación profundiza más. La operación de bombeo para desalojar estos excesos se suelen llevar a cabo mediante la construcción de pozos de extracción que crean conos de depresión en el nivel freático, reduciendo así la infiltración y haciendo descender el nivel de las aguas subterráneas (Karmakar y Das, 2012; Jhariya et al., 2016).

Los efectos sobre el gradiente hidráulico pueden presentarse de diferentes maneras dependiendo del tipo de acuífero, sea este confinado o libre, y en función de las propiedades hidráulicas presentes, como la permeabilidad (las actividades de voladura incluso pueden incrementar hasta más de 100 veces la permeabilidad original) (Hawkins, 1995), la transmisividad y el almacenamiento que pueden sufrir cambios abruptos por el aumento de fracturamiento, apertura de cavidades y galerías.

El descenso de niveles y alteración del flujo generalmente conlleva, además, una pérdida de reservas de agua subterránea también pueden causar una serie de consecuencias de hidrogeológicas posteriores (Oyarzun et al., 2011).

Durante la fase de cierre del proyecto minero y rehabilitación de las áreas intervenidas es posible que las zonas de fracturas, socavones, y huecos y galerías abandonadas introduzcan nuevos condicionantes al comportamiento del nivel freático / piezométrico y que estos efectos producidos no puedan ser revertidos a corto plazo. Aunque se conoce que las depresiones del nivel freático generalmente son cercanas a la zona de explotación, los efectos sobre el régimen hidrológico regional pueden ser variables y complejos, por lo que suele ser necesario un monitoreo prolongado para entender la nueva dinámica regional del flujo subterráneo (Hawkins, 1995).

La Figura 18, muestra un esquema de como las actividades mineras pueden causar efectos sobre los niveles piezométricos de acuíferos cercanos.



**Figura 18.** Esquema representando las fluctuaciones de los niveles freáticos y piezométricos como a causa de proyectos mineros.

(Tomado de: *Minería Ambiental, una Introducción a los Impactos y su Remediación*. Oyarzun et al, 2011).

### Subsidencia

La subsidencia es una consecuencia inevitable de la minería subterránea; puede que esta sea muy pequeña y localizada o a su vez se extienda en grandes áreas, puede ser un fenómeno inmediato o presentarse durante muchos años (Blodgett y Kuipers, 2002).

Recientes investigaciones motivadas por el agotamiento de las aguas subterráneas en más de 34 países desarrolladas por Herrera-García et al. (2021), concluyen que para el año 2040, aproximadamente el 19% de la población mundial podría verse afectada por hundimientos de tierra.

La subsidencia por actividad minera puede describirse como el asentamiento de la superficie del suelo como resultado de los reajustes de material por sobrecargas de los materiales que rellenan los vacíos o cavidades que se crean durante o después de los procesos de explotación minera (Kentucky Emergency Management, 2018). También se puede producir

“subsidiencias a causa del descenso del nivel freático y la pérdida de presión hidrostática, lo que dará lugar a la compactación del material” (Guzy y Malinowska, 2020).

La subsidencia puede provocar una variación de las condiciones hidráulicas de los acuíferos provocando un cambio en los regímenes de explotación para uso humano.

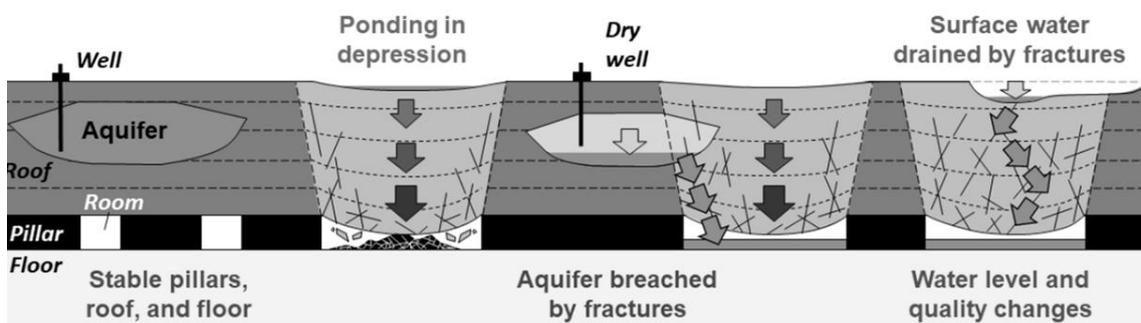
Varios y complejos factores pueden influenciar la subsidencia de una mina entre los cuales se pueden mencionar los siguientes (Lee y Abel, 1983; Gray y Bruhn, 1984; Kentucky Emergency Management, 2018).

- Edad de la mina
- Espesor de las excavaciones
- Dimensiones de los pilares y entradas
- Profundidad de la mina
- Tipo de mina
- Competencia del lecho rocoso de sobrecarga
- Competencia del piso de la mina
- Topografía de la superficie
- Tensiones presentes en el sitio
- Movimientos y fluctuaciones del agua en minas antiguas
- Hidrología del material de sobrecarga
- Fracturas (naturales y artificiales)
- Numero de minas subterráneas superpuestas

La Figura 19, muestra un esquema de influencia del agua superficial y subterránea para la ocurrencia de subsidencia. El aumento del grado de fracturamiento debido a la apertura de galerías y construcción de pilares puede causar un colapso en la zona de sobrecarga, de igual manera el drenaje no controlado de agua superficial (igualmente con el flujo no controlado de agua subterránea) por las fracturas puede causar afecciones importantes, facilitando el colapso.

El análisis de estos asentamientos (subsidiencias y colapsos) en distintos tipos de terreno ha permitido desarrollar relaciones empíricas para evaluar la subsidencia y puede considerarse que el problema de la subsidencia asociada a excavaciones superficiales está relativamente

resuelto y existen herramientas y metodologías para predecir su magnitud y extensión (Peck, 1969).



**Figura 19.** Subsistencia influenciada por cuerpos de agua superficial y subterránea

(Tomado de: *Mine subsidence, Kentucky Emergency Management, 2018*).

La literatura presenta varios casos en el mundo, uno de los más interesantes se encuentra en las vecindades de las ciudades de Berezniki y Solikamsk en la región Perm de Rusia, en el 2014 la sobreexplotación de las minas de sal de Uralkali's Solikamsk-2, causó en 2014 una serie de eventos de subsidencia generando que fueron colmatados a su vez de agua lluvia con la inseguridad de que las ciudades puedan literalmente comenzar a hundirse como se lo muestra en la Figura 20, (<https://www.themoscowtimes.com/2015/09/03/sinkhole-at-russian-uralkali-mine-gigantic-and-still-expanding-a49327>).



**Figura 20.** Imagen aérea mostrando un sinkhole de 3.5 kilómetros al este de Solikamsk-2 potash mine.

(Tomado de: <https://www.themoscowtimes.com/2015/09/03/sinkhole-at-russian-uralkali-mine-gigantic-and-still-expanding-a49327>, 2021).

### **Modificación del relieve, deforestación y compactación**

Actividades como modificación del relieve, remoción parcial o total de la cobertura vegetal y compactación del terreno para implementación de infraestructura son comunes durante las fases de desarrollo minero. Estas actividades pueden provocar una pérdida de la capacidad de infiltración del suelo, alteraciones en la dinámica de la evapotranspiración, aumento de la escorrentía superficial, disminuciones en el contenido de humedad del suelo (que está muy ligado a la cercanía de cuerpos hídricos) y cambios en las direcciones de flujo. (Oyarzun et al., 2011). Estas alteraciones puede conllevar a una potencial disminución neta en el agua de recarga que fluye a los cuerpos de agua subterráneos (Oyarzun et al., 2011).

Los procesos recurrentes de compactación del suelo pueden provocar una pérdida importante de las características edáficas y en la capacidad de retención de humedad en el suelo, imposibilitando en algunos casos recuperarlos en actividades de post-cierre de minas. (Wolensky, 2009).

En la Figura 21, se presentan fotografías de la mina de Weipa en Australia en donde se observan procesos de compactación al suelo para favorecer el tránsito de equipo pesado en las actividades mineras.



**Figura 21.** Imágenes de la mina Wiepa en Australia mostrando procesos de compactación y aspersión periódica debido a la intensa actividad y tránsito de equipo pesado.

*(Foto de [www.travelpod.com.uk](http://www.travelpod.com.uk)).*

La modificación continua del relieve debido a las obras civiles necesarias para las operaciones mineras puede favorecer cambios en la dinámica de los procesos de ladera. Lillo (2013), indica que los efectos de los cambios en el relieve se pueden traducir en aumentos

de la escorrentia y esto a su vez pueden facilitar la erosión en los suelos. La modificación del relieve debido a las excavaciones y los frentes de explotación minero pueden causar desestabilización en las laderas que pueden derrumbarse y afectar los cursos naturales de ríos y consecuentemente favorecer represamientos por colmatación.

La apertura de frentes de explotación cercanos a ríos puede causar afecciones importantes a las condiciones físicas de los cuerpos hídricos, como ejemplo se puede citar el desastre en la mina de Antracita River Slope (1959) en donde a causa de la apertura de galerías muy cercanas al río Susquehanna se infiltró alrededor de 2.7 millones de galones de agua por minuto hacia las galerías desde un enorme remolino cercano a las orillas del río causando pérdidas humanas y un desastre ecológico de grandes proporciones (Wolensky, 2009).

#### **Impactos secundarios interesantes**

El efecto “Albedo” se refiere a la radiación reflejada por la superficie terrestre y que puede influir en la regulación de la temperatura. Mientras más radiación absorbe el planeta de los rayos del sol la temperatura crece. La minería puede influir indirectamente a este efecto debido a la deforestación y a la variación de los regímenes de evapotranspiración como lo mencionado por Karmakar y Das, 2012.

Según Karmakar y Das (2012), el aumento de calor espontáneo y la posibilidad de su combustión en sitios con remanentes carbonáceos expuestos, pueden causar efectos sobre la humedad de los suelos y cuerpos de agua cercanos.

#### **3.4.4. Caso de estudio: Mina Henderson**

Como parte de la caracterización de impactos físicos al medio hidrológico se ha escogido un caso de estudio con el fin de poder analizar las causas, efectos y medidas aplicadas para mitigar los impactos ocurridos debido a la actividad minera. El caso de estudio seleccionado ha sido expuesto en el reporte técnico “Underground Hard-Rock Mining: Subsidence and Hydrologic Environmental Impacts (Blodgett y Kuipers, 2002)”.

#### **Descripción del sitio y antecedentes**

La mina de molibdeno Henderson está ubicada a unos 15 kilómetros al oeste de la pequeña ciudad de Empire en la región centro norte de Clear Creek County en el estado de Colorado en Estados Unidos y es considerada la mina más grande de los Estados Unidos que ha

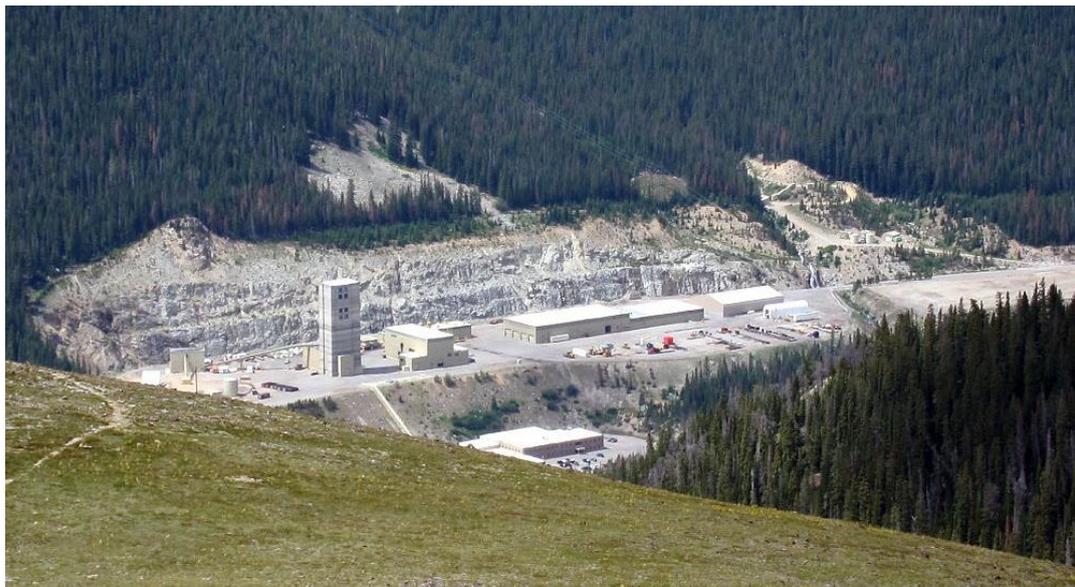
producido molibdeno. Durante la segunda guerra mundial la compañía Climax Molybdeum Company (CMC) desarrolló una de las minas más gigantes en Red Mountain bajo el nombre de Molybdenum Corporation of America (MCA). En 1976 fue nuevamente desarrollada por American Metal Climax (AMAX) siendo explotada hasta principios de la década de 1980 y su posterior cierre debido al colapso del mercado mundial del molibdeno. Desde 1984 y hasta la fecha sigue operando bajo propiedad de Freeport-McMoRan, actualmente la mina emplea unas 350 personas y su plan minero considera una vida productiva hasta finales de la década de 2030 según se menciona en la página web <https://coloradoencyclopedia.org/article/henderson-molybdenum-mine>.

El yacimiento de Henderson es un depósito de molibdenita en *stockwork* ubicado dentro de múltiples intrusiones graníticas riolíticas del complejo ígneo Red Mountain (Stewart et al., 1996) específicamente en el granito precámbrico Silver Plume. Las operaciones mineras son subterráneas utilizando el método de *block caving* a profundidades que alcanzan los 945 metros y una extensión de aproximadamente 80000 metros en longitud. El mineral extraído está compuesto de molibdenita con material de desecho que consiste principalmente en pirita, cuarzo y hematita. El yacimiento tiene una forma elíptica de 914 metros de largo, 670 metros de ancho y 243 metros de espesor. La mineralización data de la época del Oligoceno (33,90 a 23,03 millones de años). La fisiografía de las Montañas Rocosas del Sur caracteriza la geomorfología del área circundante, según se menciona en The Diggings™ (<https://thediggings.com/mines/usgs10012410>., 2021).

El mineral es transportado por un sistema de cinta transportadora de 24 kilómetros que se extiende a través de un túnel de 16 kilómetros debajo de la División Continental y luego 8 kilómetros por tierra hasta el molino de procesamiento de mineral cerca de Parshall, Colorado. El mineral se trata mediante flotación por espuma para obtener concentrado de molibdenita ([https://en.wikipedia.org/wiki/Henderson\\_molybdenum\\_mine](https://en.wikipedia.org/wiki/Henderson_molybdenum_mine). 2021).

La información hidrológica es escasa, sin embargo, se ha reportado colmatación de agua superficial y nuevas interacciones con acuíferos circundantes (Stewart et al., 1996; Blodgett y Kuipers, 2002).

En la Figura 22, se presenta una vista panorámica de la mina.



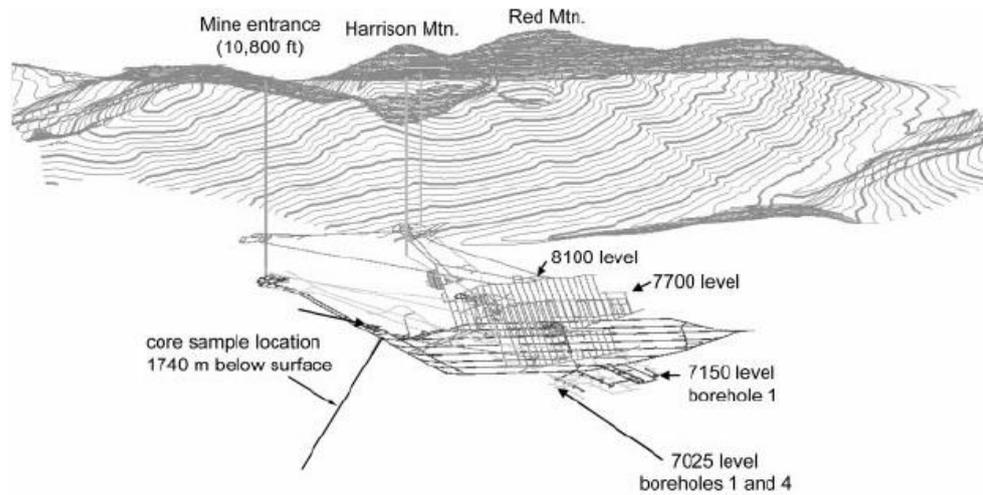
**Figura 22.** Mina de Molibdeno Henderson en Colorado, Estados Unidos de América.

(Tomado de: <https://i1.wp.com/www.schnizer.com/SOTAblog/wp-content/uploads/2015/03/Henderson-Mine-Complex.jpg>, 2021).

### **Descripción de la problemática e impactos**

Debido a las intensas actividades extractivas el primer apareamiento de un hundimiento asociados a fenómenos de subsidencia ocurrió en 1976, en 1980 la cavidad apareció en superficie justo por encima del área subterránea hundida, los estudios técnicos no mostraron evidencias de un desarrollo inminente de un hueco de mayores proporciones. La zona de interés está atravesando el cuerpo mineralizado y varias zonas de alteraciones sin embargo no se conoce de fallas regionales importantes que haya perturbado la superficie original. Otro agujero se formó al lado suroeste de Red Mountain a causa de minería subterránea con una altura de 640 metros en la mina adyacente Urad (Stewarts., et all, 1984) creando zonas de hundimientos masivos.

En la Figura 23, se muestra el diagrama esquemático de la mina Henderson y los niveles de explotación.



**Figura 23.** Diagrama esquemático de la mina Henderson mostrando 2 niveles de explotación

(Tomado de: *Subsurface microbial diversity in deep-granitic-fracture water in Colorado*, Sahl et al., 2008).

El problema de la subsidencia se agrava debido a las condiciones climáticas de la región, nevadas extremadamente fuertes (9 a 12 metros / año) causan generalmente fuertes avalanchas y precipitaciones en las elevaciones de estos agujeros que son zonas de alta transmisión favoreciendo el drenaje de agua hacia las obras subterráneas que se encuentran a más de 900 metros de profundidad por debajo de la superficie. Pendientes empinadas, avalanchas y heladas han creado condiciones ideales para favorecer la inestabilidad del suelo y aumentar el riesgo de asentamientos, derrumbes y seguridad a los trabajadores y a la vida silvestre (Blodgett y Kuipers, 2002).

### **Medidas de mitigación**

La compañía Climax Mine actual propietaria de la mina indica en un documento remitido en 2015 que varias actividades están enfocadas en el manejo y gestión para minimizar el impacto de las operaciones en la mina. En 2007 la compañía comisionó alrededor de 23 millones de dólares para tratamiento de aguas previo a su descarga y actividades como reforestación, restablecimiento de taludes, control de erosión y cierre de galerías para evitar hundimientos (Climax Mine, 2015)

#### 4. CONCLUSIONES

En el presente TFM se han descrito las principales características asociadas a los impactos físicos que sufre el medio hidrológico a causa de la ejecución de proyectos mineros. Pese a que existen una limitada exposición y recopilación bibliográfica al respecto, varios investigadores, mencionados en este trabajo, han abordado desde una perspectiva integradora un sinnúmero de elementos que permiten entender en el contexto general cómo funcionan estos impactos y por qué debemos investigarlos a largo plazo.

Las conclusiones principales del presente TFM son:

- Una de las premisas fundamentales al considerar la interacción del agua con las actividades mineras es el de entender que tanto las aguas superficiales como las subterráneas como un único recurso ya que una afección negativa sobre cualquiera de estas acabara indefectiblemente generando a su vez unos efectos negativos sobre las otras.
- De manera general se han caracterizado varios impactos físicos agrupándoles en función de las alteraciones que causan a la dinámica fluvial, a las pérdidas de masas de agua y a las alteraciones que producen en el régimen hidrogeológico.
- Las variaciones en la dinámica fluvial pueden deberse a los cambios en las tasas de sedimentación por erosión, los cambios en los trazados fluviales y variaciones de perfil por creación de embalses, presas y drenes causan efectos directos locales y regionales sobre los cuerpos de agua superficiales, otros fenómenos indirectos se pueden presentar como son, la alteración a los regímenes de la vida acuática y afectaciones a infraestructuras por colmatación de sólidos. El constante monitoreo y obras superficiales que permitan una mitigación a los impactos a la dinámica fluvial deben ser considerados en las etapas de desarrollo, explotación, beneficio, transporte e incluso cierre de mina y restauración.
- Ciertas actividades mineras que ocurren durante las fases de explotación y beneficio pueden causar efectos importantes sobre la disponibilidad del recurso en otras actividades antrópicas, las pérdidas de masas de agua pueden volverse un problema de escala regional si no se gestionan adecuadamente, no solamente puede ocurrir por la necesidad de utilizar el recurso con la creación de embalses, túneles y tomas, sino además pueden existir pérdidas de masa de agua subterránea debido a cambios en las

propiedades hidráulicas de los acuíferos causando desequilibrios en el balance hídrico de la cuenca e incluso pérdidas de masas glaciares.

- Un sinnúmero de factores puede causar alteraciones al régimen hidrogeológico, algunos no son tan visibles y requieren de ingentes esfuerzos para poder diagnosticarlos y monitorearlos, las faenas mineras a cielo abierto (*open pit*) pueden causar nuevos fracturamiento y cavidades lo que a su vez crea cambios en la permeabilidad de la roca y su capacidad de almacenamiento provocando desequilibrios en los regímenes y flujos de aguas subterráneas locales y regionales. Las actividades de bombeo y drenaje (*dewatering*) para dar seguridad geotécnica y estabilidad estructural a los macizos sin duda causan variaciones, por un lado, se pueden crear conos de depresión pronunciados en la napa freática, reduciendo así la infiltración y el nivel del agua subterránea, además de fenómenos de descompresión de acuífero que pueden traducirse en subsidencias y hundimientos.
- Actividades como modificación del relieve, remoción parcial o total de la cobertura vegetal y compactación del terreno para implementación de infraestructura pueden provocar indirectamente una pérdida de la capacidad de infiltración del suelo, alteraciones en la dinámica de la evapotranspiración, aumento de la escorrentía superficial, disminuciones en el contenido de humedad del suelo y cambios en las direcciones de flujo.
- La gran minería en el sector a develado uno de los mayores problemas relacionados con la subsidencia y los frecuentes hundimientos en las cercanías afectando la seguridad de poblados enteros y afecciones al régimen hidrológico natural.
- Las actividades mineras y en especial las que no son reguladas apropiadamente tienen la capacidad de crear una serie de impactos físicos al recurso hídrico prácticamente en todo su ciclo de vida, incluso algunos de estos impactos pueden ser irreversibles y/o requerirán de tiempo y grandes esfuerzos para alcanzar el equilibrio hidrológico original

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- Aparicio, J. (1992). Fundamentos De Hidrología De Superficie. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9, pp.1689-1699).
- Apaza, R. (2018). *Las fases y el ciclo de un proyecto minero*. <https://www.rubenapaza.com/2018/05/las-fases-y-el-ciclo-de-un-proyecto.html?m=0>.
- Blodgett, S., & Kuipers, J. (2002). *Underground Hard-Rock Mining: Subsidence and Hydrologic Environmental Impacts*. Center for Science in Public Participation, pp. 36-38.
- Campos Aranda, D. (1998). Procesos del ciclo hidrológico. In Universidad Autónoma de San Luis de Potosí (Ed.), *Universidad Autónoma de San Luis Potosi* (Tercera Re).
- Carmona, D. M. (2012). *Recuperación de suelos acidificados y contaminados por minería metálica: ensayos en columnas*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cartagena. p617.
- Castro, J., & Reckendorf Frank. (1995). *Effects of Sediment on the Aquatic Environment: Potential NRCS Actions to Improve Aquatic Habitat - Working Paper No. 6*. US Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- Cazau, P. (2006). *Introducción a la Investigación en Ciencias Sociales* (3rd ed. p. 100).
- Chen, G., & Weil, R. R. (2010). Penetration of cover crop roots through compacted soils. *Plant and Soil*, 331(1), 31–43. 7
- Chow, V. Te. (1965). Handbook of applied hydrology. In *International Association of Scientific Hydrology. Bulletin* (Vol. 10, Issue 1, pp. 82-83).
- Climax Mine. (2015). *Henderson Mine*. 2015. [https://fcx.com/sites/fcx/files/documents/fast\\_facts/climax\\_EnvironSteward\\_2015.pdf](https://fcx.com/sites/fcx/files/documents/fast_facts/climax_EnvironSteward_2015.pdf)
- Conesa, V., Conesa, R., Conesa, L., y Ros, V. (1997). *Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental* (Mundiprensa Libros).
- Díaz, C., María, D., Esteller, V., & Fernando López-Vera, A. (2005). *Recursos Hídricos Conceptos básicos y estudios de caso en Iberoamérica*. Piriguazu Ediciones.
- Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros del Perú. (2006). *Volumen: I GUÍA PARA LA ELABORACIÓN DE PLANES DE CIERRE DE MINAS. 1*. [http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/guia\\_cierre.pdf](http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/guia_cierre.pdf)
- Dubey, K., & Dubey, P. K. (2011). Impact of Mining on tree diversity of the silica mining forest area at Shankargarh, India. *Journal of Forestry Research*, 22(4), 527-532..
- Environment Australia. (2002). *Overview of the Best Practice Environmental Management*

*in Mining.*

- Environmental Law Alliance. (2010). *Guía Para Evaluar EIAs de Proyectos Mineros. 1.*
- Evans, K. G. (2000). Methods for assessing mine site rehabilitation design for erosion impact. *Australian Journal of Soil Research*, 38(2), 231–247.
- Fetter, C. (2014). *Applied hydrogeology* (Pearson New International Edition (Ed.); Fourth).
- Frelich, E. L. (2014). *Forest and terrestrial ecosystem impacts of mining*. The University of Minnesota Center for Forest Ecology. (p. 18)
- Galindo, M. (2015). *Separación y recuperación de ácido sulfúrico en aguas ácidas de minas mediante Nanofiltración*. (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya) (p. 78).
- Gray, R. E., & Bruhn, R. W. (1984). Coal mine subsidence—Eastern United States, in Holzer, T.L. *Reviews in Engineering Geology*, 6, 123–150.
- Guzy, A., & Malinowska, A. (2020). Assessment of the Impact of the Spatial Extent of Land Subsidence and Aquifer System Drainage Induced by Underground Mining. *Sustainability 2020, Vol. 12, Page 7871, 12(19), 7871.*
- Hanzlik, J. (1985). The Influence of Hydrogeology in Mining Activities. *IAHS-AISH publication*, (154), 117-121.
- Hawkins, J. (1995). *Impacts on Ground-water Hydrology from Surface Coal Mining in Northern Appalachia*. In Proceedings of the 1995 Annual Meetings of the American Institute of Hydrology. Denver, Colorado (pp. 32-43).
- Herrera-García, G., Ezquerro, P., Tomás, R., Béjar-Pizarro, M., López-Vinielles, J., Rossi, M., Mateos, R. M., Carreón-Freyre, D., Lambert, J., Teatini, P., Cabral-Cano, E., Erkens, G., Galloway, D., Hung, W.-C., Kakar, N., Sneed, M., Tosi, L., Wang, H., & Ye, S. (2021). Mapping the global threat of land subsidence. *Science*, 371(6521), 34–36.
- Hooke, R. L. (1994). *Spatial distribution of human geomorphic activity in the United States: Comparison with rivers*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24(8), 687–692.
- Ibáñez, C. (2001). *El Impacto Ambiental de los Trasvases: El caso de la cuenca del Ebro*.
- Jhariya, D., & Choraisia, K. (2010). *Khanij utpadan ka jal sansadhan aivam jal sanrakshan par prabhav. Bhu - Jal Sanvardhan aivam Jal sansadhano ka sanrakshan*.
- Jhariya, D., Khan, R., & Thakur, G. S. (2016). *Impact of Mining Activity on Water Resource : An Overview study*. Proceedings of the Recent Practices and Innovations in Mining Industry, Raipur, India, 19-20.
- Kamboj, N., & Kamboj, V. (2019). Riverbed mining as a threat to in-stream agricultural

- floodplain and biodiversity of Ganges River, India. In *Contaminants in Agriculture and Environment: Health Risks and Remediation* (Vol. 19, pp. 250–263).
- Karmakar, H. ., y Das, K. P. (2012). Impact of Mining on Ground & Surface water. In 4<sup>th</sup> *International Mine Water Association Congress*.
- Kentucky Emergency Management. (2018). *CK-EHMP 2018, S3-S6, Risk Assessment, Hazard Identification, 9, Mine Subsidence, Original Submittal*.
- Kondolf, G. (1994). Geomorphic and environmental effects of instream gravel mining. *Landscape and Urban Planning*, 28, 225–243.
- Kondolf, G. (1997). PROFILE: Hungry Water: Effects of Dams and Gravel Mining on River Channels. *Environmental Management*, 21(4), 533–551.
- Lee, F. T., y Abel, J. F. (1983). *Subsidence from underground mining: Environmental analysis and planning considerations*. (No. 876). US Geological Survey,
- Lewis, R. S., y Clark, G. B. (1964). *Elements of mining* (Vol. 3). J. Wiley.
- Lillo, J. (2006). *Impactos de la minería en el medio natural*.  
[https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-15564/Impactos de la minería - Javier Lillo.pdf](https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-15564/Impactos%20de%20la%20miner%C3%ADa%20-%20Javier%20Lillo.pdf)
- Llamozas, S., Duno, R., Meier, W., y Riina, R. (2003). *Libro rojo de la flora venezolana*. Litografía Imagen Color.
- Macháček, J. (2020). Alluvial artisanal and small-scale mining in a river stream-Rutsiro case study (Rwanda). *Forests*, 11(7), 762.
- MINEO Consortium. (2000). *Review of potential environmental and social impact of mining. Part 2*. IST-1999-10337. <http://www2.brgm.fr/mineo/UserNeed/IMPACTS.pdf>.
- Ministerio de Energía y Minas del Perú. (2016). *Ley General de Minería Texto Unico Ordenado del Perú, Decreto Supremo No. 014-92-EM*.
- Mollere, D., Evans, K., y Willgoose, G. (2000). Environmental Impact of Mining. Erosion and Hydrology Temporal trends in erosion and hydrology for a post-mining landform at Ranger Mine. *Environmental Research Institute of the Supervising Scientist Research Summary 1995-2000*, 31.
- Movimiento Mundial por los Bosque Tropicales (WRM). (2004). *Minería Impactos sociales y ambientales* (1st ed.).
- Oliveira, M., y Morón, V. (2018). Deforestación y Fragmentación de hábitat: amenazas de la minería. In *Una Mirada al Soberbio Sur del Orinoco: entendiendo las implicaciones del arco minero*. Grupo EXPLORA.

- Organización Mundial de las Naciones Unidas para la Educación, la C. y la C. (2019). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019*.
- Oyarzún, J., y Oyarzun, R. (2011). *Minería Sostenible: Principios y Prácticas* (GEMM).
- Oyarzun, R., Higuera, P., y Lillo, J. (2011). *Minería Ambiental: Una introducción a los Impactos y su Remediación* (Ediciones). GEMM.
- Oyarzun, R., Lillo, J., Maturana, H., y Higuera, P. (2007). Mineral deposits and Cu'Zn'AS dispersion contamination in stream sediments from the semiarid Coquimbo region, Chile. *Environmental Geology*, 53, 283–294.
- Peck, R. B. (1969). Deep Excavation and Tunneling in Soft Ground. State-of-the-Art Report . In *Scientific Research Publishing*. Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, 225-325.
- Programa Chile Sustentable. (2016). *Impactos de la minería sobre los glaciares en Chile*. <https://www.camara.cl/verDoc.aspx?prmID=56431yprmTIPO=DOCUMENTOCOMISION>.
- Ruben Apaza. (2018). *Las fases y el ciclo de un proyecto minero*. <https://www.rubenapaza.com/2018/05/las-fases-y-el-ciclo-de-un-proyecto.html>
- Sahl, J. W., Schmidt, R., Swanner, E. D., Mandernack, K. W., Templeton, A. S., Kieft, T. L., Smith, R. L., Sanford, W. E., Callaghan, R. L., Mitton, J. B., y Spear, J. R. (2008). Subsurface microbial diversity in deep-granitic-fracture water in Colorado. *Applied and Environmental Microbiology*, 74(1), 143–152.
- Sánchez, J. (n.d.). *El Ciclo Hidrológico*. [https://hidrologia.usal.es/temas/Ciclo\\_hidrol.pdf](https://hidrologia.usal.es/temas/Ciclo_hidrol.pdf)
- Sills, E., Pattanayak, K. S., Saha, S., Yang, C. J., Sahu, P., y Singha, A. (2006). *Mine over matter? Health, wealth and forests in a mining area of Orissa*.
- Sreebha, S., y Padmalal, D. (2011). Environmental Impact Assessment of Sand Mining from the Small Catchment Rivers in the Southwestern Coast of India: A Case Study. *Environmental Management*, 47, 130–140.
- Stewart, D., Rein, R., y Firewick, D. (1996). *Surface Subsidence at Henderson Mine*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 22(2), A57–A58.
- T.C. Winter, J.W. Harvey, O.L. Franke, y W.M. Alley. (2013). Ground Water And Surface Water A Single Resource. *Acque Sotterranee-Italian Journal of Groundwater*, 1(1).
- UNESCO World Water Assessment Programme (WWAP). (2003). Water for people, water for life : The United Nations World Water Development Report - Executive Summary.

*In Water for people, water for lives.*

- Vallejo, G., Luis Ferrer, M., Ortuño, L., y Oteo, C. (2002). Ingeniería Geológica. In I. Capella y S. Ayerra (Eds.), *Editorial Pearson Education, Madrid*. Pearson Prentice Hall.
- Victor Manuel López. (1994). *Manual Para La Seleccion de Métodos de Explotación de Minas* DF, México: Departamento de Publicaciones de la Facultad de Ingeniería. (No. 1).
- Winter, T.C., Harvey, J.W., Franke, O.L., Alley, W.M., 1998. Groundwater and Surface Water. A Single Resource. US Geological Survey, Denver. CO Circular 1139.
- Wolensky, R. (2009). *Heritage: Knox mine*. PA Department of Environmental Protection.
- Wray, D. (1998). The impact of unconfined mine tailings and anthropogenic pollution on a semi-arid environment – an initial study of the Rodalquilar mining district, south east Spain. *Environmental Geochemistry and Health*, 20(1), 29–38.
- Younger, P., Banwart, S., y Hedin, R. (2002). *Mine Water Hydrology, Pollution, Remediation*.
- Younger, P. L. (2004). *Impacts of mining on physical hydrogeology (Conference) | ETDEWEB*. <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20701190>.