

# **IMPACTOS FISICOS DE LA MINERIA EN EL MEDIO HIDROLOGICO**

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

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

**Presentado por:**

**D<sup>a</sup> DIANA CATALINA MANOSALVAS CORRALES**

**Dirigido por:**

**Dr. FRANCISCO JAVIER LILLO RAMOS**

**Alcalá de Henares, a 30 de junio de 2021**

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por el inmenso amor y generosidad que ha tenido conmigo, por no olvidarse de mis sueños y haberme permitido poder estudiar mi maestría en España, por cuidar y guiar cada uno de mis pasos en todo el tiempo que he permanecido lejos de casa.

A mis padres (Catalina y Carlos), mi hermana (Daniela), mis tías (Anhin y Nancy), mi abuelita (Rafiha), mis primas (Leyla y Genesis) y a mi gran compañero en esta aventura (Carlos) por su amor y apoyo incondicional durante todo el desarrollo del master.

A la “Casa de las Flores”, a cada una de las miembros del hermoso hogar que me regaló España, especialmente a Anni por toda la alegría, amor y largas noches en vela que pudimos compartir estudiando.

A mi tutor Francisco Lillo por su dedicación y apoyo en todo momento para la elaboración del presente trabajo.

Finalmente quiero agradecer a Fundación Carolina por la beca y apoyo otorgado sin el cual no habría sido posible cursar el master.

## INDICE

<b>RESUMEN .....</b>	<b>1</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>3</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>6</b>
<b>3. ANTECEDENTES .....</b>	<b>6</b>
3.1    Uso de Agua en Minería .....	6
3.2    Minería y el medio hidrológico .....	7
<b>4. METODOLOGÍA .....</b>	<b>8</b>
<b>5. CASOS DE ESTUDIO .....</b>	<b>10</b>
5.1    Dysart Woods, Ohio (EE.UU.) .....	10
5.1.1    Descripción General .....	10
5.1.2    Impacto en el medio hidrológico .....	12
5.1.3    Intervenciones de protección .....	14
5.2    Zaruma y Portovelo, Ecuador .....	14
5.2.1    Descripción General .....	15
5.2.2    Impactos en el medio hidrológico .....	16
5.2.3    Intervenciones de protección .....	18
5.3    Shaanxi, China .....	19
5.3.1    Descripción General .....	19
5.3.2    Impactos en el medio hidrológico .....	21
5.3.3    Intervenciones de protección .....	23
5.4    Carmichael, Australia .....	25
5.4.1    Descripción General .....	25
5.4.2    Impactos en el medio hidrológico .....	27
5.4.3    Intervenciones de protección .....	29
<b>6. DISCUSIÓN.....</b>	<b>30</b>
<b>7. CONCLUSIONES.....</b>	<b>32</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>34</b>

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Impactos de la minería .....	<b>5</b>
<b>Tabla 2</b> Profundidad del nivel freático .....	<b>21</b>
<b>Tabla 3</b> Recarga por infiltración.....	<b>23</b>

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Reservas de minerales en el mundo .....	4
<b>Figura 2</b>	Mapa de la cuenca hidrográfica de Dysart Woods.....	11
<b>Figura 3</b>	Actividad Minera en Dysart Woods.....	12
<b>Figura 4</b>	Concesiones mineras en el complejo minero Zaruma–Portovelo .....	16
<b>Figura 5</b>	Socavón registrado en Zaruma 2017 .....	17
<b>Figura 6</b>	Contaminación por residuos de extracción minera en Ecuador, afluente del río Amarillo.....	18
<b>Figura 7</b>	Zona de exclusión Zaruma .....	19
<b>Figura 8</b>	Plantas de carbón en China, zoom provincia de Shaanxi.....	20
<b>Figura 9</b>	Profundidad del nivel freático por áreas .....	22
<b>Figura 10</b>	Escenario 1.....	24
<b>Figura 11</b>	Escenario 2.....	24
<b>Figura 12</b>	Escenario 3.....	25
<b>Figura 13</b>	Ubicación de la mina Carmichael.....	27
<b>Figura 14</b>	Representación de la dirección de flujo de agua subterránea pre- minería y pos- minería .....	28

## ABREVIATURAS

<b>ACL:</b>	América Latina y El Caribe
<b>AMD:</b>	<i>Acid Mine Drainage</i> (siglas en inglés), Drenaje ácido de minas
<b>ARCOM:</b>	Agencia de Regulación y Control Minero
<b>EDAR</b>	Estación Depuradora de Aguas Residuales
<b>EIA</b>	Estudio de Impacto Ambiental
<b>GAB</b>	Great Artesian Basin (siglas en inglés), Gran cuenca Artesiana
<b>OVCC:</b>	Ohio Valley Coal Company
<b>PTAR:</b>	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

## **RESUMEN**

La presente investigación fue desarrollada con el objetivo de identificar los impactos físicos generados por el desarrollo de la minería en el medio hidrológico. El presente trabajo se basa en una recopilación bibliográfica de información existente en diversas fuentes de datos científicos que contienen relación con la temática analizada. Se tomó un total de 4 casos de estudio: Dysart Woods (EE.UU.), Zaruma y Portovelo (Ecuador), Shaanxi (China) y Carmichael (Australia) donde se han llevado a cabo estudios del impacto de la minería sobre el medio hidrológico.

Como resultado de la investigación el impacto común identificado en los cuatro casos de estudio fue las subsidencias del terreno producto del colapso de estructuras de soporte subterráneas y el descenso de los niveles freáticos producto del drenaje de minas. En el caso de Carmichael es una predicción ya que las actividades de explotación iniciaron en el presente año.

En los casos de Dysart Woods como en Shaanxi el impacto común analizado fue el descenso en los caudales de los ríos en los que descargan los acuíferos intervenidos, los acuíferos se conectan hidráulicamente con los recursos superficiales por lo que una alteración se verá reflejada tanto a nivel subterránea como superficial.

En el caso de Dysart Woods y Carmichael uno de los impactos físicos de la minería de carbón que ha sido previsto a través de modelos fue la posibilidad de llegar a una drenaje total y secado de acuíferos y las consecuencias ecológicas que esto implicaría.

En todos los casos de estudio se han propuesto una serie de medidas de prevención y/o remediación frente a los potenciales impactos de la minería. En el caso de Dysart Woods se incluyó una zona de amortiguamiento, en el caso de Zaruma y Portovelo se estableció un área de exclusión minera, en Shaanxi se están implementado tecnologías de aprovechamiento de relleno de huecos, depósitos de almacenamiento subterráneos y explotación de carbón y agua, finalmente en el caso de Carmichael se incluyó un plan de manejo del recurso subterráneo que incluye medidas de monitoreo y alerta temprana durante los 60 años de vida útil de la mina.

Se concluye que tras el cese de la actividad minera las características físicas de los recursos hídricos superficiales (calidad y cantidad) y subterráneos (permeabilidad, capacidad de almacenamiento, conductividad hidráulica y modelo de flujo) cambiarán en relación a las condiciones previas a la minería.

**Palabras clave:** minería, impacto, hidrología, acuífero, subterráneo, drenaje

## **SUMMARY**

The objective of this research was to identify the physical impacts generated by the development of mining in the hydrological environment. This work is based on a bibliographic compilation of various scientific and technical databases that contain a relation with the subject analyzed. In total four case studies were taken: Dysart Woods (USA), Zaruma and Portovelo (Ecuador), Shaanxi (China), and Carmichael (Australia), where the impact of mining on the hydrological environment was studied.

As a result of the research, the common impact identified in the four case studies was the subsidence of the land as a result of the collapse of underground support structures and the decrease in the water table due to the drainage of mines. In Carmichael's case, it is a prediction because the exploitation activities started this year.

In the cases of Dysart Woods as in Shaanxi, the common impact analyzed was the decrease in the flows of the rivers, where the intervened aquifers discharge; Aquifers are hydraulically connected to surface resources, in this way an alteration will be reflected both underground and surface.

In the case of Dysart Woods and Carmichael, one of the physical impacts of coal mining that has been predicted through models was the possibility of reaching total drainage and drying of aquifers, and the ecological consequences that this would imply.

In all the case studies, a series of prevention and/ or remediation measures have been proposed against the potential impacts of mining. In the case of Dysart Woods, a buffer zone was included, in the case of Zaruma and Portovelo it was established a mining exclusion area, in Shaanxi, technologies are being implemented to take advantage of the filling of holes, underground reservoir storing, and the simultaneous exploitation of coal and groundwater. Finally, in the case of Carmichael, an underground resource management plan was proposed, which includes monitoring and early warning measures during the 60-year useful life of the mine.

Finally, it is concluded that, after the cessation of mining activity, the physical characteristics of surface water resources (quality and quantity) and underground (permeability, storage capacity, hydraulic conductivity, and flow pattern) will change concerning previous conditions to mining.

**Keywords:** mining, impact, hydrology, aquifer, underground, drainage

## 1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la minería tiene sus inicios en las primeras civilizaciones tras la necesidad de utilizar materiales presentes en la tierra que permitan fabricar herramientas útiles para las actividades cotidianas encontrándose así los primeros vestigios en el Paleolítico (Noguera, 2020).

En la actualidad la minería forma parte de las actividades económicas del sector primario esencial para el desarrollo de la sociedad debido a la gran demanda de minerales que son extraídos de la tierra con el objetivo de satisfacer las necesidades del ser humano en diversos sectores como la agricultura, pesca, educación, energía, construcción, tecnología, etc. (Higueras et al., 2011)

Los recursos minerales juegan un papel dominante en 81 países representando una cuarta parte de PIB mundial y a su vez conformando la mitad de la población mundial con aproximadamente 3.500 millones de habitantes, siendo un 70% países que se encuentran en situación de extrema pobreza (The World Bank, 2017).

La minería al igual que otras actividades humanas genera un impacto social, económico y sobre todo un impacto ambiental considerable (Vásconez y Torres, 2018) el cual está relacionado con el tipo de minería: cielo abierto, subterránea y aluvial (Servicio Geológico Mexicano, 2017) y por el volumen de material extraído: gran, mediana o pequeña minería, llegando incluso a describirse una cuarta categoría denominada minería artesanal (Ministerio del Ambiente y Agua, 2014).

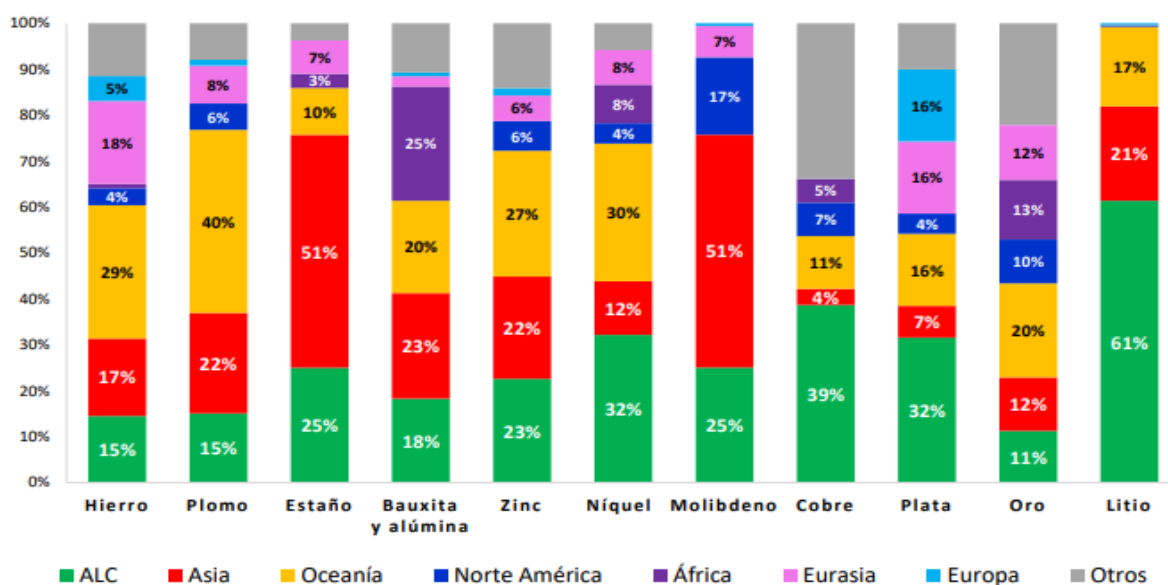
En base al material extraído la minería se puede dividir en:

- Minería metalúrgica: extracción y/o explotación de metales que se han acumulado en el suelo (capa superficial) o subsuelo en forma de yacimientos, destacándose minerales como cobre, oro, plata, hierro, aluminio, etc.
- Minería no metalúrgica: denominada minería de cantera y/o construcción, explotación de minerales no-metálicos y rocas utilizados en la construcción, ornamentación, e industria.

En los últimos años la explotación de minerales metálicos y no metálicos ha incrementado a nivel mundial de acuerdo a lo indicado por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Solo en América Latina y el Caribe (ALC) el incremento ha sido de 6 veces desde 1970 al pasar de 659 millones de toneladas a 3.972 en el año 2017 (Bárcena, 2018).

Las mayores reservas de níquel, cobre, plata y litio se concentran en ALC, destacándose países como Brasil, Perú, México y Chile quien cuenta con la mayor reserva de cobre del mundo. En el caso del continente asiático se destaca a China e India, con las mayores reservas de estaño y molibdeno y en Oceanía se encuentran las reservas más grandes de hierro, plomo, zinc y oro siendo estos minerales explotados principalmente por Australia (Bárcena, 2018) (The World Bank, 2017).

En la Figura 1 se presenta un resumen de las reservas de los principales minerales y cómo estos se encuentran distribuidos por regiones (continentes) en todo el planeta.



**Figura 1** Reservas de minerales en el mundo

**Fuente:** (Bárcena, 2018)

El incremento de la actividad minera, se relaciona directamente con el aumento de las presiones sobre el medio ambiente generando importantes desafíos y conflictos socioambientales a nivel mundial, con un crecimiento muy marcado en ALC. A nivel mundial se registran un total de 1.395 casos (ACKnowl-EJ et al., 2021) de conflictos ambientales relacionados con actividades mineras, destacándose las siguientes: exploración de yacimientos mineros, extracción de materiales de construcción, relaves de minas, procesamiento de minerales, extracción y procesamiento de carbón, refinerías de metales y extracción de uranio.

En la Tabla 1 se presenta una recopilación de los principales impactos socioambientales generados por la actividad minera.



**Tabla 1** Impactos de la minería

<b>Componente</b>	<b>Impacto</b>
<b>Aire</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contaminación atmosférica con material particulado procedente de actividades de voladura, carga y transporte de material y durante la operación de escombreras.</li> <li>• Contaminación con gases procedentes del proceso de combustión de maquinaria y vehículos, combustión de carbón (COx, NOx, SOx, CH4) y durante la extracción de minerales.</li> <li>• Formación de aerosoles tóxicos durante el proceso de explotación e hidrometalurgia (recuperación de metales de interés).</li> <li>• Contaminación acústica procedente del proceso de voladura, maquinaria (transporte de materiales y planta de beneficio), paso de vehículos para movilización de personal.</li> <li>• Vibraciones resultantes de la actividad de voladuras.</li> </ul>
<b>Suelo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erosión del suelo.</li> <li>• Pérdida de cobertura vegetal.</li> <li>• Deforestación.</li> <li>• Pérdida de la estructura y propiedades del suelo (cambio en el relieve, desestabilización de laderas, cambio de textura, porosidad, permeabilidad, mezcla de horizontes).</li> <li>• Contaminación química por disposición de metales pesados, acidificación, adición de sales, etc.</li> </ul>
<b>Agua</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alteración de la dinámica de masas de agua.</li> <li>• Incremento de sólidos y sedimentos en cuerpos de agua.</li> <li>• Incremento de la turbidez de masas de agua.</li> <li>• Modificación del nivel freático (excavaciones para construcción de galerías y túneles).</li> <li>• Cambios en flujos subterráneos (creación de barreras, drenajes, infiltraciones).</li> <li>• Contaminación con metales pesados.</li> <li>• Acidificación del agua (drenaje ácido de mina AMD).</li> </ul>
<b>Flora</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pérdida de la biodiversidad de especies por desbroce y efecto de borde.</li> <li>• Pérdida de hábitat natural (fragmentación).</li> <li>• Pérdida de tierras agrícolas y de pastoreo.</li> </ul>
<b>Fauna</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pérdida de la biodiversidad de especies terrestres y acuáticas.</li> <li>• Migración de especies.</li> </ul>
<b>Socioeconómico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Generación de fuentes de empleo.</li> <li>• Dinamización de economía local.</li> <li>• Problemas sociales (consumo de alcohol, drogas, delincuencia, prostitución).</li> <li>• Cambio de uso de suelo.</li> <li>• Presión sobre servicios locales (energía, agua potable, vertederos, PTAR/EDAR).</li> <li>• Incremento de minería informal (artesanal) por expectativa de hallazgo de minerales.</li> <li>• Accidentes de tránsito o atropellamiento por incremento de flujo vehicular.</li> <li>• Accidentes laborales.</li> <li>• Pérdida de patrimonio cultural (durante actividades de construcción).</li> <li>• Enfermedades a causa de material particulado y gases generados.</li> <li>• Expropiaciones forzadas.</li> </ul>

**Fuente:** (Lillo, Impactos de la minería en el medio natural, 2006), (Cardno, 2018)

## 2. OBJETIVOS

### Objetivo General

- Realizar una revisión bibliográfica de los impactos físicos generados por el desarrollo de la minería en el medio hidrológico.

### Objetivo Específico

- Efectuar una comparación de los impactos físicos generados por la minería sobre el medio hidrológico en casos de estudios de diferentes países.

## 3. ANTECEDENTES

### 3.1 Uso de Agua en Minería

El agua juega un papel fundamental dentro de la industria minera siendo indispensable en los procesos de extracción, concentración y purificación del mineral; sin embargo en el caso de la minería subterránea se ha convertido en un verdadero desafío por los grandes volúmenes que deben ser bombeados al exterior (Red EsAgua, 2019) para ocupar la superficie para la construcción de infraestructura y servicios de la mina.

Independientemente del tipo de minería que se desarrolle se generan volúmenes considerables de efluentes en muchas ocasiones cargados de metales pesados, sales y otros compuestos que deberán ser gestionados adecuadamente para evitar contaminación de fuentes de agua naturales (Red EsAgua, 2019).

El uso intensivo de recurso puede causar serios problemas tanto en cantidad (sobreexplotación) como en calidad (contaminación) es por ello que la industria busca soluciones de tratamiento de efluentes, así como su reutilización con el objetivo de disminuir la presión sobre las fuentes de agua naturales. (Red EsAgua, 2019).

A continuación se presenta brevemente un resumen de las principales actividades mineras que demandan uso del agua de acuerdo a lo indicado por (Red EsAgua, 2019):

- **Operación minera:** el agua es utilizada para contención de material particulado y limpieza de maquinaria y equipos.
- **Procesado de mineral:** *“el agua se utiliza para mezclar el mineral bruto, con el objetivo de llevar a cabo separaciones físicas tales como el lavado, separaciones por espesado y flotación, utilizado en combinación con químicos para lixiviar los minerales”.*

- **Transporte y manejo del mineral subproductos:** el agua se utiliza aquí para bombear relaves o subproductos a sitios de almacenamiento temporal o definitivo y a su vez transporte de concentrados mineros a medios de transporte.
- **Transporte y disposición de lixiviados y aguas residuales:** transferencia de flujos residuales (por ejemplo, AMD) del sitio de la mina a los lugares controlados para su tratamiento (EDAR) dentro de la industria.
- **Drenaje de mina:** el bombeo de agua presente en el área de operación minera se realiza para asegurar el acceso, seguridad de los mineros, equipos y maquinaria a las reservas de mineral.

### 3.2 Minería y el medio hidrológico

El medio hidrológico y la minería se encuentran directamente relacionados debido a que cualquier cambio en el subsuelo (apertura de túneles, agujeros, galerías) van a influir directamente en el estado y las características de los acuíferos, con una alteración en el flujo de las aguas subterráneas. Las afecciones generadas dependerán del tipo de minería que se lleve a cabo y las características del subsuelo (Instituto Tecnológico Geominero de España; Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía; Consejería de Trabajo e Industria de la Junta de Andalucía, 1998).

Cabe mencionar que cada mina sea esta superficial o subterránea tiene su propio comportamiento hidrogeológico que deberá ser considerado al momento de llevar a cabo el diseño y planes de explotación, sin embargo, existen una serie de aspectos que son comunes en la explotación minera (Instituto Tecnológico Geominero de España; Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía; Consejería de Trabajo e Industria de la Junta de Andalucía, 1998):

- **Aspectos que condicionan el laboreo:** relacionado con las características hidrodinámicas de las aguas subterráneas y del acuífero que condicionarán el ingreso de agua a la mina y por ende el tipo de bombeo necesario, la maquinaria requerida, sistema de iluminación y esquema de voladuras.
- **Aspectos que deterioran la calidad del agua:** se ve influenciado por procesos de disolución y de lixiviación de minerales, así como residuos generados en los procesos de recuperación del mineral: sólidos en suspensión de aguas de procesos, efluentes, y lixiviados industriales procedentes del proceso de refinación
- **Recursos del acuífero:** uso del acuífero (consumo humano, agricultura, ganadería, industrial, etc.) se debe considerar de manera puntual la posibilidad de depresión de los acuíferos.

La explotación minera genera una serie de alteraciones sobre el medio hidrológico los cuales se detallan a continuación (Lillo, 2020; Amezaga et al., 2004):

- Formación de barreras físicas: incluye la construcción de diques, presas, acumulación de materiales (escombreras, rellenos, relaves), provocando modificaciones en las propiedades hidráulicas del suelo como por ejemplo la compactación y asentamiento lo que a su vez supondrá un obstáculo para la normal circulación del agua.
- Cambio en perfiles y niveles base de corrientes fluviales: producidos por desvíos de cursos de agua, represamientos, embalsamientos y excavaciones.
- Incremento y/o facilidad de flujos de agua subterráneos: producido por la apertura de túneles, construcción de galerías, fracturas de rocas, incremento de presión en fracturas existentes provocadas por procesos de voladura en minería subterránea.
- Variación en las reservas de agua: producido por el bombeo de agua subterránea durante procesos de construcción de túneles, galerías y explotación del mineral de interés; por el contrario, podría darse el escenario contrario de incremento del volumen (reservas) de agua en el acuífero producto de inyecciones forzadas.
- Pérdida de la calidad física del agua en corrientes superficiales: como consecuencia de la pérdida de infiltración por la compactación, sellado, cementación del suelo, incremento de la escorrentía superficial y la erosión del material se produce el arrastre de gran cantidad de sólidos aumentando los sólidos en suspensión en los cursos de agua superficiales y deteriorando así la calidad física de los mismos.
- Colmatación de cauces naturales: se produce tras la construcción de balsas, presas o depósitos; los materiales derivados de la actividad minera son erosionados y removidos por acción de la escorrentía superficial aguas abajo, depositándose y acumulándose en el cauce.
- Efectos en el gradiente hidráulico, nivel freático y nivel piezométrico de los acuíferos: durante la extracción del mineral y drenaje de minas subterráneas se producen descensos de los niveles como consecuencia de los drenajes derivados de las excavaciones que pueden afectar a otras áreas dependiendo de la escala de operación, además de la creación de grandes huecos que podrían provocar subsidencias y el incremento de la permeabilidad por procesos de voladuras que generarán nuevas vías de circulación de los flujos de agua. Como resultado de lo antes mencionado se producirán pérdidas en las reservas de agua subterránea, incremento de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación, disminución de las descargas de agua subterránea en ríos, humedales y manantiales conectados

hidráulicamente que se verá reflejado en una disminución de los caudales, pudiendo llegar a secarse, además de la disminución del nivel freático cercano a pozos de abastecimiento humano y agrícola aumentado la altura de bombeo requerida incrementado los costos de explotación de los pozos.

- Durante las actividades de cierre y abandono de forma específica durante la inundación de la mina y los vacíos minados puede provocar el denominado efecto “rebote” provocando hundimientos debido a la erosión de cavidades o pilares de soporte de la mina por rápido flujo de agua que a su vez puede provocar reactivación de fallas por la presión generada sobre los poros de los estratos del suelo. Tras el cese de la actividad los niveles vuelven a su estado natural, los túneles y galerías son inundados; sin embargo, las características de los acuíferos principalmente permeabilidad, capacidad de almacenamiento, conductividad hidráulica y modelo de flujo habrán cambiado en relación a las condiciones previas a la minería.

#### 4. METODOLOGÍA

La presente investigación se basa en una recopilación bibliográfica de información existente en diversas fuentes como artículos científicos, revistas científicas, libros, publicaciones, trabajos académicos (tesis de grado, maestría y doctorado), publicaciones gubernamentales, normativa, etc., con el objetivo de recopilar la información existente en el tema de impactos físicos de la minería sobre el medio hidrológico y compararlos a través de la revisión de casos de estudio en diferentes países.

La metodología utilizada para el desarrollo de la presente investigación se ejecutó en cuatro fases de acuerdo a lo señalado por Aponte et al., 2014.

- **Definición del problema:** la recopilación de información permitirá responder los objetivos planteados previamente y generará un aporte sobre el tema investigado.
- **Búsqueda de información:** material informativo procedente de revistas y artículos científicos, libros, páginas web, etc.

Los criterios seleccionados para la búsqueda de información fueron los siguientes:

1. Relación directa e indirecta con el tema de investigación, impactos físicos de la minería sobre el medio hidrológico.
2. En su mayoría la información de consulta correspondió a los últimos 15 años con énfasis en los últimos 5 años, sin embargo, también se apoyó la investigación con información histórica relacionada principalmente con información hidrogeológica y climatología de los casos de estudio analizados.

3. Para la búsqueda de información fue necesario utilizar buscadores, bases de datos científicas y editoriales de libros digitales que se enlistan a continuación:

- Google Académico
- Web of Science
- Scopus
- Springer
- Pearson
- ProQuest
- Lexis (base de datos legal ecuatoriana)
- Atlas de Justicia Ambiental

4. La búsqueda de información en las plataformas antes citadas se realizó a través de palabras claves relacionadas de forma directa con el tema de investigación.

- **Organización de la información:** organización sistemática de la información encontrada distinguiendo documentos principales y secundarios.
- **Análisis de la información:** selección de información relevante e integración en un documento.

## 5. CASOS DE ESTUDIO

A continuación, se presenta a manera de resultados diferentes casos de estudio tomados de varios países donde se han evidenciado impactos físicos de la minería sobre el medio hidrogeológico.

### 5.1 Dysart Woods, Ohio (EE.UU.)

#### 5.1.1 Descripción General

El área de Dysart Woods es el remanente del bosque de robles y nogales antiguos más grande del sureste de Ohio con una superficie aproximada de 23 hectáreas se encuentra ubicado en el condado de Belmont principal productor de carbón de Ohio (McCathy et al., 2001).

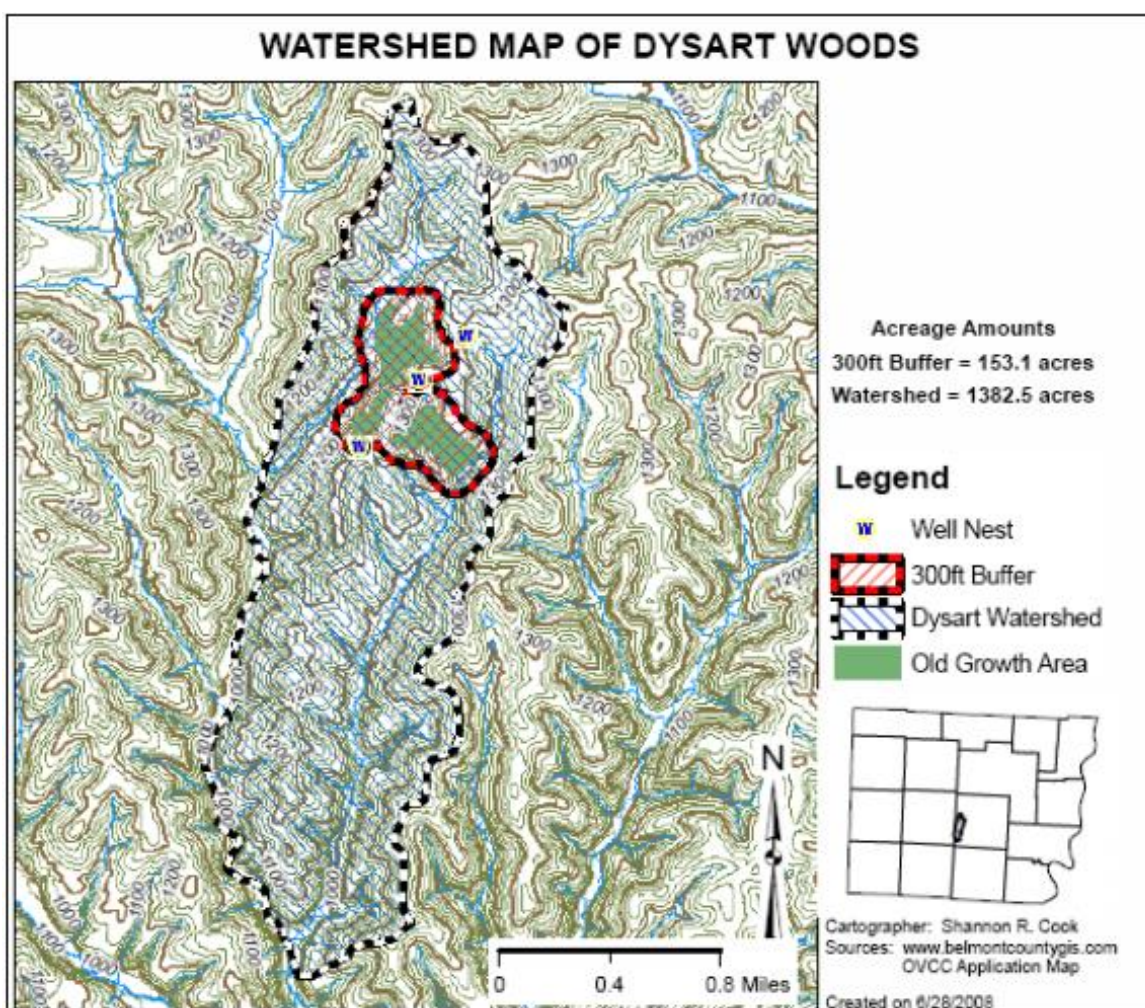
El clima de la zona corresponde a un clima continental con una temperatura media de 10,5°C (Harstine, 1991), la precipitación media anual es de 1066 mm y 635 mm de evapotranspiración potencial. (Craig et al., 1997).

Dysart Woods se encuentra asentado sobre un acuífero colgado (acuífero que se encuentra por encima del nivel freático regional), poco profundo conformado por arenisca, caliza, limolita, carbón y material no consolidado al este de Ohio. (OhioEPA, 2014). La recarga

anual oscila entre 107 y 194 mm la cual procede únicamente de la precipitación. Cabe mencionar que el acuífero no se extiende grandes distancias lateralmente ya que se encuentra limitado por la topografía de la zona y a su vez esto influencia de forma directa en la recarga del mismo (Ground Water Associates, Inc, 1991).

Al existir un yacimiento de carbón de interés los derechos mineros fueron otorgados a la empresa Ohio Valley Coal Company (OVCC) quien obtiene el permiso de explotación Permit D-360-12, el 15 de agosto de 2003 para iniciar trabajos en la mina Pittsburgh No 8, cuya veta de carbón se encuentra debajo de Dysart Woods (Marino, 2003).

En la Figura 2 se presenta el mapa de la cuenca hidrográfica de Dysart Woods incluida el área propuesta por OVCC como área de amortiguamiento.



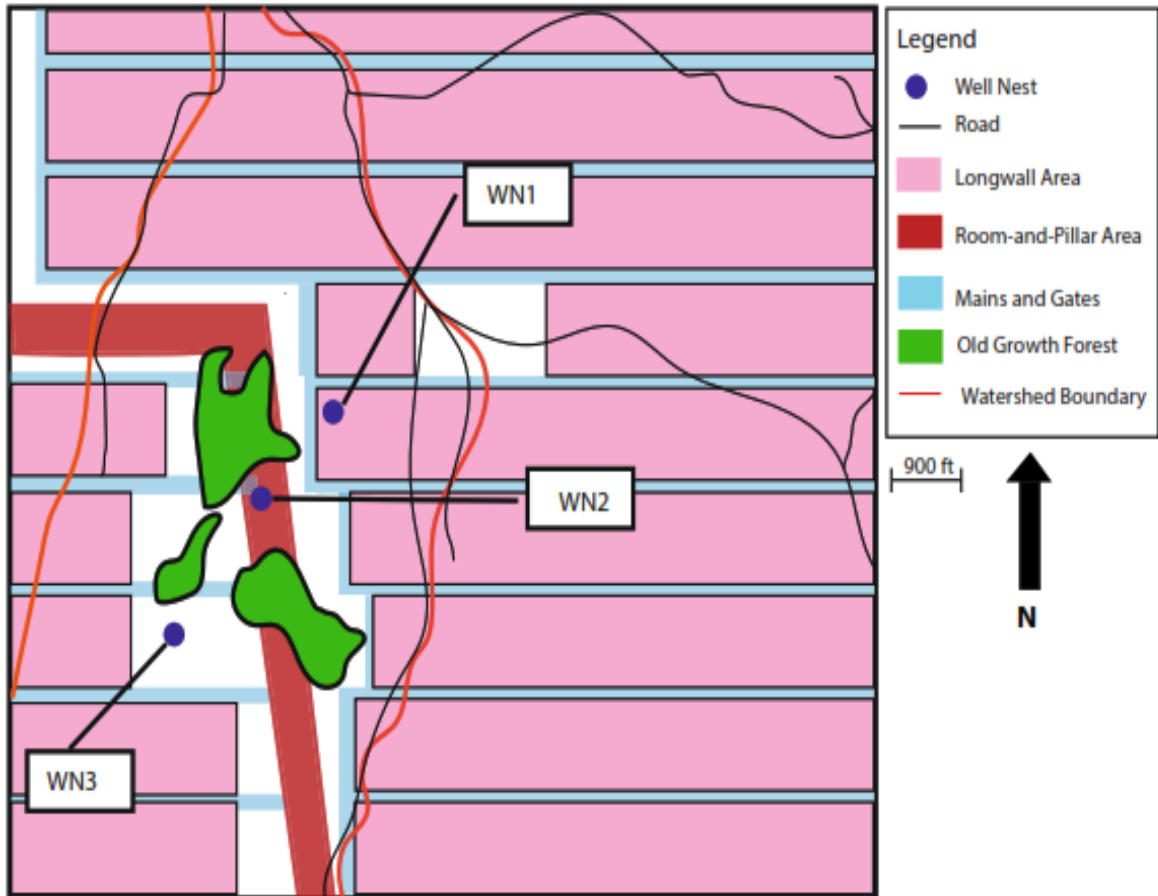
**Figura 2** Mapa de la cuenca hidrográfica de Dysart Woods

**Fuente:** (Cook, *The Hydrogeology of an Old Growth Forest with Implications for Defining Impact Zones Associated with Underground Mining*, 2008)

La explotación minera se ha llevado a cabo a través de operaciones subterráneas con los siguiente métodos:

- Cámara con soporte de pilares (*room and pillar*): atraviesa por debajo de Dysart Woods en sentido sueste a noroeste
- Minería de tajo o muro largo (*longwall*): se efectúa dentro de la cuenca de Dysarts.

En la Figura 3 se presenta un esquema donde se visualiza las áreas intervenidas y los métodos de explotación utilizados en cada una de ellas.



**Figura 3** Actividad Minera en Dysart Woods

**Fuente:** (López et al., 2019)

### 5.1.2 Impacto en el medio hidrológico

La técnica minera por tajo largo utilizada en la explotación de carbón genera impactos a nivel superficial como en el subsuelo siendo mayores en comparación con la minería de cámara y pilares.

La minería por tajo largo implica el hundimiento de la sobrecarga (material estéril) una vez que se ha extraído el mineral a medida que colapsa dentro de la mina se producen fracturas sobre las rocas suprayacentes y a su vez se crea una presión sobre las fracturas existentes, favoreciendo así los flujos de agua subterráneos. De acuerdo a lo indicado por Booth et al., (1999) en áreas de conductividad hidráulica elevada para mantener estable el sistema es requerido un mayor flujo de entrada a través de la precipitación, caso contrario se produciría



una disminución de los niveles piezométrico relacionado con el colapso y fracturas en la sobrecarga a causa de la subsidencia provocando que los flujos subterráneos que en un inicio eran horizontales se convertirán en flujos descendentes (verticales), viéndose reflejado en el descenso del nivel piezométrico. El incremento de la conductividad hidráulica vertical disminuye así el tiempo de residencia del agua subterránea en el acuífero, a su vez esto repercute sobre el almacenamiento y la descarga hacia manantiales (Johnson, 1992).

La minería por cámaras y pilares podría provocar subsidencias en el terreno debido al colapso espontáneo (incontrolados) de los pilares que sostienen la mina tras el cese de las operaciones; esto a su vez podría provocar barreras que impidan el flujo de agua subterránea, nuevas secciones de drenaje y presión sobre fracturas existentes; sin embargo, la minería por cámaras y pilares se encuentra entre los enfoques más seguros y de menor impacto ecológico para la extracción de carbón en la actualidad.

El estudio de Schilling (2005) describe la instalación y puesta en marcha de 8 pozos de monitoreo con el objetivo de tomar muestras cada hora y evaluar datos de conductividad hidráulica del acuífero pre-minería.

Cook en el año 2006 realiza una comparación de los datos obtenidos antes y después de las operaciones mineras obteniendo las siguientes conclusiones:

- La minería de tajo largo podría aumentar la conductividad hidráulica de los acuíferos colgados poco profundos de Dysart
- Se evidenció la pérdida de potencial hidráulico en tan solo una semana de inicio de la minería de tajo largo.

Cook (2008) profundiza en la investigación de los impactos hidrogeológicos realizando un modelado numérico con la ayuda de MODFLOW para el período 2004 -2008 a través del cual se observa que los niveles piezométricos del acuífero localizado en el noreste descenderían una vez se efectúe la minería por tajo largo; además el modelo arrojó que las unidades estratigráficas superiores se secarían a causa de la minería subterránea; también se analizó el impacto que tendría la pérdida de agua en los acuíferos sobre el bosque de robles y nogales que se mantiene del agua proveniente de los manantiales que descargan los acuíferos de Dysart ya estudiado previamente por Burgess (2006) quien aseguró que el bosque utilizaba agua subterránea en mayor proporción durante el crecimiento y en épocas de sequía concluyendo así que el agua subterránea es un factor predominante en la biohidrología de Dysart Woods.

Finalmente, López y Zhang (2019) a través de análisis de series de tiempo evalúan los impactos en las propiedades hidráulicas de las aguas subterránea de Dysart Woods. Las principales conclusiones de su trabajo se exponen a continuación:

- El descenso de los niveles piezométricos se produjo 56 días después de llevar a cabo actividades mineras en comparación con los 67 días que tomaba el descenso previo a actividades de minería, este cambio se cree fue producido por un incremento de la conductividad hidráulica y velocidades de flujo a causa de las actividades mineras.
- La minería por tajo largo podría ocasionar cambios en la permeabilidad, almacenamiento, descargas y tiempo de residencia del agua en el acuífero (Fetter, 2001).
- Hubo una disminución en el coeficiente de almacenamiento específico en las condiciones post-extracción en comparación con las condiciones anteriores a la extracción; se produjo debido a la pérdida de capacidad del acuífero de almacenar agua por el incremento de fracturas y drenajes asociados con actividades mineras.

### 5.1.3 Intervenciones de protección

El permiso otorgado para la explotación de Dysart Woods contemplaba realizar minería subterránea a través de tajo largo, sin embargo, grupos ambientalistas e investigadores de la universidad de Ohio intervinieron con el objetivo de incorporar una zona de protección a la cual se le denominó zona de amortiguamiento (área de influencia) y a su vez se modificó la técnica de explotación a cámara y pilares.

- **Zona de amortiguamiento:** técnica de protección utilizada en actividades de explotación de minería subterránea con el objetivo de preservar la estructura en superficie; el área que ocuparán estas zonas será establecida tomando en cuenta los límites de las cuencas hidrográficas existente en la zona de estudio, así como las divisorias de aguas subterráneas (Cook, *The Hydrogeology of an Old Growth Forest with Implications for Defining Impact Zones Associated with Underground Mining*, 2008). Cabe mencionar que esto se podría aplicar a los diferentes tipos de minería existente y no únicamente a la minería de carbón
- Las zonas de amortiguamiento se definen en función del ángulo de influencia (distancia lateral desde los límites del panel de tajo largo hasta el punto de hundimiento cero) en el caso de Dysart Woods la zona de amortiguamiento se basó en un ángulo de 13° dando como resultado un radio de influencia de 300 pies (91,44 metros) alrededor del bosque de robles y nogales (OVCC, 2003); sin embargo, Cook

en el año 2008 concluyó que los límites de la subcuenca donde se encuentra Dysart Woods se extienden mucho más allá de la zona de amortiguamiento.

Con estas intervenciones se buscó preservar las características hidrogeológicas de los acuíferos existentes evitando que lleguen a secarse y así mantener el ecosistema de los bosques de roble y nogal.

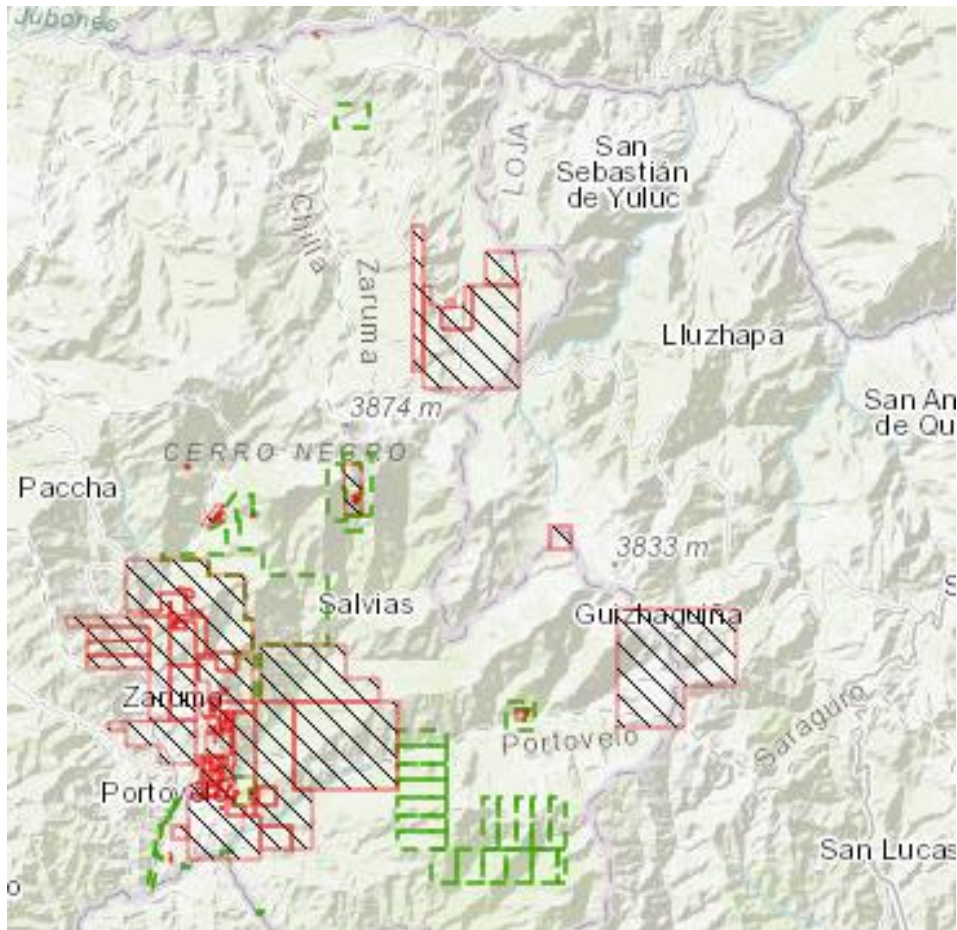
## **5.2 Zaruma y Portovelo, Ecuador**

### **5.2.1 Descripción General**

Los cantones de Zaruma y Portovelo se encuentran al suroeste de Ecuador en la provincia de El Oro en la cuenca hidrográfica del Puyango cuyos principales afluentes son los ríos Calera y Amarillo los cuales aportan un caudal promedio anual de 22,98 m<sup>3</sup>/s en su confluencia al suroccidente de Portovelo. El área de Zaruma y Portovelo registra una precipitación de 1.229 mm/año asentándose sobre un acuífero fisurado-libre-interior cuyo nivel freático en promedio se encuentra a 5 m de profundidad (Oliva et al., 2015).

La actividad minera en esta zona tiene sus inicios en la época de la colonia en el puerto de Tumbes donde se descubrió que las aguas del río contenían pequeñas trazas de oro; con el objetivo de conocer la fuente las investigaciones avanzaron aguas arriba hasta alcanzar el cerro donde se encontró una gran veta del mineral al que los conquistadores lo llamaron Vizcaya fundándose así las “Minas de Zaruma” (Murillo, 2000).

El complejo minero Zaruma – Portovelo (ver Figura 4) es considerado una de las reservas mineras más importantes y grandes del Ecuador el cual incluye los sectores de Arcapamba, Botoneros, Buza, Cdla. El Obrero, Curipamba, El Pache, El Paraíso, El Salado, La Florida, Malvas, Minas Nuevas, Portovelo, Puente Negro, Santa Cecilia Malvas, Vía Puente de Buza (Agencia de Regulación y Control Minero, 2019). En base al catastro minero del Ecuador el complejo minero Zaruma-Portovelo cuenta con un sistema de vetas longitudinales de oro las cuales se dirigen en sentido N-S, existiendo al momento 142 concesiones de las cuales 111 se encuentran inscritas y 31 en trámite; además la ARCOM ha escaneado un total de 65 kilómetros de galerías las cuales se encuentran localizadas debajo del casco urbano. (Agencia de Regulación y Control Minero, 2020)(Bravo et al., 2020).



**Figura 4** Concesiones mineras en el complejo minero Zaruma-Portovelo

**Fuente:** (Oliva et al., 2015), (Agencia de Regulación y Control Minero, 2020)

Durante más de 80 años (1896 – finales de 1970) llegan al país la compañía South American Development Company (SADCO) iniciando la explotación minera subterránea en el Ecuador; para ello se utilizaron varias técnicas de explotación: corte y relleno, cámaras y pilares y cámara almacén, generando kilómetros de galerías, cámaras, pilares y rellenos en el subsuelo (Oliva et al., 2015).

### 5.2.2 Impactos en el medio hidrológico

A finales de 1970 tras el cese de actividades por parte de SADCO, se crea la Compañía Industrial Minera Asociada (CIMA) quien opera en la zona hasta 1980 con procesos extractivos poco técnicos y grandes errores que la llevaron a la quiebra. En el año 1981 se marca un punto histórico en los cantones de Zaruma y Portovelo tras el interés creciente de los pobladores por la extracción de oro quienes de forma artesanal e ilegal ingresan a las minas abandonadas para explotarlo extrayendo el material de relleno que las estabilizaba dando paso a una explotación sin control y con falta de conocimiento técnico ocasionando inestabilidad del terreno en las áreas urbanas y suburbanas de los cantones Zaruma y Portovelo (Oliva et al., 2015) además de los siguientes impactos:

- Actividades de voladuras incontroladas provocan gran cantidad de vibraciones del suelo llevando al colapso de galerías y cámaras existentes lo que a su vez provoca hundimientos.
- En el año 2017 producto de la minería ilegal se produjo un socavón en la escuela “Inmaculada Fe y Alegría” (ver Figura 5) emitiéndose una declaratoria de estado de excepción a través de la cual se prohibían actividades mineras en la zona (Ludizaca et al., 2018).



**Figura 5** Socavón registrado en Zaruma 2017

**Fuente:** (*Diario El Comercio, 2017*)

- Al encontrarse el acuífero cercano a la superficie y al crearse cientos de kilómetros de túneles y galerías los flujos de agua subterránea se han visto modificados ya que gran cantidad de agua ha tenido que ser extraída del acuífero para evitar inundaciones dentro de las minas.
- La porosidad y el fisuramiento de los suelos y rocas de la zona para la construcción de galerías mineras han modificado significativamente las condiciones del flujo natural (superficial y subterráneo) del agua a través de los materiales, en el caso de flujos subterráneos estos cambios se ven reflejados en el descenso del nivel freático e incrementado el riesgo por inestabilidad del terreno (Gallardo et al., 2018).
- Al efectuarse trabajos de forma artesanal (ilegal) gran cantidad de sólidos en suspensión y compuestos tóxicos como metales pesados (plomo, mercurio, manganeso y cianuro) han sido depositados en los ríos Amarillo y Calera afluentes del río Puyango (ver Figura 6) donde se asientan las plantas de procesamiento y beneficio; dichos compuestos podrían a su vez alcanzar las aguas subterráneas

(Barcos et al., 2017) (Paredes, 2013).

- Problemas de acidificación en aguas superficiales y subterráneas debido a los drenajes de cunetas, corredores subterráneos, relaves, escorias, disolución oxidativa y lixiviación de sulfuros metálicos (Barcos et al., 2017).



**Figura 6** Contaminación por residuos de extracción minera en Ecuador, afluente del río Amarillo

**Fuente:** (Paredes, 2013)

### 5.2.3 Intervenciones de protección

En el año 2011 el gobierno asigna un presupuesto de 4.347.087,75 US\$ para llevar a cabo el “Proyecto de seguimiento, control y evaluación de labores mineras en el distrito Zaruma – Portovelo” con el objetivo de tecnificar las operaciones mineras a través del seguimiento, control, evaluación de las amenazas, riesgos y consecuencias sociales, económicas y ambientales producidas como consecuencia de las actividades mineras. (Agencia de Regulación y Control Minero, 2019).

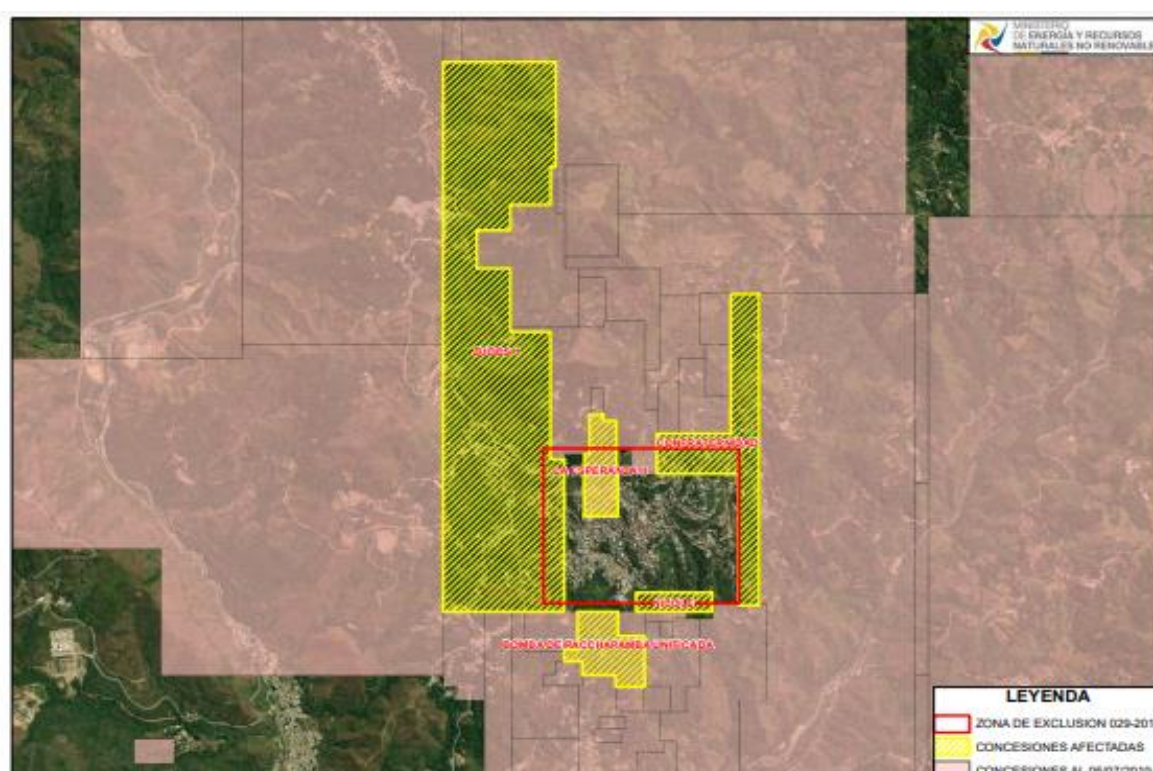
El 27 de septiembre de 2013 mediante Acuerdo Ministerial 509, el Ministerio de Recursos Naturales No Renovables, “*declara como zona de exclusión minera el casco urbano de la ciudad de Zaruma, cantón Zaruma, provincia de El Oro, con el fin de precautelar la vida, la salud y el ambiente, así como, proteger la infraestructura pública y privada de este Patrimonio Nacional, afectadas por las internaciones ilegales y la explotación minera ilegal*” (Ministerio de Recursos Naturales No Renovables, 2013).

El 14 de septiembre de 2017 tras el socavón registrado en la escuela Inmaculada Fé y Alegría el gobierno del Ecuador declara el estado de excepción en Zaruma mediante Decreto N° 158



delimitando al cantón Zaruma como zona de riesgo prohibiendo el desarrollo de cualquier tipo de actividad minera por 60 días. Tras el término del estado de excepción el 14 de diciembre de 2017 mediante Acuerdo Ministerial Nro. 2017-038 se amplía la zona de exclusión minera

Finalmente el 12 de septiembre de 2019 mediante Acuerdo Ministerial 2019-0050-AM, el Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables delimita una nueva zona de exclusión bajo el casco urbano de la ciudad de Zaruma (ver Figura 7) con el objetivo de incentivar el desarrollo económico y social de un cantón históricamente minero y la generación de empleo de manera formal. En la siguiente figura se observa la zona de exclusión Zaruma.



**Figura 7** Zona de exclusión Zaruma

**Fuente:** (Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables , 2019)

### 5.3 Shaanxi, China

#### 5.3.1 Descripción General

En la provincia de Shaanxi ubicada en una región semiárida/árida en el norte de China se encuentran las áreas mineras Shenmu-Fugu, Yulin-Shenmu y la región norte de Yuyang-Hengshan consideradas como la base energética (ver Figura 8), ocupando un área total de 10.592 km<sup>2</sup>, con abundantes recursos de carbón de alta calidad (Hou et al., 2018).



**Figura 8** Plantas de carbón en China, zoom provincia de Shaanxi

**Fuente:** ( GLOBAL ENERGY MONITOR, 2021)

La precipitación que en esta zona es menor a 400 mm anuales contando con apenas el 3,9% de recursos hídricos de todo el país y la evaporación media anual se encuentra entre 2.200 – 2.800 mm siendo seis veces mayor que la lluvia (Da-zhao Gu, 2016), (Luchen, 2016).

Las áreas mineras Shenmu-Fugu, Yulin-Shenmu y Yuyang-Hengshan se encuentran asentadas sobre dos unidades acuíferas que son recargadas en su totalidad por la precipitación que logra infiltrarse:

- **Formación cuaternaria Salawusu:** principal acuífero de la cuenca norte de Ordos, compuesto por arena fina, arena limosa-fina, conglomerado de areniscas con buena clasificación, alta permeabilidad que se recarga fácilmente por la precipitación (Luchen, 2016).
- **Formación jurásica Zhiluo:** compuesta por un gran conjunto de arenisca y lutita verde con la mayoría de los cuerpos de mineral de uranio (Feng-jun, 2020).

La actividad minera de carbón en China data de 1880; sin embargo, la actividad minera a gran escala con la construcción de gran parte de las minas de carbón en la región inició después del año 2000 (Hou et al., 2018). Existen más de 20 métodos de extracción subterránea; sin embargo, en su mayoría se efectúa con métodos de tajo largo.



### 5.3.2 Impactos en el medio hidrológico

Durante la explotación de carbón a gran escala se observó que tanto las reservas de agua subterránea como el caudal de los sistemas de aguas superficiales se redujeron notablemente a medida que aumentaba el rendimiento de carbón después del año 2000, el volumen de drenaje de la masa de agua subterránea aumentó considerablemente año tras año (Hou et al., 2018).

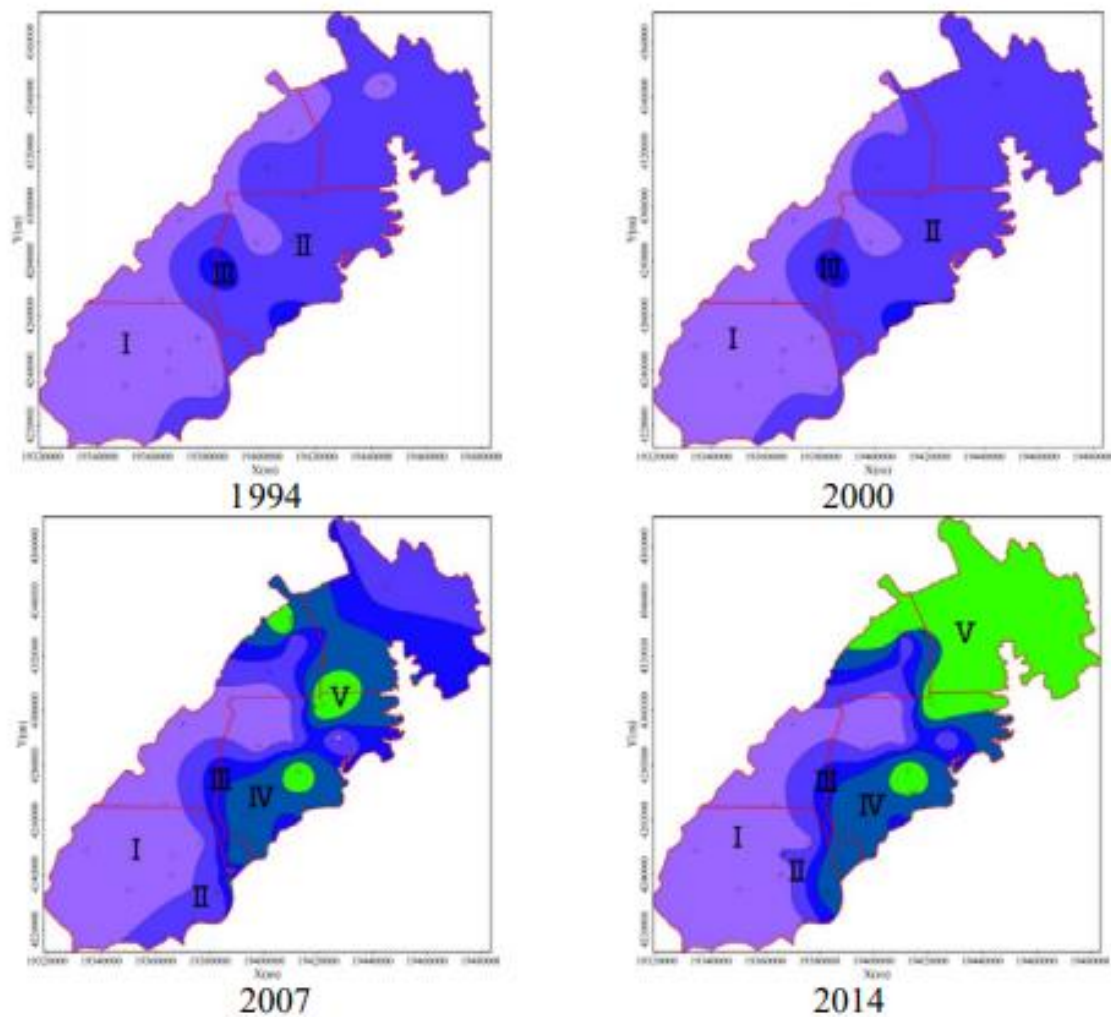
Se realizó un análisis del impacto de la minería sobre el nivel freático basado en datos de nivel de agua en 26 pozos de observación que tomaban agua del acuífero no confinado cubriendo un área de  $10^9\text{m}^2$  para cuatro años (1994, 2000, 2007 y 2014). Los resultados de la investigación se presentan en la se puede ver que el nivel freático en el año 2000 era similar en comparación con el año 1994 para las zonas II, III, IV y V, debido a que en estos años el consumo de agua se encontraba influenciado únicamente por las demandas para consumo humano y agricultura; sin embargo una vez que inicia la minería a gran escala en el año 2000 se puede ver como el nivel freático desciende, especialmente en el área minera de Shenmu-Fugu donde la profundidad del nivel freático del agua subterránea descendió más de 10 m (Hou et al., 2018).

**Tabla 2** y Figura 9 se puede ver que el nivel freático en el año 2000 era similar en comparación con el año 1994 para las zonas II, III, IV y V, debido a que en estos años el consumo de agua se encontraba influenciado únicamente por las demandas para consumo humano y agricultura; sin embargo una vez que inicia la minería a gran escala en el año 2000 se puede ver como el nivel freático desciende, especialmente en el área minera de Shenmu-Fugu donde la profundidad del nivel freático del agua subterránea descendió más de 10 m (Hou et al., 2018).

**Tabla 2** Evolución de la extensión areal (en  $10^9\text{m}^2$ ) de diferentes rangos de profundidades del nivel freático

Año	I 0-3m	II 3-6m	III 6-9m	IV 9-15m	V >15m
1994	4,276	6,058	0,258	0	0
2000	3,88	6,48	0,232	0	0
2007	3,491	2,485	2,025	2,09	0,501
2014	3,513	1,082	0,866	1,701	3,43

Fuente: (Hou et al., 2018)



**Figura 9** Profundidad del nivel freático por áreas

**Fuente:** (Hou et al., 2018)

A su vez el excesivo drenaje de aguas subterránea ocasionó una disminución en la tasa de infiltración hacia el acuífero; la investigación revisada no especifica el motivo de este fenómeno, sin embargo se conoce que la recarga de infiltración de la precipitación se obtiene a partir de la combinación de la profundidad del nivel freático por zona y el coeficiente de infiltración el cual a su vez está condicionado por varios parámetros: profundidad del agua subterránea, precipitación, litología de la zona no saturada, características geomorfológicas, vegetación, etc., lo que nos permite concluir que la modificación de estos parámetros producto de la minería provocó la reducción en la recarga por infiltración.

Los resultados obtenidos de la infiltración se presentan en la Tabla 3.

**Tabla 3** Recarga por infiltración

<b>Año</b>	<b>Infiltración</b> 10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> /a
<b>1994</b>	16,28
<b>2000</b>	16,13
<b>2007</b>	13,93
<b>2014</b>	11,74

**Fuente:** (Hou et al., 2018)

Finalmente se evidenció una disminución en los caudales de los ríos a medida que incrementó el desarrollo industrial de explotación de carbón; se debe tener en cuenta que la principal fuente de recarga de los ríos en la región proviene del aporte de aguas subterráneas lo que a su vez podría generar más problemas ecológicos (Hou et al., 2018).

### **5.3.3 Intervenciones de protección**

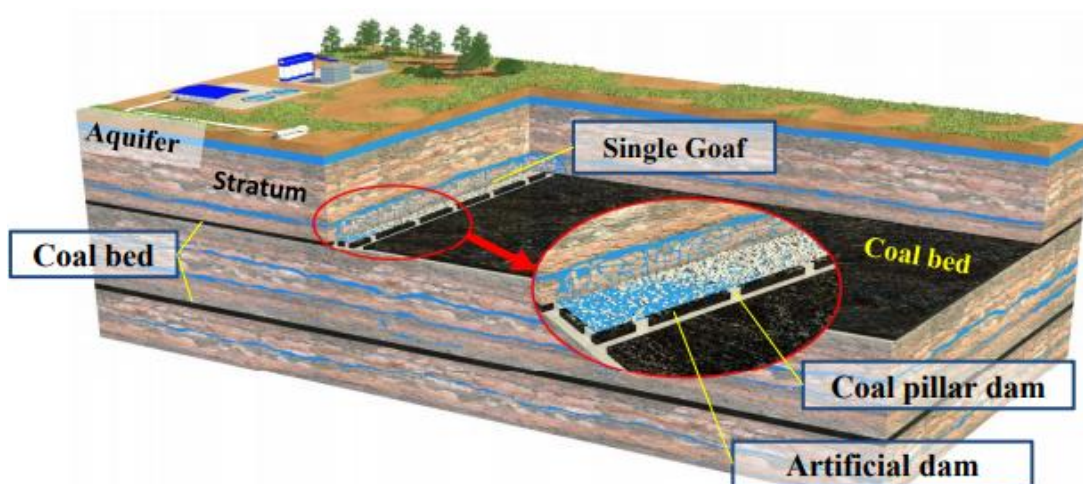
Los problemas de escasez de recursos hídricos en China son predominantes en las zonas áridas y semiáridas del norte del país donde a su vez se concentran la mayor cantidad de minas de carbón, es por ello que ha sido necesario la adopción de tecnologías de mitigación y protección de los recursos hídricos. A continuación, se describen tres tecnologías que están siendo utilizadas:

- Relleno de huecos: dados los problemas de deterioro del acuífero Salawusu producto de la actividad minera se ha promovido el desarrollo de la minería de relleno utilizando arena eólica como agregado compuesta en su mayoría por cuarzo, feldespato, mica y cenizas volantes activas con adición de cal, yeso y cemento como agentes cementantes (Liu, 2017).

Esta tecnología está siendo desarrollada con el objetivo de proteger los recursos hídricos, de forma especial el acuífero suprayacente de las áreas que han sido explotadas; además esta tecnología ha permitido un ahorro del 35% de costos de materiales de relleno (Liu, 2017).

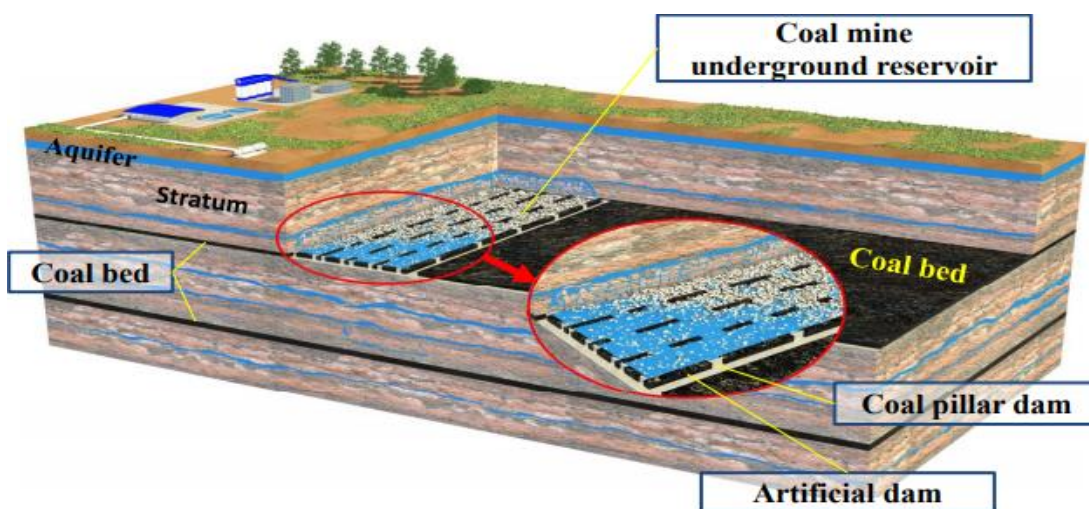
- Depósitos de almacenamiento subterráneo: usando rocas producto del proceso voladuras, se realiza el relleno parcial de los espacios de almacenamiento de agua, con el objetivo de crear una presa artificial que a su vez estará conectada con los pilares de carbón; pudiendo considerarse tres escenarios (Da-zhao Gu, 2016):

- Escenario 1. Desarrollo de una única instalación (ver Figura 10) para el almacenamiento del agua de mina con el objetivo de comprobar la viabilidad de almacenamiento de agua a nivel subterráneo.



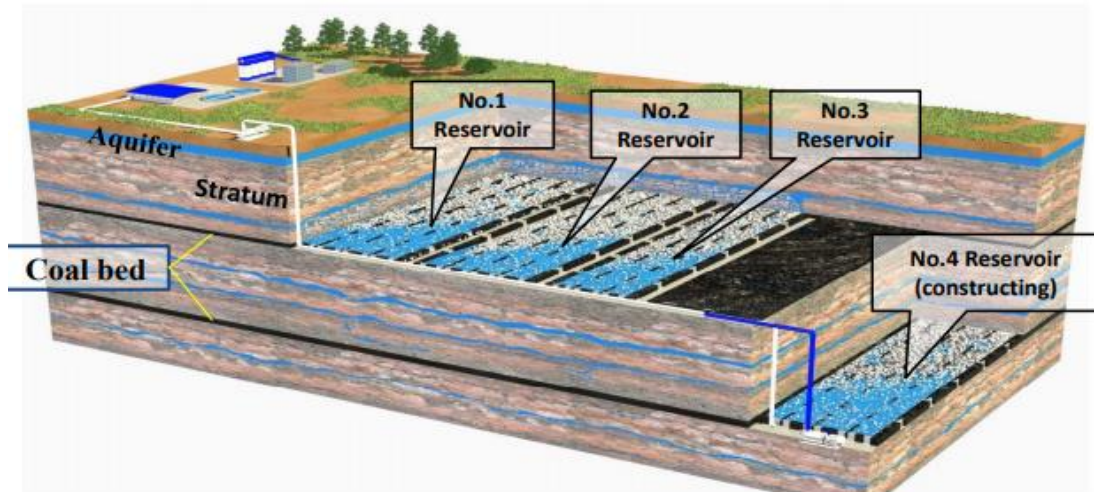
**Figura 10** Escenario 1  
**Fuente:** (Da-zhao Gu, 2016)

- Escenario 2. El segundo escenario contempla creación de un depósito compuesto por múltiples rellenos (ver Figura 11) con el objetivo de incrementar la capacidad de almacenamiento.



**Figura 11** Escenario 2  
**Fuente:** (Da-zhao Gu, 2016)

- Escenario 3. Finalmente, el tercer escenario consiste en hacer un depósito compuesto por varios reservorios (Figura 12) con el objetivo de lograr una descarga nula cuando se extraen múltiples vetas de carbón.



**Figura 12** Escenario 3

**Fuente:** (Da-zhao Gu, 2016)

Esta tecnología de reservorios subterráneos en minas de carbón enfrenta cinco desafíos técnicos que han sido estudiados y desarrollados paso a paso aumentando así el volumen de agua almacenada en los últimos años. A continuación, se enumeran los 5 desafíos:

1. Volumen de producción de agua
  2. Capacidad del reservorio
  3. Garantizar la resistencia y evitar filtraciones
  4. Garantizar la seguridad
  5. Control de calidad del agua
- Explotación simultánea de carbón y agua: basándose en la ideología de minería verde, se plantea el punto de vista de la explotación simultánea de carbón y agua para utilizar continuamente los recursos hídricos de forma segura, como el drenaje de agua antes de la extracción y la combinación de drenaje durante la extracción para la aplicación del recurso para otros fines durante el desarrollo minero (Bai et al., 2009); sean estos en el propio proceso de extracción de metales o dependiendo de las características geoquímicas del agua y posibles tratamientos físico/químicos o por ejemplo para su uso en agricultura dependiendo de los requisitos propios de los cultivos,

## 5.4 Carmichael, Australia

### 5.4.1 Descripción General

La mina de carbón térmico de Carmichael se localiza en el centro de Queensland sobre la cuenca carbonífera de Galilee al noreste del Australia en un área no habitada utilizada para el pastoreo de ganado y cubierta por grandes extensiones de bosques de eucalipto. El clima

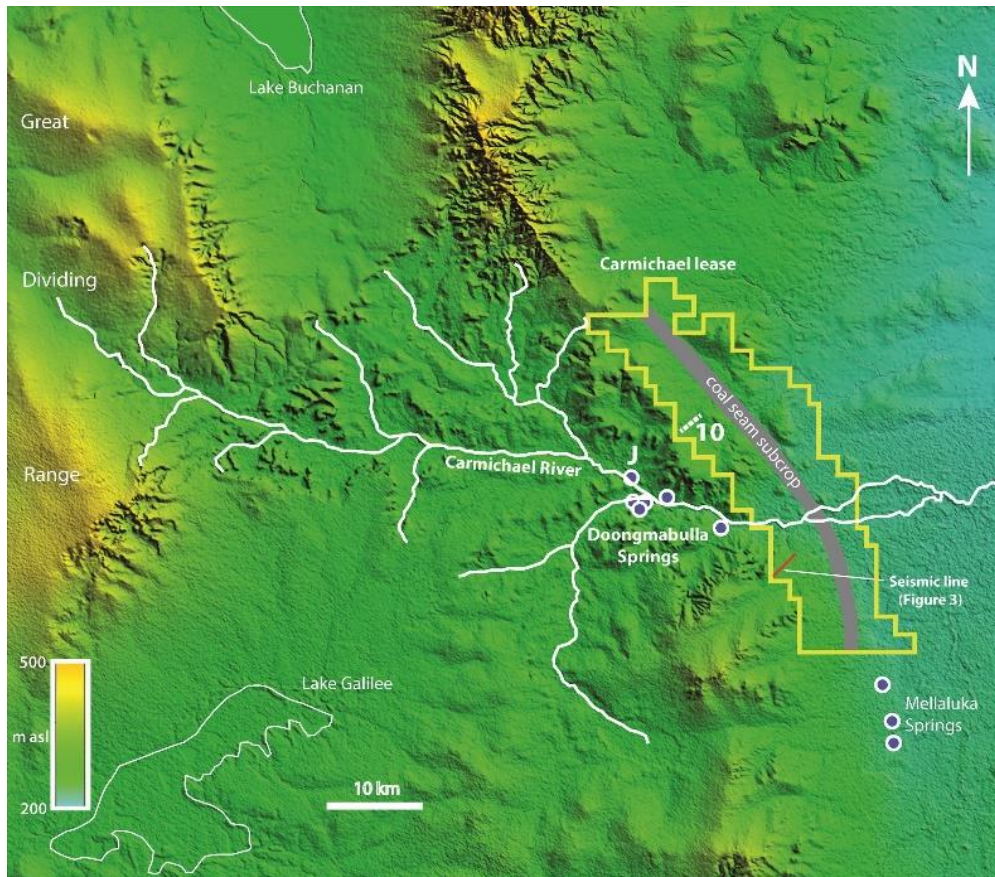
de la zona es semiárido alcanzando precipitaciones anuales de 500 mm con un único cuerpo de agua dulce permanente el río Carmichael y dos lagos salados Buchanan y Galilee al oeste (Currell et al., 2017).

En la zona de Queensland se encuentra la Gran Cuenca Artesiana (GAB) considerada la cuenca de agua dulce más grande del mundo. La GAB es una cuenca subterránea conformada por capas de roca que forma acuíferos confinados superpuestos por acuitados. La parte superior de la GAB está conformada por depósitos de gravas de río, arena y roca basáltica producto de erupciones volcánicas que forman acuíferos libres pocos profundos (GasFields Commission Queensland, 2014). En el área destinada para operaciones mineras se distingue el acuífero de arenisca de Colinlea, el acuífero de arenisca Clematis (que es un acuífero de gran importancia en la GAB) y la formación Rewan considerado como un acuífero regional compuesto por pizarras (Currell et al., 2017).

Considerando la importancia de la presencia de fallas en las operaciones mineras se realizó una caracterización de estas, encontrando una que se extiende verticalmente cientos de metros desde las vetas de carbón hasta la formación Rewan. (McClintock, 2012).

A 8 kilómetros al oeste de la mina se encuentra el complejo de manantiales de agua dulce permanentes conocido como Doongmabulla (Ver Figura 13) que cubre un área de 8,7 hectáreas; los manantiales de Doongmabulla representan una fuente confiable de agua dulce en la región, son de gran importancia cultural y ecológica y se encuentran protegidos por un Acuerdo de Conservación de Refugios Naturales entre los propietarios de tierras y el estado de Queensland y por la Ley Federal de Protección Ambiental y Conservación de la Biodiversidad de 1999, la principal legislación ambiental federal de Australia. A su vez el complejo de manantiales aporta un flujo base al río Carmichael. Un segundo complejo de manantiales Mellaluka, Lignum y Stories se encuentran entre 5 y 10 km al sur de la mina y aproximadamente a 35 km al sureste de Doongmabulla (Currell et al., 2017).





**Figura 13** Ubicación de la mina Carmichael

**Fuente:** (*GasFields Commission Queensland, 2014*)

En el año 2019 después de varios años de debate por parte de grupos ambientalistas, comunidades indígenas, investigadores, Land Services of Coast and Country Inc. y procesos judiciales en el tribunal de tierras de Queensland, el gobierno australiano aprueba el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) y los planes de gestión de agua subterránea presentados por la compañía Adani Australia del proyecto de explotación de una mina de carbón a cielo abierto y una línea ferroviaria para transportar el carbón hasta la costa para su posterior exportación.

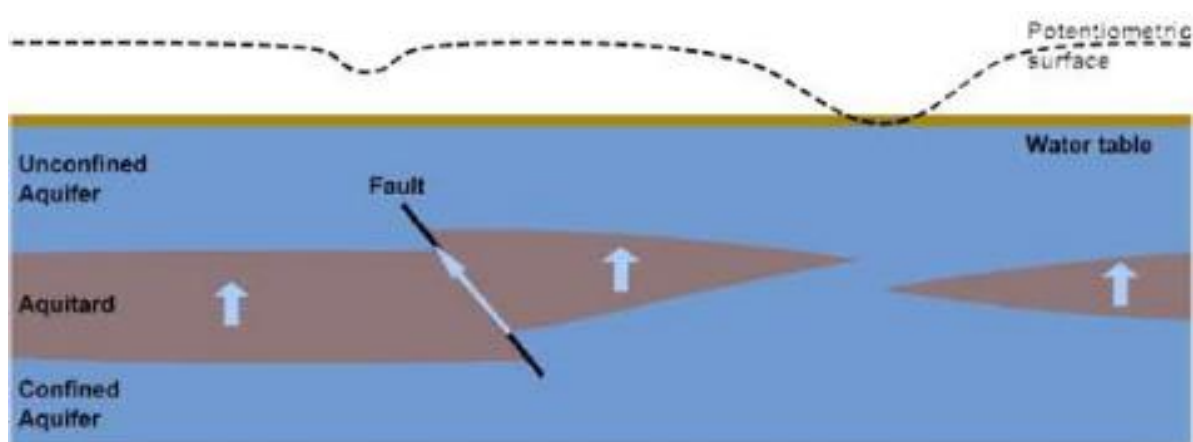
El tiempo de vida útil de la mina será de 60 años, iniciando la explotación con el método de corte de caja en julio de 2020; el proyecto requiere aproximadamente 12,5 mil millones de litros de agua al año que será captada de agua superficial y el drenaje del acuífero arenisca de Colinlea y los acuíferos circundantes a la mina (Currell et al., 2017).

#### **5.4.2 Impactos en el medio hidrológico**

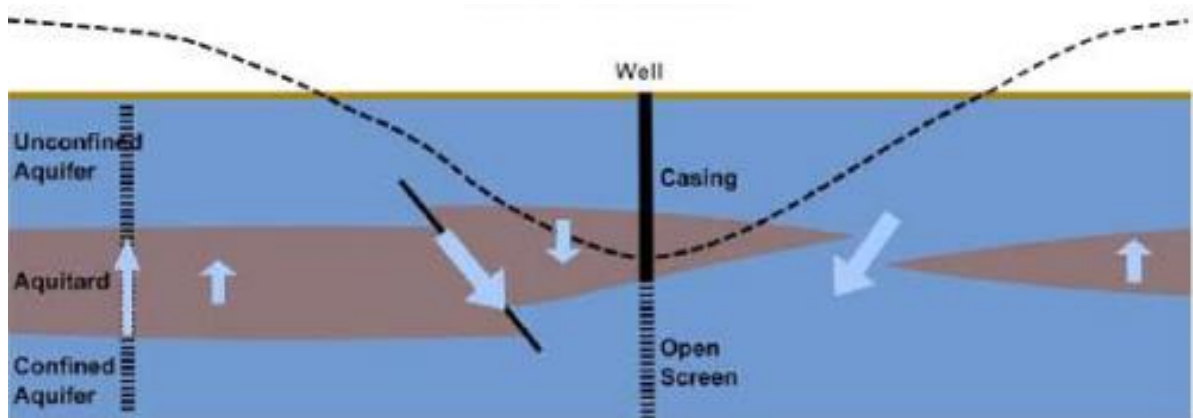
Al ser una mina que ha iniciado actividades de explotación en el año de la presente investigación no existen investigaciones sobre impactos ya identificados; sin embargo, se ha convertido en unos de los proyectos más polémicos a nivel mundial por los posibles impactos que podrían generarse sobre la reconocida y famosa barrera de coral australiana, considerado

como uno de los ecosistemas más amenazados del mundo producto de las emisiones de CO<sub>2</sub> que se generarán durante la explotación de carbón.

Uno de los grandes problemas que han sido analizados es el relacionado con el mantenimiento de la conectividad del agua subterránea de la GAB sin alterar los flujos de agua existentes entre acuíferos; GasFields Commission Queensland en el año 2014 presentó el informe “*Groundwater Aquifer Connectivity in Queensland*” en el cual se incluye una representación de cómo podrían invertirse los flujos de agua subterráneas (del acuífero libre al acuífero confinado) en algunas zonas como consecuencia de los efectos en el sistema hidrológico por actividades antrópicas como la extracción de agua subterránea (ver Figura 14).



A. Flujo de agua subterránea previo a la actividad minera.



B. Efectos en el flujo del agua subterránea de la acción antrópica.

**Figura 14** Representación de la dirección de flujo de agua subterránea pre- minería y pos-minería

**Fuente:** (GasFields Commission Queensland, 2014)

A su vez la posible pérdida de conectividad influiría negativamente sobre el complejo de manantiales de Doongmabulla; sin embargo, no se ha llegado a determinar a ciencia cierta cuales son las fuentes que alimentan estos complejos existiendo un gran vacío científico que



llevó la aprobación del proyecto a los tribunales de Queensland con una gran incertidumbre sobre el verdadero impacto que podría tener la minería en este ecosistema (Bradley, 2015).

Otro posible impacto por descenso del nivel piezométrico en Mellaluka es que se eliminarían las presiones artesianas pudiendo llegar a secarse los tres manantiales Mellaluka, Lignum y Stories (Currell et al., 2017).

La información sobre el grado de conectividad del agua subterránea entre las vetas de carbón y el GAB es esencial para comprender de mejor manera cuales podrían ser los impactos potenciales de la mina de Carmichael.

A pesar de lo mencionado anteriormente y la falta de estudios científicos como análisis hidrogeoquímicos/isotópicos del agua subterránea de los acuíferos y manantiales, así como estudios hidrogeológicos sobre las propiedades hidráulicas de los acuíferos y acuitardos o estudios geofísicos que permitan conocer las fallas existentes a profundidad. El EIA para la mina fue aprobado con una serie de condiciones para Adani quien tenía que cerrar todos los vacíos evidenciados ante el tribunal de Queensland (Currell et al., 2017).

#### **5.4.3 Intervenciones de protección**

El EIA fue aprobado por el Departamento de Medio Ambiente bajo una serie de 180 condiciones de obligatoria aplicación:

- Elaboración de un modelo del impacto hidrogeológico de la mina a lo largo de los 60 años de vida útil del proyecto incluida la etapa de rehabilitación posterior al cierre.
- Establecimiento de un plan de manejo de aguas subterráneas en el cual deberán detallar las acciones correctivas en caso de superar el umbral provisional de 0,2 m en el Complejo de Manantiales de Doongmabulla.
- El plan también debe dar detalles de medidas de mitigación tales como la reinyección al acuífero de la fuente de agua subterránea para mantener la presión, los flujos y el hábitat ecológico en el Complejo de Manantiales Doongmabulla. (Departamento de Medio Ambiente, 2015).
- Monitoreo de alerta temprana entre las actividades mineras, el estado de los manantiales de Doongmabulla y activadores de acciones correctivas inmediatas en caso de identificarse un impacto inesperado en las aguas subterráneas (Currell et al., 2017).

Las condiciones de aprobación del EIA no especifican qué ocurrirá si la remediación no tiene éxito o si los manantiales de Doongmabulla se secan como resultado de la mina (Currell et al., 2017).

## 6. DISCUSIÓN

En el presente trabajo se realizó la revisión de cuatro casos de estudio relacionados con los impactos físicos que se han evidenciado por el desarrollo de la minería sobre el medio hidrológico en Carmichael (Australia), Shaanxi (China), Dysart Woods (EE. UU.) y Zaruma y Portovelo (Ecuador).

Tanto el caso de estudio de Shaanxi como Dysart Woods corresponden a minas subterráneas de carbón y en el caso de Zaruma y Portovelo (Ecuador) corresponden a minas subterráneas de oro. El potencial impacto identificado en Dysart Woods fue la subsidencia y/o hundimiento del terreno por el colapso de las estructuras de soporte de la mina. En el caso de Shaanxi en el año 2019 se registró el colapso de techo de una mina de carbón dejando atrapados a 66 mineros y provocando la muerte de otros 21 mineros (BBC NEWS, 2019). Por su parte en el caso de Zaruma y Portovelo se ve que este impacto ya se ha materializado provocando grandes socavones bajo el casco urbano, cabe resaltar que el caso ecuatoriano corresponde a minería artesanal (no cumple condiciones técnicas de explotación) ilegal que ha venido desarrollándose desde 1970.

En el caso de Dysart Woods y Shaanxi los impactos físicos comunes estudiados fueron los siguientes:

- Descenso del nivel freático post-minería
- Pérdida de capacidad de almacenamiento de los acuíferos por el incremento de fracturas y drenajes asociados con actividades mineras reflejado en una disminución del volumen de agua subterránea.
- Disminución de los caudales en ríos, manantiales y cuerpos de agua superficiales conectados hidráulicamente con los acuíferos impactados por la minería.

Comparando el caso de Dysart Woods y Carmichael el impacto común analizado fue la alteración en los flujos de descarga de los acuíferos en cuerpos de agua superficiales y en el mantenimiento de los ecosistemas sensibles en los que su supervivencia depende directamente de la conectividad hidrológica natural existente.

De manera particular en el caso de Carmichael es en el único que se presenta una representación de los cambios en los flujos de agua subterránea que podrían ocurrir a través de las fallas existentes en el subsuelo, esta variación del flujo se podría generar como resultado del drenaje de la mina y pérdida de la presión existente entre el acuífero libre que está cercano a la superficie y el acuífero confinado. Este particular da a conocer la necesidad de profundizar la investigación del medio hidrológico previo al desarrollo de proyectos

mineros que busque una visión más holística de todo el recurso hídrico que va a ser intervenido.

Por su parte en el caso de Dysart Woods es el único caso donde López en el 2019 hace referencia a un cambio en la conductividad hidráulica producto de la minería, cabe mencionar que este particular ya fue mencionado por Cook en el año 2006.

En el caso de Zaruma y Portovelo las investigaciones se han centrado principalmente en el estudio de los hundimientos y colapsos del terreno que se han producido en el casco urbano y contaminación del agua por metales pesados, sin embargo, Gallardo en el año 2018 estudió como el cambio en la porosidad y fisuramiento de los suelos influyó en los cambios de las condiciones de flujo superficial y subterráneo.

De forma particular en el caso de Shaanxi se realizó un análisis de la tasa de infiltración al acuífero, se observó una disminución en la tasa de infiltración tras el excesivo drenaje de aguas subterráneas; la investigación no especifica el motivo de este fenómeno, sin embargo, manifiesta que la recarga de infiltración de la precipitación se obtiene a partir de la combinación de la profundidad del nivel freático por zona y el coeficiente de infiltración, el cual a su vez está condicionado por varios parámetros: profundidad del agua subterránea, precipitación, litología de la zona no saturada, características geomorfológicas, vegetación, etc. lo que nos permite concluir que la modificación de estos parámetros producto de la minería provocó la reducción en la recarga por infiltración.

En todos los casos de estudio se investigaron las medidas de prevención y/o mitigación que se han tomado frente a los impactos que hasta el momento han podido ser estudiados, cabe resaltar que las medidas adoptadas se han adecuado a la realidad de cada proyecto y las necesidades especiales de protección como es el caso de Dysart Woods y Carmichael en donde un posible alteración hidrológica podría provocar la pérdida de ecosistemas altamente sensibles como lo es el bosque de robles y nogales antiguos más grandes de Ohio en el caso de EE.UU y en el caso australiano se busca conservar el complejo de manantiales Doongmabulla y Mellaluka. Por otro lado, tenemos el caso de las minas de Shaanxi donde la principal preocupación es la escasez del recurso hídrico ya que se trata de una zona semiárida donde la aplicación de tecnologías de alta calidad con elevados costos de inversión está siendo puestas en marcha para aprovechar el recurso de forma eficiente a medida que se avanza con la explotación de carbón necesario para dotar de energía al país. Finalmente tenemos el caso de Ecuador donde las medidas adoptadas se han enfocado en mantener la seguridad física de la población de las localidades de Zaruma y Portovelo ya que no se

conoce a profundidad la cantidad de minas y túneles que siguen siendo explotados de forma ilegal pudiendo provocar pérdidas humanas a causa de colapsos y hundimientos.

Al realizar la comparación de los casos de estudio se puede ver claramente como en los casos de estudio de minería a gran escala de EE.UU., China y Australia se cuenta con capacidad científica y económica para llevar a cabo estudios relacionados con los impactos de la minería sobre el medio hidrológico, más allá de enfocarse únicamente en el tema de contaminación del agua que es un tema bastante estudiado en todo el mundo al tratarse de países donde la actividad minera produce gran cantidad de energía por no decir la mayoría como es el caso de China. La presión sobre el medio ambiente ha ido aumentando, así como la resistencia por la protección de ecosistemas sensibles, promoviendo indirectamente la investigación de impactos que está produciendo la actividad minera sobre todo en la importancia de la conectividad del agua subterránea con los recursos superficiales. En el caso de Ecuador al contar con apenas dos proyectos mineros a gran escala en etapa de explotación como son Fruta del Norte y Mirador, la investigación se ha centrado únicamente en problemas ya existentes que atentan contra la seguridad de las personas y contaminación del agua superficial por metales pesados como es el caso de las minas subterráneas ilegales de Zaruma y Portovelo.

## **7. CONCLUSIONES**

- Tras la búsqueda de información se evidenció que la identificación y análisis de impactos físicos producidos por la minería en el medio hidrológico es un tema poco estudiado a nivel mundial en su mayoría esta problemática ha sido investigada en países desarrollados con grandes proyectos de minería como EE.UU., Australia y China. El conocimiento de los casos en estos países contrasta con el caso estudiado en Ecuador donde se dispone de menos información.
- Las investigaciones del impacto de la minería en el medio hidrológico surgen como respuesta a la protección de ecosistemas especialmente sensibles como el caso de Dysart Woods y Carmichael donde la preocupación ambiental reveló la necesidad de estudiar los impactos de la minería en el subsuelo y como estos influyen de forma directa en el equilibrio del recurso hídrico superficial que a su vez permite mantener los ecosistemas naturales.
- El impacto común analizado en todos los casos de estudio fue las subsidencias y hundimientos del terreno tanto en los casos de minería superficial como subterránea e independientemente del mineral extraído.

- En los tres casos de minas de carbón el impacto común identificado fue el descenso del nivel freático producto del drenaje excesivo de las minas, cabe mencionar que en el caso de Carmichael es una predicción ya que las actividades de explotación iniciaron en el presente año.
- Tanto en el caso de Dysart Woods como en Shaanxi el impacto común analizado fue el descenso en los caudales de los ríos en los que descargan los acuíferos que han sido intervenidos dado que los acuíferos se conectan hidráulicamente con los recursos superficiales por lo que una alteración se verá reflejada tanto a nivel subterránea como superficial.
- En el caso de Dysart Woods y Carmichael uno de los impactos físicos de la minería de carbón que ha sido previsto a través de modelos fue la posibilidad de llegar a un drenaje total y secado de acuíferos y las consecuencias ecológicas que esto implicaría.
- En todos los casos de estudio se han propuesto una serie de medidas de prevención y/o remediación frente a los potenciales impactos de la minería. En el caso de Dysart Woods se incluyó una zona de amortiguamiento (radio de influencia de protección de 300 pies alrededor del bosque), en el caso de Zaruma y Portovelo se estableció un área de exclusión minera (se prohíbe efectuar actividades mineras), en Shaanxi se están implementado tecnologías de aprovechamiento de relleno de huecos (ahorro de costos de material de relleno), depósitos de almacenamiento subterráneos (disminución de tratamiento de AMD) y explotación de carbón y agua (aprovechamiento del recurso para otros fines ajenos de la propia actividad minera); finalmente en el caso de Carmichael se incluyó un plan de manejo del recurso subterráneo que incluye medidas de monitoreo y alerta temprana durante los 60 años de vida útil de la mina que permita tomar acciones en caso de identificarse alteraciones sobre el medio hidrológico.
- Tras el cese de la actividad minera, a pesar de la implementación de medidas de prevención, protección y mitigación: las características físicas de los recursos hídricos superficiales (calidad y cantidad) y subterráneos (permeabilidad, capacidad de almacenamiento, conductividad hidráulica y modelo de flujo) cambiarán en relación a las condiciones previas a la minería.
- A través de la información investigada se evidenció que en el estudio de los impactos en el medio hidrológico existen vacíos científicos relacionadas con el estudio de acuíferos y su conectividad real con los recursos hídricos superficiales. Dentro de los

EIA no se profundiza en el análisis de esta relación que es de gran importancia para lograr una minería ambientalmente responsable.

- Al ser la minería un pilar fundamental en la economía de muchas ciudades, el desarrollo de esta actividad debe efectuarse de forma técnica en lo relativo a sus afecciones con un conocimiento profundo de los impactos que se generarán en el sistema hidrológico con el desarrollo de la actividad de manera que se puedan establecer medidas preventivas y correctoras de esos impactos.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

ACKnowl-EJ, ENVJUSTICE y EJOLT. (2021). *Environmental Justice Atlas*. Recuperado el 1 de abril de 2021, de <https://ejatlas.org/>

Agencia de Regulación y Control Minero. (2019). *Proyecto de Seguimiento, Control y Evaluación de labores mineras en el Distrito Zaruma-Portovelo*. Recuperado el 27 de mayo de 2021, de [http://www.controlminero.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/02/GPR\\_FEBRERO\\_2020/2019-07-05\\_05-39-53\\_SEGUIMIENTOYCONTROLZARUMA-PORTOVELO.pdf](http://www.controlminero.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/02/GPR_FEBRERO_2020/2019-07-05_05-39-53_SEGUIMIENTOYCONTROLZARUMA-PORTOVELO.pdf)

Agencia de Regulación y Control Minero. (2020). *Geoportal de Catastro Minero*. Recuperado el 8 de abril de 2021, de <https://gis-sigde.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=8b53f9388c034b5e8e3147f03583d7ec>

Amezaga, J. M., Baresel, C., Destouni, G., Göbel, J., Gren, I.-M., Hannerz, F., . . . Younger, P. L. (2004). *Mining Impacts on the Fresh Water Environment: Technical and Managerial Guidelines for Catchment Scale Management*. Recuperado el 3 de junio de 2021, de [https://www.researchgate.net/publication/225431915\\_Mining\\_Impacts\\_on\\_the\\_Fresh\\_Water\\_Environment\\_Technical\\_and\\_Managerial\\_Guidelines\\_for\\_Catchment\\_Scale\\_Management](https://www.researchgate.net/publication/225431915_Mining_Impacts_on_the_Fresh_Water_Environment_Technical_and_Managerial_Guidelines_for_Catchment_Scale_Management)

Aponte Mayor, G., Betancourt Buitrago, L. A., Fernando Navas, D., & Gómez Luna, E. (abril de 2014). Metodología para la revisión bibliográfica y la gestión de información de temas científicos, a través de su estructuración y sistematización. *Dyna*, 81(184), 158-163. Recuperado el 29 de marzo de 2021, de <https://www.redalyc.org/pdf/496/49630405022.pdf>

Bai, H., Mao, X., Tang, J., & Yao, B. (2009). Research on simultaneous exploitation of coal and groundwater in Lu'an coalfield. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 395. Recuperado el 2 de junio de 2021, de <https://www.semanticscholar.org/paper/RESEARCH-ON-SIMULTANEOUS-EXPLOITATION-OF-COAL-AND-Junhua/b860b81b4a595c90352f40581e6c8b5600e4ddc0#citing-papers>

Bárcena, A. (2018). *Estado de situación de la minería en América Latina y el Caribe: desafíos y oportunidades para un desarrollo más sostenible*. IX Conferencia de Ministerios de Minería de las Américas, Lima. Recuperado el 31 de marzo de 2021,

- de  
[https://www.cepal.org/sites/default/files/presentation/files/181116\\_extendidafinalconferencia\\_a\\_los\\_ministros\\_mineria\\_lima.pdf](https://www.cepal.org/sites/default/files/presentation/files/181116_extendidafinalconferencia_a_los_ministros_mineria_lima.pdf)
- Barcos, M., Moína, E., Naranjo, J., & Oviedo, R. (2017). Contaminación por metales pesados en el sur del Ecuador asociada a la actividad minera. *Revista Natura*, 437-441. Recuperado el 26 de mayo de 2021, de <https://www.revistabionatura.com/files/2017.02.04.5.pdf>
- BBC NEWS. (13 de enero de 2019). *El colapso del techo de una mina de carbón china en Shaanxi mata a 21 personas*. Obtenido de <https://www.bbc.com/news/world-asia-china-46853982>
- Booth, C. J., Curtiss, A. M., Demaris, P. J., & Van Roosendaal, D. J. (1999). Anomalous Increases in Piezometric Levels in Advance of Longwall Mining Subsidence. *Environmental & Engineering Geoscience*, 4, 407- 417. Recuperado el 25 de mayo de 2021, de <https://pubs.geoscienceworld.org/aeg/eeg/article-abstract/V/4/407/137120/Anomalous-Increases-in-Piezometric-Levels-in?redirectedFrom=fulltext>
- Bradley, J., Merrick, N., Webb , J., & Werner, A. (2015). *Adani Mining Pty Ltd vs. Land Services of Coast and Country Inc & Ors. Joint Groundwater Experts Report*. Recuperado el 4 de junio de 2021, de <http://envlaw.com.au/wp-content/uploads/carmichael7.pdf>
- Bravo, A., Espinosa, M., & Vilela, W. (2020). La contaminación ambiental ocasionada por la minería en la provincia de El Oro. *Estudios de la Gestión Revista Internacional de Administración*(8), 215-233. Recuperado el 27 de mayo de 2021, de <https://revistas.uasb.edu.ec/index.php/eg/article/view/2437>
- Burguess, M. H. (2006). *The Biohydrology of Dysart Woods*. Electronic Thesis or Dissertation, Ohio University. Recuperado el 25 de mayo de 2021, de [https://etd.ohiolink.edu/apexprod/rws\\_olink/r/1501/10?clear=10&p10\\_accession\\_num=ohiou1164129673](https://etd.ohiolink.edu/apexprod/rws_olink/r/1501/10?clear=10&p10_accession_num=ohiou1164129673)
- Cardno. (2018). *Estudio de Impacto Ambiental y Social para el Proyecto Minero Fruta del Norte*. Estudio de Impacto Ambiental, Quito. Recuperado el 25 de febrero de 2021, de [https://www.lundingold.com/site/assets/files/43041/lug\\_esia\\_executive\\_summary\\_esp.pdf](https://www.lundingold.com/site/assets/files/43041/lug_esia_executive_summary_esp.pdf)
- Cook, S. R. (2006). *Effects of coal mining on perched aquifers above active longwall and room-and-pillar mines near dysart woods*. BS Thesis, Dept of Geological Science Ohio Univ, Athens, Universidad de Ohio, Ohio.
- Cook, S. R. (2008). *The Hydrogeology of an Old Growth Forest with Implications for Defining Impact Zones Associated with Underground Mining*. Electronic Thesis or Dissertation, Ohio. Recuperado el 25 de mayo de 2021, de [https://etd.ohiolink.edu/apexprod/rws\\_olink/r/1501/10?p10\\_etd\\_subid=60965&clear=10](https://etd.ohiolink.edu/apexprod/rws_olink/r/1501/10?p10_etd_subid=60965&clear=10)
- Craig, P., & Holt, J. (1997). *Effects of longwall mining on forested areas*. Knoxville: Ohio Valley Coal Co, P-SQUARED Technologies Inc.

- Currell, M., Berkman, M., McGrath, C., Webb, J., & Werner, A. (mayo de 2017). Problems with the application of hydrogeological science to regulation of Australian mining projects: Carmichael Mine and Doongmabulla Springs. *Journal of Hydrology - Elsevier*, 548, 674-682. Recuperado el 3 de junio de 2021, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169417301774>
- Da-zhao Gu. (2016). Technology Development and Engineering Practice for Protection and Utilization of Water Resources in Coal Mining in Western China. *Frontiers of Engineering Management*, 59-66. Obtenido de <https://journal.hep.com.cn/fem/EN/10.15302/J-FEM-2016010>
- Departamento de Medio Ambiente. (2015). *probación. Proyecto de infraestructura ferroviaria y mina de carbón Carmichael, Queensland (EPBC / 5736)*. Recuperado el 4 de junio de 2021, de <http://www.environment.gov.au/epbc/notices/assessments/2010/5736/2010-5736-approval-decision.pdf>
- Diario El Comercio. (18 de mayo de 2017). Obtenido de <https://www.elcomercio.com/actualidad/ecuador/socavon-zaruma-eloro-mineriailegal-hormigon.html>
- Feng-jun Nie, Hai-yang Cao, Hong-xu Liu, Hua-lei Zhao, Hui-qun Hou, Lu-lu Chen, . . . Xue-ming Teng. (2020). Genesis of green sandstone/mudstone from Middle Jurassic Zhiluo Formation in the Dongsheng Uranium Orefield, Ordos Basin and its enlightenment for uranium mineralization. *China Geology*, 3. Recuperado el 2 de junio de 2021, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2096519220300264>
- Fetter, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology*. Illinois: Waveland Press, Inc. Recuperado el 25 de mayo de 2021, de [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=BYZXDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Fetter+C+\(2001\)+Applied+hydrogeology&ots=kGYy8q1bGZ&sig=5uEEKF6BUiVwfaDliL7RblVOkao#v=onepage&q&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=BYZXDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Fetter+C+(2001)+Applied+hydrogeology&ots=kGYy8q1bGZ&sig=5uEEKF6BUiVwfaDliL7RblVOkao#v=onepage&q&f=false)
- Gallardo, R., Oliva, A., & Ruiz, A. (2018). Inestabilidad del terreno en zonas de actividad minera: caso ciudad de Zaruma, Ecuador. *Redes de Ingeniería*, 69-81. Recuperado el 27 de mayo de 2021, de <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/REDES/article/view/12116/13537>
- GasFields Commission Queensland. (2014). *Groundwater Aquifer Connectivity in Queensland*. Technical Communication 1, Queensland.
- GLOBAL ENERGY MONITOR. (2021). *Global Coal Plant Tracker*. Obtenido de <https://endcoal.org/tracker/>
- Ground Water Associates, Inc. (1991). *Hydrogeological Evaluation of Longwall Mining at the Powhatan No. 6 Mine and the Potential Impact to Dysart Woods (Draft)*. The National Water Well Association. Ground Water Associates, Inc., Westerville, OH .
- Harstine, L. (1991). *Hydrologic Atlas for Ohio Average Annual Precipitation, Temperature, Streamflow, and Water Loss for 50-year Period, 1931-1980*. Water Inventory Report No. 28, Department of Natural Resources Division of Water, Ground Water Resources Section, Ohio.



- Higueras, P., Lillo, J., & Oyarzun, R. (2011). *Minería Ambiental una introducción a los Impactos y su Remediación*. Obtenido de [https://www.aulados.net/GEMM/Libros\\_Manuales/Libro\\_Mineria\\_MA.pdf](https://www.aulados.net/GEMM/Libros_Manuales/Libro_Mineria_MA.pdf)
- Hou, Y., Hu, X., & Luo, A. (2018). Mining influence on underground water resources in arid and semiarid regions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 113. Recuperado el 1 de junio de 2021, de <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/113/1/012131>
- Instituto Tecnológico Geominero de España; Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía; Consejería de Trabajo e Industria de la Junta de Andalucía. (1998). *ATLAS HIDROGEOLOGICO DE ANDALUCÍA*. Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España. Recuperado el 5 de abril de 2021, de [http://www.igme.es/actividadesIGME/lineas/HidroyCA/publica/libros1\\_HR/libro110/lib110.htm](http://www.igme.es/actividadesIGME/lineas/HidroyCA/publica/libros1_HR/libro110/lib110.htm)
- Johnson, K. L. (1992). *Influence of topography on the effects of longwall mining on shallow aquifers in the Appalachian coal field. United States*. Virginia: West Virginia University. Recuperado el 25 de mayo de 2021, de [https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:24001088](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:24001088)
- Lillo, F. J. (2006). *Impactos de la minería en el medio natural*. Madrid. Recuperado el 25 de febrero de 2021, de <https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-15564/Impactos%20de%20la%20miner%C3%ADa%20-%20Javier%20Lillo.pdf>
- Lillo, F. J. (21 de mayo de 2020). *Impactos de la minería en el medio hidrológico (I): Alteraciones físicas*. Obtenido de iagua: <https://www.iagua.es/blogs/javier-lillo/impactos-mineria-medio-hidrologico-i-alteraciones-fisicas>
- Liu, P. (2017). Technologies and practices of mechanized backfill mining for water protection with aeolian sand paste-like. (A. W. Jewell, Ed.) *Proceedings of the 20th International Seminar on Paste and Thickened Tailings*, 284-293. Recuperado el 2 de junio de 2021, de [https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1752\\_32\\_Liu/](https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1752_32_Liu/)
- López, D. L., & Zhang, Q. (2019). Use of Time Series Analysis to Evaluate the Impacts of Underground Mining on the Hydraulic Properties of Groundwater of Dysart Woods, Ohio. *Mine Water and the Environment*, 38, 566-580. Recuperado el 21 de mayo de 2021, de <https://link.springer.com/article/10.1007/s10230-019-00619-z>
- Luchen Wang, Hongyun Ma, Jordi Delgado Martín, Kun Yu, & Qingchun Yang. (2016). Hydrochemical characterization and pollution sources identification of groundwater in Salawusu aquifer system of Ordos Basin, China. *Elsevier*, 216, 340-349. Recuperado el 2 de junio de 2021, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026974911630464X#bib37>
- Ludizaca, F. E., & Valarezo, I. (2018). *Propuesta para implementación de un sistema integrado de gestión de riesgos por hundimiento de suelo en la zona urbana del cantón Zaruma*. Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera/o Ambiental, Universidad Politécnica Salesiana, Carrera de Ingeniería Ambiental, Cuenca. Recuperado el 26 de mayo de 2021, de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15599/1/UPS-CT007665.pdf>
- Marino, G. (2003). *Geotechnical analysis of coal mining and reclamation*. Urbana: Prepared for Buckeye Forest Council, Marino Engineering Assoc Inc.

- McCathy, B., Rubino, D., & Small, C. (2001). Composition, structure and dynamics of Dysart Woods, an old-growth mixed mesophytic forest of southeastern Ohio. *Ecología y Gestión Forestal*, 140, 193-213.
- McClintock, K. (2012). *Adani 2D Seismic Survey. Galilee Basin, Qld. Interpretation Data Processing Report*. Adani Mining by Velseis Processing Pty Ltd.
- Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables . (13 de Septiembre de 2019). *Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables, Noticias*. Obtenido de Nueva zona de exclusión minera en Zaruma reactivará la economía local: <https://www.recursosyenergia.gob.ec/nueva-zona-de-exclusion-minera-en-zaruma-reactivara-la-economia-local/#>
- Ministerio de Recursos Naturales No Renovables. (2013). *ACUERDO EXCLUSION OTORGAMIENTO CONCESION EXPLOTACION MINERA ZARUMA, Acuerdo Ministerial 509*. Acuerdo Ministerial, Quito. Recuperado el 27 de mayo de 2021, de <http://historico.mineria.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/10/Acuerdo-Ministerial-509.pdf>
- Ministerio del Ambiente y Agua. (2014). *Reglamento Ambiental de Actividades Mineras* . Acuerdo Ministerial, Ministerio del Ambiente y Agua, Quito - Ecuador. Recuperado el 27 de marzo de 2021, de <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/01/REGLAMENTO-AMBIENTAL-DE-ACTIVIDADES-MINERAS-MINISTERTIO-AMBIENTE.pdf>
- Murillo, R. (2000). *Zaruma, historia minera Identidad en Protovelo*. Quito: Abya-Yala. Recuperado el 26 de mayo de 2021, de [https://digitalrepository.unm.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1260&context=abya\\_yala](https://digitalrepository.unm.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1260&context=abya_yala)
- Noguera, J. R. (15 de Abril de 2020). *EADIC Formación y Consultoría*. Obtenido de El origen de la minería: <https://www.eadic.com/el-origen-de-la-mineria/>
- OhioEPA. (2014). *Major Aquifers in Ohio and Associated Water Quality*. Division of Drinking and Ground Waters. Recuperado el 22 de mayo de 2021, de [https://epa.ohio.gov/Portals/28/documents/gwqcp/Aquifer&Geochem\\_ts.pdf](https://epa.ohio.gov/Portals/28/documents/gwqcp/Aquifer&Geochem_ts.pdf)
- Oliva, A., & Ruiz, A. (2015). *Inestabilidad del terreno en zonas urbanas de Zaruma y Portovelo, Factores condicionantes y desencadenantes*. Grupo ITEICO Euroamericano, Ecuador. Recuperado el 26 de mayo de 2021, de [https://www.researchgate.net/publication/324507378\\_Inestabilidad\\_del\\_terreno\\_en\\_zonas\\_urbanas\\_de\\_Zaruma\\_y\\_Portovelo\\_Ecuador\\_Factores\\_condicionantes\\_y\\_de\\_sencadenantes](https://www.researchgate.net/publication/324507378_Inestabilidad_del_terreno_en_zonas_urbanas_de_Zaruma_y_Portovelo_Ecuador_Factores_condicionantes_y_de_sencadenantes)
- OVCC, 2003a, Anticipated Effects of Planned Subsidence, Addendum to Page 29, Part 3, K (5) (a), Powhaten No. 6 Mine, Permit D-0360. Received: May 5, 2003. Alledonia, OH.
- Paredes, D. C. (2013). *¿Después de la minería qué? Análisis del impacto socioeconómico y ambiental de la minería, Caso South American Development Company (SADCO-CIMA)*. Tesis para obtener el título de Maestría en Estudios Socioambientales, Portovelo y Zaruma. Recuperado el 26 de mayo de 2021, de <https://repositorio.flacsoandes.edu.ec/bitstream/10469/5943/2/TFLACSO-2013DCPP.pdf>

- Red EsAgua. (2019). *Informe Uso sostenible del agua en la minería*. Recuperado el 28 de mayo de 2021, de [http://www.esagua.es/wp-content/uploads/2019/12/Uso-sostenible-del-agua-en-la-miner%C3%ADa\\_Informe-red-EsAgua.pdf](http://www.esagua.es/wp-content/uploads/2019/12/Uso-sostenible-del-agua-en-la-miner%C3%ADa_Informe-red-EsAgua.pdf)
- Schilling, P. (2005). *A hydrostratigraphic model for pre-mining control in a deciduous old-growth forest*. BS Thesis, Geological Science, Ohio Univ, Athens, Universida de Ohio, Ohio.
- Servicio Geológico Mexicano. (22 de marzo de 2017). *Explotación minera*. Obtenido de [https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones\\_geologicas/Explotacion-minera.html](https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Explotacion-minera.html)
- The World Bank. (16 de abril de 2017). *The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future*. International Bank for Reconstruction and Development, Washington. Recuperado el 31 de marzo de 2021, de <http://documents1.worldbank.org/curated/en/207371500386458722/pdf/117581-WP-P159838-PUBLIC-ClimateSmartMiningJuly.pdf>
- Vásconez Carrasco, M., & Torres, L. L. (2018). Minería en el Ecuador: sostenibilidad y licitud. *Estudios del Desarrollo Social: Cuba y América Latina*(2), 83-103. Obtenido de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=s2308-01322018000200006](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s2308-01322018000200006)