



RESTAURACIÓN GEOMORFOLÓGICA SOBRE DEPÓSITOS DE RELAVES: CASO DE ESTUDIO APLICADO A LA CONCESIÓN MINERA RÍO BLANCO, ECUADOR

GEOMORPHOLOGICAL RESTORATION ON TAILING DEPOSITS: A STUDY CASE APPLIED TO THE RIO BLANCO MINING CONCESSION, ECUADOR

Raúl Moreno 

Departamento de Geodinámica, Universidad Complutense de Madrid. 28040, Madrid, España.

*Autor para correspondencia: rmorenofarfan0@gmail.com

Manuscrito recibido el 30 de marzo de 2021. Aceptado, tras revisión, el 14 de diciembre de 2021.

Resumen

Con el fin de contribuir al desarrollo de una industria minera sostenible, de bajo impacto ambiental, que minimice posibles conflictos sociales asociados a esta actividad, este estudio da a conocer: 1) cómo aplicar el concepto de restauración geomorfológica sobre espacios degradados, para establecer propuestas de integración geoambiental, enfocadas a la restauración de zonas mineras alteradas por el depósito de relaves del proyecto minero Río Blanco, provincia del Azuay-Ecuador, basadas en el modelamiento con el método GeoFluv y el software Natural Regrade; y 2) un análisis de los aspectos generales de la actividad minera en el Ecuador, sus precauciones, y la problemática ambiental que pueden presentar los depósitos de relaves. Como resultado se obtuvo un diseño estable que imita condiciones naturales, en el que a pesar de perder una capacidad de almacenamiento del 15% en relación con el diseño convencional, logra maximizar el volumen de relaves a acumular, aumentando significativamente la estabilidad e integración ambiental que tendría el depósito.

Palabras clave: Restauración geomorfológica, modelación del terreno, integración ambiental, depósitos de relaves, minería, ambiente.

Abstract

This study presents two separate assessments to contribute to the development of a sustainable mining industry with low environmental impact that minimizes possible social conflicts related with this activity. The first is how to apply the concept of geomorphological restoration on degraded spaces to establish geoenvironmental integration proposals, focused on the restoration of mining areas altered by the tailing deposit of the Río Blanco project, Azuay province-Ecuador, based on the modeling with GeoFluv method and the Natural Regrade software. The second is an analysis of the general aspects of the mining activity in Ecuador, its cautions, and the environmental problems that could show

tailing deposits. The main result of the current study has been a stable design that simulates natural conditions, which although it loses a storage capacity of 15% relative to the conventional design, it maximizes the volume of tailings to be accumulated. This significantly increases the stability and environmental integration that would have the tailing deposit.

Keywords: Geomorphological restoration, land modeling, environmental integration, tailings deposits, mining, environment.

Forma sugerida de citar: Moreno, R. (2022). Restauración geomorfológica sobre depósitos de relaves: Caso de estudio aplicado a la concesión minera Río Blanco, Ecuador. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. [Acceso Temprano] <http://doi.org/10.17163/lgr.n37.2023.10>.

IDs Orcid:

Raúl Andrés Moreno Farfán: <http://orcid.org/0000-0001-8194-8386>

Accepted version

1 Introducción

Ecuador está ganando rápidamente terreno como destino de inversiones mineras en América Latina (Jamasmie, 2017). Recientemente Ecuador se ubicó en el puesto 92 de las 109 naciones más atractivas para captar inversionistas (Stedman, Yunis y Aliakbari, 2019). Nuevas campañas y marcos regulatorios han conllevado a un cambio de estrategia para una nación que tradicionalmente ha basado su economía en exportaciones petroleras y agrícolas (Verdugo y Andrade, 2018), en particular, con un promedio del índice de extractividad de materias primas del 36,93% entre el 2000 y el 2011 (Hailu y Kipgen, 2017). Entre 1999 y 2016 la participación del PIB minero respecto del PIB total estuvo entre 1,17% y 1,56%, con un incremento gradual en los últimos años entre 1,48% y 1,51% del 2013 al 2016 (Almeida, 2019). Inclusive, según estudios conservadores, la minería podría convertirse en un 4% del PIB (Vistazo, 2019).

Desde el año 2016, Ecuador recibió aproximadamente 420 solicitudes de concesión, de las cuales 160 ya han sido aprobadas, obteniendo una inversión de más de 100 millones de dólares para explorar áreas ricas en oro, cobre, plata y molibdeno (Jamasmie, 2017). En el país existe una superficie total de 105 000 hectáreas concesionadas para actividades mineras, distribuidas en siete provincias (BCE, 2021); donde, por ejemplo, en el año 2013 el estado ecuatoriano adjudicó a la empresa Ecuagold-mining South America S.A., el proyecto Río Blanco en la provincia del Azuay (Figura 1), con reservas por un total 991.000 onzas de oro y 4.7 millones de onzas de plata, recurso equivalente a una cantidad no inferior a 14.000 millones de dólares (Latinominería, 2012).

Aunque todo lo anteriormente expuesto es correcto en términos del desarrollo económico, hay que tener en cuenta que la minería ha generado situaciones problemáticas en su entorno (Vásconez y Torres, 2018). Los grandes proyectos extractivos no han estado exentos de controversias, siendo cuestionados por el no respeto a los derechos humanos y de la naturaleza (D'Angelo y Ruiz, 2018), derivando en conflictos sociales y suspensiones del tipo judicial (Ruiz, 2018), como lo suscitado en proyectos como Río Blanco o Quimsacocha (Massa-Sánchez, Cisne Arcos y Maldonado, 2018). Además,

cobra relevancia la localización de estos grandes proyectos mineros dentro de ecosistemas altamente frágiles, como en zonas de recarga hídrica, páramos y humedales (Environmental Justice Atlas, 2017). Consecuencia de ello, el 07 de febrero de 2021, mediante referéndum, el pueblo de la provincia de Azuay se pronunció por la prohibición de actividad minera extractiva metálica en áreas de cuencas hidrográficas de importante recarga hídrica (El Comercio, 2021). Según este contexto, la minería obligatoriamente debe considerar sus responsabilidades operativas, legales y éticas, debiendo aspirar a una compatibilidad con el respeto al medioambiente y la sostenibilidad, por ejemplo, mediante la explotación responsable de recursos, generando beneficios (ambientales, sociales y económicos) que iguallen o superen los valores que existían antes de la explotación (Oyarzún y Oyarzún, 2011).

Por otro lado, el manejo de los residuos mineros o relaves (tailings) y su posterior tratamiento son dos factores de gran riesgo en términos ambientales que conlleva la minería (Oyarzún y Oyarzún, 2011), ya que su generación es mucho mayor que los productos económicos que produce. Por ejemplo, en el caso de una explotación de cobre (Cu) por cada tonelada de roca mineralizada solo se llegaría a extraer 10 kg del metal en el mejor de los casos. Esto significa que 990 kg de material serían residuos destinados a un depósito de relaves (Oyarzún, Higuera y Lillo, 2011), convirtiendo a esta actividad en una de las fuentes de contaminación por metales pesados más persistentes del planeta, debido a que: 1) su función es almacenar materiales sólidos resultantes de operaciones de separación y obtención de metales (Espín, Jarrín y Escobar, 2017), y 2) estos residuos necesitan ser almacenados dentro de grandes extensiones (Serrato, Díaz y Brotóns, 2010).

Sobre la problemática ambiental de los depósitos de relaves, destaca su potencial para generar drenaje ácido de mina (AMD: acid mine drainage), en especial en lugares donde se explotan yacimientos con presencia de sulfuros (Sarmiento, 2007), y que posteriormente son abandonados (Oyarzún y col., 2012). Además pueden presentarse roturas de diques de contención debido a su inestabilidad intrínseca (materiales plásticos con altos contenidos de agua) (Mudd y Boger, 2013) y de ahí, llegar a inundar vastas áreas de terreno (US EPA, 2015), y probablemente causar ingentes pérdidas humanas,

como el caso de Brumadinho, Sureste de Brasil, ocurrida el 25 de enero de 2019, donde hubo 257 personas fallecidas y más de 182 desaparecidos (Pereira, Barros Cruz y Guimarães, 2019).

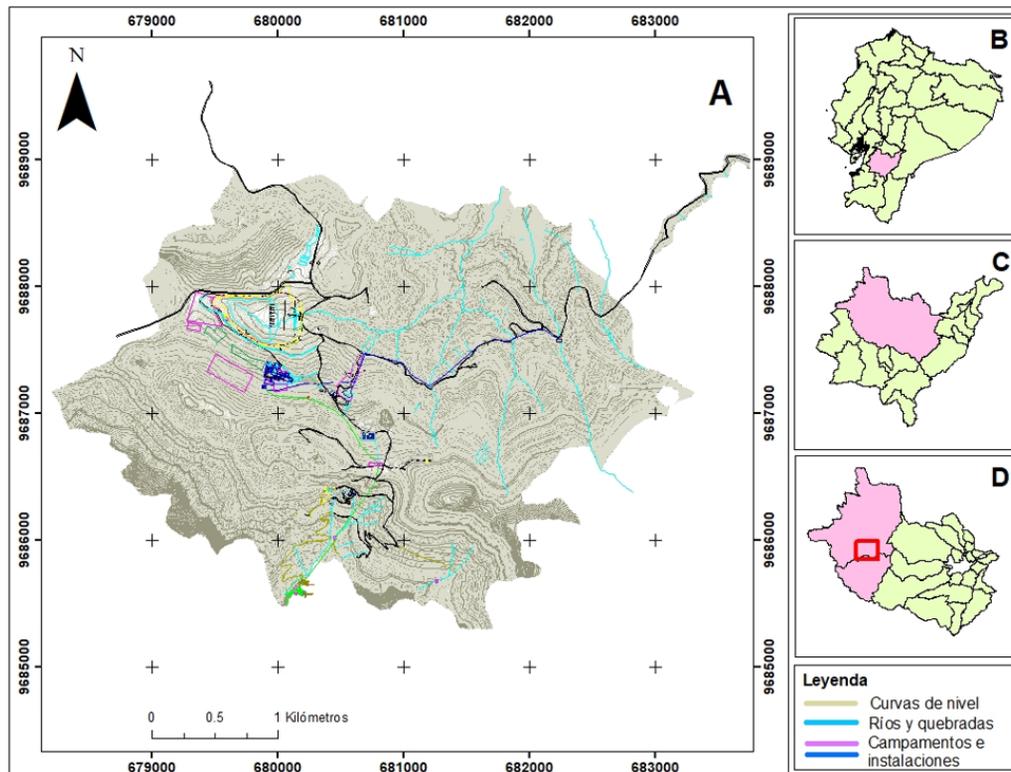


Figura 1. A (mapa general del proyecto minero Río Blanco), B (ubicación de la provincia de Azuay en la República del Ecuador), C (ubicación del cantón Cuenca en la provincia de Azuay) y D (ubicación del proyecto minero en las parroquias de Molleturo y Chaucha, cantón Cuenca).

Estos depósitos generalmente cuentan con el clásico diseño llamado “aguas arriba”, el cual presenta una serie de problemas de estabilidad (WISE, 2019) como: 1) que el suelo sobre el que se asienta no sea el adecuado, de manera que puede haber infiltración de agua y a partir de ahí ceder la base del dique, como ocurrió en Aznalcóllar (Sevilla, España el 25 de abril de 1998) (Rodríguez y col., 2009), 2) una mala respuesta ante la actividad sísmica (tema relevante en Ecuador) (Oldecop y Rodríguez, 2007), y/o 3) la subida del nivel del agua, llevando a dos situaciones: una donde el peso del agua puede inducir fenómenos del tipo deslizamiento rotacional cerca del dique, con pérdida total o parcial del mismo; y la otra donde el agua supera el dique de contención, erosiona el o los diques sucesivos causando la rotura de estos (Owen y col., 2020).

Por otra parte, es difícil pensar en una actividad humana sobre el territorio que no implique mover tierra o realizar cambios sobre las primeras capas del suelo, reemplazando ecosistemas que una vez contribuyeron a generar suelos fértiles con otros que no lo hacen (Daily y Ehrlich, 1992). Bajo este contexto cobra relevancia la aplicación de la restauración geomorfológica, disciplina reciente y aplicada a actividades “mueve tierras” como minería, infraestructuras lineales, obra civil, urbanismo, creación de espacios verdes, etc. Actualmente, esta disciplina se ha convertido en una herramienta al servicio del sector minero (Villa y Martín Duque, 2018) debido a que es una actividad que transforma drásticamente el relieve, y donde las restauraciones permiten reconstruir nuevas geoformas, paisajes y ecosistemas (Universidad Complutense Madrid,

2021), como también crear propuestas de integración ambiental, que tiendan a la sostenibilidad (Zapico y col., 2011), y ayuden a reducir en cierto grado los impactos inherentes a esta actividad (Bastidas-Orrego y col., 2018).

En este sentido el método GeoFluv (patentado en EEUU) (GeoFluv, 2021) y el software Natural Regrade desarrollado por Carlson Software Inc (2020), constituyen una de las herramientas más avanzadas y completas a nivel internacional para el diseño de geformas maduras y estables que imitan condiciones naturales (Martín Duque y col., 2012) y que son aplicados en espacios afectados por movimientos de tierras (Martín Duque y Bugosh, 2017). Este estudio muestra la aplicación del método GeoFluv sobre el depósito de relaves de la concesión minera Río Blanco, Ecuador, con el objetivo de obtener un diseño geomorfológico conceptual y estable, que sea integrado ambientalmente, y que imite condiciones naturales.

2 Materiales y Métodos

Este apartado abordará el tratamiento inicial y las operaciones de depuración de la información de partida, seguido de la realización del modelo de restauración sobre el depósito de relaves mediante la utilización del método GeoFluv y el software Natural Regrade, y finalmente la definición de los parámetros de diseño utilizados en el modelamiento geomorfológico del terreno.

2.1 Tratamiento inicial de la información

El punto de partida del estudio inició con el tratamiento de la información general del proyecto en formato CAD facilitada por la empresa encargada (Terrambiente Consultores, 2012; Terrambiente Consultores, 2016). A partir de ella se emplearon métodos de selección y edición de objetos, realizando algunas operaciones iniciales de depuración de la información (control de calidad), como: limpieza de información repetida, recorte de espacios idóneos de trabajo, entre otros. Al finalizar se obtuvo un mapa simplificado de la zona de interés (Figura 1A). La topografía general del proyecto se detalló mediante curvas de nivel con cotas, excepto el depósito de relaves, el cual no ofrecía cotas pues venía representado con polilíneas 2D. Por ello, un pa-

so inicial fue otorgar cotas a las líneas que definen este depósito, convirtiendo las polilíneas 2D a 3D. A nivel informativo, la coronación de este depósito de relaves se sitúa a 3.763 m.s.n.m

2.2 Diseño de base del depósito de relaves

Nos enfocamos en el diseño del depósito de relaves a partir de la información depurada en el software Natural Regrade. Mediante la gestión de capas se introdujo: 1) límite de la superficie objeto de restauración, simulando el borde de una cuenca hidrográfica, 2) trazado general de los canales fluviales y 3) parámetros de diseño (settings). En la Figura 2 las líneas azules representan las polilíneas 2D del depósito de relaves propuesto por la empresa concesionaria, y las líneas blancas del interior y las que lo rodean representan el límite de la cuenca de diseño y el trazado de los canales fluviales, respectivamente. Finalmente, dentro del proceso preparatorio se realizó un TIN (triangular irregular network, en español: redes irregulares de triángulos) inicial. A partir de esta información base, se pudo comenzar con la realización y definición de una serie de diseños.

2.3 Parámetros de diseño de restauración

Respecto a los parámetros (Tabla 1), aplicando el software Natural Regrade (Carlson Software Inc, 2020), se destaca que la mayoría de estos se obtuvieron de un referente o análogo local. Aunque la adquisición completa de estos datos fue limitada debido al intenso trabajo de campo que se requiere, los parámetros restantes se obtuvieron de proyectos similares (Martín Duque y col., 2012), pudiendo obtenerse un diseño conceptual de restauración, el cual, en caso de que sea adoptado como solución de restauración, deberá ser validado posteriormente con datos locales.

3 Resultados y discusión

Esta sección muestra los resultados del diseño de restauración sobre el depósito de relaves, utilizando el método GeoFluv y el software Natural Regrade, destacando los valores de corte y relleno, además del análisis de pendientes y orientaciones que identifica de manera cuantitativa la variación entre los diseños, y finalmente aborda la discusión resultante del presente estudio.

3.1 Resultados del diseño de restauración

La prioridad del diseño fue buscar morfologías estables que maximicen el volumen de materiales de relave a almacenar. Aquí se realizaron operaciones tales como cambiar ajustes en el programa y limitar la cantidad de afluentes, para así procurar generar menos valles (espacio que no acumula relaves con respecto al diseño convencional), distribuir y equi-

librar los canales, disminuir el valor de la pendiente de cabecera de los canales, o maximizar el tramo convexo de las laderas (Figura 3). Finalmente, se obtuvo un diseño de restauración cuyos resultados se detallan en la Tabla 2. Con el diseño propuesto se pierden $80\,548,35\text{ m}^3$ de capacidad de almacenamiento de relaves con respecto al diseño convencional (original), equivalente a un 15% del total de residuos mineros (Tabla 2).

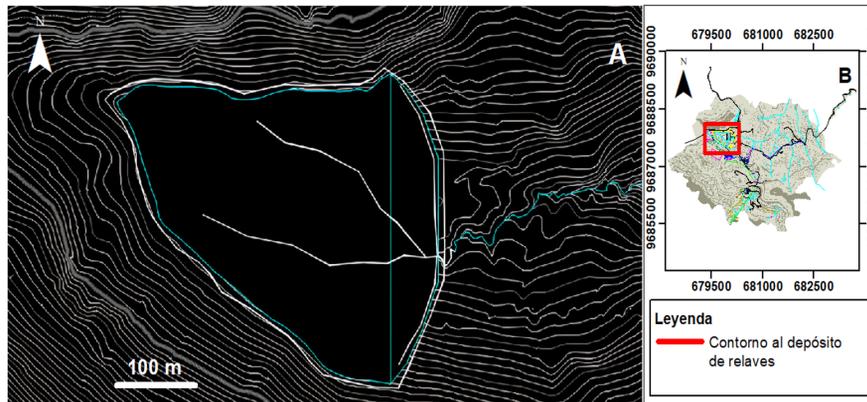


Figura 2. A (representación del mapa en formato CAD del entorno del depósito de relaves objeto del diseño de restauración y B (ubicación del depósito de relaves dentro del mapa general del proyecto minero).

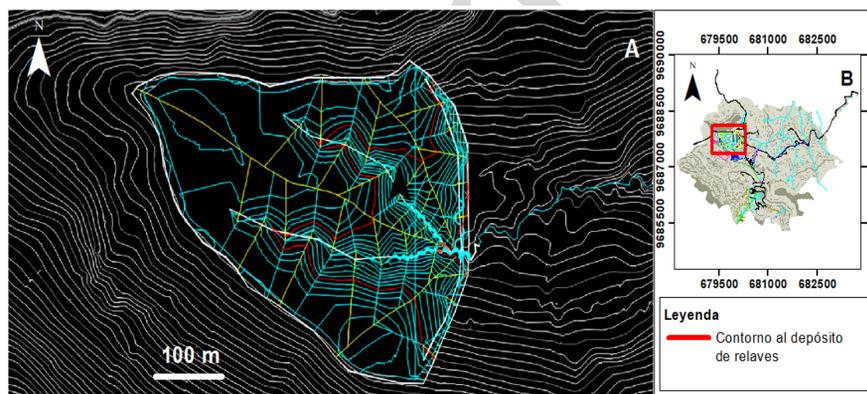


Figura 3. A (diseño final adoptado. En azul se muestran las curvas de nivel y los canales fluviales, y en rojo las curvas de nivel maestras), B (ubicación del depósito de relaves dentro del mapa general del proyecto minero).

En la Figura 4 se muestran una serie de vistas 3D, comparando imágenes del diseño convencional con sus equivalentes obtenidas en el diseño de restauración propuesto. Una de las condiciones que evidencian los resultados del diseño de restauración obtenido es que el mismo limita el volumen de rela-

vos a almacenar en comparación con el diseño original (convencional), equivalente a un embalse lleno, debido a que el programa Natural Regrade diseña paisajes con valles, lo que quiere decir que estos espacios suponen una reducción en la capacidad de almacenamiento. Para el caso de este estudio se ha

realizado un diseño que acumula un 15% menos de material de relaves, pero que es mucho más integrado y estable. No obstante, corresponderá a la empresa operadora la valoración de si esta reducción es viable o no.

Tabla 1. Parámetros utilizados en el diseño mediante el software Natural Regrade.

Parámetros	Unidades	Depósito de relaves
Distancia máxima entre los canales de conexión	m	3
Distancia máxima entre la línea de cresta hasta la cabecera del canal	m	45
Pendiente del valle principal hasta la desembocadura del canal primario	%	Se determinó con AutoCAD
Alcance del canal principal	m	36
2yr-1hr (valor para un evento de precipitación que determina las dimensiones del canal principal)	cm	2.15
50yr-6hr (valor para un evento de precipitación que determina las dimensiones del canal propenso a las inundaciones)	cm	8.92
Variación de la densidad de drenaje	%	20
Ángulo del subpuente a la perpendicular del canal (aguas arriba)	grados	10
Pendientes máximas en línea Norte - Este	%	20
Pendientes máximas en línea recta	%	33
Variación máxima de corte / llenado	%	125
Variación máxima de corte / llenado	%	80
Factor de aumento global para el material cortado		1
Factor de reducción global para el material de relleno		1
Elevación tolerable en la cabeza del canal	m	1
Pendiente tolerable en la cabeza del canal	%	1
Ajustes de canal		
Velocidad máxima del agua	m/s	1.37
Pendiente (aguas arriba)	%	-12
Pendiente (aguas abajo)	%	Se determino con AUTOCAD
Relación ancho - profundidad	pendiente>0.04	10
Sinuosidad	pendiente >0.04	1.15
Cuenca hidrográfica		
Coefficiente de escorrentía (zonas recuperadas)		0.3
Coefficiente de escorrentía (zonas sin vegetación)		0.89

Según la información del mapa general de implantaciones de beneficio del proyecto minero Río Blanco, realizado por Ecuagoldmining South America S.A., la capacidad de almacenamiento del depósito de relaves de la zona sería de 804000 m³ (Terrambiente Consultores, 2012; Terrambiente Consultores, 2016). Sin embargo, en nuestra cuantificación, realizada con topografía precisa y empleando el software Carlson, la capacidad del depósito es de 535273,5 m³, tomando como resultado válido este

último. Dado el riesgo ambiental que presentan los depósitos de relaves, en cuanto a: 1) estabilidad estática y dinámica; 2) efectos asociados a la respuesta sísmica (Vanegas, 2011); y drenaje ácido de roca (ARD), el tomar como referencia el resultado de la cuantificación obtenida con el diseño de restauración de este estudio implica trabajar con una cantidad menor de residuos, priorizando la seguridad, y teniendo un menor riesgo de roturas.

En el caso de una aplicación real, se podría contrastar los resultados obtenidos con el diseño de restauración con la información de la empresa operadora, y de ser necesario corregir la magnitud en relación con la capacidad de almacenamiento. En este aspecto se podrían comparar los pros y contras entre los métodos utilizados, tema que sería cubierto en un futuro tema de investigación.

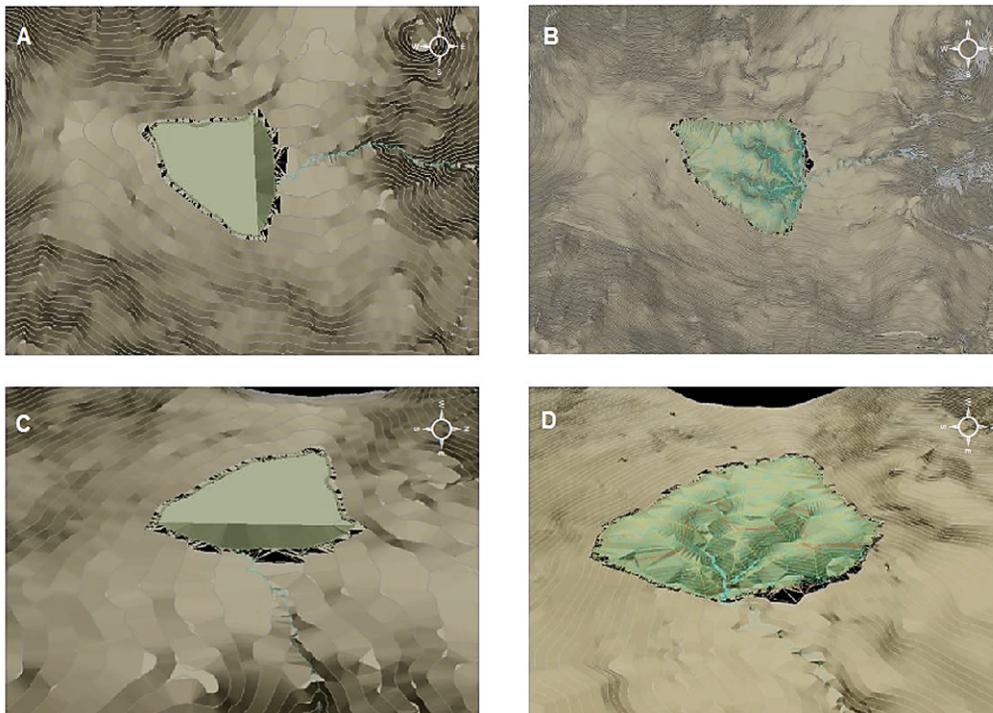


Figura 4. A y B (muestran una comparación de diseños vistos desde planta), C y D (presentan una comparación de diseños entre vistas frontales).

Tabla 2. Datos sobre volúmenes de la versión de diseño seleccionada.

Descripción	Cantidad (m^3)
Capacidad de almacenamiento del depósito original	535 237,50
Corte (capacidad que no almacena el diseño geomorfológico con respecto al convencional sobre todo por los valles)	142 739,00
Relleno (material que el diseño geomorfológico puede acumular “de más”, con respecto al convencional, al acumular material en las lomas de los interfluvios)	62 190,00
Diferencia “corte-relleno”. Es decir, volumen de relaves que el diseño geomorfológico deja de acumular con respecto al diseño convencional	80 548,35

3.2 Resultados del análisis de pendientes y orientaciones

Como información complementaria al estudio de restauración, se realizó el análisis de pendientes y orientaciones, tanto para el diseño convencional como para el propuesto, donde se muestra de manera cuantitativa (porcentajes de las distintas clases) la variación entre los dos diseños. Con respecto al Análisis de Pendientes: en el diseño convencional (original) se obtiene una escasa variación de rangos o clases (Tabla 3). Por el contrario, en el diseño propuesto se evidencian porcentajes mayores, resultando en una mayor superficie de hábitats (Tabla 4). Lo más destacado de este análisis es que se ha constatado que existe una gran diferencia de superficies reales del terreno (suma de las superficies de la red de triángulos) entre los diseños.

Tabla 3. Informe de pendientes, diseño convencional.

Informe de pendientes		
Pendiente promedio		4,40%
Rangos o clases de pendientes	Área (ha)	Porcentaje de la superficie total en dicho rango o clase de pendiente (%)
<10	7,76	83
10 a 20	0,12	1,4
20 a 30	1,46	15,7
30 a 40	0,00	0
>40	0,00	0
Total	9,36	100

Tabla 4. Informe de pendientes, diseño propuesto.

Informe de pendientes		
Pendiente promedio		9,90%
Rangos o clases de pendientes	Área (ha)	Porcentaje de la superficie total en dicho rango o clase de pendiente (%)
<10	11,94	60,53
10 a 20	5,62	28,5
20 a 30	1,85	9,38
30 a 40	0,29	1,47
>40	0,02	0,12
Total	19,88	100

Respecto al Análisis de Orientaciones: en el diseño convencional se obtiene poca variabilidad, ya que el depósito es mayoritariamente plano, con su

pared de cierre orientada hacia el Este (Tabla 5, Figura 4). El diseño de restauración propuesto cuenta con una mayor diversidad, lo cual es considerado favorable ya que implica tener una mayor diversidad biológica, dado que algunas especies tendrán una mayor posibilidad de establecerse en determinadas orientaciones, en función de distintos factores físicos (luz, humedad, etc.) (Tabla 6).

3.3 Discusión

De modo progresivo Ecuador se está convirtiendo en un país que ha adoptado a la minería como fuente de recursos económicos, vía impuestos, regalías y empleo, apoyando la exploración y explotación de diversos proyectos mineros. Sin embargo, la actividad minera sigue generando cierta desconfianza y temor en un contexto en el que la preocupación por los aspectos ambientales y sociales cobran cada vez más importancia, lo cual se ha observado en protestas en contra del extractivismo, en especial si estos proyectos se localizan en zonas ambientalmente sensibles. Conociendo el riesgo que se asocia a la minería, este puede ser minimizado aplicando propuestas de integración ambiental y restauración de zonas alteradas por movimientos de tierras. Mediante la aplicación de nuevos métodos y programas informáticos, como el método GeoFluv y el software Natural Regrade, se puede contribuir a desarrollar una minería compatible con el desarrollo sostenible, de tal manera que genere beneficios a largo plazo en términos ambientales, sociales y económicos.

Uno de los grandes problemas que conlleva la actividad minera en todas sus escalas es la disposición y posterior tratamiento de los depósitos de relaves o tailings. En el caso del proyecto minero Río Blanco, se considera rellenar un valle natural de alta montaña (corona del depósito de relaves situada a 3.763 m.s.n.m.) con estos residuos. Según la bibliografía consultada, esto no es recomendable desde el punto de vista ambiental y geomorfológico, siguiendo las técnicas y diseños convencionales, como del llamado "aguas arriba", el cual presenta una serie de problemas de estabilidad (roturas). Además, según información recolectada sobre los estudios mineralógicos del proyecto (Terrambiente Consultores, 2012; Terrambiente Consultores, 2016) en la zona existe la presencia de Pirita (FeS_2), sulfuro metálico que bajo ciertas condiciones ambienta-

les de humedad y oxidación puede llegar a provocar la liberación de metales pesados y generar drenaje ácido de mina (AMD) (Gray, 1997). Inclusive, el potencial contaminante de este fenómeno geoquímico continúa incluso mucho tiempo después de cesada la actividad. Las cubiertas son las técnicas utilizadas ante riesgos de rotura y protección ambiental, que impiden que los relaves entren en contacto con el exterior, pero estas cubiertas no serían del todo efectivas, ya que se han suscitado desastres mineros que contaban con esta metodología (Lottermoser, 2013). Por ello, adicional al sistema de cubierta, es recomendable aplicar el método GeoFluv y el software Natural Regrade, el cual permite diseñar y construir geoformas diversas, como valles, por los que discurre una red de drenaje, además de otros conjuntos que imitan condiciones naturales, diseñados para responder de manera segura ante episodios extraordinarios de lluvia, haciéndolos más estables ante la infiltración de agua, y el efecto de la erosión hídrica y fluvial.

Tabla 5. Informe de orientaciones, diseño convencional.

Informe de orientaciones		
Zona	Área (ha)	Porcentaje de superficie (%)
Norte	0,26	2,83
Nordeste	0,51	5,46
Este	2,49	26,65
Sudeste	0,56	5,99
Sur	0,38	4,05
Sudoeste	2,04	21,87
Oeste	1,79	19,17
Nordeste	1,30	13,93
Total	9,36	100,00

Los métodos convencionales de restauración minera se enfocan en dos aspectos: 1) el diseño topográfico convencional de berma-talud-cuneta y 2) el aspecto estético realizado mediante la revegetación; estos han tenido resultados insatisfactorios en distintos lugares del mundo, ya que este tipo de topografía (que no existe en la naturaleza) no tiene la capacidad necesaria para evacuar valores altos de escorrentía, lo cual forma regueros y cárcavas con elevadas tasas de erosión y emisión de sedimentos, además siendo escasa su integración paisajística debido a sus formas rectilíneas (Nicolau y col., 2021). Ahora bien, desde el año 2005, el método GeoFluv y el software Natural Regrade fueron aplicados sobre restauraciones mineras, reemplazando a los métodos convencionales principalmente en Estados Unidos, además de otros como la reconstrucción del

relieve de la cantera La Revilla o el Alto Tajo (España), o de grandes minas de carbón como Drayton South (Australia), y en Sudamérica, La Guacamaya y Puerto Libertador (Colombia) y la Mina Invierno (Chile), teniendo resultados favorables en términos de estabilidad y disminución de la erosión y sedimentos (Hancock, Duque y Willgoose, 2020). En este sentido la restauración geomorfológica debe y puede aproximar su aplicación sobre la problemática intrínseca de los depósitos de relaves.

Cabe señalar que, hasta la fecha, no existe ningún caso real (ni siquiera en fase de proyecto), que contemple utilizar estos métodos sobre depósitos de relaves en alta montaña. De ahí la importancia potencial que puedan tener los resultados obtenidos en este estudio, en concreto poniendo en práctica la metodología y herramientas descritas para mejorar la integración ambiental del proyecto en términos de reducción de riesgos, disminución del impacto ambiental e integración ecológica y paisajística, y de modo subsecuente, mejorar la imagen de la empresa desde el punto de vista operativo y social.

Para proceder al cese de una actividad minera y el cierre del depósito de relaves, se debe aplicar un sistema de cobertura, cuyo objetivo es mantener los relaves lo más estables posibles (en términos químicos), evitando la formación de drenaje ácido de mina (Matos y col., 2016), sistema de cobertura imprescindible a la hora de complementar una restauración geomorfológica. La propuesta de un sistema de cubierta no fue abordada en este estudio, dejando abierta una futura línea de investigación.

Tabla 6. Informe de orientaciones, diseño propuesto.

Informe de orientaciones		
Zona	Área (ha)	Porcentaje de superficie (%)
Norte	2,91	14,79
Nordeste	5,08	25,79
Este	3,03	15,39
Sudeste	2,93	14,89
Sur	3,76	19,09
Sudoeste	1,18	6
Oeste	0,42	2,15
Nordeste	0,36	1,87
Total	19,73	100,00

4 Conclusiones

La propuesta de restauración geomorfológica realizada en el presente estudio ofrece un resultado óptimo, capaz de proporcionar una máxima estabilidad e integración ambiental con sólo una reducción del 15% de la capacidad total de almacenamiento. Dado que no existen diseños o proyectos aplicados con el método GeoFluv y el software Natural Regrade para depósitos de relaves, hubo aspectos desconocidos, como el aporte (condición imprescindible) de tener que colocar una serie de canales perimetrales en la parte frontal del depósito (presa). La cuantificación del incremento de la superficie real del terreno que se produce entre diseños (culminación plana y plano inclinado en la presa, con respecto a una topografía compleja con valles, lomas, laderas, etc.) llega a ser casi el doble.

Considerando que el proyecto minero se encuentra emplazado dentro de zonas sensibles de alta montaña y cercano a otras zonas de recarga hídrica, se debe tratar de realizar la mejor gestión extractiva posible, ya que un manejo inapropiado, como la falta de un control ambiental adecuado, podría desencadenar consecuencias ambientales desastrosas para el medio natural y social. Por tanto, la metodología aplicada con GeoFluv y Natural Regrade en el proyecto minero Río Blanco contribuye a minimizar el riesgo ambiental asociado.

Agradecimientos

Un agradecimiento especial al Departamento de Geodinámica de la Universidad Complutense de Madrid, en especial al Profesor José F. Martín Duque y al Profesor Roberto Oyarzún Muñoz, por su tutoría en la realización del presente estudio. Además, se agradece a la empresa Ecuagoldmining South América S.A. por su colaboración al proveer la data original de diseño para su procesamiento.

Referencias

Almeida, M. (2019). *Estudio de caso sobre la gobernanza en el sector minero en el Ecuador*. Naciones Unidas.
BCE (2021). *Banco Central del Ecuador. Reporte de Minería, Resultados al tercer trimestre de 2020*. Inf. téc. Banco Central del Ecuador.

Bastidas-Orrego, L. y col. (2018). «Conflictos socioambientales y minería a cielo abierto en la Sierra Norte de Puebla, México». En: *Textual: análisis del medio rural latinoamericano* 72, 35-65. Online: <https://bit.ly/3NazrEi>.
Carlson Software Inc (2020). *Carlson Software 2020 Online help*.
Daily, G. y P. Ehrlich (1992). «Population, Sustainability, and Earth's Carrying Capacity». En: *BioScience* 42, 35-65. Online: <https://bit.ly/3laJAVI>.
D'Angelo, J. y F. Ruiz (2018). «Extracción minera y derechos humanos: Impactos adversos y caminos hacia un desarrollo sostenible». En: *Revista Internacional de Cooperación y Desarrollo* 5.1, 105-123. Online: <https://bit.ly/3PhPimh>.
El Comercio (2021). *La prohibición de la minería en zonas cercanas a fuentes hídricas ganó en la consulta popular de Cuenca*.
Environmental Justice Atlas (2017). *International Minerals Corporation (IMC) in Molleturo, Ecuador*.
Espín, D., J. Jarrín y O. Escobar (2017). «Manejo, gestión, tratamiento y disposición final de relaves mineros generados en el proyecto Río Blanco». En: *Revista de Ciencias de Seguridad y Defensa* 2.4, 1-12. Online: <https://bit.ly/38kV8mw>.
GeoFluv (2021). *GeoFluv Software*.
Gray, N. (1997). «Environmental impact and remediation of acid mine drainage: a management problem». En: *Environmental geology* 30.1, 62-71. Online: <https://bit.ly/3FHavbt>.
Hailu, D. y C. Kipgen (2017). «The extractives dependence index (EDI)». En: *Resources Policy* 51, 251-264. Online: <https://bit.ly/3Pkr371>.
Hancock, G., J. Duque y G. Willgoose (2020). «Mining rehabilitation—Using geomorphology to engineer ecologically sustainable landscapes for highly disturbed lands». En: *Ecological Engineering* 155, 105836. Online: <https://bit.ly/3yCUivY>.
Jamasmie, C. (2017). *Ecuador anticipates \$4 billion in mining investments by 2021*.
Latinominería (2012). *Ecuador-IMC decidió vender sus proyectos en Ecuador: Río Blanco y Gaby Ecuador – IMC decides to sell Rio Blanco and Gaby projects*.
Lottermoser, B. (2013). *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts*. Springer Science y Business Media.
Martín Duque, J. y N. Bugosh (2017). *El remodelado del terreno en la restauración ecológica del espacio afectado por actividades mineras: del uso de criterios geomorfológicos al método geofluv*.
Martín Duque, J. y col. (2012). «Un procedimiento integrado de restauración ecológica con base geomorfológica. El ejemplo de la cantera de Somolinos (Gadalupe)». En: *Avances de la geomorfología en España, 2010-2012: actas de la XII Reunión Nacional de Geomorfología*.

- Massa-Sánchez, P., R. del Cisne Arcos y D. Maldonado (2018). «Exploitation minière à grande échelle et conflits sociaux: une analyse pour le sud de l'Équateur». En: *Problemas del desarrollo* 49.194, 119-141. Online: <https://n9.cl/a2rkq>.
- Matos, A. y col. (2016). *Planning for closure 2016*. Online: <https://bit.ly/3wew8q8>. Gecamin Digital publications.
- Mudd, G. y D. Boger (2013). «The ever growing case for paste and thickened tailings—towards more sustainable mine waste management». En: *J. Aust. Inst. Min. Metall* 2, 56-59. Online: <https://bit.ly/3L6JpVO>.
- Nicolau, J. y col. (2021). *Otra aproximación a la restauración de canteras: La restauración geomorfológica, como base para una restauración ecológica exitosa*. Aragonito.
- Oldecop, L. y R. Rodríguez (2007). «Liquefacción de los relaves mineros. Riesgo ambiental». En: *V simposio nacional de seguridad minera y desarrollo sostenible*.
- Owen, J. y col. (2020). «Catastrophic tailings dam failures and disaster risk disclosure». En: *International journal of disaster risk reduction* 42, 101361. Online: <https://bit.ly/3l9mbnt>.
- Oyarzún, J. y R. Oyarzún (2011). *Minería sostenible: principios y prácticas*. GEMM.
- Oyarzún, J. y col. (2012). «Abandoned tailings deposits, acid drainage and alluvial sediments geochemistry, in the arid Elqui River Basin, North-Central Chile». En: *Journal of Geochemical Exploration* 115, 47-58. Online: <https://bit.ly/3laktSQ>.
- Oyarzún, R., P. Higuera y J. Lillo (2011). *Minería ambiental: una introducción a los impactos y su remediación*. GEMM.
- Pereira, L., G. de Barros Cruz y R. Guimarães (2019). «Impactos do rompimento da barragem de rejeitos de Brumadinho, Brasil: uma análise baseada nas mudanças de cobertura da terra». En: *Journal of Environmental Analysis and Progress* 4.2, 122-129. Online: <https://bit.ly/3MiutFu>.
- Rodríguez, R. y col. (2009). «Los grandes desastres medioambientales producidos por la actividad minero-metalúrgica a nivel mundial: causas y consecuencias ecológicas y sociales». En: *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas* 12.24, 7-25. Online: <https://bit.ly/3NiRUPf>.
- Ruiz, V. (2018). *Judge orders Chinese Company to stop mining activities in Ecuadorian town*.
- Sarmiento, M. (2007). «Estudio de la contaminación por drenajes ácidos de mina de las aguas superficiales en la cuenca del río Odiel (SO España)». Tesis de mtría. Universidad de Huelva. Departamento de Geodinámica y Paleontología.
- Serrato, F., A. Díaz y J. Brotóns (2010). «Contaminación ambiental por estériles mineros en un espacio turístico en desarrollo, la sierra minera de Cartagena-la Unión (sureste de España)». En: *Cuadernos de turismo* 25, 11-24. Online: <https://bit.ly/3a3VVsx>.
- Stedman, A., J. Yunis y E. Aliakbari (2019). *Survey of mining companies 2019*. Fraser Institute.
- Terrambiente Consultores (2012). *Estudio de impacto ambiental proyecto minero Río Blanco, fase de explotación*. Terrambiente Consultores.
- (2016). *Estudio de impacto ambiental fase de beneficio proyecto minero Río Blanco*. Terrambiente Consultores.
- US EPA (2015). *Emergency Response to August 2015 Release from Gold King Mine*.
- Universidad Complutense Madrid (2021). *Restauración Geomorfológica*.
- Vanegas, F. (2011). «Respuesta sísmica reciente en balsas de relaves chilenas y presas de material suelto». Tesis de mtría. Universidad Politécnica de Madrid.
- Vásconez, M. y L. Torres (2018). «Minería en el Ecuador: sostenibilidad y licitud». En: *Revista Estudios del Desarrollo Social: Cuba y América Latina* 6.2, 83-103. Online: <https://n9.cl/7gm53>.
- Verdugo, N. y V. Andrade (2018). «Productos tradicionales y no tradicionales del Ecuador: Posicionamiento y eficiencia en el mercado internacional para el período 2013–2017». En: *X-pedientes Económicos* 2.3, 84-102. Online: <https://n9.cl/7p00s>.
- Villa, J. De la y J. Martín Duque (2018). «Restauración geomorfológica de espacios afectados por la minería en Castilla - La Mancha. Posibilidades de Aplicación a las explotaciones de áridos». En: *V Congreso Nacional de Áridos (2018)*.
- Vistazo (2019). *Cuidar los ingresos mineros*.
- WISE (2019). *Safety of Tailings Dams*.
- Zapico, I. y col. (2011). «Reconstrucción geomorfológica y de hábitats en el plan de restauración de la cantera "Lo Quebraderos de la Serrana"(Toledo, España)». En: *X-pedientes Económicos*, 501-508. Online: <https://n9.cl/70wcw>.