



# Los depósitos de relaves en Ecuador y sus riesgos socio-ambientales

---

*Un análisis de los proyectos de minería a gran escala Mirador y  
Llurimagua*

Karolien van Teijlingen, 2019

# LOS DEPÓSITOS DE RELAVES EN ECUADOR Y SUS RIESGOS SOCIO-AMBIENTALES

*UN ANÁLISIS DE LOS PROYECTOS DE MINERÍA A GRAN ESCALA  
MIRADOR Y LLURIMAGUA*



*Informe elaborado por Karolien van Teijlingen para la Fundación Pachamama y*

*el Colectivo de Geografía Crítica del Ecuador*

2019

# Índice

<b>1. Introducción</b> .....	<b>3</b>
<b>2. Impactos y riesgos relacionados con la minería a gran escala</b> .....	<b>4</b>
<b>3. Los depósitos de relaves y sus riesgos</b> .....	<b>5</b>
3.1 ¿Qué son los relaves y cómo se depositan?.....	5
3.2 Riesgos relacionados con los depósitos de relaves.....	7
3.3 Riesgos pos-cierre .....	11
<b>4. Los depósitos de relaves de los proyectos Mirador y Llurimagua y sus riesgos</b> .....	<b>13</b>
4.1 Los depósitos de relaves del proyecto Mirador .....	13
4.2 Los depósitos de relaves del proyecto Llurimagua .....	4
<b>5. Conclusiones</b> .....	<b>7</b>
<b>6. Referencias</b> .....	<b>8</b>

# 1. Introducción

La minería metálica a gran escala, una actividad relativamente nueva para el país, está en auge en el Ecuador. Resultado de una campaña agresiva por parte del gobierno nacional para promocionar Ecuador como un país minero, actualmente alrededor del 15% del territorio continental está concesionado por empresas mineras. Este porcentaje probablemente seguirá aumentando, ya que el potencial minero del subsuelo ecuatoriano ha despertado el interés de varios gigantes de la industria minera transnacional, entre estos la empresa australiana Newcrest y BHP Billiton.<sup>1</sup>

La expansión de este sector se da principalmente en las áreas más remotas y biodiversas del país, como son los páramos de la Sierra Sur, los bosques tropicales de la Cordillera del Cóndor y los bosques nublados del Chocó Andino. En estos ecosistemas sumamente sensibles, la actividad minera puede generar graves impactos al ambiente y a las comunidades indígenas y campesinas que habitan en estos lugares. Impactos ambientales relacionados con la minería a gran escala son la remoción de montañas enteras, la deforestación, la contaminación del agua y la pérdida de biodiversidad.

Sin embargo, por ser un sector nuevo en el Ecuador, hay poco conocimiento y experiencia con proyectos de esta magnitud, y con los impactos y riesgos que implican. En este estudio se busca, por tanto, analizar los riesgos ambientales que representan los proyectos de minería metálica a gran escala que se están desarrollando en el país, con énfasis en los riesgos relacionados con las piscinas de relaves. Las piscinas de relaves son los depósitos de los residuos mineros, obras que son ampliamente reconocidas por ser los elementos más complejos y riesgosos de un proyecto minero a gran escala (Chamber, 2012).

El análisis se enfocará además en dos proyectos emblemáticos del sector minero. El primero es el proyecto cuprífero Llurimagua en Íntag (provincia de Imbabura), que se encuentra actualmente en la fase de exploración y está en manos de la Empresa Nacional Minera (ENAMI) y empresa estatal chilena CODELCO. El segundo es el proyecto cuprífero Mirador en Tundayme (provincia Zamora Chinchipe) que recién ha entrado a su fase de explotación, y que está en manos de un consorcio conformado por dos empresas estatales chinas. La elección de enfocarse en estos dos proyectos es por que están entre los más avanzados y emblemáticos del país, y por que se ha descubierto serias fallas en sus diseños e implementación.

Este análisis se fundamenta en los informes escritos por Steven Emerman (2015, 2018) para la ONG E-Tech International, informes técnicos de los proyectos (estudios, diseños y material cartográfico) y literatura científica e internacional sobre minería a gran escala. Si bien el análisis presenta información sobre los dos casos antemencionados, cabe señalar que existe mucha más información acerca del proyecto Mirador, ya que éste se encuentra en una fase más avanzada. La documentación sobre el proyecto Llurimagua es más escasa. Ésta se enfoca principalmente en las actividades de exploración y no en la fase de explotación, en la cual se generarían la mayoría de los impactos.

---

<sup>1</sup> Véase: “BHP, la minera más grande del mundo, invertirá USD 41 millones en Ecuador”, mensaje publicado en la página de ARCOM. Enlace: <http://www.controlminero.gob.ec/bhp-la-minera-mas-grande-del-mundo-ateriza-en-ecuador/>

## 2. Impactos y riesgos relacionados con la minería a gran escala

El término minería metálica a gran escala se refiere a la extracción de metales del subsuelo que se distingue de la minería artesanal o de pequeña escala en varios sentidos. La minería a gran escala se caracteriza por la remoción de montañas enteras y grandes cantidades de rocas con una baja concentración de metales (menos del 1%). Esto hace que se necesite la implementación de tecnología y experticia especializada, y que requiera de una alta inversión de capital. Es por eso que la minería a gran escala es – generalmente – llevada a cabo por corporaciones transnacionales que cuentan con inversión extranjera.

La escala grande de esta actividad y el uso de tecnología avanzada resulta en que los impactos ambientales de esta actividad también son grandes. Proyectos mineros – particularmente si son proyectos a cielo abierto – usan extensas superficies dentro de ecosistemas sensibles, acabando con su cobertura vegetal y alterando sus ciclos naturales por completo. Esto causa la disminución drástica de la biodiversidad en las zonas extractivas y la efectiva extinción de especies endémicas.

La minería a gran escala es además asociada con fuertes impactos a los recursos hídricos, tanto por el uso de grandes cantidades de agua dulce en la extracción y procesamiento como por posibilidad de las descargas y filtraciones de contaminantes. Como se detallará en la sección 4 de este documento, la contaminación se puede dar debido a los químicos usados en el proceso de separación de los minerales de las rocas, así como por la oxidación que ocurre cuando el material que permaneció en el subsuelo por siglos se expone al agua y al oxígeno. Ambas alteraciones pueden afectar gravemente a la vida acuática, los ecosistemas y el uso del agua para consumo humano.

Menos conocidos son los impactos a la calidad de aire ocasionados por la actividad minera. Las voladuras necesarias para romper la roca y poder extraerla pueden producir grandes cantidades de polvo, así como los depósitos de relaves. De la misma manera, en el procesamiento de cobre y oro se pueden liberar gases potencialmente tóxicos (NICNAS, 2000). El polvo y los gases son sobre todo peligrosos para la salud de los trabajadores de los proyectos mineros, aunque efectos a las vías respiratorias y la piel por esta contaminación atmosférica también han sido registrados en personas que viven cerca de los proyectos (NICNAS, 2000; Moran, 2001).

La mayoría de los impactos y accidentes generados por proyectos de minería a gran escala están relacionados con los depósitos de los residuos de la actividad minera, llamados relaves (Chambers & Higmans, 2015). Es por eso que este análisis se enfoca particularmente en cómo se construyen estas infraestructuras, qué riesgos conllevan y cómo están siendo diseñados e implementados en los proyectos Mirador y Llurimagua.

## 3. Los depósitos de relaves y sus riesgos

La Comisión Mundial de Presas Grandes (ICOLD) señala que los depósitos de relaves mineros son las infraestructuras más grandes construidas por la humanidad (ICOLD, 2001). Desde su puesta en marcha en la industria minera, los depósitos de relaves han protagonizado muchas más fallas y desastres que cualquier otro tipo de represa. Es, entonces, de suma importancia entender este tipo de infraestructuras y los riesgos que representan para el ambiente y la población cercana.

### 3.1 ¿Qué son los relaves y cómo se depositan?

Para entender lo que son relaves, es importante entender (en grandes rasgos) el proceso de la extracción de cobre. Este proceso comienza con la remoción de la roca usando perforadoras y explosivos para posteriormente excavarla. El material extraído que no contiene ninguna sustancia de valor comercial es trasladado a la escombrera, mientras las rocas que contienen metales se transportan a una planta para lo que se llama el proceso de 'beneficio'. En el proceso de beneficio se da un tratamiento a los materiales para obtener un concentrado de cobre y otros metales de interés como oro y plata. Este paso es necesario por lo que las reservas de cobre generalmente tienen una ley de alrededor de 0,5% de cobre. Es decir, de toda la roca extraída de la mina, solo 0,5% es realmente cobre.<sup>2</sup> Para hacer eficiente el transporte y la exportación, hay que separar los metales de las rocas hasta obtener un concentrado con un porcentaje más alto de cobre.

Para lograr este concentrado, se trituran las rocas en la planta de beneficio hasta obtenerse una arena fina, la cual es posteriormente mezclada con agua y químicos. Los químicos recolectores y espumantes<sup>3</sup> ayudan a los metales a separarse de la arena y flotar en burbujas hacia la superficie. Esta capa espumosa es retirada y deshidratada para formar un concentrado que contiene entre 20 y 30% de cobre. En este proceso, gran parte del material extraído del tajo de la mina queda como residuo. En el caso del proyecto minero Mirador, por ejemplo, solo el 2% del material extraído será exportado mientras el 98% es descartado como residuo que no tiene ningún valor comercial (Cardno, 2015). Esos residuos se llaman *relaves*.

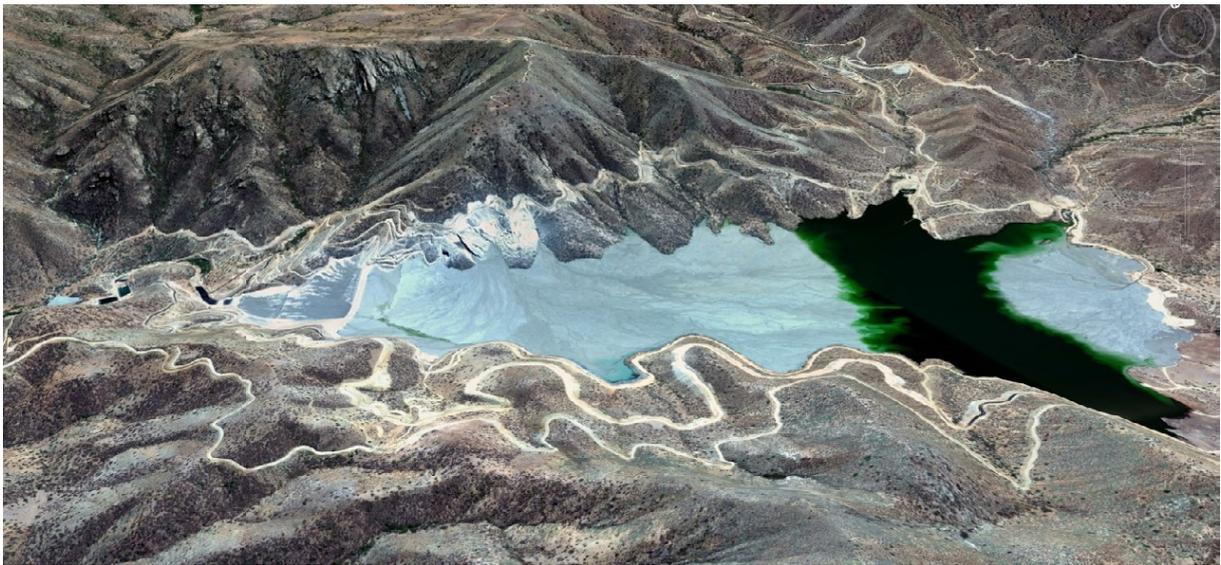
Los relaves consisten en gran parte de roca molida y agua, pero también contienen los químicos aplicados en el proceso de beneficio y partículas de metales pesados como cianuro, arsénico, plomo, cadmio, zinc y mercurio, entre otros (Relaves.org, 2019). Además de estos contaminantes, existe la posibilidad de que ciertos elementos de los relaves reaccionen cuando entran en contacto con agua y oxígeno, generando ácido. Por estas características potencialmente tóxicas, los relaves tienen que permanecer resguardados en infraestructuras herméticamente cerradas. Estas infraestructuras se llaman depósitos de relaves o relaveras.

---

<sup>2</sup> Por lo general los yacimientos de cobres contienen otros materiales de interés, como son el oro, la plata y el molibdeno en porcentajes mucho más bajos.

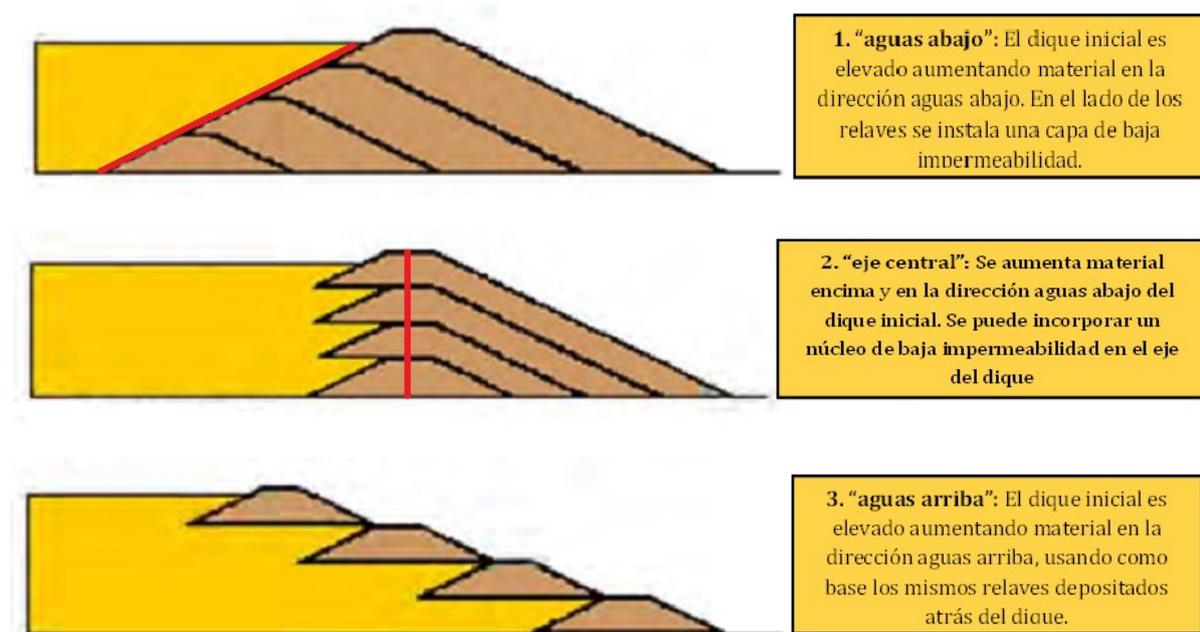
<sup>3</sup> Ver sección 4 para el tipo de químicos que se usan en este proceso y su peligro para el ambiente.

En los depósitos de relaves los residuos mineros son separados del ambiente por uno o más diques o presas de tierra (ver figura 1). El diseño del depósito varía entre proyectos y depende de las características del material almacenado, el material de construcción disponible, la geología local y las características meteorológicas de la zona. Similar a muchas represas de agua, las relaveras tienden a usar pendientes o valles naturales para represar los relaves, ya que esto disminuye la cantidad de material requerido para la construcción. A diferencia de represas de agua, los diques de los depósitos de relaves se construyen en etapas: se comienza con un dique inicial, el cual es elevado con diques sucesivos conforme se va aumentando la cantidad de relaves almacenados.



*Figura 1: depósito de relaves El Mauro en el proyecto de minería de cobre Los Pelambres en Chile: vista de arriba y de frente. Fuente: [www.relaves.org](http://www.relaves.org).*

Existen tres métodos de elevar el dique de la relavera a partir del dique inicial: el método “aguas abajo”, el método “eje central” y el método de construcción “aguas arriba” (Chambers & Higman, 2011; Emerman, 2018). En la figura 2, se muestran cortes transversales de los tres tipos de diques. Como se puede ver, se distinguen por la dirección en la que se aumenta el material sobre el dique inicial y por el volumen del material requerido para realizar este aumento (siendo el método aguas abajo el tipo que más material requiere). Existe además una diferencia en torno a la posibilidad de instalar una capa de baja impermeabilidad: el método “aguas abajo” y “eje central” permite su instalación, mientras el método “aguas arriba” no lo permite.



*Figura 2: Métodos de construcción del dique de contención de relaves.  
Adaptación de Chambers & Higman (2011).*

A más del dique de contención, un depósito de relaves cuenta con instalaciones de bombeo para depositar los relaves y con máquinas que drenan el agua y la devuelven a la planta de beneficio para ser reutilizada. Se instala además un sistema de sensores que monitorean la integridad de la presa y las posibles filtraciones de agua, así como la calidad del agua (superficial y subterránea) alrededor del depósito.

### *3.2 Riesgos relacionados con los depósitos de relaves*

Por el hecho de que los depósitos de relaves contienen grandes cantidades de materiales potencialmente tóxicos y deben mantener su estabilidad física perpetuamente, son obras de

ingeniería de alto riesgo. En esta sección se detallarán los mayores riesgos que se asocian con estas obras.

En primer lugar, los diques de contención de relaves pueden colapsar, resultando en la liberación de millones de metros cúbicos de relaves al ambiente. Cuando esto sucede, los impactos a los ecosistemas y a la población cercana son por lo general catastróficos. En enero del 2019, por ejemplo, el cantón Brumadinho en el sureste de Brasil se convirtió en un mar de relaves mineros provenientes de una mina de hierro ubicada aguas arriba (ver figura 3). La rotura de su principal dique de contención de relaves llamado Córrego do Feijão causó la muerte de al menos 235 personas, ahogadas en el lodo. Los relaves se transportaron en el Río Paraopeba por cientos de kilómetros (ver figura 4), acabando con la vida acuática del río y volviéndolo inadecuado para el uso humano.



*Figura 3: los impactos del colapso del dique de contención en el cantón Brumadinho, Minas Gerais, Brasil. Fuente: <http://www.mineaccidents.com.au/mine-event/264/brumadinho-dam-failure>*

El “Desastre de Brumadinho” es uno más en una larga lista de desastres mineros en que los diques de contención fueron los protagonistas. Según la base de datos de Uranium Wise, a nivel mundial ha fallado un dique de relaves cada 4 meses durante la última década.<sup>4</sup> En comparación con los diques de contención de agua, los diques de relaves suponen un riesgo mucho mayor: la probabilidad de que un dique de relaves falle es de 1:700, mientras los diques de contención de agua tienen una probabilidad de 1:10.000 de fallar (Emerman, 2018).

<sup>4</sup> <https://www.wise-uranium.org/mdaf.html>

Un análisis técnico de las causas de la ruptura de varios diques de relaves en el mundo (ICOLD, 2001; Roche et al. 2017) indica que la mayoría de los diques fallan por la excesiva presencia de agua en el material que conforma el dique – un fenómeno que se llama licuefacción.<sup>5</sup> Un alto nivel de hidratación hace que el material del dique sea más suelto y que el dique se erode en ciertas partes o colapse por completo bajo la presión que ejercen los relaves almacenados detrás del dique. Un alto nivel de hidratación – hasta que se sature el dique – se puede generar por la inundación del depósito de relaves debido a condiciones climáticas (lluvias) extremas, por fallas en o la ausencia de la capa de baja permeabilidad que cubre el dique, o por mal manejo del sistema de drenaje o de las instalaciones de desvío del agua de escurrimiento (Roche et al., 2017; Emerman, 2018). Otra causa de la rotura es la pérdida de estabilidad del dique por actividad sísmica cerca al proyecto minero, que puede variar entre un temblor leve hasta un terremoto de gran magnitud (ICOLD, 2001).



*Figura 4: los relaves del desastre minero del 2015 en Bento Rodrigues, Brasil, llega al mar 650 kilómetros aguas abajo. Fuente: <https://www.publico.es/internacional/vertido-mina-causa-mayor-catastrofe.html>*

Si bien el colapso completo del dique es lo más catastrófico para el ambiente y la sociedad, la erosión parcial del dique o la filtración de agua contaminada por el piso del embalse o el dique hacia los ríos y acuíferos también pueden causar afectaciones significativas. Los relaves pueden generar ácido mediante un proceso que se llama “drenaje ácido de roca”. Este proceso ocurre cuando tierras ricas en sulfuro entran en contacto con oxígeno y agua, y se oxidan. Generalmente, los yacimientos de cobre tienen un alto nivel de sulfuro, por lo que sobre todo los relaves de minas de cobre corren el riesgo de generar ácido. Su filtración puede causar la acidificación de los recursos hídricos. Un problema adicional del drenaje ácido de roca es que los metales pesados sólidos presentes en los relaves se disuelven mucho más fácil en agua ácida. De

<sup>5</sup> Ver Emerman (2018) para una descripción más detallado de este fenómeno.

forma disuelta, los metales pesados se pueden transportar hacia los ríos y acuíferos y contaminarlos (Romero et al. 2008).

El potencial que tienen los relaves para generar drenaje ácido de roca y filtrar contaminantes se puede predecir en base a las características del yacimiento o mediante muestreo. Mientras esas pruebas pueden ayudar a tomar medidas para prevenir impactos ambientales, es importante tomar en cuenta que en la práctica no son muy confiables. En una comparación de los impactos citados y los realmente generados en 25 proyectos mineros en los EE.UU. (Kuipers y Maest, 2006), se concluye que en la mayoría de los casos los impactos reales superaron los impactos previstos. De las minas que produjeron drenaje ácido de roca, solo el 10% había anticipado una producción potencial de ácido entre media y alta. En la sección 4 se analizarán el potencial de generación de ácido para los proyectos Mirador y Llurimagua en Ecuador.

Aunque condiciones naturales pueden poner los depósitos de relaves a prueba, los desastres mineros se originan siempre en el (deficiente) diseño y mal manejo de los depósitos (Campbell et al., 2017). Los factores de diseño que contribuyen a que los riesgos de colapso sean más altos son:

- La *inclinación del dique*, en donde una inclinación más leve representa más seguridad. El Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU, por ejemplo, recomienda una inclinación de 11,3 grados para diques de arena, mientras la Comisión Europea recomienda una inclinación de 15 grados para diques de depósitos de relaves. Diques que no respetan estas directrices pueden ser demasiado angostas, lo que disminuye su volumen y su resistencia ante la presión de los relaves almacenados (Chamber, 2012; Emerman, 2018).
- El *método de construcción del dique*. En la literatura internacional (ICOLD, 2001; Chamber y Westwood, 2015; Roche et al., 2017), hay un amplio consenso en que el método aguas abajo (ver figura 2) es la forma más segura de construir diques de depósitos de relaves. El volumen del dique es mayor, por lo cual es más resistente en caso de un evento sísmico o una sobrecarga de agua en el embalse por excesivas lluvias. Además permite aplicar una capa de un material de baja permeabilidad, lo que ayuda a evitar erosión y la filtración de agua contaminada a través del dique (Emerman, 2018). El método de aguas arriba, en cambio, representa un mayor riesgo de colapso, sobre todo en caso de un terremoto. Según este método los diques se construyen sobre los mismos relaves, los cuales dan una estabilidad reducida. Es por eso que la normativa Ecuatoriana que entró en vigencia en el 2019, prohíbe el método 'aguas arriba' y solo permite el método 'aguas abajo' (ARCOM, 2019, Art. 13).
- El *calculo de la magnitud de eventos naturales* como lluvias y terremotos. Esto se refiere a que – para diseñar una represa que tiene la capacidad de resistir a todo tipo de movimiento sísmico – es necesario primero predecir la magnitud máxima que se puede esperar en la zona durante el ciclo de vida del depósito. Según estándares internacionales,<sup>6</sup> la magnitud del terremoto máximo creíble que debe ser tomado en cuenta en el diseño de represas es la intensidad del evento sísmico más fuerte que pueda ocurrir en 1.000 años en base a registros sísmicos locales. Asimismo, hay que calcular la máxima precipitación e inundación que pueda ocurrir en el lugar del depósito. Un

<sup>6</sup> Canadian Dam Association, 2013. Dam safety guidelines 2007 (edición 2013).

problema para realizar el cálculo de estos dos parámetros esenciales es la falta de datos recogidos en la zona del proyecto, y la creciente incertidumbre sobre los patrones de precipitación por el cambio climático (Franks et al., 2011).

- Como se mencionó anteriormente, *el nivel de hidratación de los relaves* en el depósito es de suma importancia para la reducción del riesgo a la licuefacción y colapso del dique. De hecho, el almacenamiento de los relaves en un estado seco elimina muchos de los riesgos señalados en esta sección (Roche et al., 2017).

La Comisión Mundial de Presas Grandes (ICOLD, 2001) recomienda ser sumamente conservador en el proceso de diseño, tomando en cuenta los más grandes márgenes de seguridad. Sin embargo, esto no siempre ocurre en la práctica. Por lo general, los diseños más seguros son también los más costosos. El método de aguas abajo con taludes de una leve inclinación, por ejemplo, requieren más material de construcción y entonces cuesta más, mientras el método aguas arriba con taludes más empinados es más barato. Como las elecciones en el proceso de diseño son condicionadas por consideraciones económicas y el margen de ganancia del proyecto, la empresa tiene que encontrar un balance entre seguridad y viabilidad económica. Sobre todo yacimientos con un bajo porcentaje de minerales – y por ende un margen de ganancia pequeño – tienden a reducir sus costos diseñando infraestructura y usando tecnología más barata, resultando en riesgos ambientales más elevados (Roche et al., 2017).

### 3.3 Riesgos pos-cierre

Mientras la duración de un proyecto minero es de solo unas décadas, los depósitos de relaves se quedan en el sitio indefinidamente. En este tiempo pos-cierre, las relaveras siguen teniendo riesgos de colapso y filtración de contaminantes (Romero et al., 2008; Lock the Gate, 2017). Es por eso que, según Chambers & Higman (2011), los depósitos de relaves tienen que ser diseñados para mantener su integridad durante al menos 10.000 años, y que requieren de un monitoreo y manejo perpetuo. En muchos países del mundo, la responsabilidad de este monitoreo es de la empresa que operó el proyecto por un periodo determinado, para después volverse una responsabilidad del estado. En el Ecuador, la normativa indica al respecto que “el usuario realizará el monitoreo por un lapso de tiempo igual al del uso efectivo del Depósito de Relaves”, mientras “el monitoreo posterior será competencia del Estado” (ARCOM, 2019).

Este manejo pos-cierre es, sin embargo, un tema espinoso. Debido a que los depósitos ya no son parte de un proyecto que representa ingresos para la empresa (la empresa incluso ya puede haber salido del país), el presupuesto y la atención para esta fase es generalmente mínimo (Bowker y Chamber, 2015; Close the Gate, 2017). Esto explica porqué los sistemas de monitoreo de los diques en la fase pos-cierre son a menudo deficientes. En el desastre de Brumadinho, por ejemplo, el malfuncionamiento del sistema de monitoreo de un depósito en fase pos-cierre contribuyó a que éste colapsara (Wise Uranium, 2019; WMTF, 2019).

Además existen debates acerca de los costos que representa el manejo de las instalaciones pos-cierre para los estados y sus ciudadanos (Campbell et al., 2017). Generalmente, gobiernos obligan a las empresas a reservar recursos financieros (una fianza) para poder pagar los costos relacionados con el cierre y el manejo pos-cierre. El monto de la fianza se basa en los impactos previstos y el costo para remediarlos. Pero como estos impactos a menudo se subestiman, las

fianzas generalmente no cubren los costos reales del mantenimiento (Roche et al., 2017; Kuipers y Maest, 2006). Experiencias de Australia y Canadá muestran que cuando la fianza no cubre los costos ha sido complicado obligar a las empresas a que se responsabilicen por ellos, generando una cuenta que a la final es asumida por la ciudadanía (Campbell et al., 2017; Roche et al, 2017).

## 4. Los depósitos de relaves de los proyectos Mirador y Llurimagua y sus riesgos

En Ecuador, la expansión de la minería a gran escala implica la construcción de decenas de depósitos de relaves – la mayoría de éstos dentro de ecosistemas sensibles como la Amazonía, los páramos, o el Chocó Andino. En vista de los fuertes riesgos señalados en las secciones anteriores, vale preguntarse: ¿cuáles son los riesgos relacionados con los proyectos mineros que se planifican en el Ecuador? ¿Cuál es el riesgo que Ecuador tenga su propio Brumadinho, y qué se está haciendo para evitarlo?

Esta sección trata de encontrar respuestas a estas preguntas, enfocándose en la información disponible sobre el proyecto Mirador y – en menor medida – sobre el proyecto Llurimagua. Los documentos en los cuales se basa esta sección son los Estudios de Impacto Ambiental para la fase de Explotación y Beneficio del proyecto Mirador, el Estudio de Impacto Ambiental para la fase de Exploración del proyecto Llurimagua, e informes técnicos producidos por las empresas operadoras de los dos proyectos. Clave son además los informes elaborados por Steven Emerman, quien – con apoyo de la organización E-Tech International – ha realizado varios estudios críticos sobre los diseños de ambos proyectos. La información cartográfica usada aquí proviene del trabajo de campo de la autora.

Tanto el proyecto Mirador como Llurimagua son minas de cobre con una ley de 0,54% y 0,78% respectivamente (Entrix, 2015; Micon, 2005). En los yacimientos se encuentra además oro, plata y molibdeno en grados más bajos. Ambos son proyectos de minería a cielo abierto, y planifican la construcción de al menos un depósito de relaves. A continuación se describirán los detalles de cada uno de estos proyectos.

### *4.1 Los depósitos de relaves del proyecto Mirador*

Una vez construido, el proyecto Mirador alcanzará una extracción de 60.000 toneladas de roca al día. Durante los 30 años de operación del proyecto,<sup>7</sup> se prevé la producción de 588 millones de toneladas de relaves. Desde los inicios de la década del 2000, el diseño y la ubicación del depósito (o los depósitos) de relaves han sido un punto de preocupación para la empresa operadora. Varias empresas consultoras (entre estas AMEC, Knight Piésold) han desarrollado estudios técnicos sobre el diseño más óptimo de las relaveras.

---

<sup>7</sup> Tiempo que probablemente se extenderá, ya que hay indicios de que en la zona se encuentra otro yacimiento de cobre llamado Mirador Norte.

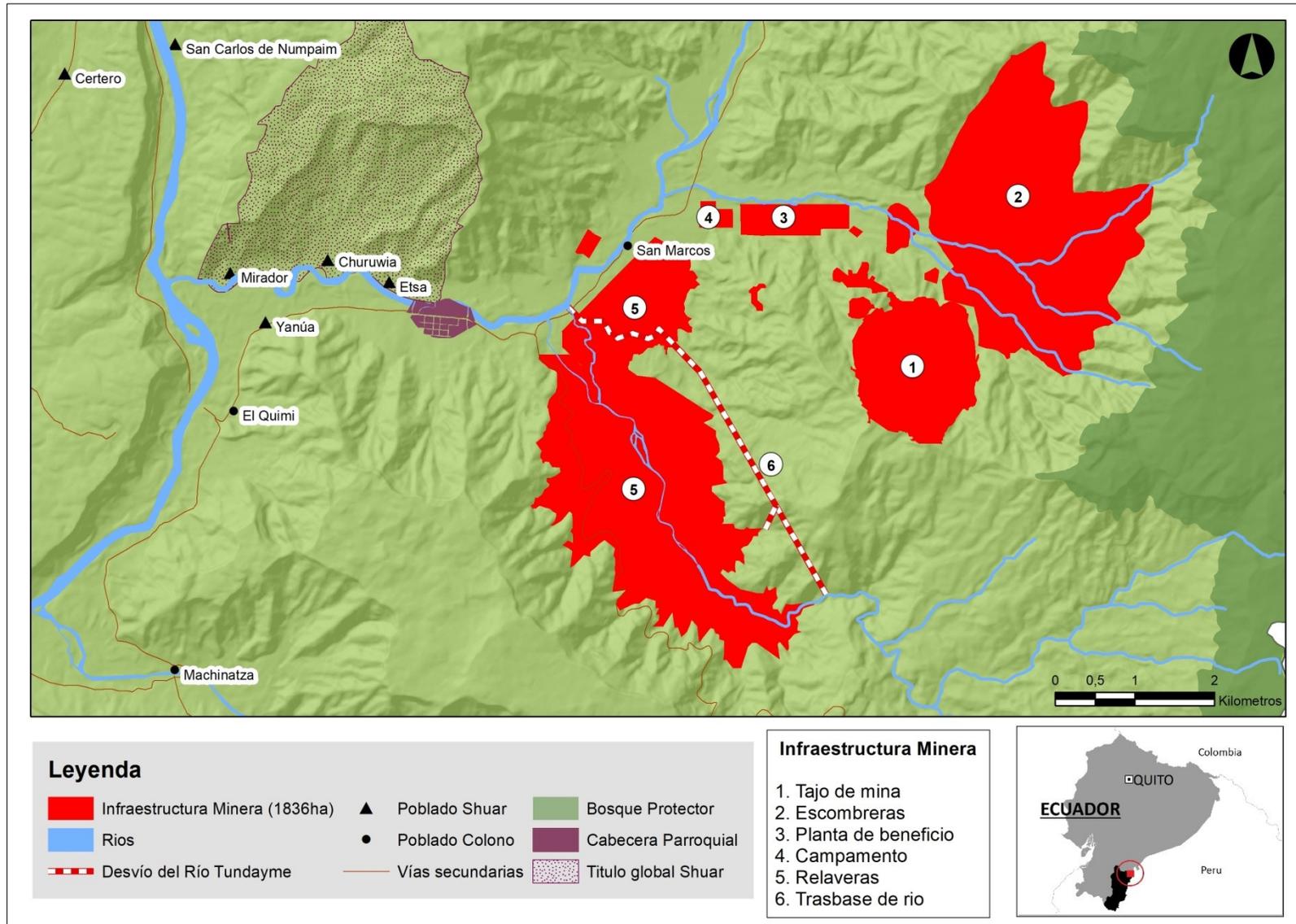


Figura 5: mapa de la infraestructura del proyecto Mirador. Elaboración propia en base a Entrix (2015, 2019).

Después de casi dos décadas, el diseño final (ver figura 5) propone la construcción de dos depósitos de relaves. El primero – llamado “Relavera Quimi” – se encuentra en la orilla ligeramente empinada del río Quimi y cuenta con 3 diques a su alrededor. El dique planificado tiene una altura máxima de 60 metros y la superficie total del depósito es de 170 hectáreas (Entrix, 2015). Esta relavera servirá para almacenar los relaves producidos durante los primeros 4 años del funcionamiento del proyecto. Después, la relavera solo servirá para el almacenamiento de relaves en caso de emergencia.

El segundo depósito de relaves se llama la “Relavera Tundayme”, y está ubicada en el valle del Río Tundayme (ver figura 5). Este depósito entrará en funcionamiento en el quinto año después de haber iniciado la extracción y tiene una capacidad mucho mayor a la Relavera Quimi: 447.173.100 m<sup>3</sup>. Para construir un depósito de tal magnitud, se construirá un dique de contención de una altura máxima de 260m y una longitud de 2020m en la parte baja del valle, usando las laderas del valle para crear el reservorio. El área total de esta relavera es de 730 hectáreas. El río Tundayme, que originalmente fluye por el valle, es represado aguas arriba y desviado mediante túneles. Aguas abajo del dique se construirán dos piscinas que recogen las aguas que se filtrasen a través del dique. El agua filtrada es considerada potencialmente ácida, por lo que el agua de esta piscina se traslada a una planta de tratamiento para aguas ácidas. Después de los 30 años de operación del proyecto Mirador, las relaveras serán deshidratadas y cubiertas con una capa impermeable.

Con estos parámetros, la Relavera Tundayme llega a ser el dique de contención de relaves más alto construido en el mundo. Para darse cuenta de su magnitud, la figura 6 compara las características de esta relavera con otros depósitos de relaves en el mundo:

Nombre proyecto	Altura dique	Longitud dique	Capacidad almacenamiento	Pluviosidad media	Actividad sísmica <sup>8</sup>
Mirador (Ecuador)	260m	2020 m	447.173.100 m <sup>3</sup>	1828 mm	8.0 <sup>o</sup> Richter
Brumadinho (Brasil)*	86m	720 m	11.700.000 m <sup>3</sup>	1325 mm	s/i
Los Pelambres (Chile)**	189m	1200 m	360.000.000 m <sup>3</sup>	145 mm	9.5 <sup>o</sup> Richter
Mount Polley (Canadá)*	80m	s/i	74.000.000 m <sup>3</sup>	637 mm	6.5 <sup>o</sup> Richter

\* Diques que han fallado; \*\* Este es el dique de contención de relaves más alto del mundo en la actualidad

*Figura 7: la Relavera Tundayme en comparación con otros depósitos de relaves.*

Debido a la enorme magnitud de este depósito de relaves, es aún más importante que las medidas de seguridad sean estrictamente implementadas en la fase de diseño, construcción y operación. No obstante, como concluyen varios informes críticos sobre los diseños y la construcción de dos depósitos de relaves del proyecto Mirador (Emerman 2015; 2018), ese no

<sup>8</sup> Con esto referimos al magnitud del Terremoto máximo creíble (maximum credible earthquake)

es el caso. A continuación se resumirán los principales riesgos del diseño y la forma en que se está implementando el proyecto:

- *El diseño y los cálculos que aseguran la integridad física del dique se basan en información y supuestos errados* (Emerman, 2018). Por un lado, para estimar la intensidad del terremoto más fuerte que pueda ocurrir en Tundayme y que tiene que resistir la relavera Quimi, un estudio de Knight Piésold escogió la intensidad del evento más fuerte que pueda ocurrir en 500 años. Sin embargo, estándares internacionales prescriben que los cálculos debe estar basados en el terremoto más fuerte que pueda ocurrir en 10.000 años (Chamber y Higman, 2011). Esto tiene sentido, ya que los relaves permanecen de manera indefinida en ese lugar. Por otro lado, la información de línea base de la actividad sísmica disponible para la zona es de baja calidad, como indican los mismos consultores contratados por la empresa Ecuacorriente S.A. en su informe sobre la seguridad de los diseños de las represas (Emerman, 2018). Es, entonces, imposible hacer un cálculo confiable en base a la información disponible.
- Asimismo, *la información de la precipitación se basa en información tomada de sitios lejanos y de períodos cortos*. El Estudio de Impacto Ambiental del 2015 combinó información de las estaciones meteorológicas de Gualaquiza y El Pangui que proporcionan datos sobre un periodo de 40 años. También usaron datos generados en el sitio de la mina; sin embargo, éstos cubren un periodo de tan solo 10 años, lo que reduce su confiabilidad significativamente (Emerman, 2018). Además, ningún estudio hace mención de los posibles impactos del cambio climático en los patrones de precipitación en la zona. Esta falta de datos es especialmente preocupante ya que el Estudio de Impacto Ambiental del 2015 indica que “debido a los grandes caudales, se dificulta el control de inundaciones en temporadas lluviosas” en la Relavera Tundayme (Entrix, 2015, 5-13).
- *La inestabilidad de los suelos en la zona del proyecto puede generar erosión y derrumbes* en el área de proyecto. Esto se vuelve particularmente problemático cuando los derrumbes ocurren en las laderas del valle del Río Tundayme, que formarán parte del reservorio de la Relavera Tundayme. El deslizamiento de tierra desde las laderas al reservorio puede generar el desbordamiento del mismo, o su rotura (Emerman 2018). Pero más problemática sería la erosión del piso de las relaveras, algo que – según un estudio de Knight Piésold Consulting sobre la relaveras – tienen un alto riesgo de ocurrencia.
- *El material con que se prevé construir los diques de contención puede producir ácido*. Según informes de consultores contratados por ECSA, el 87% de material procesado no tiene la composición química para producir ácido al momento de entrar en contacto con agua y oxígeno. En base a estos informes, la empresa planifica depositar este material en embalses con menos medidas de seguridad, e incluso propone construir las represas usando este material. Steven Emerman critica estos planes, indicando que tales conclusiones se basan en tan solo 21 muestras que representan una cantidad minúscula comparada con el total del material procesada.<sup>9</sup> Existe entonces la posibilidad de que se construyan las represas con material que no es totalmente libre de ácido y que este ácido se filtre a los cuerpos hídricos sin ningún tipo de protección.
- *La inclinación de los diques de las dos relaveras no cumple con los estándares internacionales*. Recuerden que el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU, y la Comisión Europea recomiendan una inclinación de 11,3 grados y 15 grados, respectivamente, y que una

<sup>9</sup> Fueron 21 muestras de 2 gramos, lo que resulta en un total de 42 gramos. Según el informe de Emerman (2019), la cantidad total de material que se preve procesar es de 657 millones de toneladas.

inclinación crítica para cualquier dique de arena es considerada de no más de 26,5 grados (Chamber, 2012; Emerman, 2018). Sorprendentemente, el Estudio de Impacto Ambiental del 2015 propone una inclinación de 30 grados para el dique de la Relavera Tundayme (Entrix, 2015, 5-13). Investigaciones sobre el colapso del dique de relaves en el proyecto minero Mount Polley en Canadá indica que la fuerte inclinación del dique fue unas de los factores que contribuyeron a la inestabilidad del mismo.

- Es aún más sorprendente notar que *la inclinación del dique de la Relavera Quimi que se está construyendo actualmente en el proyecto Mirador no coincide con los diseños*, ni con estándares internacionales. Esto fue observado por Steven Emerman (2018) quien durante una visita al proyecto constató que la inclinación del dique recién construído es de 45 grados (Emerman, 2018).
- Durante la misma visita, Emerman (2018) descubrió también que *el método de construcción se esta usando para el dique de la Relavera Quimi es el método "aguas arriba"* (figura 2). Este método no está mencionado en los estudios, pero la ubicación del dique inicial justo a lado de una carretera y río no permitirán su extensión en la dirección aguas abajo (ver figura 7a y b). Esto no deja otra opción que aumentar el dique en la dirección aguas arriba. Cabe resaltar que este método es el más inseguro de todos, y no debería ser usado en areas con una alta actividad sísmica como la Cordillera del Cóndor (ICOLD, 2001).<sup>10</sup> Este método está, además, explícitamente prohibido en la legislación ecuatoriana (ARCOM, 2019).



*Figura 7a: ubicación del dique inicial de la Relavera Quimi a lado de la carretera.  
Fuente: Emerman (2018).*

<sup>10</sup> El EIA del 2015 indica a la zona del proyecto de Alta Actividad Sísmica (Entrix, 2015, 6-94).

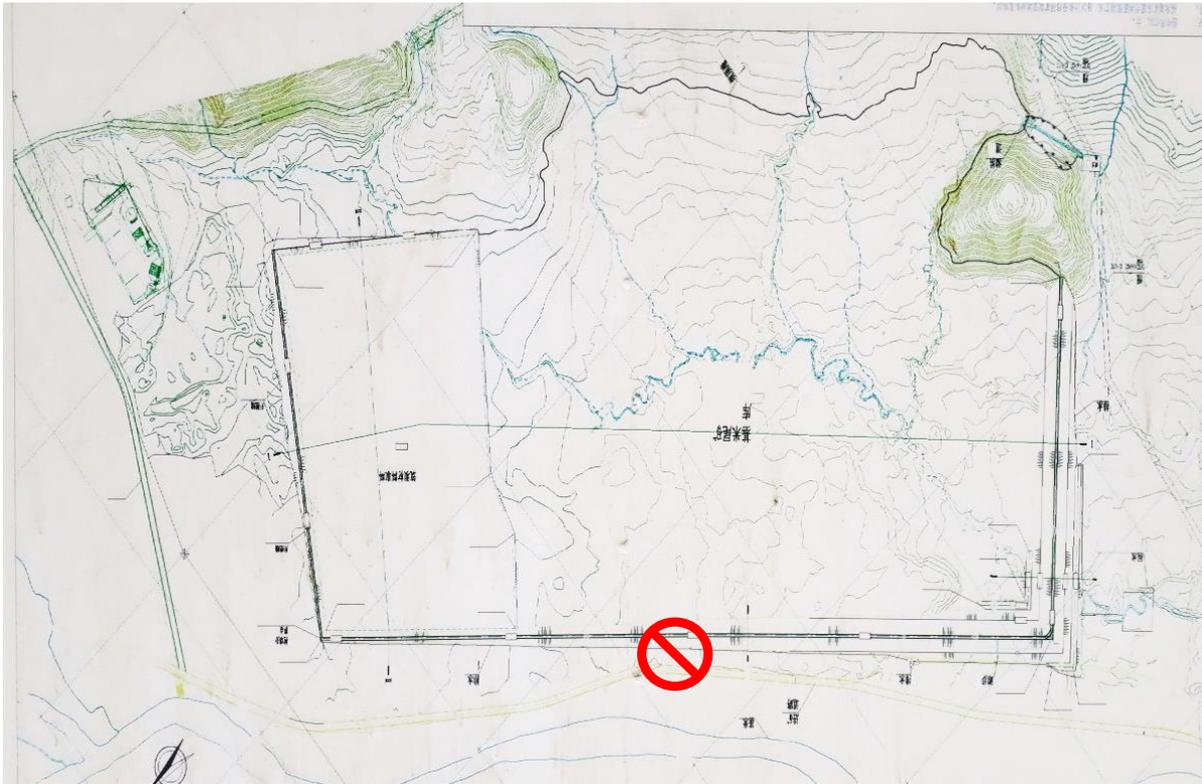


Figura 7b: foto del mapa de la relavera Quimi, mostrando la imposibilidad de que el dique se aumente en la dirección aguas abajo por la presencia de una vía y el Río Quimo.

Fuente: foto de la autora.

- Finalmente, el Estudio de Impacto Ambiental (Entrix 2015, 4-35) menciona que cuando los relaves generan drenaje ácido, éstos serán colocados en la Relavera Quimi. Sin embargo, *este depósito de relaves es el menos equipado para almacenar materiales potencialmente tóxicos para el ambiente*: es construída según el método más propenso a colapsarse, con una inclinación crítica, y no cuenta con la planta de tratamiento de aguas ácidas filtradas, tal como lo tiene la Relavera Tundayme. Es entonces una riesgosa decisión, que no es justificada a lo largo del Estudio de Impacto Ambiental.

Este breve resumen de los riesgos que representan los diseños de los depósitos de relaves del proyecto Mirador muestra que actualmente no se están aplicando los más estrictos estándares de la industria minera. A pesar de que existen alternativas técnicas probadas que disminuyen los riesgos de colapso, erosión o filtración, éstas no fueron utilizadas. Por ejemplo, aplicar el método “aguas abajo” con una inclinación del dique de 15 grados podría reducir los riesgos significativamente. Sin embargo, tales medidas tienen un precio más alto lo que disminuye el margen de ganancia del proyecto. Considerando que el proyecto Mirador tiene una ley de cobre de 0,5% y no es un proyecto de primera,<sup>11</sup> las decisiones tomadas en torno a sus diseños probablemente han sido basadas en consideraciones económicas. Las consecuencias de estas decisiones pueden llevar a situaciones catastróficas, como lo hicieron en Brumadinho y Mount

<sup>11</sup> Los mejores yacimientos de cobre del mundo tienen niveles de 4 hasta 7% de cobre por tonelada. Véase: <https://www.mining.com/the-worlds-top-10-highest-grade-copper-mines/>

Polley (Roche et al., 2017; Wise Uranium, 2019). El informe de Emerman (2018, 36) afirma esto, al concluir que “la falla de las presas de relaves en la mina Mirador es inevitable y las consecuencias serán extremas”.

#### 4.2 Los depósitos de relaves del proyecto Llurimagua

En comparación al proyecto Mirador, que recién entró a la fase de explotación y está avanzando en la construcción de la infraestructura, el proyecto Llurimagua (también conocido como Íntag) está en una fase inicial. A pesar de varios intentos de empresas mineras para entrar en la zona durante las últimas décadas, el proyecto está apenas en fase de exploración. Es por esto que la información disponible sobre el proyecto Llurimagua es escasa. Existen varios estudios de Impacto Ambiental, pero estos documentos aún no dan muchas pautas sobre cómo se piensa diseñar el proyecto. En esta sección se resumirá, entonces, lo poco que se sabe sobre los posibles riesgos del proyecto, con un énfasis en los depósitos de relaves que indudablemente formarían parte de la mina en el caso que llegue a desarrollarse.

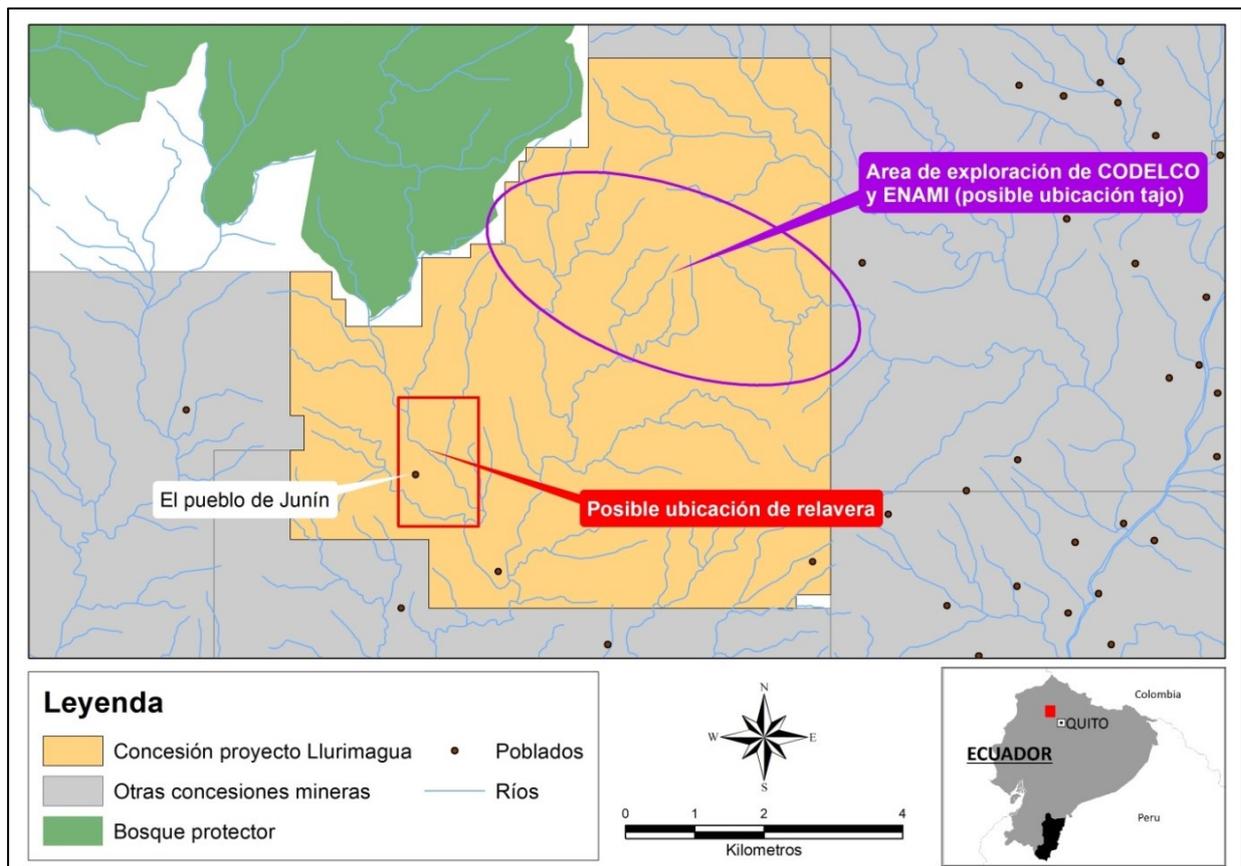


Figura 9: mapa del proyecto Llurimagua. Fuente: elaboración propia.

El mapa en la figura 9 muestra la concesión del proyecto Llurimagua y las áreas destinadas a las distintas infraestructuras del proyecto (tajo y relavera). Como indica el mapa, la zona en que se ubica el proyecto es caracterizada por una abundante presencia de ríos, esteros y fuentes de

agua. Es una zona montañosa que es reconocida por una exuberante biodiversidad: un artículo en la revista *Nature* la ubica incluso entre las 25 áreas más biodiversas del planeta (Myers et al. 2000). Si bien, gran parte del área concesionada está cubierta de bosque, en la parte sur de la concesión existen varios poblados y comunidades campesinas cuya mayoría se dedica a la siembra de café y la ganadería. El pueblo principal en esta zona es el poblado de Junín (ver figura 9). Existen además varios micro-emprendimientos de ecoturismo. Estas comunidades dependen principalmente de ríos que descienden de los bosques para la producción y el consumo humano (Chopard y Sacher, 2017).

Las últimas estimaciones de la reserva de cobre en el proyecto Llurimagua (Micon, 2005) indican que el proyecto producirá al menos 1360 millones de toneladas de relaves (Emerman, 2019a). Según estudios realizados por una de las primeras empresas operadoras del proyecto – la empresa japonesa Bishimetals – la relavera del proyecto se ubicará en el valle donde se encuentra el poblado de Junín. La forma de construirla sería comparable a la Relavera Tundayme: colocando un dique para cerrar el valle y usando las laderas del valle para crear un embalse. En base a esta información, Emerman (2019a) calculó que para almacenar el volumen de los relaves la altura del dique de contención de esta relavera debería ser de 399m. Con esto, la relavera del proyecto minero Llurimagua tendría casi dos veces la altura del dique más alto del mundo (ver figura 6).

Debido a que aún no se hicieron públicos los diseños detallados del depósito de relaves (o los depósitos), es difícil realizar un análisis de los factores de seguridad como hicimos para el proyecto Mirador. Sin embargo, los estudios técnicos y los de Impacto Ambiental disponibles indican que existen riesgos similares a los del proyecto Mirador. El primer riesgo que surge es el de la alta precipitación de la zona y, por lo tanto, el alto riesgo de inundación (Emerman, 2019a). Sin embargo, los estudios subestiman este problema, ya que los datos meteorológicos (precipitación) usados provienen de estaciones ubicadas muy lejos del área del proyecto. Son tomados de las estaciones Ingingcho y Otavalo, que además se encuentran en otra altura y en otra zona climática que la de Íntag. Esto afecta de manera inaceptable la confiabilidad de las estimaciones de la precipitación y las inundaciones que se producen en el área (Chopard y Sacher, 2017; Controlaría del Estado, 2017).

Segundo, los estudios subestiman gravemente la composición química de los relaves y sus riesgos de contaminación. Mientras los estudios producidos por las empresas operadoras y sus consultores hacen poca mención de los riesgos de contaminación, un estudio independiente (Chopard y Sacher, 2017) muestra que hay un alto riesgo de contaminación. Por un lado, las muestras de rocas que analizaron tienen un alto nivel de azufre<sup>12</sup> que es una indicación de que existe un alto riesgo que se produzca drenaje ácido. Las muestras contienen además concentraciones altas de contaminantes como arsénico, antimonio, manganeso y zinc (Chopard y Sacher, 2017). Emerman (2019b) muestra que la problemática de la contaminación del agua se agudiza aún más por el hallazgo de grandes cantidades de agua hirviendo que brotan de los pozos de perforación durante la exploración. Esto indica la presencia de un acuífero de agua térmica lo cual significaría grandes retos para la operación minera, como son el drenaje del tajo y la relavera, y el uso de mucha energía para el enfriamiento del área.

---

<sup>12</sup> De hecho, reportan una concentración de azufre de 21.000 mg/kg. Estándares internacionales señalan que rocas con una concentración de más de 3000 mg/kg de azufre son potencialmente generadoras de ácido.

El peligro que representa la presencia de contaminantes para los ecosistemas y la población es considerable, sobre todo cuando a esto se suma el riesgo de inundaciones y – por encontrarse en una zona de riesgo sísmico alto – de terremotos fuertes (Emerman, 2019a-b). Desarrollar un proyecto minero bajo estas condiciones requerirá las más altas medidas de seguridad, las cuales actualmente no se están tomando en cuenta (ej. la falta de un análisis del potencial de drenaje ácido, por ejemplo). Esto lleva a que tanto Chopard y Sacher (2017) como Emerman (2019a-b) concluyan que se debe reconsiderar seriamente la viabilidad ambiental y social del proyecto Lurimagua.

## 5. Conclusiones

La minería a gran escala se está expandiendo a pasos agigantados hacia los ecosistemas más sensibles del Ecuador, trayendo consigo grandes riesgos para las sus características ecológicas y sociales únicas. Mientras esta expansión es acompañada por un fuerte discurso sobre “la minería responsable” y los impactos benéficos de esta actividad, existe poco conocimiento sobre los riesgos que representan los proyectos para la naturaleza y la sociedad. Este informe tuvo como objetivo analizar los riesgos ambientales que representan los proyectos de minería metálica a gran escala que se están desarrollando en el país, con énfasis en los riesgos relacionados con las piscinas de relaves.

Este énfasis fue motivado por que los depósitos de relaves son ampliamente reconocidos como el elemento más riesgoso de una operación de minería metálica a gran escala. Son infraestructuras gigantescas, que almacenan residuos potencialmente tóxicos y tienen que mantener su integridad física por tiempo indefinido. O como la comisión que investigó el desastre minero en Mount Polley lo colocan: “Depósitos de relaves son [...] sistemas que no perdonan nada, en términos de la cantidad de cosas que tienen que ir bien. Su confiabilidad depende de una ejecución consistente e impecable en la planificación, en la investigación del subsuelo, en el análisis y el diseño, en la calidad de la construcción, en la diligencia operativa, en el monitoreo, en las acciones regulatorias y en la gestión de riesgos en todos los niveles. Todas estas actividades están sujetas a errores humanos.” (Morgenstern et al., 2015: 119).

Un análisis de los diseños y estudios realizados sobre los proyectos mineros Mirador en la provincia de Zamora Chinchipe y Llurimagua en la provincia de Imbabura, muestra que la forma en que se están diseñando e implementando estos proyectos es todo menos impecable y consistente. En el proyecto Mirador se está planificando el dique de relaves más alto del mundo, pero no se están aplicando los estándares de seguridad más rigurosos. Existen serias deficiencias en la manera en que se calculó la resistencia de los diques a inundaciones y terremotos, así como no se está implementando el mejor diseño en términos de método de construcción e inclinación de los mismos. Esto incrementa el riesgo de fallas o colapso de los depósitos de relaves, liberando, eventualmente, grandes cantidades de contaminantes a los ecosistemas. En el proyecto Llurimagua – aunque se encuentra en una fase mucho menos avanzada – se parecen repetir algunos de los mismos errores: se subestima la posible contaminación que pueda general el proyecto, e igualmente sus cálculos se realizan en base a datos de precipitación erróneos.

En este punto cabe preguntarse ¿por qué se siguen aprobando y autorizando estos proyectos, puesto que cuentan con tantas imperfecciones? ¿Será que es solo, como señalan Morgenstern et. al (2015), una cuestión de ‘errores humanos’? A pesar de que este informe no abarcó este tema a profundidad, es obvio que eso no es el caso. Para las empresas mineras, los riesgos ambientales aceptados y las medidas de seguridad tomadas son cuestiones de cálculos económicos. Y, por la baja calidad de las reservas en el Ecuador, estos cálculos generalmente no se dan a favor del medio ambiente. El Estado – que ha aprobado todos los estudios discutidos dentro de este documento – se hace de la vista gorda, sea ésto por falta de conocimiento, la baja capacidad de manejar estos proyectos o por falta de interés político. Es así, entonces, que se fabrican desastres ampliamente anunciados bajo el escudo de la minería responsable.

## 6. Referencias

ARCOM (2019) *Instructivo para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves para la mediana y gran minería*. Quito: ARCOM.

Bowker, L. y D. Chamber (2015) *The risk, public liability, & economics of tailings storage facility failures*. Bozeman, MT: Center for Science in Public Participation.

Campbell, R.; J. Linqvist; B. Browne; T. Swann y M. Grudnoff (2017) *Dark side of the boom: What we do and don't know about mines, closures and rehabilitation*. Manuka, ACT: The Australia Research Institute.

Cardno (2015) *Actualización del Estudio de Impacto y Plan de Manejo Ambiental, para la Fase de Beneficio de Minerales Metálicos (cobre), Ampliación de 30 kt por día a 60 kt por día del Proyecto Minero Mirador, Concesión Minera "Mirador 1"*. Quito: Cardno.

Chambers, D. (2012) *Long Term Risk of Releasing Potentially Acid Producing Waste due to Tailings Dam Failure*. Bozeman, MT: Center for Science in Public Participation.

Contraloría General del Estado (2017) *Informe del examen especial al Proyecto Minero Llurimagua*. Quito: Contraloría General del Estado.

Emerman, S. (2015) Overview of Two Studies on the Riverine Transport of Tailings from a Possible Tailings Dam Breach at the Mirador Mine in Southeastern Ecuador. Santa Fé, NM: E-Tech International.

Emerman, S. (2018) *Evaluación del Diseño y de la Construcción de las Presas de Relaves para la Mina Mirador, Zamora Chinchipe, Ecuador*. Spanish Fork, UT: Malach Consulting.

Emerman, S. (2019a) *Las Presas de Relaves y sus Fallas*. Presentación durante el seminario sobre Relaveras y sus Fallas en la Universidad Andina Simón Bolívar, 2019.

Emerman, S. (2019b) *Dos estudios de caso sobre la influencia de la geotermia en las explotaciones mineras*. Presentación durante el seminario sobre Relaveras y sus Fallas en la Universidad Andina Simón Bolívar, 2019.

ICOLD (2001) *Tailings Dams Risk of Dangerous Occurrences: Lessons learnt from practical experiences*. Bulletin 121 de la Comisión Mundial por las Grandes Represas. Paris: ICOLD. Accesible a través: <http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/2891-TailingsDams.pdf>

Franks, D.M., Boger, D.V., Côte, C.M., Mulligan, D.R. (2011). Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes. *Resource Policy* 36, pp. 114–122.

Kuipers, J. y A. Maest (2006) *Comparison of Predicted and Actual Water Quality at Hardrock Mines: The reliability of predictions in Environmental Impact Statements*. Washington DC: Earthworks.

Lock the Gate Alliance (2017) *Mine Rehabilitation and Closure Cost: A Hidden Business Risk*. Helensvale, QLD: Lock the Gate Alliance. Accesible a través de: <https://www.lockthegate.org.au/reports>.

Micon International (2005) Review of the Quartz Porphyry-Hosted Copper-Molybdenum Mineralisation at Junin, Otavalo, Ecuador – Technical Report. Norfolk, UK: Micon International.

Moran, R. (2001) Aproximaciones al costo económico de impactos ambientales en la minería. *Ambiente y Desarrollo*, VOL XVII - Nº 1, pp. 59 – 66

Morgenstern, N.; S. Vick y D.Van Zyl (2015) *Report on Mount Polley Tailings Storage Facility Breach*. Province of British Columbia: Independent Expert Engineering Investigation and Review Panel.

Myers, N., R. A. Mittermeier, C. G. Mittermeier, G. A. B. da Fonseca y J. Kent (2000) Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403:853-858.

NICNAS, National Industrial Chemicals Notification and Assessment Scheme (2000). Sodium Ethyl Xanthate: Priority Existing Chemical Assessment Report. Sydney: NICNAS. Accesible a través de: <https://www.nicnas.gov.au/chemical-information/pec-assessments>

Roche, C., Thygesen, K., Baker, E. (Eds.) 2017. Mine Tailings Storage: Safety Is No Accident. A UNEP Rapid Response Assessment. United Nations Environment Programme and GRID-Arendal, Nairobi and Arenda

Romero, A.; Flores, S. y Medina R. (2008) Estudio de los metales pesados en el relave abandonado de Ticapampa. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG* 11(22): 13-16.

Wise Uranium (2019) *The Brumadinho tailings dam failure (Minas Gerais, Brazil)*. Accesible a través de: <https://www.wise-uranium.org/mdafbr.html>.

WMTF, World Mine Tailings Failures (2019) *The Corrego do Feijao Tailings Failure*. Accesible a través de: <https://worldminetailingsfailures.org/corrego-do-feijao-tailings-failure-1-25-2019/>