

GUÍA DE ECONOMÍA CIRCULAR PARA LAS ETAPAS MINERAS

DE ORO ALUVIAL



UNIVERSIDAD DE
CÓRDOBA

GUÍA

DE ECONOMÍA CIRCULAR

PARA LAS ETAPAS MINERAS

DE ORO ALUVIAL



GUÍA DE ECONOMÍA CIRCULAR PARA LAS ETAPAS MINERAS DE ORO ALUVIAL.

**Convenio Interadministrativo GGC
No 1860 – 2025**

Autores

Esp. Lina Paola Barrera Sterling
Esp. Miriam Yanet Pantoja Álvarez
Geól. Juan Andrés Gil
Esp. Jesús Alberto Ordoñez
MSc. Roberth Paternina Uribe
PhD. José Luis Marrugo Negrete
PhD. Mauricio José Rosso Pinto
MSc. Ivonne Stella Negrete Sierra

Equipo de Apoyo

Ingeniero Coordinación General
MSc. Ivonne Stella Negrete Sierra

Ingeniero Coordinador Técnico de Campo

Msc. William Batista Jinete

Ingeniero Coordinador Operativo

PhD. Mauricio José Rosso Pinto

Ingeniero Coordinador

**Estructuración-Elaboración de la
Guía**

Esp. Lina Paola Barrera Sterling

Ingeniero Coordinador Proyecto Tipo

Esp. Camilo Alejandro Gómez Úsuga

Profesional Temático Minería

Esp. Mauricio Jiménez Batista
MSc. Carlos Domínguez Balmaceda

Profesional Temático en Geología

Esp. Diana Carolina Ortiz Niño
MSc. Sergio Reyes Sandoval

Profesionales de Apoyo

PhD. Carlos Gómez Ortiz
Ing. Edgardo Elías Cruz Montes
Admr. Sain José Bermúdez Vergara
MSc. Laidy Viviana Cruz Navarro

Profesionales documentales

MSc. María José Caraballo Laza
Ing. Jesús David Argel Bárcenas
Ing. Pedro José Rada Tejada
Ing. Paula Peñate Salgado

Profesionales Soporte Administrativo

Esp. Enadis Cordero Anaya
Esp. Alexis De León Navarro
Esp. Sandra Ramos Izquierdo

Abogados

Erika María Gracia Flórez

Profesionales Laboratorio Soporte

MSc. Iván David Urango Cárdenas
MSc. Joel Aleán Flórez
Esp. Dalciris Nisperuza Pérez
Qco. Yendis Carmona Fuentes
Qco. Yuris Benavides Tirado
Qco. Senis Montiel Murillo

Diseño y diagramación

Juan Sebastian Garzón Salcedo

© Universidad de Córdoba

Las tablas, figuras o fotografías de esta guía que no están atribuidas a fuentes externas son de los autores del libro.

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA

Punto de atención presencial: Calle 43 N° 57 - 31 CAN.
Bogotá D.C. Colombia,
PBX: (57) +1 220 0300
Línea gratuita nacional: 01 8000 910 180
Código Postal 111321

Ministro

Edwin Palma Egea

Secretaria General Ministerio

Elkin Leonardo Pérez Zambrano

Viceministra de Minas

Sorrel Parisa Aroca Rodríguez

Director de Formalización Minera

Alexander Reina Otero

Supervisor del Convenio

Luis Alexander Sarmiento

Apoyo a la Supervisión

Martha Yaneth Montañez Chaparro
Ronnal Alexander Bello Bernal

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

Sede: Carrera 6 No. 76-103. Montería, Córdoba
PBX: +57 (4) 7904050; 57 (4) 7860381; 57(4) 7860151
Código Postal: 230002

Rector PhD.

Jairo Miguel Torres Oviedo

Vicerrector de Investigación y Extensión

PhD. Deivis Luján Rhenals

Director Proyecto

MSc. Roberth Paternina Uribe

Supervisor

MSc. Dairo Pérez Sotelo

Coinvestigador Asesor

PhD. José Luis Marrugo Negrete



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"



Energía



Contenido

1	Presentación	8
	Agradecimientos	9
	Introducción	10
2	PRINCIPIOS DE LA ECONOMÍA CIRCULAR EN LAS ETAPAS DE LA MINERÍA AURÍFERA ALUVIAL	13
3	BASES TÉCNICAS PARA LA APLICACIÓN DE LAS LINEAS ESTRATÉGICAS DE ECONOMÍA CIRCULAR EN LAS ETAPAS DE LA MINERÍA AURÍFERA ALUVIAL	21
	3.1 MARCO CONCEPTUAL	23
	3.2 APLICACIÓN LÍNEAS ESTRATÉGICAS PARA LA ETAPA DE EXPLORACIÓN	30
	3.2.1 Lineamiento 1. Optimización en el muestreo	37
	3.2.1.1 Oportunidad de Economía Circular 1: Reducir número de apiques y zanjas, disminuir remoción de sedimentos	38
	3.2.2 Lineamiento 2. Optimización en la planeación del proyecto minero	41
	3.2.2.1 Oportunidad de Economía Circular 1: Minimizar intervención física del cauce y planicie aluvial	41
	3.2.2.2 Oportunidad de Economía Circular 2: Reducción de estériles en la extracción del mineral oro	43
	3.2.3 Lineamiento 3. Estrategias de anticipación y prevención de impactos ambientales residuales desde la exploración aluvial	46
	3.2.3.1 Oportunidad de Economía Circular 1: Manejo del agua con control de sedimentos desde la exploración de oro aluvial para anticipar y prevenir impactos ambientales residuales	47
	3.2.4 Lineamiento 4. Modelamiento y gestión inteligente de información	53
	3.2.4.1 Oportunidad de Economía Circular 1: Reducción de la huella hídrica y ocupación territorial mediante optimización y análisis con herramientas SIG	53
	3.3 APLICACIÓN LÍNEAS ESTRATÉGICAS PARA LA ETAPA DE CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE	54
	3.3.1 Lineamiento 5. Ejecutar el plan de obras con manejo eficiente de materiales	55

3.3.1.1 Oportunidad de Economía Circular 1: Aprovechamiento de materiales generados en el proceso de infraestructura aluvial	55
3.3.1.2 Oportunidad de Economía Circular 2: Construcción modular y desmontable de infraestructura	56
3.3.1.3 Oportunidad de Economía Circular 3: Uso de áridos reciclados y materiales locales en vías, plataformas y obras hidráulicas	56

3.4 APLICACIÓN LÍNEAS ESTRATÉGICAS PARA LA ETAPA EXPLOTACIÓN Y BENEFICIO EN ORO ALUVIAL 59

3.4.1 Lineamiento 6. Optimización del proceso de explotación y beneficio con eficiencia tecnológica	59
3.4.1.1 Oportunidad de Economía Circular 1: Enfoque integral de optimización del proceso	67
3.4.1.2 Oportunidad de Economía Circular 2: Uso eficiente del agua con recirculación y control de sólidos en el proceso de explotación y beneficio	69
3.4.1.3 Oportunidad de Economía Circular 3: Aprovechamiento de aguas lluvias. Captación con atrapanieblas	70
3.4.2 Lineamiento 7. Valorización de subproductos	73
3.4.2.1 Oportunidad de Economía Circular 1: Aprovechar los relaves generados en el proceso de beneficio	74
3.4.2.2 Oportunidad de Economía Circular 2: Simbiosis industrial para arenas, gravas y concentrados pesados	74
3.4.2.3 Oportunidad de economía circular 3: Relaves históricos con mercurio	83

3.5 APLICACIÓN LÍNEAS ESTRATÉGICAS PARA LA ETAPA DE CIERRE DE MINA DE ORO DE ALUVIÓN 85

3.5.1 Lineamiento 8. Restauración inmediata con manejo circular del agua	85
3.5.1.1 Oportunidad de Economía Circular 1: Cero excavaciones abiertas y cero descargas directas	85
3.5.1.2 Oportunidad de Economía Circular 2: Reconversión paisajística y uso del suelo	88

3.6 APLICACIÓN LÍNEA ESTRATÉGICA TRANSVERSAL PARA TODAS LAS ETAPAS MINERAS 92

3.6.1 Lineamiento 9. Establecer indicadores de monitoreo y verificación	92
--	----



GLOSARIO	96
Fichas técnicas	100
Bibliografía	111

Presentación

La Política Nacional de Formalización Minera establece que la formalización, como política de Estado debe entenderse como un proceso continuo de mejoramiento dirigido a comunidades mineras tradicionales, que ejercen su actividad bajo el amparo de un título minero y cuenten con instrumento ambiental aprobado.

En alineación con el Plan Nacional de Desarrollo, especialmente su artículo 231 y decreto reglamentario, se hace necesario desarrollar y fortalecer las estrategias y los esfuerzos en torno a los Distritos Mineros Especiales para la Diversificación Productiva, de tal forma que se generen acciones hacia el desarrollo productivo no extractivo en los territorios, respetando el ambiente y a las comunidades, para lo cual se requiere contar con recursos que permitan adelantar dichas estrategias.

De acuerdo con la Ley 2232 de 2022, la economía circular hace referencia a un modelo económico basado en sistemas de producción y consumo que promueven la eficiencia en el uso de los materiales, agua y energía, teniendo en cuenta la capacidad de recuperación de los ecosistemas y el uso circular de flujos de materiales a través de la innovación tecnológica, colaboración entre actores y modelos de negocio que responden a los fundamentos del desarrollo sostenible. Continúa la Ley señalando que su objetivo propenderá por el mantenimiento del valor de los productos, los materiales y los recursos, de tal forma que se mantengan durante el mayor tiempo posible en la economía, así como la reducción en la generación de residuos.

Por otro lado, el artículo 12 de la Ley 2250 de 2022, *“Por medio del cual se establece un marco jurídico especial en materia de legalización y formalización minera, así como para su financiamiento, comercialización y se establece una normatividad especial en materia ambiental”*, establece el marco normativo para la economía circular en el sector minero para fomentar mejores prácticas que promuevan la circularidad de los flujos de materiales y la extensión de su vida útil a través de la implementación de la innovación tecnológica, alianzas y colaboraciones entre actores y el impulso de modelos de negocio que responden a los fundamentos del desarrollo sostenible.

En este sentido, uno de los objetivos prioritarios del Estado es la implementación de estrategias de economía circular en actividades mineras, incentivando la reducción, reutilización y reciclaje de materiales, así como la inclusión de tecnologías limpias y prácticas sostenibles, especialmente en los territorios con presencia de minería artesanal y de pequeña escala.

Por otro lado, la economía circular en el sector minero busca reducir la presión sobre los ecosistemas mediante la optimización del uso de recursos, la reincorporación de materiales al ciclo productivo, y la valorización de residuos. En el contexto de la minería, esto se traduce en:

- Reducción hasta llegar a la eliminación total de sustancias tóxicas.
- Recuperación y reutilización de materiales valiosos contenidos en relaves o residuos (si aplica).
- Implementación de tecnologías limpias para mejorar la eficiencia extractiva.
- Rehabilitación de pasivos ambientales a través de modelos regenerativos.

Estas acciones contribuyen a mitigar la degradación de suelos, cuerpos de agua y biodiversidad, especialmente en zonas de alta sensibilidad ambiental como cuencas hidrográficas y ecosistemas estratégicos.

Un proyecto de economía circular liderado desde el Ministerio de Minas y Energía permitiría:

- Fortalecer la sostenibilidad de la formalización con enfoque diferencial y territorial.
- Transferir tecnología y conocimiento para mejorar prácticas productivas.
- Generar alternativas económicas y productivas complementarias o derivadas del uso eficiente de los recursos, en el marco de la diversificación productiva.
- Mejorar la calidad de vida de comunidades mineras mediante esquemas de trabajo digno, reducción de riesgos en salud y seguridad, y acceso a mercados responsables.

En virtud de lo expuesto, la Universidad de Córdoba se constituye en un aliado estratégico para el desarrollo del proyecto de “Asistir a comunidades mineras y/o entes territoriales en la identificación, análisis e implementación de alternativas de economía circular y/o de producción más limpia en operaciones mineras”, en los términos anteriormente planteados.

En Colombia es muy común el bajo nivel de recuperación del metal precioso, no mayor al 60 %, por el poco conocimiento del depósito y la deficiente aplicación de las técnicas de explotación, amalgamación y cianuración. Esto significa que cerca del 40 % del oro extraído se pierde a relaves.

Con el fin de dar cumplimiento a lo establecido por el Gobierno Nacional y en virtud de las funciones otorgadas al Ministerio, en particular a la Dirección de Formalización Minera, se estructuró el proyecto de inversión denominado “Construcción e implementación de estrategias para el desarrollo de la actividad minera de pequeña escala bajo un modelo de desarrollo colaborativo”, el cual se encuentra incluido en el Sistema Unificado de Inversiones y Finanzas Públicas – SUIFP con el Código BPIN: 202300000000362, horizonte 2024-2030 y cuyo objetivo principal es mejorar el desempeño de las operaciones mineras bajo una visión integral con el ambiente y con el territorio. Es así como para el logro de dicho objetivo se cuenta con las actividades propuestas con el Convenio Interadministrativo GGC 1860-2025 que tiene como objeto: ‘Aunar esfuerzos para identificar, analizar e implementar alternativas de economía circular en operaciones mineras de pequeña escala en distritos mineros para la diversificación productiva’, suscrito entre el Ministerio de Minas y Energía y la Universidad de Córdoba, para cumplir con dichos compromisos y necesidades.

Agradecimientos

El Ministerio de Minas y Energía y la Universidad de Córdoba, a través del Grupo de Investigación de Agua, Química Aplicada y Ambiental (GAQAA) y del Laboratorio de Toxicología y Gestión Ambiental, expresan su agradecimiento a todas las personas que participaron en la elaboración de la presente guía, las cuales se encuentran relacionadas en el listado de participantes.

De igual manera, agradecen a los pequeños mineros que se vincularon activamente al proceso de aplicación de estas guías de economía circular, cuyo contenido resulta de alto interés para la implementación de alternativas sostenibles en las operaciones mineras.

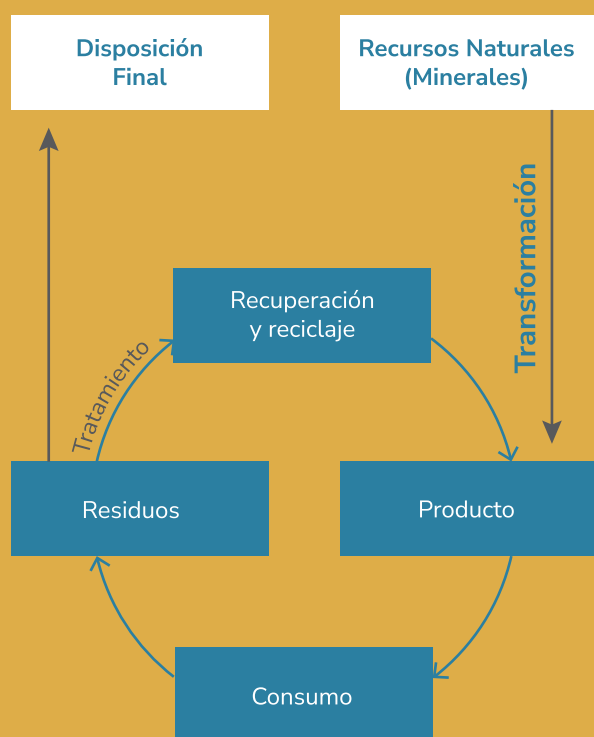


Introducción

El presente documento, denominado Guía de economía circular para las etapas mineras de oro aluvial, se elaboró en el marco del Convenio Interadministrativo GGC 1860–2025, suscrito entre el Ministerio de Minas y Energía y la Universidad de Córdoba, cuyo objeto es identificar, analizar e implementar alternativas de economía circular en operaciones mineras de pequeña escala en distritos mineros, orientadas a la diversificación productiva. En este contexto, la guía se concibe como un instrumento técnico de apoyo para el fortalecimiento de prácticas mineras más sostenibles y responsables.

La minería es una actividad estratégica para el desarrollo económico, cuya viabilidad depende de la incorporación de criterios de sostenibilidad y de la transición hacia modelos de economía circular.

Figura 1.1. El papel de la recuperación y el reciclado en el ciclo de vida de los minerales



Fuente: Modificado de Walter Pardavé Livia, Reciclado industrial de metales. Una aproximación, 2006.

El ciclo de vida de los minerales se desarrolla de acuerdo con las siguientes etapas (Figura 1.1): materia prima, transformación, producto, utilización, residuo, tratamiento del residuo y disposición final. Como lo menciona Walter Pardavé Livia en su siguiente diagrama, “(...) a medida que el proceso de recuperación y reciclado sea más completo y eficaz, menos habrá que acudir a los recursos naturales primarios y menor será la repercusión de los residuos finales sobre el medio ambiente (...)”:

Dado el modelo de economía lineal que hoy se experimenta, surge la tendencia de la economía circular (EC) como un modelo que opera en todo el nivel organizacional. Así mismo, previene la contaminación ambiental, protege el entorno ambiental y ofrece una ruta a la sostenibilidad, cuyo funcionamiento es regenerativo y restaurador en un sistema cerrado¹. Las prácticas de la EC no son ajenas a las operaciones mineras, pues su patrocinio se entreteje como oportunidades para minimizar y otorgar valor a los residuos, mejorar la eficiencia en las operaciones mineras (extracción y beneficio), y remediar los sitios mineros con fines productivos a futuro².

Tradicionalmente, el sector minero ha operado bajo un modelo de economía lineal, caracterizado por la extracción de recursos naturales, su transformación y

uso, y la disposición final de los residuos, sin un aprovechamiento sistemático de los materiales generados. En el marco de la normativa ambiental y minera vigente en Colombia, la explotación de oro de aluvión especialmente en operaciones de pequeña escala enfrenta desafíos relevantes relacionados con el uso eficiente del recurso hídrico, la gestión de relaves y estériles, y la recuperación de áreas intervenidas. Estas

1 Según Mang y Reed (2015), el diseño regenerativo es un sistema de tecnologías y estrategias basado en el entendimiento del trabajo profundo de los ecosistemas. Este elabora diseños para regenerar, más que agotar, los sistemas de soporte vitales y los recursos dentro de los conjuntos socioecológicos. Por otro lado, el diseño restaurativo es un sistema de diseño que combina el retorno de sitios contaminados, degradados o dañados, y les otorga un estado de salud aceptable a través de la intervención humana, con diseños que reconectan a las personas con la naturaleza.

2 La economía circular en la minería peruana. Dolfer Julca Zuloeta. Naciones Unidas CEPAL. Cooperación Alemana. GIZ.

problemáticas requieren enfoques integrales que permitan mejorar el desempeño ambiental y productivo de la actividad minera, en concordancia con las disposiciones regulatorias y los lineamientos de la política pública nacional.

En este sentido, la economía circular se consolida como una herramienta estratégica al promover la optimización de los recursos, la reducción de residuos y el reaprovechamiento de materiales y subproductos generados durante el proceso minero (DNP-CONPES 4011: Política Nacional de Economía Circular, 2020; MADS Resolución 1256, 2021).

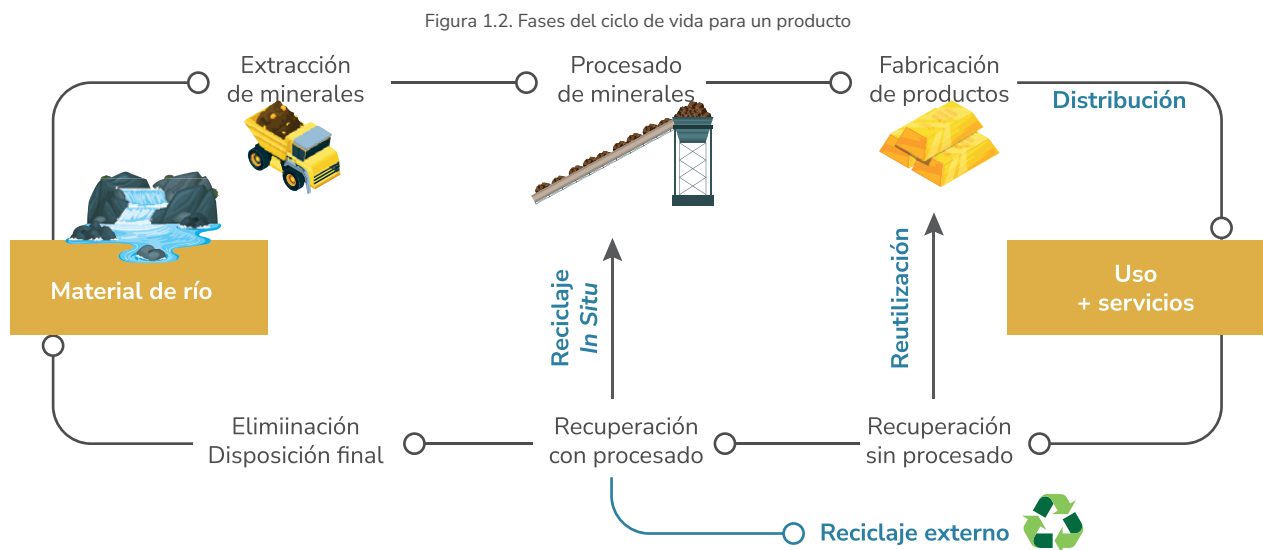
La economía circular cuenta con múltiples definiciones a nivel internacional, pero en términos generales se entiende como un modelo de desarrollo que busca desacoplar el crecimiento económico del consumo intensivo de recursos naturales, promoviendo sistemas productivos eficientes, regenerativos y resilientes. A diferencia del modelo lineal tradicional de extraer–producir–desechar, la economía circular propone cerrar los ciclos de materiales, agua y energía, extendiendo la vida útil de los recursos y reduciendo la generación de residuos y emisiones.

Bajo este contexto, se han propuesto distintas definiciones del concepto, entre las cuales se destacan:

"Es un sistema industrial que es restaurador o regenerativo por intención y diseño. Reemplaza el concepto de "fin de vida" con uno de restauración, cambia hacia el uso de energía renovable, elimina el uso de químicos tóxicos que perjudican la reutilización, y apunta a la eliminación de desechos a través del diseño superior de materiales, productos y sistemas" (Fundación Ellen MacArthur, 2013, p.7).

Consiste en utilizar los recursos de manera más eficiente a lo largo de su ciclo de vida, al cerrar, extender y estrechar los circuitos de materiales que podrían resultar en la disociación del consumo de materias primas necesarias para el crecimiento económico (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico. OECD, 2018).

En la figura 1.2 se presenta una figura que relaciona los conceptos antes mencionados, alineado con El Plan Nacional de Desarrollo 2018 – 2022 *"Pacto por Colombia, Pacto por la Equidad"*, donde se introduce la **Estrategia nacional de economía circular**, elementos para fortalecer el modelo de desarrollo económico, ambiental y social del país, a partir de la lógica de *"producir conservando y conservar produciendo"* (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019).



Fuente: Adaptada de Walter Pardavé Livia, Reciclado industrial de metales. Una aproximación, 2006 y de Capuz y otros, España, 2001. Convenio interadministrativo GGC 934-2024.

Las prácticas de economía circular son particularmente pertinentes en la minería de oro aluvial, donde grandes volúmenes de arenas, gravas y concentrados pesados son movilizados durante la exploración y explotación. La implementación de estrategias circulares permite transformar estos materiales, tradicionalmente considerados estériles, en potenciales subproductos, al tiempo que se reduce la huella hídrica, se previenen daños residuales ambientales y se mejora la perspectiva social de la actividad minera en las poblaciones vecinas (Smart Prosperity Institute, 2020; MinMinas et al., 2023).

En este contexto, la presente guía tiene como propósito orientar al pequeño minero hacia una comprensión integral del ciclo de vida del producto minero, en este caso el oro de aluvión, incorporando los principios de economía circular dentro del planeamiento minero y ambiental que se presenta ante las autoridades competentes. A lo largo de las distintas etapas del ciclo minero, se abordan lineamientos técnicos aplicables y alternativas para la identificación y el aprovechamiento de residuos y subproductos como segundas materias primas, con el fin de mejorar la eficiencia de la actividad, reducir los impactos sociales y ambientales y maximizar los beneficios para el titular minero y su entorno. Desde este enfoque, la guía plantea oportunidades de transformación y reconversión productiva que permiten avanzar hacia una minería más responsable, sostenible y articulada con el desarrollo del territorio.



The background image shows a mining operation in a hilly, arid landscape. An orange excavator is positioned on a dirt path, with its arm extended. A small, open-sided truck is parked nearby. The foreground is filled with a large pile of light-colored, rocky material. The entire image is overlaid with a semi-transparent orange filter.

2

PRINCIPIOS DE LA ECONOMÍA CIRCULAR EN LAS ETAPAS DE LA MINERÍA AURÍFERA ALUVIAL

La Revolución Industrial transformó profundamente la forma en que el mundo se desarrollaba, intensificando la explotación de los recursos naturales, modificando los patrones de consumo y fortaleciendo las redes logísticas y de transporte. Este proceso, impulsado por el avance tecnológico, permitió un aumento significativo en la escala de producción, en el cual la minería ha desempeñado un papel fundamental como parte integral del desarrollo industrial (Deane, 1979; Allen, 2009; Smil, 2010; UNEP, 2011).

El desarrollo industrial se ha basado históricamente en un modelo productivo lineal, caracterizado por el incremento sostenido de la extracción, producción y consumo de recursos. Sin embargo, desde la segunda mitad del siglo XX se ha evidenciado una creciente preocupación por los impactos ambientales asociados a este modelo, como el cambio climático y la degradación de los ecosistemas, sustentada en estudios científicos y análisis institucionales. Estos antecedentes han puesto de manifiesto la necesidad de transitar hacia enfoques productivos más sostenibles, que optimicen el uso de los recursos y reduzcan los impactos ambientales.

Diversos enfoques de economía circular plantean que, en los sistemas naturales, no existe el concepto de residuo en sentido estricto, ya que los materiales se transforman y reincorporan continuamente en nuevos ciclos biogeoquímicos. Este principio, ampliamente difundido por expertos en sostenibilidad como Alfredo Gallardo, constituye una base conceptual valiosa para promover el aprovechamiento eficiente de los recursos. No obstante, en el caso de los relaves de minería aurífera este enfoque debe aplicarse con precaución. La posible presencia de metales pesados y riesgos geoquímicos hace obligatorio realizar una caracterización fisicoquímica y ecotoxicológica previa, que permita determinar si el material es apto para su valorización o requiere manejo como residuo peligroso.

En la siguiente tabla vemos el comparativo y sus desafíos:

Ante estas circunstancias es que nace el concepto de Economía Circular: “La EC se basa en el ciclo de la naturaleza y tiene como objetivo el bajo consumo de materias primas, energía y desperdicio cero, caracterizándose por generar bajas emisiones contaminantes y alta eficiencia de los recursos, cuyo desarrollo ayudará para mejorar la protección del medio ambiente no solo a nivel regional sino también a nivel mundo, lo que hace que la economía circular forme parte de una estrategia integral para lograr el desarrollo sostenible (Laple, 2007, pp. 9-10)”.	Tabla 2.1. Comparación y desafíos economía lineal vs. Economía circular		
	Aspecto	Economía lineal	Economía circular
	Objetivo Principal	Maximizar el beneficio económico a corto plazo	Desvincular el crecimiento económico del consumo de recursos y regenerar sistemas naturales.
	Gestión de residuos	Desecho al final del ciclo	Reducción, Reutilización, Reparación, Recuperación, Valorización, Regeneración y Sustitución” con innovación
	Eficiencia	Baja eficiencia, con pérdida de material de baja ley y en los procesos	Alta eficiencia, con aprovechamiento de recursos y optimización de procesos
	Retos	Contaminación y agotamiento de recursos	Obstáculos legislativos, necesidad de inversión y cambio de mentalidad

Con base en lo antes mencionado, el objetivo de la presente guía es pasar de un modelo de economía lineal a uno circular de “Reducir, Reutilizar, Reparar, Recuperar, Revalorizar, Regenerar/Rehabilitar/Restaurar y Reemplazar” (Ver Figura 2.1. Principios de la Economía Circular) analizando las etapas de las operaciones de minería de oro, tal como se ilustra en la siguiente figura 2.3. Transición de un modelo tradicional a un modelo de Economía Circular Sostenible en la Actividad Minera, enfocando en extender la vida útil de los recursos, innovar en procesos, valorizar los residuos mineros y fomentar la colaboración entre diferentes actores. Esto implica pasar del modelo “tomar, producir desechar” a uno donde los materiales de mina puedan permanecer en el ciclo productivo o de transformación o beneficio el mayor tiempo posible teniendo procesos eficientes, minimizando los residuos y maximizando el valor.

Figura 2.1. Principios de la economía circular

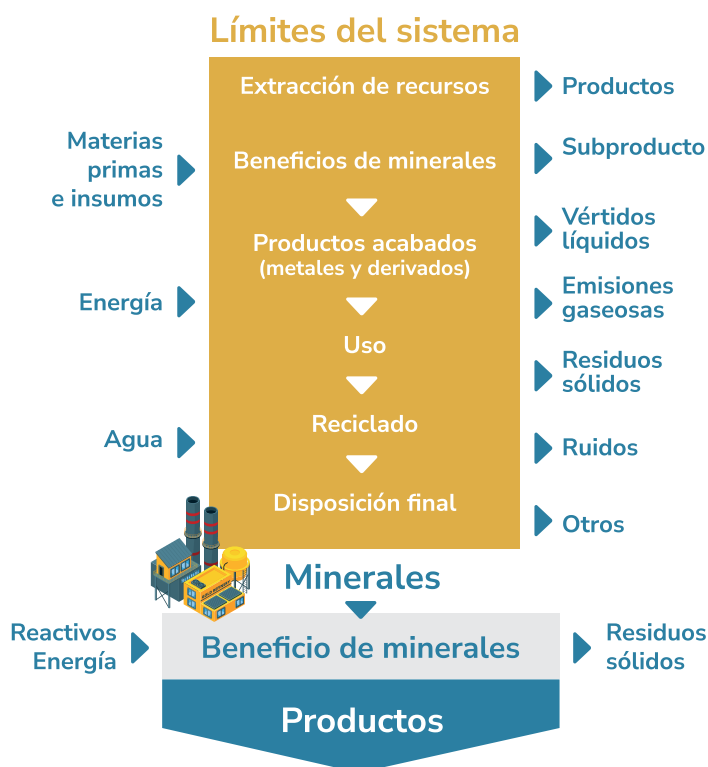


Las fuentes de suministro en la actividad minera deben ser de la **reutilización de los recursos**, como se puede observar en el siguiente esquema general de un análisis de ciclo de vida aplicado a la industria del procesamiento de minerales propuesto por el autor Walter Pardavé Livia, que conlleva a una recopilación y evaluación de las entradas y salidas y los potenciales impactos medioambientales del sistema del producto a lo largo de su ciclo de vida: (ver figura 2.2. Proceso de beneficio de minerales).

Dado lo mencionado anteriormente, se dan las siguientes **ESTRATEGIAS** claves para la transición:

- Incorporar la circularidad desde la concepción del proyecto minero para prolongar la vida útil de los recursos desde el principio, donde se incorporen o se integren las variables ingenieriles (técnicas) con la dinámica biológica de la naturaleza y de los seres vivos. (Ellen MacArthur Foundation (2019, United Nations Environment Programme – UNEP (2020), Azapagic, A. (2004).
- Propiciar la Economía Circular Colaborativa, es decir la oportunidad que surge a partir de los residuos o elementos residuales de la industria minera de oro junto con las actividades humanas o del entorno. (European Commission (2020), Van Buren et al. (2016), CEPAL (2021)).
- Pensar más en la Economía Funcional, maximizando la eficiencia de los procesos para optimizar el uso de materiales e insumos. (OCDE (2019))
- Si la naturaleza es dinámica y cíclica, los costos no deben mirarse como gastos del presente, si no como inversión del futuro, ya que es difícil estimar en términos de ahorro, la eficiencia de la naturaleza. (TEEB (2010), Daily et al. (1997)).
- Economía Circular no es sólo aprovechar los desechos que generamos, también es aprovechar lo que la naturaleza nos brinda de modo gratuito. Solo tenemos que observar y entender. (Ellen MacArthur Foundation (2017), Costanza et al. (2014)).
- Continuar impulsando la investigación aplicada y el desarrollo de soluciones tecnológicas y modelos de negocios circulares que sean económicamente viables, socialmente aceptables y ambientalmente sostenibles como las oportunidades que aquí en esta guía se presentan y se exponen de acuerdo a estudios realizados en diferentes zonas del país y a nivel internacional.

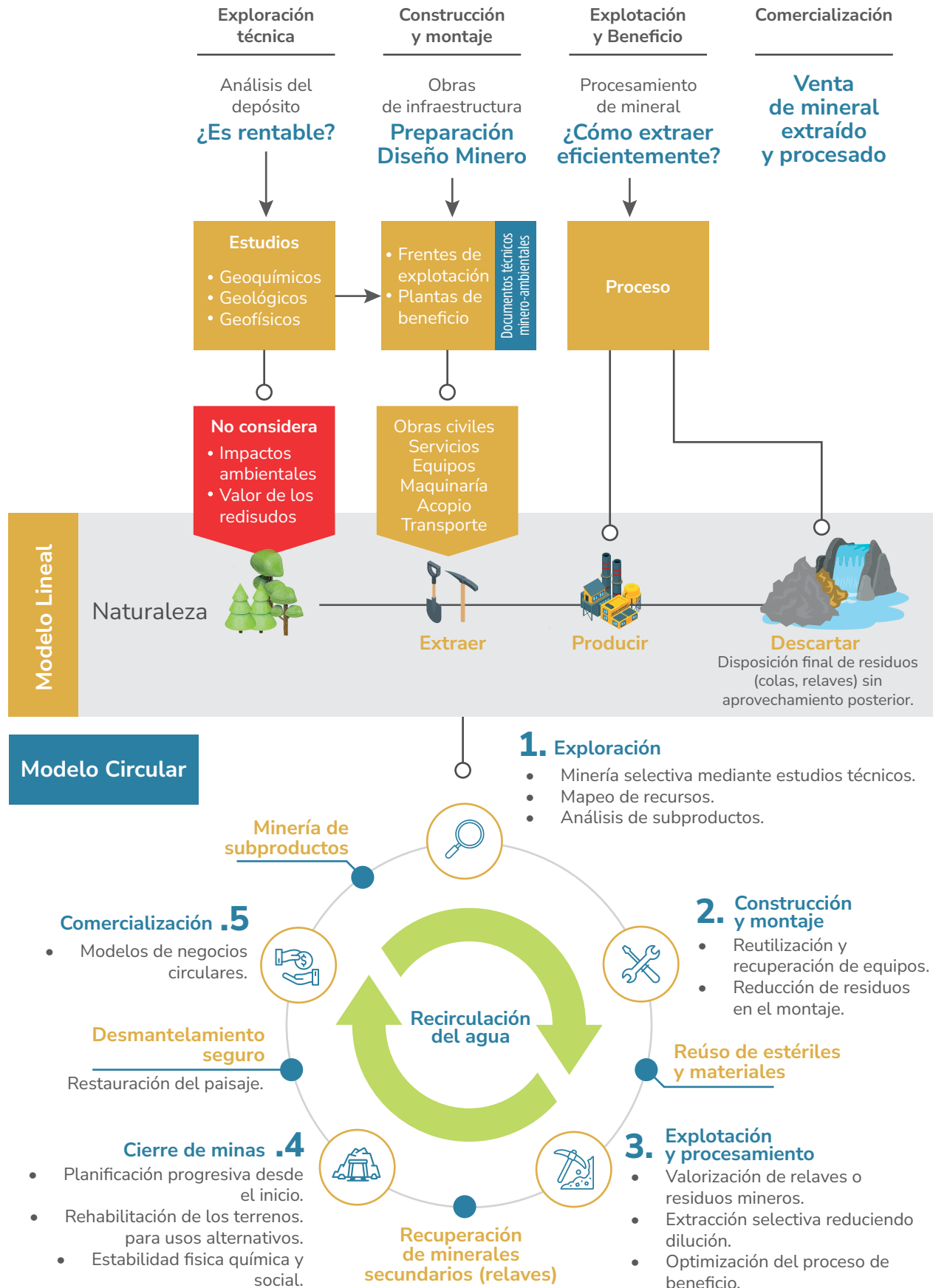
Figura 2.2. Proceso de beneficios de minerales



Fuente: Adaptada de Walter Pardavé Livia, Reciclado industrial de metales. Una aproximación, 2006 y de Capuz y otros, España, 2001.



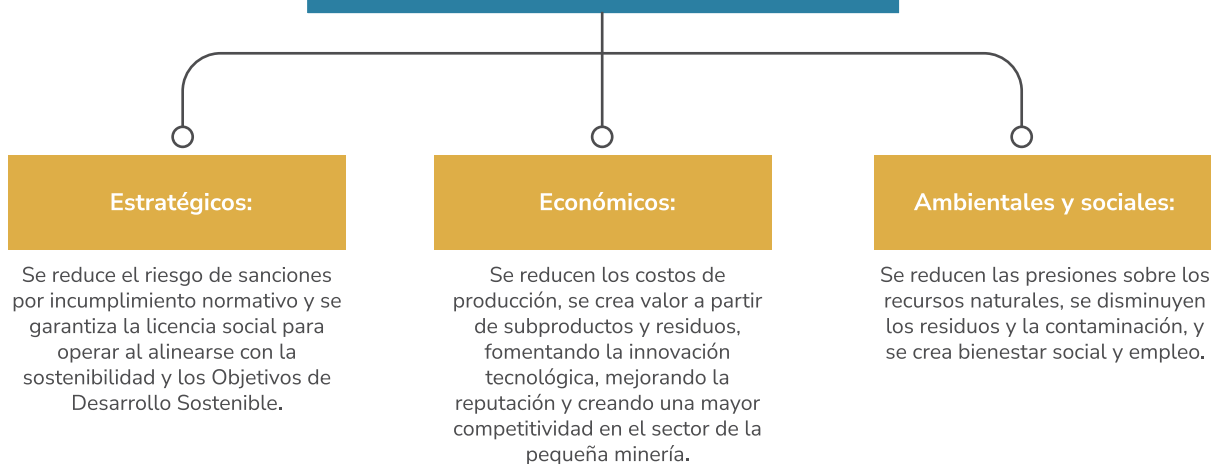
Figura 2.3. Transición de un modelo tradicional a un modelo de economía circular sostenible en la actividad minera



Dichas estrategias, conllevan a unas **OPORTUNIDADES**:

- **Diseño circular:** planificar las operaciones mineras con la economía circular en mente, pensando en la vida útil de las instalaciones y en cómo los materiales pueden ser reutilizados al final de su vida útil.
- **Materiales sostenibles:** priorizar el uso de materiales reciclados, ya sea para la construcción de la mina o para infraestructuras como carreteras, banquetas y bases de la mina o del lugar donde se llevará a cabo la etapa de explotación y beneficio. En lugar de depender completamente del cemento y agregados vírgenes para las estructuras, se utilizaría por ejemplo concreto con agregados reciclados y otros materiales de construcción de desecho para las bases, sub-bases y otros elementos no estructurales.
- **Recuperación de residuos:** desarrollar tecnologías y procesos u optimizar las existentes, para extraer minerales valiosos de los relaves y otros residuos, transformándolos en nuevas fuentes de materia prima. Los residuos de la minería (relaves) se considerarían una nueva “reserva minera”, donde se buscarían y extraerían minerales aún presentes para su procesamiento y reintroducción en la cadena productiva.
- **Simbiosis industrial:** crear “encadenamientos productivos”, donde los residuos de la minería (como las escorias) se conviertan en materia prima para otras industrias, como la construcción, agricultura, etc.
- **Logística inversa:** se implementaría dicha logística para recuperar y reutilizar componentes de maquinaria.

Dichas oportunidades permitirán dar cumplimiento a **BENEFICIOS** de la transición como son:



Bajo este marco conceptual, la presente Guía de Economía Circular aplicada a la Minería de Oro Aluvial adopta y operacionaliza los principios de “Reducir, Reutilizar, Reparar, Recuperar, Revalorizar, Regenerar/Rehabilitar/Restaurar y Reemplazar, ajustándolos a las condiciones técnicas, operativas y ambientales propias del proyecto minero. La aplicación de estos principios orienta la actividad minera hacia un modelo productivo más sostenible y resiliente, al optimizar el uso de los recursos naturales, mejorar la eficiencia de los procesos y reducir las presiones ambientales asociadas a la minería de oro aluvial. No obstante, es necesario que estos principios puedan ser implementado de manera efectiva en las operaciones mineras, es necesario traducirlos en lineamientos técnicos y operativos que orienten la toma de decisiones, la planificación de actividades y la gestión de los recursos a lo largo del ciclo minero, que en el siguiente capítulo se abordará.





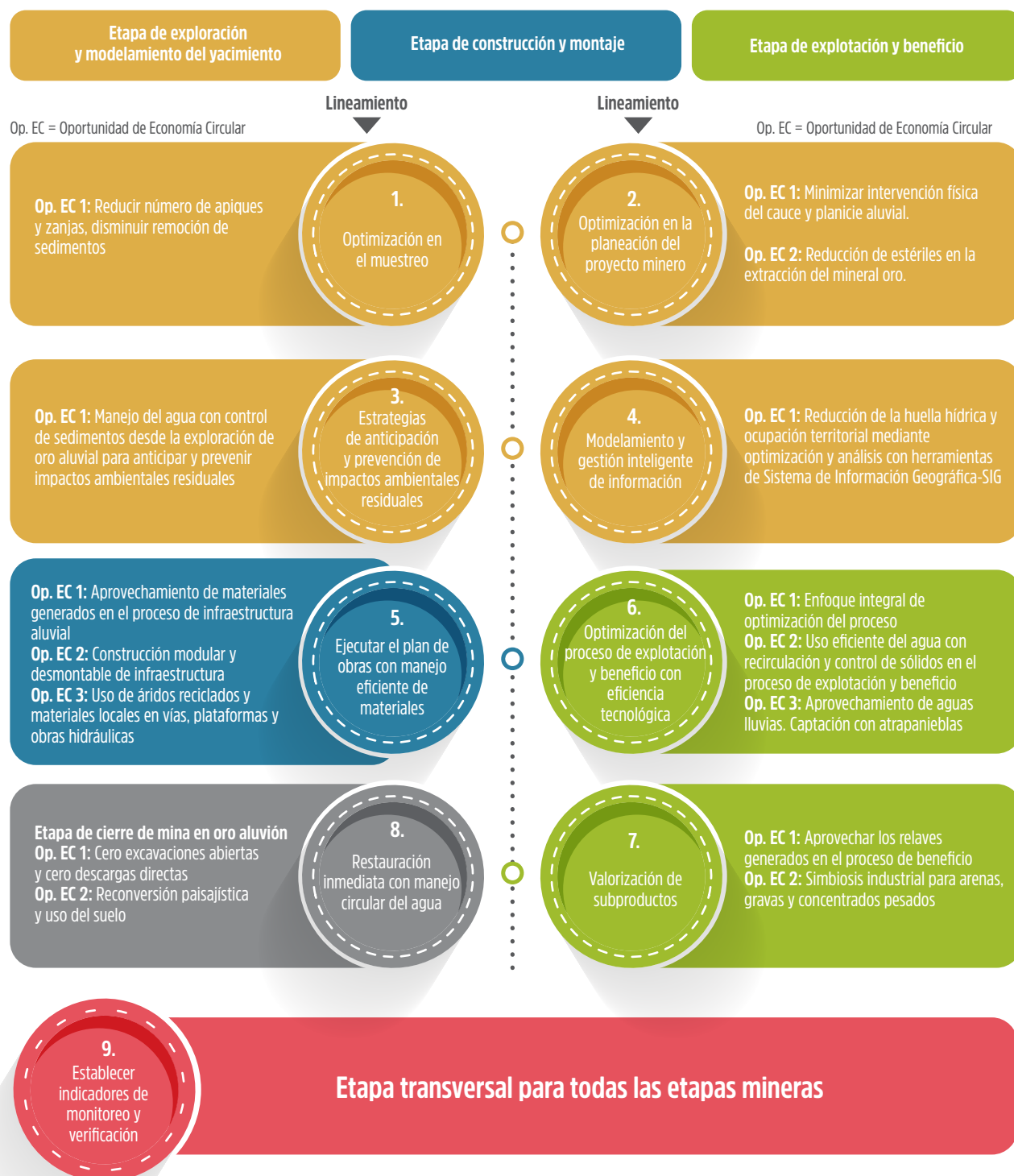


3

**BASES TÉCNICAS PARA
LA APLICACIÓN DE LAS
LINEAS ESTRATÉGICAS
DE ECONOMÍA
CIRCULAR EN LAS
ETAPAS DE LA MINERÍA
AURÍFERA ALUVIAL**

Las líneas estratégicas o lineamientos definidos en el presente documento constituyen la base para la identificación de oportunidades de economía circular en cada una de las etapas de la minería de oro aluvial. A partir de estos lineamientos, es posible reconocer prácticas, tecnologías y alternativas de gestión que permiten aplicar los principios de la economía circular de manera concreta, considerando las particularidades técnicas y operativas de cada fase del ciclo minero.

Figura 3.1. Lineamientos de economía circular en minería de oro de aluvión



3.1 MARCO CONCEPTUAL

Un río es una corriente natural de agua que nace en la montaña, baja por gravedad, transporta arena, grava y piedras y deposita materiales cuando pierde fuerza, es por ello, que la minería aluvial no es sacar arena al azar sino entender cómo el río trabaja como una “mesa gravimétrica natural” toda vez que el río mueve, clasifica, concentra y deposita el oro.

Si entiendes el río, entiendes dónde está el oro. Por consiguiente, se darán estas bases conceptuales iniciales para entender y adentrarnos a los lineamientos y oportunidades de economía circular que tenemos para esta guía.

Figura 3.2. Las partes de un río



En la siguiente figura 3.3 podemos apreciar que el río transporta sedimentos desde zonas altas. Cuando la velocidad disminuye, deposita primero los materiales más pesados, lo cual el oro se concentra en puntos específicos del cauce que con el tiempo, se forman placeres aluviales explotables.

La exploración y explotación responsable de oro aluvial requiere comprender el funcionamiento integral del sistema fluvial. La distribución y concentración del oro no es aleatoria, sino que está controlada por cuatro componentes técnicos fundamentales:

- La geomorfología del río (formas del relieve fluvial o formas del terreno).
- La sedimentología del depósito aluvial (estructura y organización de los materiales, es decir, cómo están organizadas las capas).
- La hidráulica fluvial (dinámica del flujo y energía del agua, es decir cómo se mueve el agua).
- Nivel freático (superficie superior de la zona saturada del subsuelo).

El entendimiento articulado de estos cuatro elementos permite optimizar el muestreo, reducir la intervención física y aplicar criterios de economía circular en cada etapa del proyecto minero.

a) Geomorfología fluvial

La geomorfología fluvial estudia las formas del terreno generadas por la acción del agua corriente. En sistemas aluviales, estas formas determinan dónde se erosionan, transportan y depositan los sedimentos.

Los elementos geomorfológicos relevantes son (ver figura 3.4):

Entre los principales elementos geomorfológicos asociados a la concentración de oro aluvial se encuentran:

- **Canal activo:** zona por donde circula el flujo principal del río.
- **Barras internas:** depósitos sedimentarios formados en la parte interna de los meandros.

- **Barras laterales:** acumulaciones de sedimentos adyacentes al canal.
- **Planicie aluvial:** superficie plana adyacente al río que se inunda periódicamente.
- **Antiguos cauces (paleocauces):** trayectorias abandonadas por el río debido a procesos naturales de migración lateral.
- **Terrazas aluviales:** antiguos niveles del río que quedaron elevados respecto al cauce actual.

Por otro lado, en zonas de muy alta concentración aurífera en regiones como el Chocó y el Cauca tenemos:

- **Abanicos aluviales:** es como un abanico abierto de sedimentos que deja el río al salir de la montaña. El agua venía con fuerza, de repente se abre el terreno y el río se “riega” y suelta material. Resultado: se forma una zona ancha con gravas, piedras y arena
- **Cono de deyección:** es parecido, pero más concentrado y empinado: sale de una quebrada o canal estrecho y se deposita material en forma de cono. Es más localizado, pero también muy bueno para buscar oro.

¿Por qué hay oro ahí?

Porque el río hace el trabajo por usted:

- Pierde fuerza ---> suelta lo pesado
- El oro, por ser pesado, cae primero
- Se va quedando entre las gravas

Es como si el río estuviera “lavando y concentrando” el oro naturalmente

¿Dónde buscar exactamente?

No todo el abanico tiene oro, busquelo en:

- Parte alta (cerca de la montaña)
- Cambios de pendiente
- Donde el agua pierde fuerza
- Gravas gruesas
- Donde hay piso duro (arcilla o roca)
- Canales viejos o activos dentro del abanico

Cuando un río baja de la montaña y llega a la planicie, pierde fuerza. Ahí es donde se forman los abanicos aluviales y los conos de deyección (ver figura 3.3).

Figura 3.3.
Abanico
aluvial y cono
de deyección

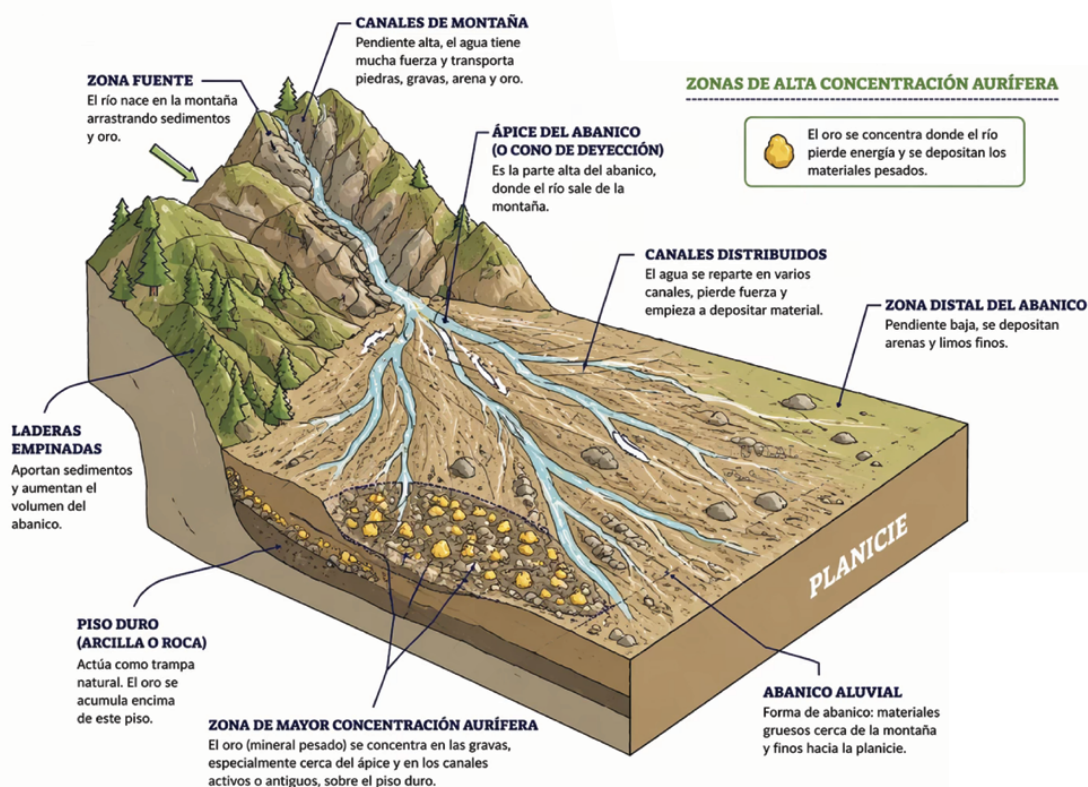


Figura 3.4. Elementos geomorfológicos asociados a la concentración de oro aluvial

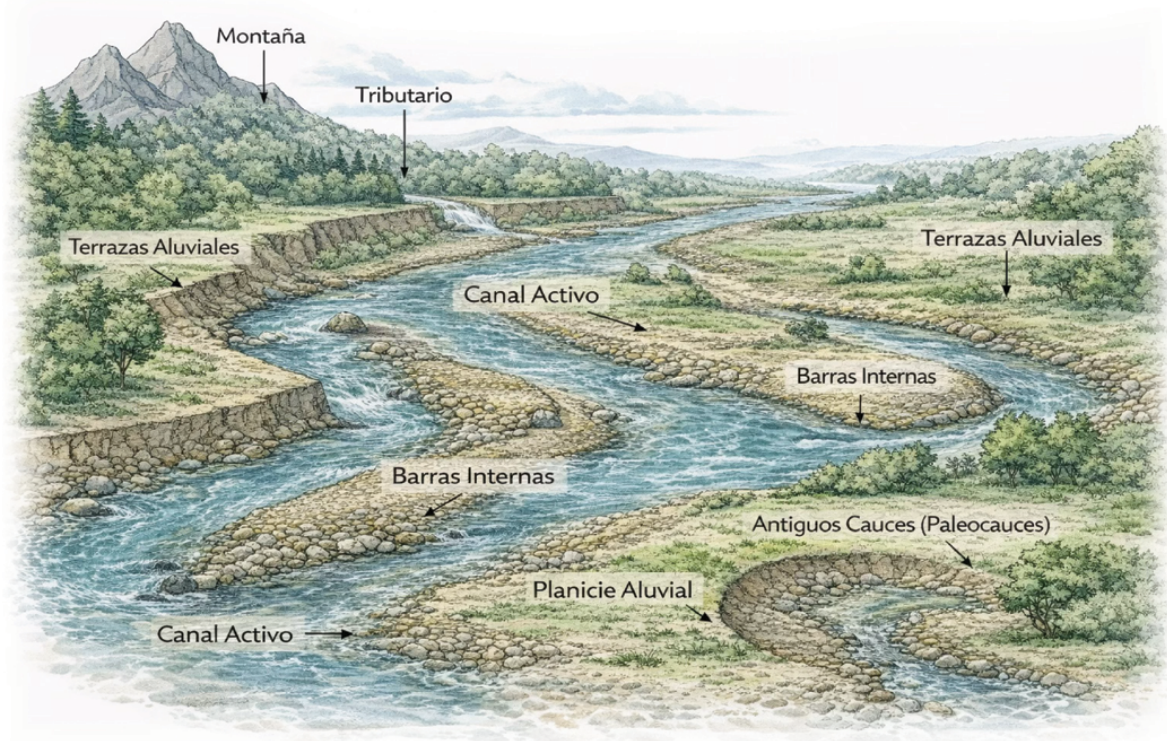
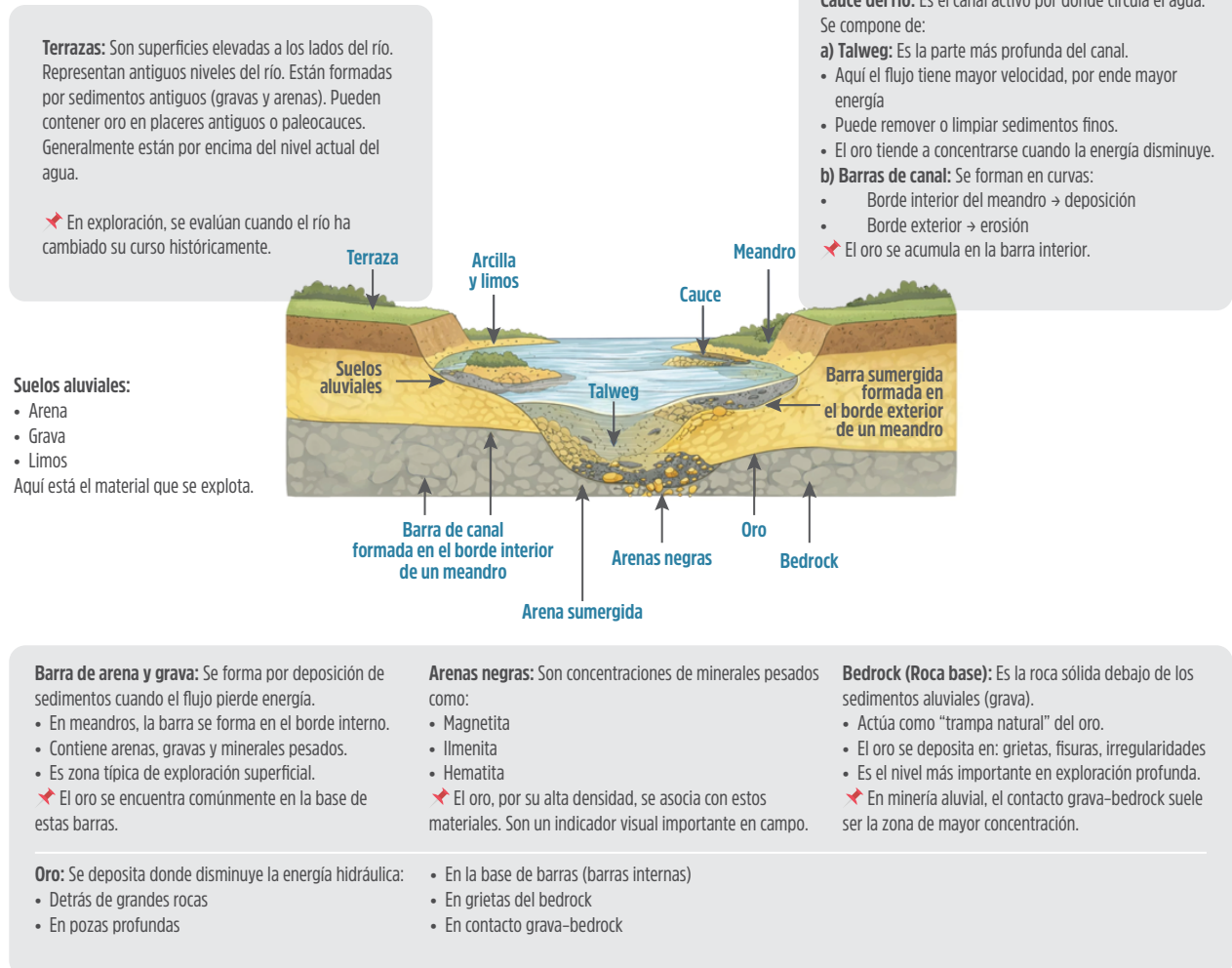


Figura 3.5. Conceptualización de un río en minería de oro aluvial.



Desde el punto de vista minero, estas formas condicionan la localización de zonas potencialmente auríferas, ya que reflejan áreas de deposición selectiva de sedimentos.

b) Sedimentología del depósito aluvial

La sedimentología no es más que entender cómo el río acomoda los materiales y en qué partes se queda el oro. Un depósito aluvial normalmente tiene capas así (de arriba hacia abajo):

1. Suelo orgánico (tierra negra)
2. Arenas y limos (material fino)
3. Gravas y piedras (cascajo)
4. Capa donde se concentra el oro
5. Arcilla dura o roca madre (el “piso”)

El oro, por ser pesado, baja hasta donde encuentra un “piso duro” y ahí se queda. Por eso el contacto entre grava y arcilla o roca es clave: es como una trampa natural. A continuación en la figura 3.6 se muestra un ejemplo de los yacimientos de oro del río Quito.

Cómo trabaja el río (clave para no excavar de más)

El río separa el material solo:

- Lo grueso (piedra) se queda primero
- Lo fino (arena, barro) se va con el agua
- Lo pesado (oro) se mete al fondo, donde el agua pierde fuerza

Por eso el oro aparece en:

- Fondos del canal
- Curvas internas
- Donde hay cambios de pendiente
- Donde hay “pisos duros”

Clave práctica: el “falso piso” (false bedrock):

A veces aparece una capa dura en la mitad, como:

- Arcilla muy compacta
- Piso endurecido
- Material pegado

Ese no es la roca madre, pero funciona igual:

- Detiene el oro
- Hace que se acumule encima

A eso se le llama: “falso bedrock” o pavimento intermedio

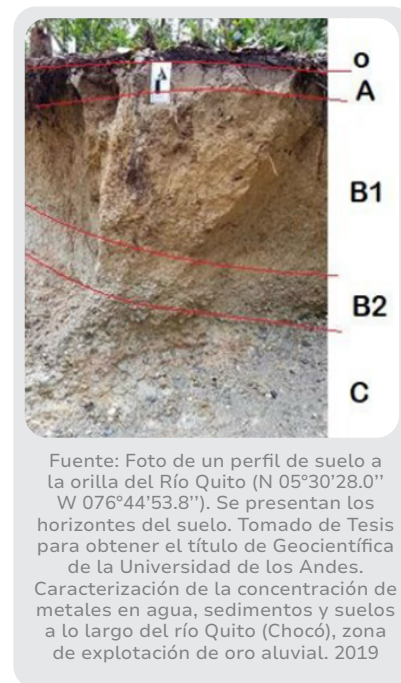
Cómo te ayuda esto (economía circular en la práctica)

Si entiendes bien las capas:

- Excavas solo donde hay oro
- Mueves menos material
- Usas menos agua
- No dañas tanto el río
- Trabajas más rápido y con menos costo

En la siguiente figura 3.7 se da una guía visual para campo con componentes importantes como: dónde muestrear, cómo identificar capas y dónde está el oro.

Figura 3.6. Ejemplo de sedimentología de un depósito aluvial



No siempre el mejor oro está en la roca, muchas veces está en el primer piso duro que encuentres.

- El oro se queda en pisos duros (arcilla o roca)
- Puede haber varias capas con oro
- El “falso piso” también concentra oro
- Entender esto evita excavar de más
- Es clave para una minería más eficiente y responsable

Figura 3.7. Componentes del suelo



c) Hidráulica fluvial

La hidráulica fluvial estudia el comportamiento del flujo de agua en el canal. Existen las siguientes variables principales que controlan la dinámica del río:

- Caudal
- Velocidad del flujo
- Pendiente longitudinal
- Rugosidad del lecho
- Sección transversal del canal

Estas variables determinan la capacidad del río para erosionar, transportar o depositar sedimentos.

La importancia de entender e integrar estos cuatro componentes en minería aluvial permite tener claridad de la concentración del oro aluvial coincidiendo la forma geomorfológica favorable, una arquitectura sedimentaria adecuada y una disminución de la energía hidráulica. Por lo tanto, la exploración técnica debe basarse en la lectura integrada del sistema fluvial y no en excavaciones extensivas sin criterio geomorfológico.

Existe la energía del sistema fluvial, permitiendo analizar la deposición de sedimentos, es decir, cuándo el río pierde energía —por ejemplo (ver figura 3.8), en: curvas internas, cambios de pendiente, zonas de ensanchamiento del canal y en la confluencias (unión de dos o más corrientes de agua, ríos) se favorece la deposición de sedimentos gruesos y la concentración de minerales pesados. Por el contrario, en zonas de alta energía se produce erosión y remoción de material previamente depositado.

Por otro lado, es importante en minería de oro aluvial conocer lo siguiente:

d) Nivel freático

El nivel freático es la superficie superior de la zona saturada del subsuelo. Es el punto donde:

- Los poros del suelo o sedimento están completamente llenos de agua.
- La presión del agua es igual a la presión atmosférica.

Por consiguiente, no es fijo y depende de varios factores como es:

Proximidad al río

Entre más cerca al cauce activo:

- Más alto el nivel freático.
- Mayor saturación del sedimento.

Época climática

- En temporada de lluvias, el nivel freático asciende.
- En temporada seca, desciende.

Puede variar varios metros dependiendo del régimen hidrológico.

Tipo de sedimento

- Gravitas gruesas ---> alta permeabilidad ---> nivel responde rápido.
- Arcillas ---> baja permeabilidad ---> agua retenida.

Topografía

En zonas bajas de planicie: El nivel freático es somero.

En terrazas altas: El nivel freático suele estar más profundo.

Conectividad hidráulica con el río

En sistemas aluviales activos: El nivel freático está hidráulicamente conectado al nivel del río.

Cuando el río crece ---> el freático sube.

Cuando el río baja ---> el freático desciende.

Dado lo anterior, en minería de oro aluvial es importante tener claro el nivel freático porque:

1. Controla la profundidad real explotable

Si el freático es muy alto:

- Las excavaciones se llenan de agua.
- Aumenta inestabilidad.
- Se requiere bombeo.

2. Infiere en la concentración aurífera

El oro se concentra típicamente:

- En la base del paquete aluvial
 - Sobre roca madre o arcilla impermeable
- Si el freático está alto:
- Se dificulta alcanzar la zona basal.

3. Determina impactos ambientales

Interceptar el freático puede:

- Alterar flujo subterráneo
- Generar drenaje artificial
- Modificar microhidrología

Figura 3.8. Interpretación de la energía del sistema fluvial

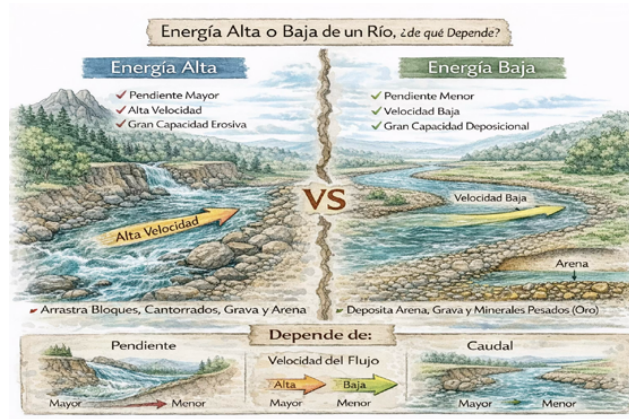


Figura 3.9. Explicación del nivel freático en minería de oro aluvial



Cómo puede saber un pequeño minero dónde está el nivel freático?

En exploración aluvial hay varios métodos:

Tabla 3.1. Diferentes métodos para determinar el nivel freático

Método 1: Observación directa en apique	Método 2: Piezómetros simples	Método 3: Relación con el nivel del río	Método 4: Indicadores indirectos
Cuando excavas y: • Aparece agua • Se empieza a infiltrar lateralmente • El fondo se humedece constantemente Ese es el nivel freático aproximado. Importante: Debe medirse la profundidad exacta.	Se instala un tubo perforado en perforación manual. Se deja estabilizar y se mide: • Profundidad hasta el espejo de agua. Es el método más técnico y preciso.	En planicie aluvial conectada: El freático suele estar a una cota (punto de referencia) similar al nivel del río cercano. Puede estimarse midiendo: • Elevación del terreno • Elevación del agua del río	• Vegetación hidrófila (ej. juncos) • Suelos permanentemente húmedos • Manchas ferruginosas • Olores reductivos Indican freático somero.

Importante saber para todos los estudios a presentar ante las autoridades:
El nivel freático en depósitos aluviales corresponde a la superficie superior de la zona saturada y está dinámicamente controlado por el régimen hidráulico del río, la permeabilidad del sedimento y la estacionalidad climática.

Para concluir este marco conceptual entonces nos hacemos la pregunta: ¿cómo se forman los depósitos aluviales de oro en un río? (Ver figura 3.10).

Figura 3.10. Formación de depósitos aluviales



Todo lo anterior permite:

- Optimizar el diseño de muestreo.
- Disminuir el volumen de material removido.
- Reducir consumo energético.
- Minimizar alteración del cauce.
- Aplicar restauración progresiva.

Del cual vamos mencionando en cada lineamiento y oportunidad de economía circular de la presente guía.

3.2 APLICACIÓN LÍNEAS ESTRATÉGICAS PARA LA ETAPA DE EXPLORACIÓN

La búsqueda de oro aluvial es una fase crucial para entender la dinámica de los sedimentos y el potencial financiero de un yacimiento, y generalmente se lleva a cabo a través de una serie de actividades secuenciales que ayudan a disminuir la incertidumbre geológica y guiar la toma de decisiones.

Varios autores destacan que esta clase de exploración necesita combinar la observación directa del entorno, el análisis de granulometría, técnicas gravimétricas y cartografía sistemática para localizar las unidades que contienen oro y su distribución en el espacio (Hentschel, Priester & Hruschka, 2002).

Estas etapas integran trabajo de campo, recolección de datos, validación analítica y modelación espacial, lo que posibilita pasar de una descripción general del terreno a una comprensión más detallada del comportamiento de los sedimentos y su composición mineral. De manera complementaria, investigaciones recientes han subrayado la relevancia de implementar prácticas sostenibles y de optimización de recursos en las etapas iniciales, como la administración digital de datos, la delimitación operativa temprana y el uso eficiente del agua, para reducir la huella ambiental vinculada a la exploración. Con este esquema conceptual, las secciones subsecuentes detallan cada actividad, sus insumos y resultados, así como las posibilidades de incorporar conceptos de economía circular en la exploración de oro aluvial.

A continuación en la tabla 3.3, se describen las características y el flujo general de operaciones en una mina de oro aluvial, estructurando un diagrama de entrada–proceso–salida desde un enfoque de circularidad. Esto permite, desde la fase inicial de exploración, planificar el manejo eficiente de residuos, materiales removidos y flujos generados, optimizando el uso de recursos minerales y no minerales. En el marco de esta guía, la gestión de la información de exploración se articula entre la Guía Técnica Colombiana GTC 314 y el Estándar Colombiano de Recursos y Reservas Minerales (ECRR-Col). La GTC 314 establece un enfoque de economía circular que exige identificar, medir y optimizar los flujos de materiales, agua y energía, así como asegurar su trazabilidad y control a lo largo del proceso (entrada–proceso–salida). En exploración minera, esto se traduce en la captura estructurada de datos de campo (muestreo, volúmenes removidos, consumo y recirculación de agua, generación de estériles), su validación y almacenamiento con criterios de calidad y seguimiento.

Estos datos, organizados bajo los principios de la GTC 314, constituyen la base técnica que el ECRR-Col utiliza para la estimación, clasificación y reporte de recursos y reservas, de acuerdo con niveles de confianza (inferido, indicado y medido). En consecuencia, la economía circular no solo optimiza el uso de recursos, sino que fortalece la calidad y representatividad de la información geológica, permitiendo que las estimaciones bajo el ECRR-Col sean consistentes, auditables y confiables. Esta integración facilita la toma de decisiones, reduce la incertidumbre y evita reprocesos, alineando la exploración minera con criterios de eficiencia, sostenibilidad y cumplimiento técnico.

Es importante en esta etapa tener en cuenta:

a) Fase inicial de reconocimiento y delimitación del depósito aluvial

Esta primera etapa, se requiere realizar un reconocimiento general del área de interés, orientado a identificar zonas con anomalías auríferas asociadas a la dinámica fluvial. A diferencia de los yacimientos filonianos, los depósitos aluviales se caracterizan por su alta variabilidad espacial y control geomorfológico, por lo que la exploración se enfoca en identificar trampas naturales de concentración de oro, como barras, meandros abandonados, zonas de baja energía hidráulica y contactos litológicos favorables.

En esta fase, el pequeño minero suele basarse en el conocimiento empírico del territorio, complementado con métodos directos (observación geológica y geomorfológica, análisis sedimentológico y geoquímico de concentrados pesados) e indirectos (teledetección, sensores remotos, modelos digitales de elevación e interpretación geomorfológica a partir de imágenes).. Para la localización preliminar del depósito se emplean fotografías aéreas, imágenes satelitales, modelos digitales de elevación y cartografía geomorfológica, herramientas que permiten identificar paleocauces, terrazas fluviales y patrones de drenaje asociados a la acumulación de oro.

El levantamiento de información incluye la descripción de los sedimentos aluviales, su espesor, distribución granulométrica, estratificación y relación con las unidades geomorfológicas, así como el análisis de la dinámica actual del sistema fluvial. Este enfoque permite comprender el comportamiento natural del río y establecer criterios para una explotación que minimice alteraciones irreversibles.

b) Análisis de laboratorio

La caracterización mineralógica de los sedimentos aluviales se apoya en técnicas instrumentales que permiten identificar tanto el oro como los minerales pesados asociados:

Microscopía óptica

Permite identificar minerales como cuarzo, feldespatos, óxidos de hierro, minerales pesados y observar la morfología del oro. A partir de este análisis se puede establecer:

- Forma y tamaño de las partículas de oro
- Grado de liberación natural del oro
- Asociación del oro con minerales pesados
- Distribución granulométrica del oro y de los minerales acompañantes

Estas características influyen directamente en la eficiencia de los procesos gravimétricos y en la recuperación esperada del metal.

Microscopía electrónica (SEM-EDS)

Se emplea para realizar microanálisis químicos de partículas individuales, permitiendo:

- Identificar oro submicroscópico o fino
- Determinar la presencia de metales potencialmente contaminantes (Hg, Pb, As, Cd)
- Establecer la composición química del oro (relación Au/Ag)
- Caracterizar minerales pesados con potencial de valorización

Esta información es clave tanto para el control ambiental como para la identificación de oportunidades económicas adicionales.

Difractometría de rayos X (DRX) acompañado de Fluorescencia de rayos X (FRX)

Estas técnicas permiten identificar fases minerales presentes en fracciones finas del sedimento, así como determinar la composición química global del material, información relevante para evaluar riesgos ambientales y definir estrategias de manejo de sedimentos.

Tabla 3.2. Cuadro comparativo: DRX vs FRX en minería de oro

Criterio	DRX – Difractometría de Rayos X	FRX – Fluorescencia de Rayos X	Criterio	DRX – Difractometría de Rayos X	FRX – Fluorescencia de Rayos X
¿Qué es?	Técnica que identifica minerales cristalinos presentes en una muestra	Técnica que identifica elementos químicos y su concentración	Aplicación en beneficio de oro	Ayuda a elegir el método de beneficio según los minerales	Control químico del proceso y de relaves
¿Qué analiza?	La estructura cristalina de los minerales	La composición química elemental	Tipo de muestra	Polvo fino, seco y homogéneo	Polvo, pastilla prensada o análisis directo
¿Qué responde?	¿Qué minerales hay?	¿Qué elementos hay y cuánto?	Tiempo de análisis	Medio (laboratorio)	Rápido (laboratorio o portátil)
Tipo de resultado	Lista de minerales (cuarzo, pirita, calcita, feldespatos, etc.)	Porcentaje o ppm de elementos (Fe, S, Ca, As, Cu, Pb, Zn, etc.)	Uso en campo	✗ No	✓ Sí, con equipos portátiles
Relación con el oro	Identifica minerales que alojan o acompañan al oro (pirita,	Identifica elementos asociados al oro, pero no el oro directamente	Costo relativo	Medio	Bajo a medio
Detección directa de oro	✗ No detecta oro libre o en bajas concentraciones	✗ No mide bien oro en concentraciones bajas	Nivel técnico requerido	Medio – alto	Bajo – medio
Uso en drenaje ácido de mina	Identifica minerales PAF y NAF (sulfuros, carbonatos)	Cuantifica azufre total y elementos neutralizantes (Ca, Mg)	Limitaciones principales	No detecta minerales amorfos ni oro fino	No identifica minerales ni la forma química
Clasificación de estériles y relaves	Permite diferenciar materiales generadores o no de acidez	Apoya la clasificación química del material	Complementariedad	Se complementa con FRX y ensayos geoquímicos	Se complementa con DRX y ensayo al fuego

Tabla 3.3. Flujo general de actividades en la minería de oro aluvial desde un enfoque de circularidad

Actividad	Entrada	Salidas	Aprovechamiento
Reconocimiento inicial	• Mapas base • Información previa del área • Equipos (GPS, brújula) • Personal técnico, acceso al área • Condiciones ambientales (clima, nivel del río, caudales)	Zonas favorables identificadas (barras, terrazas, gravas auríferas), mapa preliminar de puntos de interés, descripción geomorfológica y sedimentológica inicial, selección de sectores para muestreo, evaluación de accesibilidad y logística.	Digitalización y gestión estructurada de la información geológica para reducir intervenciones innecesarias (menos excavaciones, menor uso de agua y menor huella territorial).
Toma de muestras	• Herramientas (bateas, palas, picas, tamices) • Perforaciones (calicatas y pozos de muestreo) • Agua para el lavado inicial • Elementos de registro y almacenamiento.	Muestras representativas, coordenadas y profundidad de cada muestra, perfiles estratigráficos iniciales, material concentrado para ensayos, volúmenes muestreados por calicata, base de datos de muestreo preliminar.	Muestreo de bajo impacto, se basa en evitar la remoción masiva de cobertura y emplear sondajes de pequeño diámetro y métodos geoquímicos superficiales para reducir el impacto sobre el suelo, la vegetación y la huella hídrica.
Ensayos de concentración	• Muestras recolectadas • Agua (natural o almacenada) • Equipos: batea, alfombra, canaleta manual, concentrador pequeño • Recipientes y filtros para recolectar concentrado pesado • Mano de obra (operadores de batea o concentrador gravimétrico).	Oro recuperado (peso y morfología), black sands (magnetita, ilmenita, rutilo), *cálculo de ley (g/m^3), distribución granulométrica del oro, informe de recuperación por nivel, material residual para disposición o reúso.	Valorización de minerales accesorios (magnetita, ilmenita) bajo principios de simbiosis industrial. Recirculación del agua usada en el proceso. Aprovechamiento de arenas limpias para relleno o nivelación.
Caracterización de sedimentación	• Muestras de gravas y arenas • Hoyos y zanjas, pozos y perfiles estratigráficos • Herramientas: tamices, lupa, probetas, kits básicos • Información hidrológica (caudales, niveles del río).	Clasificación granulométrica (grava, arena, limo), identificación de unidades mineralizadas (pay streak), profundidad y espesor de capa basal (false bedrock), descripción de facies sedimentarias, mapas de distribución sedimentaria.	Evaluación del potencial uso de subproductos (gravas, arenas) para materiales de construcción según normativa ambiental. Planificación integral de recursos y reservas para minimizar estériles y evitar sobreexcavación.
Cartografía y georreferenciación	• GPS, equipo con SIG, brújula • Mapas base (DEM, hidrología, geología) • Resultados del reconocimiento y muestreo • Fotografías y perfiles de campo • Software SIG (QGIS, ArcGIS, MapInfo).	Mapa georreferenciado de puntos de muestreo, mapa geomorfológico preliminar (barras, terrazas, paleocanales), mapas de distribución de oro, sedimentología y espesor de gravas, secciones transversales, base cartográfica para el Plan de Exploración o PTOE.	Delimitación precisa de áreas de trabajo para reducir expansión no planificada, proteger áreas sensibles y minimizar la huella hídrica y superficial. Base SIG para optimizar futuras actividades y disminuir nuevas intervenciones.

*Nota técnica: En depósitos de placer el tenor del oro se expresa en mg/m^3 o g/m^3 (no en g/t como en mena dura), porque se trabaja con volúmenes de aluvión. La conversión depende de la densidad del aluvión (típicamente 2,7-2,8 t/m^3).

Fuente: Elaboración propia basada en: Guías Minero Ambientales de Exploración y Explotación (ACMin, 2024; MinMinas, 2023); Manuales de Buenas Prácticas (MINAM & GIZ, 2016; ANM, 2021, 2023); e investigaciones sobre minería aluvial y estándares globales (Langeland, 2015; Smart Prosperity Institute, 2020).



c) Gestión eficiente del agua

La eficiencia hídrica es un eje estratégico de la Economía Circular en minería. El recurso hídrico participa en **todas las etapas del ciclo de vida minero**, desde la exploración hasta el post-cierre. Este flujo continuo genera una presión considerable sobre las fuentes hídricas locales, especialmente en cuencas andinas donde la disponibilidad es limitada y la competencia por el recurso es alta (Universidad de Córdoba, 2025).

La comprensión técnica del sistema fluvial contribuye directamente a la economía circular en exploración, al:

- Evitar excavaciones redundantes.
- Reducir generación de estériles.
- Minimizar consumo de combustible.
- Facilitar la restauración inmediata.
- Mantener la funcionalidad hidrológica del río.

Una minería aluvial técnicamente fundamentada no modifica la dinámica natural del sistema fluvial, sino que aprovecha la concentración natural previamente realizada por el río.

Figura 3.11. Gestión circular del agua en minería aurífera



La tasa retributiva por vertimientos se rige por el Decreto 1076 de 2015 (Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente), que compila la normativa anterior incluyendo el Decreto 2667 de 2012. El Decreto 1553 de 2024 actualiza el componente regional de la tasa retributiva, modificando el Decreto 1076/2015. El marco aplicable vigente es el Decreto 1076 de 2015 con sus modificaciones (Decretos 50 de 2018, 1090 de 2018 y 1553 de 2024).

Los siguientes ejes estratégicos son importantes para el pequeño minero en la planeación de su proyecto de minería de oro aluvión:

Tabla 3.4. Ejes estratégicos en la gestión eficiente del agua

Eje Estratégico	Descripción	Acciones clave para PM	Meta Sugerida	Cómo Medir
1. Aumento de la eficiencia en la gestión del recurso	Priorizar la reducción del consumo y la optimización de los flujos internos de agua.	• Construir piscinas de sedimentación en serie (cascadas) • Instalar bombeo de bajo caudal para retornar agua clarificada al molino • Cubrir piscinas con malla sombra • Revestir con geomembrana HDPE	Recirculación >70% año 1, >85% año 3	Litros recirculados ÷ litros totales × 100
2. Soluciones colaborativas y tecnológicas	Esquemas compartidos de tratamiento con comunidades, otros mineros y autoridades de cuenca.	• Asociarse con mineros vecinos para planta compartida • Compartir costos de análisis de laboratorio (pH, SST) • Participar en mesas de agua que realizan las autoridades ambientales • Buscar apoyo técnico del SGC o universidades	Al menos 1 acuerdo con vecinos o participación en mesa de cuenca	N° de acuerdos firmados o reuniones de cuenca asistidas
3. Fuentes alternativas de suministro	Utilizar fuentes que no compitan con el consumo humano: aguas lluvias, aguas de desagüe de mina tratadas.	• Instalar canaletas en techos para captar agua lluvia (tanques mín. 5.000 L) • Usar agua de desagüe de mina para molienda • Segregar aguas según calidad • Evitar captar de quebradas en época seca	>20% del agua proveniente de fuentes alternativas	Litros lluvia o desagüe ÷ litros totales × 100
4. Generación de conocimiento y reportabilidad	Asegurar transparencia, trazabilidad y toma de decisiones basada en datos. El ICMM exige "reporte público del desempeño hídrico usando métricas consistentes" (ICMM, 2017).	• Llevar bitácora diaria: litros captados, recirculados, pH • Medir caudal con balde y cronómetro • Calcular indicador de recirculación mensual • Análisis de laboratorio cada trimestre	Registro completo para ICA y PUEAA	% de días con registro completo / días del mes

Fuente: Elaboración propia con base en ICMM Water Stewardship Framework (2023), SGC (2017), MME & ATG (2022), CEPAL (2020), Universidad de Córdoba (2025), Guía Minero Ambiental de Explotación (2002).

Figura 3.12. Elementos clave para la captación de agua en la pequeña minería dentro de la planeación minera

Importante: el PUEAA (Programa de uso eficiente y ahorro del agua)
Es un requisito de la autoridad ambiental cuando un minero solicita o tiene una concesión de aguas (quebrada, río, pozo, manantial).

Su objetivo es que el minero use solo el agua necesaria, la cuide y no la desperdicie.

¿Para qué le sirve al pequeño minero?

- Cumplir la norma ambiental
- Evitar sanciones o suspensión de la concesión
- Demostrar manejo responsable del agua
- Reducir costos de operación

☐ **1. Identificar de dónde toma el agua**
río, quebrada, pozo, lluvia

☐ **2. Decir para qué la usa**
beneficio del mineral, lavado, riego de vías, uso doméstico.)

☐ **3. Medir o estimar cuánta agua usa**
con aforos simples, horas de bombeo o capacidad del tanque

☐ **4. Aplicar medidas de ahorro**
Recircular el agua del beneficio
Reparar fugas
Usar canales y tuberías cerradas
Aprovechar agua lluvia cuando sea posible

☐ **5. Proteger la fuente de agua**
No botar relaves ni aguas sucias al cauce
Mantener franjas de protección
Evitar captaciones directas sin control

☐ **6. Hacer seguimiento**
Revisar periódicamente que el consumo no aumente y que las medidas funcionen.

La Guía Minero Ambiental de Explotación (2002) establece que “se deberá hacer un inventario de las posibles fuentes de captación de agua. Dentro de la etapa de Exploración Minera es importante determinar las diferentes fuentes de abastecimiento que incluye cuerpos de agua superficial o subterránea y aguas corrientes o estáticas”, y analizar las características.

Marco Normativo: La Resolución 631 de 2015, establece los límites permisibles de vertimientos para actividades mineras; la Resolución 1256 de 2021 y la Resolución 1207 de 2014, que regulan el reúso de aguas residuales tratadas; el Decreto 1076 de 2015 y el Decreto 1090 de 2018, que establecen el marco para el uso, concesión y ordenamiento del recurso hídrico; y la Ley 373 de 1997, que obliga a implementar el Programa de Uso Eficiente y Ahorro del Agua (PUEAA), en concordancia con los lineamientos de economía circular promovidos por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Tabla 3.5. Elementos clave para la captación de agua en la pequeña minería dentro de la planeación minera

	Tipo de fuente	Características	Requisitos legales
1. Identificación de la fuente hídrica	Superficial (ríos, quebradas)	Más accesible pero sujeta a variabilidad estacional. Requiere aforo de caudales mínimos. Riesgo de conflicto con otros usuarios. Vulnerable a contaminación aguas arriba.	Concesión de Aguas Superficiales (Decreto 1076/2015, Art. 2.2.3.2.9.1). Formato Único Nacional. Estudio técnico de balance oferta-demanda. PUEAA obligatorio.
	Subterránea (pozos, aljibes)	Mayor estabilidad de caudal pero costosa de desarrollar. Requiere estudio hidrogeológico. Riesgo de agotamiento sino se gestiona adecuadamente. Puede estar conectada a acuíferos regionales.	Permiso de explotación + Concesión de Aguas Subterráneas (Decreto 1076/2015, Art. 2.2.3.2.16.13). Prueba de bombeo. Evaluación de recarga de acuífero. Excepción: uso doméstico sin derivación no requiere concesión.
	Agua lluvia	Fuente gratuita y de buena calidad. No compite con otros usuarios. Depende de régimen de precipitación local. Requiere infraestructura de captación y almacenamiento. Potencial de 40 - 60% de reposición en zonas de alta precipitación.	No requiere concesión si se capta en el predio propio y no forma cauce que atraviese otros predios. (Decreto 1076/2015, Art. 2.2.3.2.16.2). Se puede construir obras de almacenamiento sin perjuicio a terceros.
	Agua de desagüe de mina	Generada por infiltración en labores subterráneas. Puede contener sedimentos o ser ácida (DAM). Requiere tratamiento previo según calidad. Fuente disponible sin afectar otras captaciones.	Si se usa internamente, no requiere permiso adicional. Sise descarga, aplica permiso de vertimientos (Res. 631/2015). Caracterizar calidad antes de usar en proceso.
	Agua residual tratada	Proveniente de procesos previos o de terceros. Requiere tratamiento para cumplir criterios de calidad. Alineada con principios de economía circular.	Resolución 1256 de 2021 reglamenta el reúso de aguas residuales tratadas. Requiere caracterización y cumplimiento de de parámetros físico-químicos y biológicos según su uso.
	Evaluar disponibilidad estacional (época seca vs. lluviosa), vulnerabilidad a la contaminación, e identificar usuarios aguas arriba y abajo. Realizar aforo de caudal en el sitio de captación propuesto. Si se trata de acuíferos, valorar la capacidad de suministro según características geológicas. Revisar registros históricos de caudal del IDEAM si existen.		
2. Caudal ecológico	El IDEAM establece como caudal mínimo ecológico aproximadamente el 25% del caudal medio mensual multianual más bajo de la corriente (Resolución 865 de 2004). Este caudal NO puede ser captado y debe permanecer en la fuente para mantener el ecosistema acuático. La captación permitida = Caudal disponible - Caudal ecológico - Otros usos prioritarios.		
3. Permisos y obligaciones regulatorias	Concesión de Aguas otorgada por la Autoridad Ambiental, según Decreto 1076 de 2015, Art. 2.2.3.2.7.1. Requisitos: caudales característicos de la corriente, inventario de usuarios aguas abajo, diseños de captación y conducción, ubicación georreferenciada. Para uso minero se requiere además el estudio de factibilidad del proyecto.		
4. Balance hídrico local	Calcular: $\text{Oferta hídrica} = \text{Precipitación} + \text{Escorrentía} + \text{Recarga de acuíferos}$ $\text{Demanda} = \text{Consumo proceso} + \text{Evaporación} + \text{Pérdidas}$ El balance debe demostrar que la captación solicitada no genera déficit hídrico en la cuenca, especialmente en época seca. Presentar análisis mensual considerando variabilidad climática.		
5. Uso responsable y eficiente	Reducir al mínimo técnico la captación de agua fresca. Priorizar recirculación (meta >70%). Control de pérdidas mediante revestimiento de canales y tanques. Mantenimiento preventivo de bombas y tuberías. Un sistema bien diseñado permite reducir la captación de agua fresca hasta en un 70-80% respecto a un circuito abierto (Universidad de Córdoba, 2025).		
6. No afectación de usos prioritarios	Verificar que la captación no afecte: acueductos veredales, bocatomas municipales, sistemas de riego agrícola, abrevaderos de ganado, usos recreativos. Coordinar con la comunidad los horarios de captación en época de estiaje. Cumplimiento del ODS 6 – Agua Limpia y Saneamiento.		

Fuente: Elaboración propia con base en Decreto 1076 de 2015, Guía Minero Ambiental de Explotación (2002), Universidad de Córdoba (2025)

d) Diagrama general de circularidad en un proyecto minero aurífero aluvial

Figura 3.13
Etapa de
exploración y
explotación con
cierre progresivo

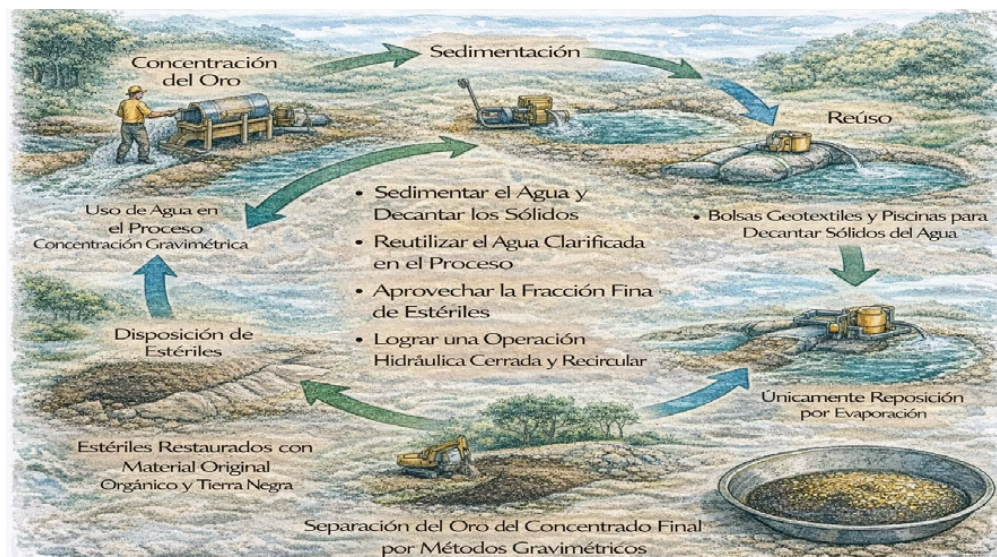
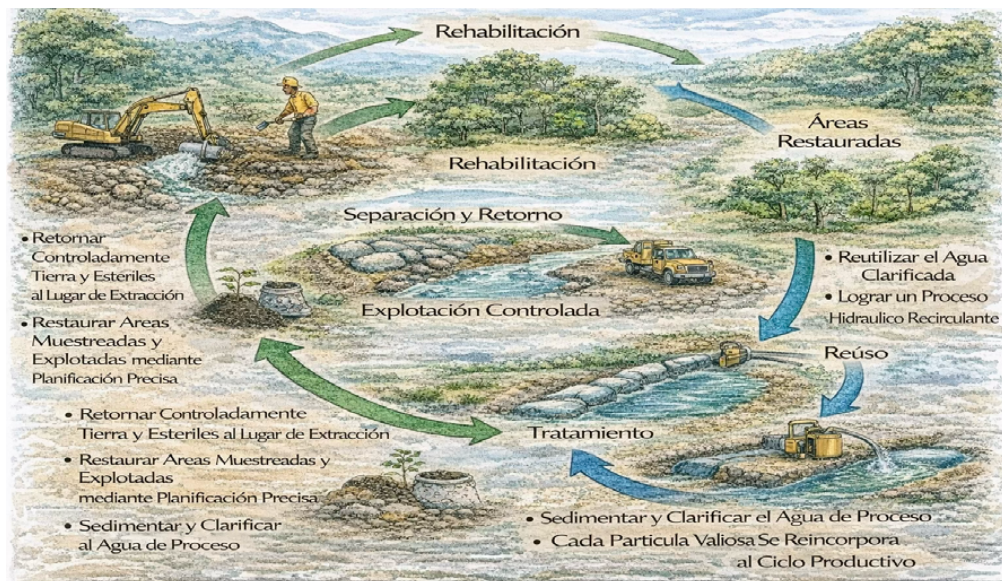


Figura 3.14
Etapa de
explotación
y beneficio con
cierre progresivo



3.2.1 Lineamiento 1. Optimización en el muestreo

Es muy importante el muestreo porque permite reducir número de apiques y zanjas, disminuir remoción de sedimentos, bajar costos de combustible y maquinaria, minimizar alteración del cauce y planicie, recuperar y reutilizar material removido.

En la práctica, dentro de su etapa de exploración un pequeño minero junto con su equipo técnico antes de excavar debería hacerse las siguientes preguntas:

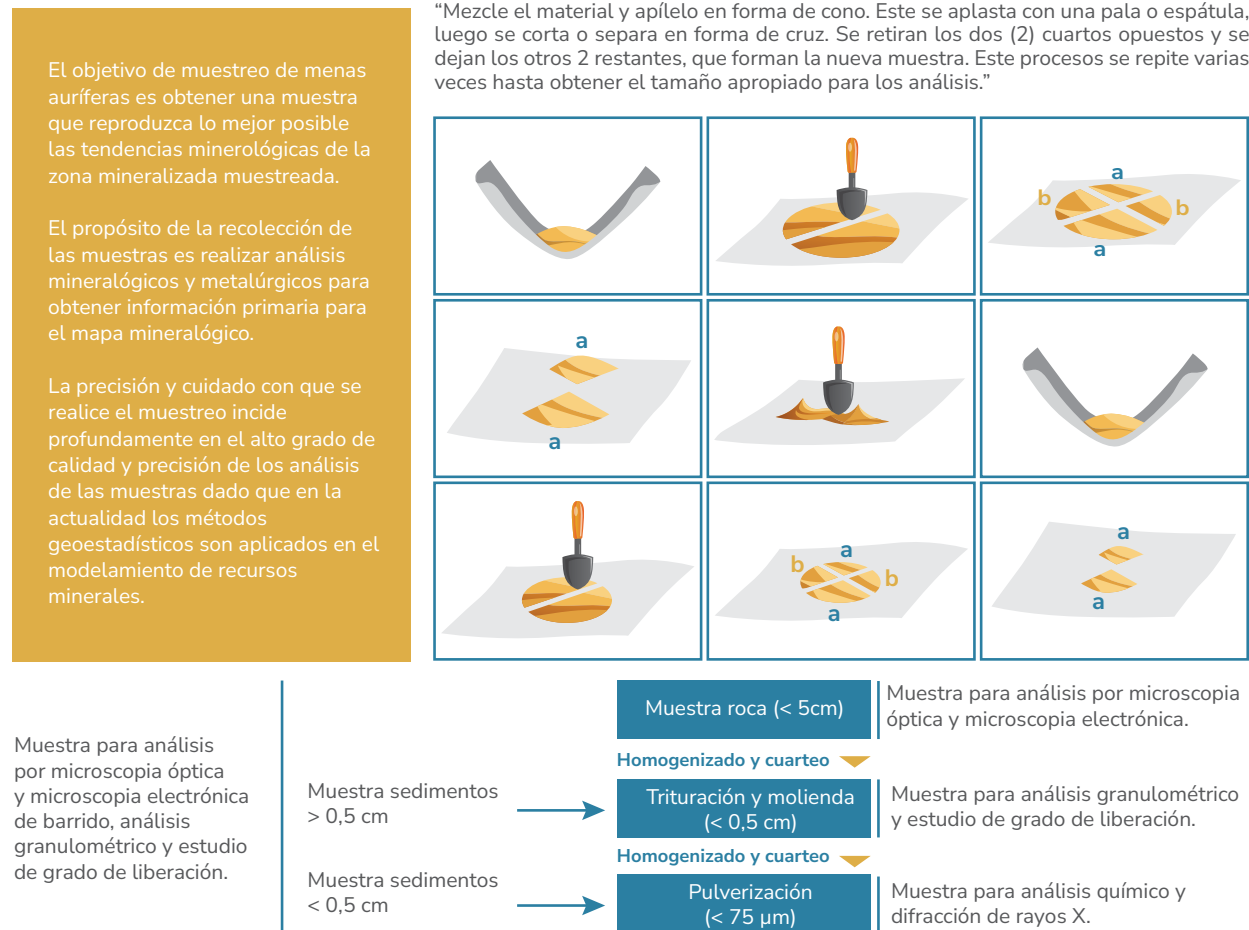
1. ¿Esta zona tiene fundamento geomorfológico?
2. ¿Ya existe información cercana?
3. ¿Puedo perforar antes de excavar?
4. ¿Voy a cerrar inmediatamente el apique?
5. ¿Estoy registrando técnicamente?

Si alguna respuesta es NO ---> no excavar aún. Para ello, se darán los siguientes insumos como pasos para que puedan optimizar el muestreo.

a) Procedimiento de muestreo y manejo selectivo del material

En los diferentes estudios que involucren rocas, sedimentos y suelos, la preparación de las muestras es una etapa esencial, para ello, es importante la aplicación de procedimientos correctos que garanticen una submuestra homogénea, representativa de la muestra total y que a la vez permita la máxima trazabilidad con una mínima posibilidad de contaminación.

Figura 3.15. Procedimiento de muestreo y manejo selectivo del material



Modificado de Protocolo-de-preparación-de-muestras-minerales-para-análisis-físicos-químicos-y-mineralógicos. Fundación instituto de ingeniería. Venezuela

Figura 3.16. ¿Dónde muestrear en abanicos?



Se toman distintos tipos de muestras representativas; en depósitos de placer las técnicas de cuarteo y división empleadas para menas duras no son recomendables debido al alto efecto pepita de las partículas de oro. La muestra de concentrado debe analizarse íntegra mediante ensayo al fuego (ANM, 2022).

b) Mineralización en depósitos aluviales

La mineralización aurífera en depósitos aluviales se caracteriza por la presencia de oro libre, generalmente en forma de partículas discretas, pepitas o laminillas, producto de la erosión y transporte de yacimientos primarios. La mineralogía asociada está dominada por minerales pesados resistentes a la meteorización, lo que permite su concentración por métodos gravimétricos. Para oro grueso son aptos jigs y mesas vibratorias; para oro fino (<70 µm) se requieren concentradores centrífugos Knelson o Falcon, que han mostrado recuperaciones de 98-99,9 % en placeres del Bajo Cauca y El Bagre.

El conocimiento mineralógico es fundamental para definir el método de beneficio más eficiente, evitando operaciones innecesarias y optimizando el uso de agua y energía. En este sentido, la correcta caracterización del oro y de los minerales acompañantes contribuye directamente a la reducción de impactos ambientales y al fortalecimiento del enfoque circular de la operación.

3.2.1.1 Oportunidad de Economía Circular 1: Reducir número de apiques y zanjas, disminuir remoción de sedimentos

1

Interpretación geomorfológica antes de excavar

¿Qué hacer?

Antes de abrir un solo apique:

- Identificar: (Ver figura 3.3, 3.4 y 3.14)
- Barras internas
 - Barras laterales
 - Zonas de recodo (curvas internas)
 - Antiguos cauces
 - Contacto grava-arcilla
 - Cambios de pendiente

¿Cómo hacerlo?

- Recorridos a pie
- Observación visual de tamaño de gravas
- Mapeo manual con GPS básico
- Uso de imágenes satelitales gratuitas (Google Earth)

Figura 3.17. Elementos geomorfológicos y sedimentológicos del sistema fluvial con potencial aurífero



Fuente: Elaboración propia respaldada por Leopold, L. B., Wolman, M. G., & Miller, J. P. (1964). Fluvial Processes in Geomorphology. Freeman & Co. Knighton, D. (1998). Fluvial Forms and Processes: A New Perspective. Arnold. Miall, A. D. (1996). The Geology of Fluvial Deposits. Springer. Boggs, S. (2012). Principles of Sedimentology and Stratigraphy. Pearson. Fletcher, W. K. (1981). Handbook of Exploration Geochemistry, Vol. 1: Geochemical Exploration for Gold. Elsevier.

2

Muestreo por prioridades (no muestreo al azar)

¿Qué hacer?

En vez de hacer 20 apiques dispersos se recomienda aplicar jerarquías de probabilidad aurífera como:

- Contacto grava-roca madre
- Barras internas en curvas
- Fondo de canal activo antiguo
- Terrazas bajas
- Terrazas altas (último nivel de prioridad)

Figura 3.18. Jerarquías de probabilidades aurífera en un río aluvial



3

Uso de perforación manual o liviana antes de excavación profunda

¿Qué hacer?

Para el pequeño minero se recomienda:

- Barreno manual
- Tubo tipo auger
- Sondaje con motobomba liviana

Ventaja:

- Permite conocer profundidad del paquete aurífero
- Evita excavar 3-4 metros innecesarios
- Reduce movimiento de material estéril

4

Muestreo compuesto (menos excavaciones, más representatividad)

¿Qué hacer?

En vez de abrir 5 apiques pequeños se recomienda:

- Hacer 1 apique estratégico
- Tomar submuestras en distintos puntos del perfil
- Mezclar y homogenizar
- Esto reduce el número de excavaciones sin perder calidad técnica.

5

Diseño de malla inteligente (muestreo progresivo)

¿Qué hacer?

Fase 1 ---> Malla amplia (ej. 50m x 50m)

Fase 2 ---> Reducir a 25m x 25m solo donde hay valores

Fase 3 ---> Detalle únicamente en zona mineralizada

La aplicación de mallas progresivas y muestreo dirigido puede reducir significativamente el número de excavaciones necesarias, en comparación con esquemas sistemáticos rígidos, optimizando costos e impacto ambiental. En exploración minera moderna se reportan reducciones de 30-70% en número de puntos cuando:

- Se inicia con malla amplia.
- Se densifica solo en anomalías.
- Se aplica análisis estadístico previo.

6

Control de profundidad real del oro

¿Qué hacer?

Muchos pequeños mineros excavan hasta 4-5 m "por si acaso".

Optimización:

- Determinar profundidad real del contacto mineralizado
- Medir espesor aurífero efectivo
- No excavar debajo del nivel productivo

Eso ahorra:

- Combustible
- Horas máquina
- Alteración innecesaria

7

Reutilización inmediata del material de apique

¿Qué hacer?

El material extraído se:

- Recoloca inmediatamente
- Se compacta
- Se deja drenaje natural
- Se cubre con capa superficial o separado
- Nunca dejar huecos abiertos innecesarios.

8

Registro técnico adecuado

¿Qué hacer?

Cada apique debe registrar:

- Profundidad
 - Espesor aurífero
 - Granulometría
 - Color de sedimento
 - Nivel freático
 - Tenor (g/m^3 o mg/m^3)
- Si no se registra bien, se repiten excavaciones innecesarias.

3.2.2 Lineamiento 2. Optimización en la planeación del proyecto minero

La exploración aluvial debe:

- Confirmar potencial aurífero con la mínima remoción de material.
- No generar pasivos ambientales.
- Dejar el área en condiciones iguales o mejores a las iniciales.
- Producir información técnica reutilizable en etapas posteriores.

La planeación de la etapa de exploración en depósitos aluviales debe ir encaminada a una intervención física mínima del cauce y planicie aluvial, priorizando métodos manuales o semimecanizados, prohibiendo desviaciones permanentes del cauce, no realizando excavaciones continuas o extensivas y trabajando por puntos discretos (apiques, calicatas, pozos de prueba).

Importante: Selección óptima de muestreo, excavaciones superficiales controladas y de menor volumen, reúso del material no mineralizado como relleno o material para nivelación y manejo eficiente del agua y reutilización desde el inicio de la exploración

Es así como la planificación desde la etapa de exploración pretende optimizar la localización, profundidad y número de calicatas, pozos y puntos de muestreo, evitando excavaciones innecesarias que incrementen el movimiento de sedimentos y la afectación del cauce. La caracterización preliminar de geomorfología, sedimentación, granulometría y niveles freáticos permite definir un diseño de exploración más eficiente, reduciendo volúmenes removidos y mejorando la exactitud en la estimación de la ley del oro. Asimismo, se debe planificar el manejo temporal de sedimentos extraídos, priorizando su retorno inmediato al sitio o su aprovechamiento potencial en usos autorizados para reducir la generación de estériles.

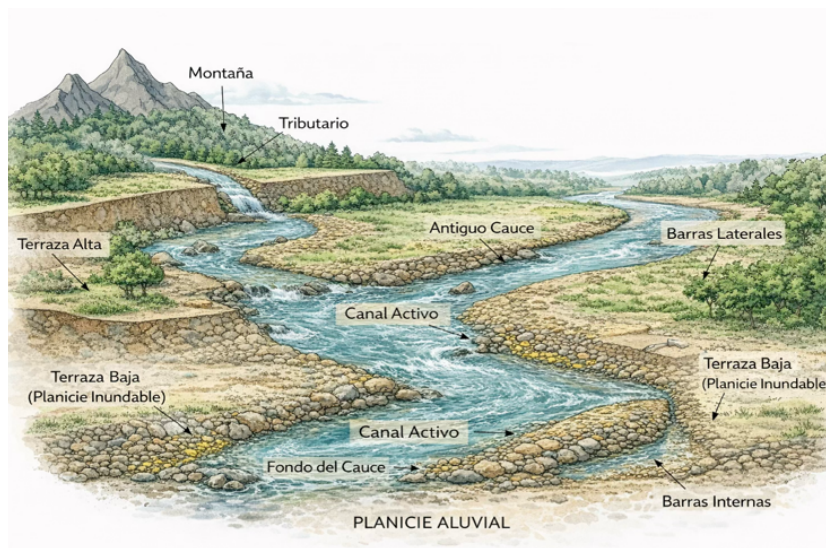
3.2.2.1 Oportunidad de Economía Circular 1: Minimizar intervención física del cauce y planicie aluvial

Minimizar la intervención física es decir, cualquier acción que cambie el terreno, como excavar, remover sedimentos, desviar agua, construir diques, zanjias o caminos o compactar o nivelar suelo del cauce y la planicie aluvial consiste en limitar las actividades mineras a excavaciones puntuales, de pequeña escala y completamente reversibles, evitando modificaciones permanentes en la morfología, el flujo y la dinámica sedimentaria del río y sus áreas asociadas.

El Cauce es el canal por donde corre el río, incluyendo el fondo (lecho), las orillas inmediatas y el canal activo (zona por donde el agua circula normalmente), dado lo anterior, minimizar intervención del cauce significa

no cambiar el trazado del río, no profundizar ni ensanchar el canal, no bloquear ni desviar el flujo natural.

Figura 3.19. Partes del cauce y planicie aluvial del río



Por otro lado, la planicie aluvial es la zona plana adyacente al río, formada por sedimentos del mismo río como las barras laterales, terrazas bajas, antiguos cauces o áreas que se inundan en crecientes. Dado lo anterior, minimizar intervención aquí significa excavaciones puntuales, no extensivas, no bajar el nivel general del terreno y no destruir la estructura natural del suelo. (Ver figura 3.19)

¿Cómo se ve esto en la práctica (minería de oro aluvial)?

✗ NO es minimizar intervención:

- Abrir zanjas largas paralelas al río
- Desviar el cauce para "trabajar seco"
- Remover grandes volúmenes "a ver si aparece oro"
- Dejar huecos abiertos

✓ SÍ es minimizar intervención:

- Trabajar con apiques pequeños
- Explorar por puntos, no por frentes
- Usar herramientas manuales
- Rellenar y restaurar el mismo día
- Ubicar trabajos fuera del canal activo

Minimizar la intervención busca que:

- El río siga funcionando igual
- No se altere la erosión ni sedimentación natural
- No aumente la turbidez aguas abajo
- No queden pasivos ambientales
- La restauración sea inmediata y efectiva

A continuación se expondrá unos pasos para tener los criterios técnicos para aplicarlo en campo:

a) Metodología

Tabla 3.6. Pasos con criterios técnicos en campo para minimizar intervención física del cauce y planicie aluvial

Pasos	¿Cómo se aplica en campo?	Criterio técnico / control	Resultado esperado
1. Priorizar métodos manuales o semimecanizados	1- Seleccionar puntos de exploración usando: • Observación geomorfológica • Información previa • Barras, curvas internas, zonas de baja energía 2- Definir excavaciones puntuales, no continuas. 3- Usar herramientas manuales: • Palas • Barras • Picos • Baldes 4- Si se requiere apoyo mecánico: • Motobombas pequeñas • Winches manuales • Equipos portátiles	• Número máximo de apiques por hectárea. • Registro fotográfico antes y después. • Prohibir retroexcavadoras en exploración.	Menor volumen removido, fácil control y restauración inmediata
2. Prohibir desviaciones permanentes del cauce	1- Identificar el eje natural del cauce. 2- Delimitar una zona de exclusión con estacas o cinta (delimitación del canal activo) 3- Realizar exploración fuera del flujo principal. 4- Si se requiere trabajar cerca del agua: • Usar barreras temporales • Canales superficiales removibles Qué sí se permite • Desvíos temporales, manuales y reversibles. • Canaletas provisionales sin excavación profunda. Qué NO se permite ✗ Jarillones ✗ Canales artificiales profundos ✗ Diqueos con maquinaria	Inspección visual: cauce conserva su trazo natural. Cero jarillones o diques permanentes.	Conservación de la dinámica natural del río • Menor erosión • Menor impacto aguas abajo
3. Evitar excavaciones continuas o extensivas	1- Definir un plan de puntos (no frentes) como trabajo por puntos aislados 2- Establecer distancias mínimas entre apiques (ej. 10-20 m). 3- Prohibir zanjas longitudinales. 4- Cada excavación se termina y se cierra antes de iniciar otra.	• Croquis de ubicación de apiques. • Bitácora diaria de excavación y cierre. • No más de un apique abierto simultáneamente.	• Impacto localizado • Control del terreno • Restauración inmediata
4. Trabajar por puntos discretos (apiques, hoyos o zanjas, pozos)	A. Apiques • Dimensiones típicas: ◦ 1 × 1 m ◦ Profundidad hasta roca madre o nivel freático • Excavación por capas. • Separación de materiales por tipo. B. Hoyos o zanjas • Orientación perpendicular al cauce. • Longitud controlada (3-5 m). • Uso solo cuando se requiera perfil estratigráfico. C. Pozos de prueba (solo cuando sea necesario) • Ubicación en terrazas o planicie. • Entibado básico si la profundidad lo requiere. (excavación por capas)	Dimensiones máximas definidas. Control de estabilidad y seguridad.	• Información precisa • Mínimo impacto • Fácil cierre

Pasos	¿Cómo se aplica en campo?	Criterio técnico / control	Resultado esperado
5. Ubicar puntos fuera del canal activo cuando sea posible	1- Recorrer el área en época seca. 2- Identificar marcas de nivel máximo de agua. 3- Ubicar apiques fuera de ese límite (barras laterales, terrazas bajas o antiguos cauces)	Verificación en campo en época seca. Criterios geomorfológicos: • Canal activo: agua permanente o reciente. • Zonas preferidas: ◦ Barras laterales ◦ Terrazas bajas ◦ Antiguos cauces	• Menor afectación hidrológica • Menor turbidez • Menor riesgo de inundación
6. Delimitar claramente el área de intervención	1- Estacar perímetro del área de exploración. 2- Señalizar: • Zona de excavación • Zona de acopio temporal • Zona de exclusión 3- Capacitar al equipo antes de iniciar.	Plano simple de campo y verificación diaria.	Evita expansión no autorizada y facilita control ambiental
7. Cierre inmediato de cada punto explorado	1- Finalizar muestreo. 2- Rellenar con el mismo material extraído. 3- Compactar manualmente. 4- Reponer capa superficial del suelo o tierra vegetal 5- Restablecer microrelieve el mismo día 👉 No se deja ningún apique abierto al final del día.	Inspección al final de la jornada. Registro fotográfico antes/después.	• Sin pasivos ambientales en exploración • Menor riesgo • Aceptación social

3.2.2.2 Oportunidad de Economía Circular 2: Reducción de estériles en la extracción del mineral oro

Según el estudio de Neal (2004)¹, se demostró que el uso de geofísica permitió ubicar calicatas con precisión milimétrica en depósitos aluviales, reduciendo hasta un 40% el volumen de sedimentos removidos y el número de excavaciones necesarias. Esto se tradujo en menor disturbio geomorfológico y reducción de estériles. Realizando levantamiento geofísico no invasivo (ETR – Tomografía de Resistividad Eléctrica) el objetivo es identificar capas sedimentarias, cambios granulométricos y zonas con concentraciones auríferas típicas como canales, barras y paleocanales. Gracias a este proceso se da una selección óptima de puntos de excavación donde presenten anomalías sedimentarias relevantes y así darle más control volumétrico a la excavación con calicatas con límites aproximados de profundidad y el material no mineralizado pudiendo ser reutilizado para el relleno.

Marco Normativo: El Código de Minas-Ley 685 de 2001 en sus artículos: Art. 34: Obliga a que toda actividad minera se desarrolle bajo el principio de prevención y control ambiental. Art. 199: Exige que desde la exploración se minimicen impactos sobre el suelo y cuerpos de agua. Art. 61: Permite el aprovechamiento integral de minerales y materiales asociados (base legal para reutilizar material no mineralizado), siempre que cumplan la normativa ambiental. El Decreto 1076 de 2015, obliga a minimizar remoción de suelo y sedimentos. Además, prevenir afectaciones a cuerpos de agua. Guía Minero-Ambiental de Exploración – MinMinas & ANLA: El número de calicatas debe justificarse técnicamente. Deben priorizarse métodos indirectos antes de excavación. El material removido debe ser manejado y restaurado inmediatamente.

Conclusión: Los resultados obtenidos se fundamentan en la aplicación de métodos geofísicos indirectos, los cuales permiten estimar el espesor de los depósitos aluviales, la geometría del cauce y la profundidad del basamento rocoso. Esta información optimiza la ubicación de puntos de muestreo y reduce la necesidad de intervención directa sobre el lecho del río, minimizando los impactos ambientales asociados a las actividades de exploración.

1 Neal, A. (2004). Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. Earth-Science Reviews, 66(3-4),261-330. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.01.004>

a) Metodología



Fase 1 – Planeación técnica previa

Antes de mover material, saber dónde y cuánto extraer

Acciones

- Delimitar el área de trabajo autorizada
- Definir frentes de explotación y secuencia de avance
- Identificar zonas de mayor potencial aurífero

Estudios y herramientas

- Reconocimiento geológico-geomorfológico del río
- Fotografías aéreas o imágenes satelitales
- Información hidrológica básica
- Topografía básica (perfil del cauce y terrazas)
- Información histórica de labores anteriores
- Estudios de Geofísica sencilla (la que pueda aplicar)

Resultado

- Evita extracción indiscriminada
- Reduce volumen de estériles desde el inicio



Fase 2 – Levantamiento de estudios geofísicos (según aplique)

Antes de mover material, saber dónde y cuánto extraer

Estudio geofísico	¿Qué mide?	¿Para qué sirve?	Qué ayuda a encontrar	Cuándo conviene usarlo	Costo relativo	Recomendación/ Limitaciones
Resistividad eléctrica (ERT / SEV)	Resistividad del subsuelo	"Ver" qué tan profundo está el material duro	Espesor de sedimentos, nivel freático, profundidad y forma de la roca madre o roca base que se encuentra debajo de los suelos y sedimentos sueltos (arena, grava, arcilla).	Antes de abrir apiques o dragar, ubicar contacto grava-roca madre o roca base, paleocanales y zonas favorables de concentración de oro	Medio	Muy recomendado No invasivo, buena profundidad, muy usado. No obstante, tiene menor resolución en materiales muy heterogéneos
Sísmica de refracción	Velocidad de ondas sísmicas	• Confirmar dónde está la roca dura. • Diferencia entre sedimentos sueltos, material compacto y roca base	Contacto exacto con la roca madre o roca base que se encuentra debajo de los suelos y sedimentos sueltos (arena, grava, arcilla)	• Cuando el aluvión es grueso • Confirmar profundidad de la roca base o roca madre y su continuidad	Medio - alto	Útil como complemento, Alta confiabilidad para roca base o roca madre. Requiere buen acoplamiento y equipo especializado
Georradar (GPR)	Reflexión de ondas electromagnéticas	Ver capas poco profundas, Estratificación de gravas, paleocanales someros	Detallar capas auríferas superficiales	Terrazas secas o ríos estacionales	Medio	Útil solo en zonas secas Baja penetración en arcillas y sedimentos saturados
Electromagnetismo (EM)	Conductividad eléctrica	Detectar zonas muy húmedas o arcillosas	Delimitar áreas desfavorables y rutas de agua	Para descartar áreas malas	Bajo - medio	Apoyo rápido Menor profundidad que ERT
Batimetría	Profundidad del cauce	Medir la profundidad del río Identifica pozas, barras sumergidas, irregularidades del fondo	Pozas profundas y barras. Identificar zonas de baja energía donde se acumula oro	Ríos anchos o profundos	Bajo	Apoyo operativo No informa sobre subsuelo
Topografía y geomorfología	La forma del terreno	Conocer la forma del terreno	Terrazas, antiguos cauces y cambios de pendiente	Siempre, como primer paso	Bajo	Indispensable. No sustituye métodos geofísicos

👉 Combinación mínima recomendada:

- Topografía + geomorfología
- Resistividad eléctrica
- Muestreo manual (apiques / batea)

Esto: reduce excavaciones innecesarias, ahorra combustible y maquinaria, disminuye impacto ambiental



Fase 3 – Selección previa del material

No todo el material del río tiene oro, se debe extraer solo lo que tiene potencial, es importante el retiro selectivo del topsoil (horizonte orgánico) con separación estricta: capa superficial del suelo o tierra vegetal, material estéril y material potencialmente mineralizado.

Cómo hacerlo: Acciones

- Reconocer visualmente capas favorables:
 - Gravas gruesas
 - Contacto grava-roca madre o roca base
 - Zonas con arenas negras
- Evitar remover:
 - Arcillas limpias
 - Limos

Extracción:

- Solo de arenas y gravas productivas
- Detener excavación al alcanzar la roca madre o roca base
- Buenas prácticas:
 - Espesor típico de retiro: 15-30 cm.
 - Acopio en pilas:
 - Altura < 2 m

- Pendiente estable
- Protección contra erosión
- Prohibido mezclar la capa superficial del suelo o tierra vegetal con gravas auríferas.

Resultado

- Menos material sin oro
- Menor volumen a lavar
- Menor generación de estériles



Fase 4 – Estudios de exploración y caracterización para la delimitación de la capa aurífera

Extraer solo donde hay potencial:

Acciones

- Muestreo con batea y manual
- Hoyos o zanjas poco profundas y apiques
- Identificación del contacto grava-roca madre o roca base

Aspecto	Hoyos o zanjas	Apique
Forma	Excavación más ancha	Excavación estrecha y profunda
Profundidad	Superficial (1-3 m)	Puede ser más profundo
Objetivo	Ver capas de suelo y sedimentos	Explorar material más profundo
Uso común	Exploración preliminar	Exploración puntual
Seguridad	Más estable	Requiere mayor cuidado

Recomendación:

- Apiques $\leq 1 \times 1$ m y profundidad controlada.
- Hoyos o zanjas orientadas perpendiculares al flujo.
- Distancia mínima entre puntos de exploración.

Estudios requeridos

- Muestreo granulométrico básico
- Caracterización visual de sedimentos
- Identificación de areeda aplicar)

Buenas prácticas

- Marcar espesor real de la grava productiva
- Detener excavación al llegar a la roca base o roca madre ideal.
- Definición de puntos de hoyos o zanjas y apiques: sólo se seleccionan puntos donde coinciden anomalías geofísicas y evidencia geomorfológica. Se define la profundidad

- máxima y el área máxima de excavación.
- Reducción de volumen: hoyos o zanjas más estrechas, excavación manual o semimecanizada controlada

Resultado

- Se define espesor real de la grava aurífera
- Se evita excavar material estéril profundo



Fase 5 – Separación temprana de estériles

Sacar lo malo antes del lavado

Acciones

- Retirar arcillas y finos antes del canalón
- Clasificación granulométrica simple (rejillas)
- Separación del material: clasificando si es material mineralizado va a muestreo, si no presenta mineralización va a acopio temporal

Acciones

- Retirar arcillas y finos antes del canalón
- Clasificación granulométrica simple (rejillas)
- Separación del material: clasificando si es material mineralizado va a muestreo, si no presenta

Apoyo técnico

- Control visual
- Ensayos simples de sedimentación

Beneficio

- Menos consumo de agua
- Menor volumen a procesar
- Menor generación de relaves



Fase 6 – Control del tamaño del material

No todo debe entrar al equipo

Medidas

- Uso de zarandas o parrillas
- Retiro de piedras grandes (>2-3 pulgadas)
- Lavado solo del material fino a medio



Fase 7 – Optimización del proceso de lavado

Mejor recuperación = menos reprocesos

Buenas prácticas: acciones

- Caudal de agua controlado
- Canaletas bien niveladas
- Mantas, alfombras o riffles adecuados
- Limpieza periódica del canalón

Resultado

- Mayor eficiencia de recuperación
- Menos generación de relaves



Fase 8 – Recirculación de material y agua

Aplicación de economía circular

Acciones

- Reprocesar solo concentrados
- No reprocesar estériles descartados
- Reusar agua decantada
- Infraestructura
- Pozas de sedimentación
- Canales de recirculación

Resultado

- Menos consumo de agua
- Menor generación de residuos



Fase 9 – Manejo ordenado de estériles

Lo que sí es estéril, usarlo correctamente

Acciones para usos

- Relleno de áreas agotadas
- Reconformación topográfica y del terreno
- Estabilización y protección de taludes

Criterios

- Uso de material NAF
- Integración paisajística
- Resultado
- Menor pasivo ambiental
- Facilita cierre progresivo

b) Equipos y especificaciones

Tabla 3.7. Herramientas y equipos con sus parámetros técnicos

Herramientas	Parámetros técnicos
Adquisición geofísica (ERT)	Arreglos eléctricos: • Wenner-Schlumberger: óptimo para capas subhorizontales y variaciones suaves • Dipolo-Dipolo: mayor sensibilidad lateral para detectar paleocanales Longitud de línea típica: 100-200 m Número de electrodos: 28-64 de acero inoxidable Espaciamiento entre electrodos: 2-5m Profundidad de investigación lograda: 10-25m, depende de la resistividad del material y espaciamiento, llegando hasta 30-40m Precisión de resistividad: ±2-5%
Batimetría	Qué mide: Distancia entre la superficie del agua y el fondo del cauce. • Unidad: metros (m) • Rango típico en ríos aluviales: 0,5 – 15 m Importancia: • Define volumen de sedimentos • Ubica zonas de mayor acumulación de grava aurífera • Determina viabilidad de dragado o succión El levantamiento batimétrico se realiza mediante ecosonda monohaz de 200 kHz, con resolución vertical aproximada de ±5 cm, acoplada a sistema GPS, permitiendo caracterizar la morfología del fondo del cauce y la distribución de sedimentos aluviales potencialmente auríferos.
Definición optimizada de calicatas	Profundidad sugerida: Hasta encontrar capa de grava compacta o arcilla, 2- 4m Volumen excavado promedio: 1-2m³ por calicata Número de calicatas reducido: 30-40% menos
Muestreo del material	Tamaño de muestra por nivel: 5-10 kg Niveles cada: 20-30cm Equipos: • Pala manual • Baldes estandarizados • Lonas para evitar pérdida del material

La reducción de estériles en la minería de oro aluvial se basa en una adecuada planeación técnica, apoyada en estudios de reconocimiento geomorfológico, topografía básica y muestreo exploratorio, seguida de un minado selectivo, separación temprana del material estéril y optimización del proceso de lavado. Esta metodología permite disminuir el volumen de material extraído y procesado, reducir el consumo de agua y minimizar los impactos ambientales.

Fuentes: Elaboración propia con base en La Guía de Buenas Prácticas para la Exploración y Estimación de Recursos y Reservas Minerales de Depósitos de Placer (ANM, 2022)

3.2.3 Lineamiento 3. Estrategias de anticipación y prevención de impactos ambientales residuales desde la exploración aluvial

Los depósitos aluviales se forman por erosión, transporte (ríos, quebradas), y concentración mecánica del oro. Durante ese proceso, parte de los sulfuros primarios (pirita, arsenopirita, calcopirita, pirrotita) se oxidan, se descomponen o se disuelven. Sin embargo, en zonas cercanas a la fuente primaria (Bajo Cauca antioqueño, Sur de Bolívar, paleoplaceres profundos) pueden quedar sulfuros residuales en las arenas negras, lo cual debe evaluarse caso a caso (ver Sección 3.4.2). El oro, al ser químicamente estable, sobrevive y se concentra.. Por eso: el oro aluvial suele ser libre, grueso o laminar y no está químicamente ligado a sulfuros, no obstante, sí generan potenciales pasivos ambientales durante la exploración asociados a alteración del cauce o margen del río, remoción excesiva de sedimentos finos y generación de zonas inestables o erosivas.

Por consiguiente, la exploración debe contemplar la identificación temprana, evaluación y manejo proactivo de estos posibles impactos ambientales, geomorfológicos e hidrológicos antes de cualquier intervención física en el cauce o sus terrazas asociadas. Implican el análisis previo de la dinámica fluvial (cauce activo, zonas de inundación periódica, terrazas y drenajes secundarios), la jerarquización de áreas con probabilidad mineral, la delimitación de zonas ambientalmente sensibles y la aplicación de medidas técnicas para evitar alteraciones innecesarias, como la intervención selectiva, el control de sedimentos, la protección de la capa superficial u orgánica y la restricción de actividades en rondas hídricas. Su objetivo es reducir al mínimo la remoción de material mediante diseño adecuado del muestreo, prevenir procesos erosivos y evitar impactos acumulativos mediante prácticas de restauración, recirculación del agua y reposición inmediata de sedimentos, asegurando que la exploración se realice bajo criterios de mínima afectación y gestión responsable del recurso hídrico y del suelo.

3.2.3.1 Oportunidad de Economía Circular 1: Manejo del agua con control de sedimentos desde la exploración de oro aluvial para anticipar y prevenir impactos ambientales residuales

En la etapa de exploración aluvial, la anticipación y prevención de impactos ambientales busca evitar que las actividades exploratorias generen afectaciones permanentes sobre el cauce, los suelos, el agua y los ecosistemas asociados. La exploración no debe modificar la dinámica hidráulica natural del sistema fluvial.

Antes de iniciar trabajos de exploración (calicatas, apiques, batimetría o muestreos), el pequeño minero debe identificar posibles impactos como:

- Alteración temporal del cauce y las barras del río
- Incremento de turbidez por remoción de sedimentos
- Compactación o pérdida de suelo orgánico (topsoil)
- Afectación puntual de la vegetación ribereña

La circularidad en depósitos aluviales se logra al restaurar calicatas y trincheras después del muestreo, gestionar adecuadamente los lodos finos para evitar turbidez aguas abajo y delimitar estrictamente el área de exploración para evitar expansión descontrolada.

Mediante el uso de estanques de sedimentación portátiles o bolsas geotextiles para la retención de sólidos, el agua clarificada puede volver al proceso de muestreo gravimétrico y sólo se repone agua por evaporación o pérdidas menores.

Normatividad a tener en cuenta: Decreto 1076 de 2015: Prohíbe vertimientos directos sin tratamiento y exige control de sedimentos y turbidez. Resolución 631 de 2015: Establece límites máximos de sólidos suspendidos totales (SST) en vertimientos. Guía Minero-Ambiental de Exploración: Obliga a restaurar calicatas, evitar la expansión del área intervenida y controlar finos y lodos.

a) Metodología



Fase 1 – Identificación previa del comportamiento hídrico

Antes de intervenir es importante tener en cuenta lo siguiente, con el fin de darle criterios de decisión al pequeño minero de dónde no debe excavar:

Delimitar (ver figura 3.17):

- Cauce activo
- Zona de inundación periódica
- Ronda hídrica
- Drenajes secundarios y escorrentías naturales

Importante: se delimita físicamente el área de exploración prohibiendo excavar fuera del polígono autorizado

Determinar:

- Época seca vs. lluviosa
- Nivel freático aproximado
- Dirección de escorrentía superficial
- Sectores con acumulación de agua



Figura 3.20. Jerarquías de probabilidades aurífera en un río aluvial



Fase 2 – No intervenir dentro del flujo activo

En exploración:

- ✗ No se realizan apiques en el canal con flujo permanente.
- ✗ No se desvía el cauce para muestrear.
- ✗ No se trabaja bajo lámina de agua.

La exploración debe enfocarse en:

- Barras secas
- Terrazas
- Paleocauces
- Planicie aluvial estable

Impacto residual evitando:

- Alteración permanente del patrón hidráulico
- Aumento de turbidez crónica
- Erosión inducida



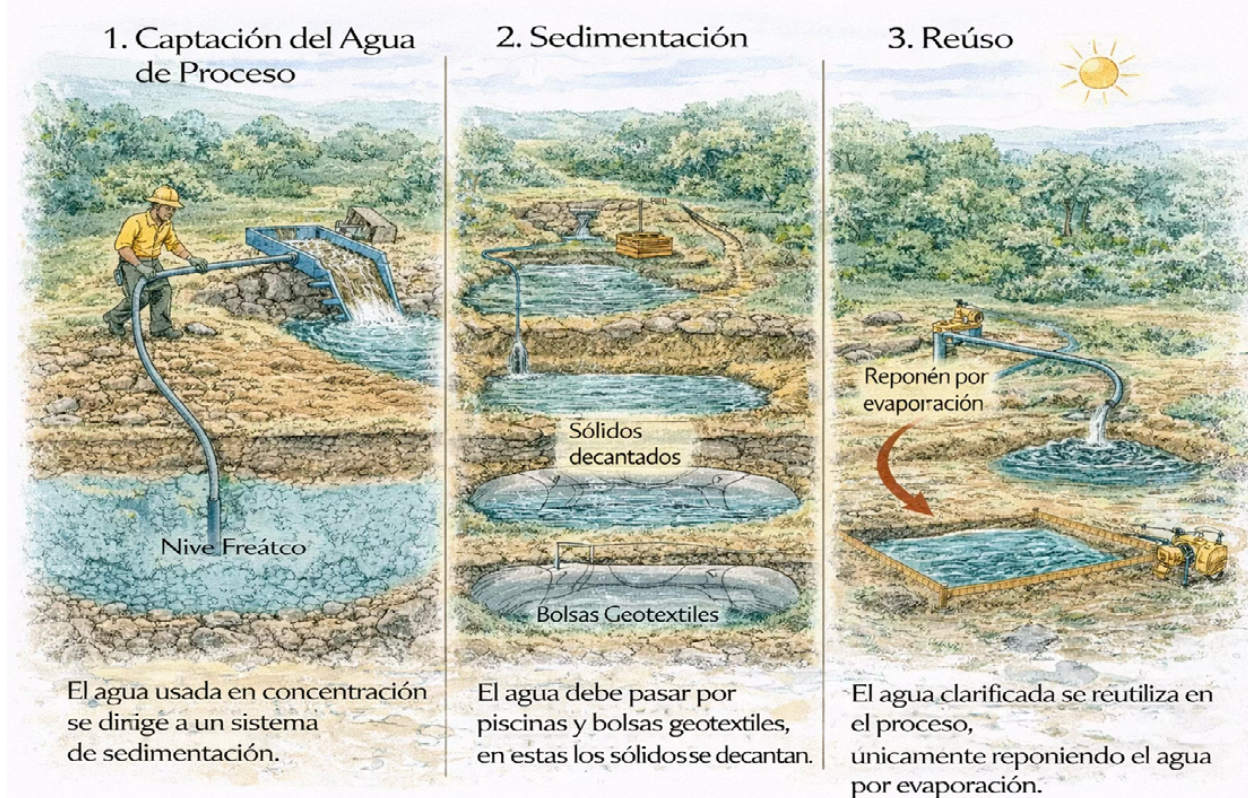
Fase 3 – Manejo del agua en el proceso

1- Captación del agua de proceso: en la recolección y conducción controlada del agua utilizada en la concentración gravimétrica hacia un sistema de sedimentación, donde los sólidos suspendidos se depositan por acción de la gravedad, permitiendo su clarificación y posterior recirculación o disposición controlada, evitando descargas directas al cuerpo hídrico y previniendo impactos residuales por turbidez.

2- Sedimentación: El agua debe pasar por piscinas y bolsas geotextiles, en estas los sólidos se decantan.

3- Reúso: El agua clarificada se reutiliza en el proceso, únicamente reponiendo el agua por evaporación.

Figura 3.21. Cómo es el manejo del agua durante el proceso



Fase 4 – Control de sedimentos y turbidez

El mayor impacto en exploración aluvial es la liberación de finos, por ello es importante el manejo y disposición controlada de sedimentos finos

Medidas técnicas:

- Trabajar en temporada seca
- Excavar fuera del nivel freático cuando sea posible
- Evitar lavado de muestras directamente en el río
- Usar recipientes cerrados para concentrados
- Instalar pequeñas zanjas de contención si hay pendiente

Si aparece agua en excavación:

- Permitir decantación natural
- No bombear directamente al cauce
- Filtrar mediante sedimentación simple

Es importante tener en cuenta:

1- Extracción controlada de lodos: Los lodos sedimentados se drenan parcialmente para facilitar su manejo.

Dicha extracción es el proceso de retirar lodos sedimentados (mezcla de agua + finos + arcillas), reducir su contenido de agua, facilitar su manejo, transporte y disposición evitando descargas contaminantes al río. (ver figura 3.22)

Figura 3.22. Sistema de drenaje controlado de lodos para minería aluvial de oro



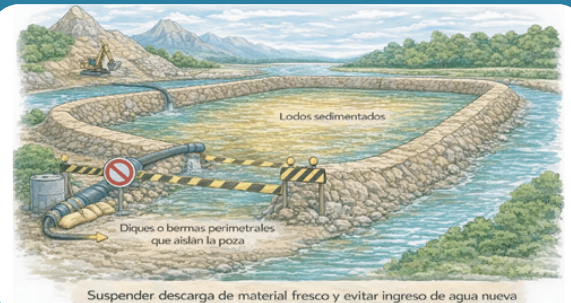
2- La disposición de lodos en calicatas restauradas consiste en el retorno controlado de los sedimentos generados durante la exploración a las mismas excavaciones de origen, mediante relleno por capas y restitución del perfil natural del terreno, garantizando estabilidad geotécnica, continuidad hidráulica y ausencia de impactos residuales.

3- Compactación por capas: El relleno se realiza por capas delgadas, aplicando compactación manual o mecánica ligera para garantizar estabilidad y evitar asentamientos posteriores.

No es sacar lodo húmedo y botarlo directamente.

Paso 1: Aislar el área de sedimentación

- Construir diques o bermas perimetrales
- Evitar ingreso de agua nueva
- Suspender descarga de material fresco
- Esto permite que el lodo se estabilice.



Paso 2: Drenaje parcial controlado

Opciones prácticas:

- a) Drenaje por gravedad
 - Abrir válvula o tubo de salida superior
 - Permitir salida de agua clara superficial
 - No remover el fondo
 - Se debe hacer lentamente para evitar arrastre de sólidos.
- b) Bomba de succión superficial
 - Extraer solo la lámina superior de agua
 - No remover sedimento del fondo
 - Enviar el agua nuevamente a circuito de recirculación



Paso 3: Secado progresivo

Métodos recomendados:

- Secado natural
 - Exposición al sol
 - Espesor máximo recomendado: 30-50 cm
 - Tiempo: 3-10 días según clima
- Celdas de deshidratación
 - Construir pequeñas plataformas con:
 - Geotextil
 - Cama de grava
 - Permiten drenaje vertical
 - Zanjales de drenaje
 - Canales laterales pequeños
 - Recogen el agua escurrida
 - La devuelven a la poza de sedimentación



Paso 4: Retiro mecánico

Cuando el lodo tenga consistencia pastosa o semisólida:

- Retirar con pala mecánica o manual
- Transportar a:
 - Zona de disposición final

- Área de reconformación
- Relleno de excavaciones agotadas
- Nunca disponer directamente en el cauce activo.





Fase 5 – Manejo del nivel freático

En planicie aluvial es común interceptar agua subterránea. Si ocurre:

- No profundizar innecesariamente
- No generar bombeo continuo
- No crear depresiones que modifiquen flujo subterráneo

La excavación debe rellenarse inmediatamente para:

- Restituir presión hidráulica natural
- Evitar drenaje artificial persistente



Fase 6 – Manejo de aguas lluvias

Durante exploración:

- No dejar excavaciones abiertas
- Reconformar microtopografía
- Evitar que los apiques se conviertan en trampas de agua

Impacto residual evitado:

- Formación de charcos artificiales
- Cambios en infiltración
- Procesos de erosión localizada



Fase 7 – Protección de la calidad del agua

En exploración no debe existir:

- Uso de químicos
- Uso de mercurio
- Uso de cianuro
- Descarga de efluentes

El muestreo se limita a separación mecánica y gravimétrica controlada.



Fase 8 – Restauración hídrica inmediata

Después de cada apique:

- Relleno por capas
- Compactación moderada
- Reconformación de pendientes naturales
- Reinstalación de la capa superficial o orgánica
- Recuperación de drenajes menores

El objetivo de esta fase es que el agua superficial vuelva a fluir exactamente como lo hacía antes.



Fase 9 – Indicadores para verificar que no hay impacto hídrico residual

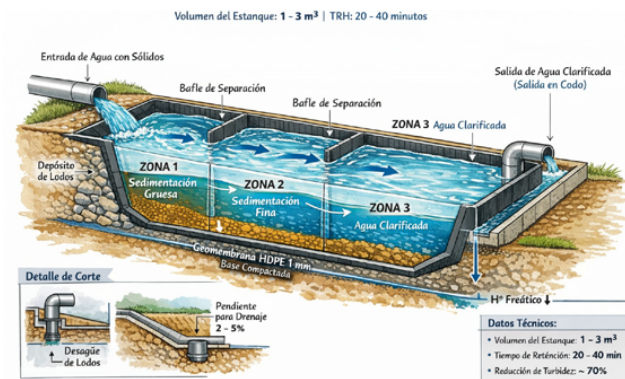
Después de la actividad se debe comprobar:

- No hay aumento visible de turbidez
- No se generaron zanjas o barrancos profundos
- No se alteró el cauce
- No hay cambios en trayectorias de escorrentía
- No hay encharcamientos artificiales
- No hay drenajes permanentes nuevos

b) Equipo y especificaciones

Tabla 3.8. Equipos y especificaciones

Piscina de sedimentación



Parámetros técnicos

1. Tiempo de residencia hidráulico (TRH): Es el tiempo promedio que el agua permanece dentro del estanque.
Rango recomendado: 30 - 60 minutos (mínimo operativo ASM)

Óptimo: >1-2 horas en sistemas bien diseñados

Fundamento técnico (para qué sirve): Sedimentación por gravedad requiere tiempo suficiente para que partículas decanten (EPA 2003). Es la variable más importante para la eficiencia.

Lectura operativa:

- Bajo TRH → partículas finas no sedimentan, agua turbia a la salida
- Alto TRH → mayor remoción de SST, mejor clarificación

2. Velocidad del flujo en el estanque: Es la rapidez con la que el agua se desplaza dentro del estanque.

Rango recomendado: < 0.03 - 0.1 m/s (flujo cuasi-laminar)

Fundamento técnico (para qué sirve):

- Basado en criterio de sedimentación por gravedad

- (Stokes), es decir controla si las partículas pueden asentarse o se mantienen en suspensión.
- EPA indica que condiciones de bajo flujo son críticas para eficiencia

Lectura operativa:

- Alta velocidad → re-suspensión, es decir, es cuando los sedimentos que ya estaban en el fondo se vuelven a levantar y mezclarse con el agua, ocasionando un problema porque el agua se vuelve turbia.
- Baja velocidad → sedimentación efectiva

3. Número de estanques en serie: Es la cantidad de piscinas conectadas una después de otra

Configuración recomendada: Mínimo: 2 estanques

Óptimo ASM: 3 estanques en serie

Fundamento técnico (para qué sirve):

Sedimentación progresiva en cascada mejora eficiencia (PlanetGOLD):

- Estanque 1: partículas gruesas
- Estanque 2: intermedias

- Estanque 3: finas

Lectura operativa:

- 1 estanque → baja eficiencia
- 3 estanques → sedimentación progresiva (gruesos → finos), agua reutilizable

4. Profundidad del estanque: Es la altura de la lámina de agua dentro de la piscina

Rango recomendado: 1.0 - 2.5 m

Criterio técnico (para qué sirve): Define el volumen disponible para sedimentación. Influye en la estabilidad del flujo

Lectura operativa:

- Muy bajo → poca capacidad
- Muy profundo → mezcla interna y menor eficiencia efectiva
- Profundidad adecuada = mayor eficiencia sin generar turbulencia

5. Relación largo/ancho (L/W): Es la proporción geométrica del estanque

Rango recomendado: 2:1 - 5:1

Fundamento técnico (para qué sirve):

- Controla el patrón de flujo del agua
- Evita que el agua "ataje" el sistema

Lectura operativa:

- Menor L/W → flujo directo sin sedimentar
- Mayor L/W o adecuado → mejor distribución del flujo

6. Carga hidráulica superficial (Q/A): Cantidad de agua que entra por unidad de área del estanque

Rango recomendado: 0.5 - 2.0 m³/m²-h

Fundamento técnico (para qué sirve): Es la variable crítica de diseño tipo clarificador (EPA). Determina si las partículas tienen tiempo suficiente para caer

Lectura operativa:

- Alta carga → partículas o sólidos no sedimentan, salen
- Baja carga → mayor eficiencia, remoción

Piscina de sedimentación

7. Eficiencia de remoción de sólidos (SST / turbidez):

Porcentaje de sólidos suspendidos que se eliminan
Rango esperado: 60% – 90% (EPA condiciones normales)
70% – 95% en sistemas ASM multietapa bien operados (PlanetGOLD / ASM consolidado)

Fundamento técnico (para qué sirve): Mide el desempeño real del sistema. Es el indicador clave de cumplimiento ambiental

Lectura operativa:

- <60% → sistema fallando, se debe revisar control hidráulico
- 80% → operación controlada, con alta eficiencia por el buen control hidráulico

NOTA IMPORTANTE: los SST deberán cumplir los límites establecidos máximos permisibles de vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y alcantarillado. en la Resolución 631 de 2015 del MADS, según la actividad y tipo de vertimiento aplicable. Los valores suelen estar en el rango: 150 – 400 mg/L (según tipo de vertimiento y tabla específica de la resolución)

8. Control y distribución del flujo: Cómo se reparte el agua dentro del estanque

Condición requerida:

- Entrada uniforme (difusor o canal de distribución)
- Salida controlada (vertedero)

Fundamento técnico (para qué sirve):

- Evita que el agua entre y salga sin sedimentar (cortocircuitos hidráulicos)
- Garantiza que todo el volumen del estanque sea utilizado

Lectura operativa:

- Flujo directo o canalizado → pérdida de eficiencia, de desempeño
- Flujo distribuido, uniforme → mejor eficiencia, desempeño

Soporte: EPA identifica deficiencias de diseño y construcción como causa principal de bajo desempeño

9. Manejo de sedimentos acumulados (lodos): Control de la acumulación de sólidos en el fondo

Frecuencia recomendada:

- Limpieza periódica (según carga)
- Mantener ≥70% volumen útil

Fundamento técnico (para qué sirve):

- Reducción del volumen efectivo → evita pérdida de

- eficiencia
- Mantiene el volumen útil del estanque

Lectura operativa:

- Sedimento acumulado (más lodo) → menor tiempo de residencia hidráulico, menor eficiencia
- Limpieza → recuperación de eficiencia

10. Sistema de recirculación: Reutilización del agua tratada dentro del proceso

Modo recomendado: Sistema cerrado con recirculación
Fundamento técnico (para qué sirve): reduce consumo de agua y descarga ambiental (PlanetGOLD)

Lectura operativa:

- Descarga directa → impacto ambiental
- Recirculación → operación sostenible

NOTA IMPORTANTE: las piscinas de sedimentación no es solo un hueco con agua, es un sistema hidráulico de control de sólidos que debe mantenerse en equilibrio, su falla no es estructural, es operacional e hidráulica.

Control de lodos



Parámetros técnicos

Para controlar lodos en piscinas de sedimentación (ASM) –incluyendo trampas de sedimentos– hay que manejar el sistema como una línea de control de sólidos en serie: entrada (trampa) → decantación (estanques) → extracción (lodos).

A continuación se relacionan los puntos críticos, con qué vigilar y cómo actuar en campo.

1. Trampa de sedimentos (control primario en la entrada)

Qué asegurar

- Ubicación: antes del primer estanque
- Flujo calmado (sin caída libre directa)
- Volumen suficiente para retener gruesos (>0.5-1 mm)

Operación

- Limpieza diaria o por turno (alta carga de sólidos)
- Extracción suave (evitar agitar y enviar nube al estanque)

Indicadores en campo

- ● Se acumula grava/arena en la trampa; al estanque entra agua “más limpia”
- ● Llegan gravas al estanque → trampa insuficiente o colmada

2. Balance hidráulico del sistema (para no movilizar lodos)

Variables a controlar

- Caudal estable (sin pulsaciones)
- Velocidad baja en estanques (flujo cuasi laminar)
- Tiempo de residencia (TRH) suficiente

Por qué importa: Si sube la energía del flujo, los sedimentos o lodos que ya estaban en el fondo se vuelven a levantar y mezclarse con el agua perdiendo todo lo sedimentado.

Señales

- Agua que se enturbia “de golpe” → los sedimentos o lodos que ya estaban en el fondo se vuelven a levantar y mezclarse con el agua perdiendo todo lo sedimentado.
- Remolinos visibles → exceso de energía

3. Acumulación de lodos (volumen útil)

Qué medir/controlar

- Volumen ocupado por lodos: mantener < 30% del volumen del estanque
- Espesor de capa: ideal < 0.3-0.5 m

Por qué importa: Menos volumen útil → menor TRH → peor sedimentación

Señales

- El estanque “se llena rápido” → problema de lodos
- Agua sale turbia aun con bajo caudal → pérdida de TRH

4. Frecuencia y método de extracción

Frecuencia

- Alta carga (ASM): cada 1-3 días (o diario si es necesario)
- Ajustar a la tasa de acumulación

Método

- Manual (palas) o bombeo controlado
- Evitar: remover todo de una vez
- “batir” el fondo

Buena práctica

- Extraer por secciones
- Mantener siempre zonas en reposo

5. Control de la pérdida de sedimentación (punto crítico)

Qué evitar

- Entradas con alta energía (caídas libres, chorros)

- Limpieza agresiva
- Mezcla por viento o equipos

Cómo controlarlo

- Disipador de energía en la entrada (caja, rocas)
- Mantener lámina de agua tranquila
- Operar sin picos de caudal

6. Gestión de lodos extraídos

Qué hacer

- Llevar a zona de secado (1-3 días mínimo)
- Disposición contenida (no devolver al flujo)

Qué evitar

- Reingresar lodos al sistema
- Disponer en zonas de escorrentía

Riesgo adicional: Si hay sulfuros (relaves): considerar PGA/PNA (ABA) para evitar generación de acidez

7. Configuración en serie (eficiencia global)

Regla operativa

- Trampa → Estanque 1 → Estanque 2 → Estanque 3

Rol de cada uno

- Trampa: gruesos
- Estanque 1: arenas
- Estanque 2: limos
- Estanque 3: finos

Resultado

- Menor carga de lodos por etapa
- Mejor control y menos re-suspensión

NOTA IMPORTANTE: El control de lodos no es solo limpiar, es evitar que los sólidos lleguen, se acumulen y se vuelvan a levantar. En campo se recomienda: primero retener (trampa), luego sedimentar (estanques) y finalmente remover (lodos)

Restauración de calicatas



Parámetros técnicos

1. Relleno y conformación del terreno

Qué hacer

- Rellenar 100% del volumen, en capas (20-30 cm)
- Reintegrar topsoil (20-30 cm) arriba

Por qué: Evita asentamientos y permite revegetación

Señales

- ● Superficie uniforme, sin huecos
- ● Hundimientos o vacíos

2. Compactación

Qué hacer: Compactar cada capa a $\geq 90-95\%$ Proctor (artesanal)

Por qué: Aumenta la estabilidad y capacidad de carga

Señales

- ● Superficie firme (no se marca con pisada)
- ● Material suelto $\rightarrow$ se hunde

3. Pendiente y drenaje superficial

Qué hacer

- Dar pendiente 2-5%
- Construir microcanales/zanjas de coronación

Por qué: Evita encharcamientos y erosión

Señales

- ● El agua escurre sin arrastrar suelo
- ● Agua estancada o cárcavas

4. Estabilidad de taludes

Qué hacer: Taludes $\leq 30^\circ$ ($\approx 1.5H:1V$)

Por qué: Previene deslizamientos

Señales

- ● Talud estable, sin grietas
- ● Caídas de material

5. Control de erosión

Qué hacer: Cobertura vegetal $>70\%$ o mulch (paja, geotextil)

Por qué: Reduce arrastre de finos (SST)

Señales

- ● Suelo cubierto
- ● Suelo desnudo $\rightarrow$ erosión

6. Control de escorrentía y sedimentos

Qué hacer

- Instalar trampas de sedimentos y desvíos
- Evitar que el agua salga con arrastre visible

Por qué: Controla SST en el receptor (cumplimiento)

Señales

- ● Agua clara en drenajes
- ● Pluma de sedimento

7. Manejo de materiales

Qué hacer

- Separar:
- Material limpio
- Material con finos/arcillas
- Material potencialmente contaminado

Por qué: Evita degradación del suelo y dispersión

8. Tiempo de intervención

Qué hacer: Restaurar inmediatamente o < 7 días

Por qué: Minimiza erosión inicial (fase más crítica)

9. Monitoreo post-restauración

Qué revisar (1-3 meses)

- Asentamientos
- Erosión
- Drenaje
- Cobertura vegetal

NOTA IMPORTANTE: Restaurar no es tapar el hueco, es reconstruir el comportamiento del suelo (estructura + drenaje + cobertura).

Fuentes: Chalov, S. R., Thorslund, J., Kasimov, N. S., Aybullatov, D. N., & Nitttrouer, J. A. (2014). Anthropogenic sediment redistribution and impacts on river systems. *Water Resources Research*, 50(3), 2264-2280. <https://doi.org/10.1002/2013WR014063>
Environmental Protection Agency. (2003). Best management practices for placer mining. U.S. EPA. <https://www.epa.gov>



3.2.4 Lineamiento 4. Modelamiento y gestión inteligente de información

La exploración aluvial requiere la recopilación de geomorfología, sedimentología, granulometría y de leyes del oro dentro de los modelos hidro-geométricos y geo- espaciales. La sistematización digital de datos permite definir zonas de interés con mayor precisión, planear la explotación de forma selectiva y evitar excavaciones innecesarias.

3.2.4.1 Oportunidad de Economía Circular 1: Reducción de la huella hídrica y ocupación territorial mediante optimización y análisis con herramientas SIG

La reducción de la huella hídrica y territorial se logra mediante la optimización espacial con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), permitiendo una mejor planificación de frentes de exploración y uso eficiente del recurso hídrico.

La reducción de huella hídrica implica disminuir el volumen de agua utilizada, afectada o intervenida en la actividad minera aurífera de exploración aluvial mediante recirculación de agua, mejor ubicación de puntos de captación, control de pérdidas y diseño eficiente de sistemas de sedimentación.

La reducción de ocupación territorial significa minimizar el área intervenida físicamente, por ejemplo: menor extensión de excavaciones, optimización de accesos, ubicación estratégica de piscinas de sedimentación, reducción de áreas de acopio y disposición. Es decir, intervenir solo el área estrictamente necesaria.

Mediante optimización y análisis con herramientas SIG (Sistemas de Información Geográfica) permiten:

- Analizar mapas de pendientes, drenajes y rondas hídricas
- Identificar zonas ambientalmente sensibles
- Modelar escenarios de menor impacto
- Definir la mejor ubicación de infraestructura temporal
- Calcular áreas intervenidas y distancias a fuentes hídricas

Uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), modelos de elevación digital (DEM) y modelos hidrológicos para ubicar mejor las calicatas, generando menos desplazamientos y menos puntos de excavación gracias a los modelos, además de menor intervención del cauce. De acuerdo con Søndergaard et al. (2019), demostraron que la integración de modelos digitales de elevación (DEM) con análisis SIG permite identificar paleocanales auríferos antes de campo, reduciendo entre 25- 40% los puntos de excavación requeridos y la huella territorial de la exploración. Mediante el uso de herramientas SIG y capas DEM, se derivan mapas de pendiente, curvatura y rugosidad para identificar terrazas aluviales. Se aplica análisis de flujo, acumulación y redes fluviales combinándolos con mapas de unidades geomorfológicas. A su vez, se implementan datos de granulometría, niveles freáticos y leyes de oro. Finalmente, integrando todo en algoritmos como análisis multicriterio de puntos óptimos de calicatas.

Normatividad a tener en cuenta: Decreto 1076 de 2015: Prohíbe vertimientos directos sin tratamiento y exige control de sedimentos y turbidez

Guía ANLA exploración: Establece que la exploración debe basarse en información secundaria y modelamiento previo, debe justificarse técnicamente el número de calicatas y su ubicación y debe evitarse las exploraciones extensivas sin sustento técnico

Resolución 1257 de 2021 – MinAmbiente: Promueve el uso de información geoespacial y análisis territorial para prevenir impactos acumulativos

a) Metodología



Fase 1 – Construcción del modelo espacial base

- 1- Recolección de insumos: Modelo Digital de Elevación (DEM), cartografía geológica y geomorfológica, red hidrográfica e información histórica de explotación aluvial.
- 2- Preparación de capas SIG: Corrección y reproyección, normalización espacial y resolución homogénea.



Fase 2 – Análisis geomorfológicos e hidrológicos

- 1- Derivación de variables: Pendiente, curvatura, rugosidad, acumulación de flujo y dirección de flujo.
- 2- Identificación de unidades favorables: Terrazas aluviales, paleocanales, barras antiguas y llanuras de inundación favorables.



Fase 3 – Integración de información geológica y de muestreo

- 1- Ingreso de datos de campo: Granulometría, niveles freáticos, leyes de oro preliminares.
- 2- Modelamiento multicriterio: Cada variable se pondera (geomorfología, hidrología y sedimentología) y se genera un mapa de favorabilidad..



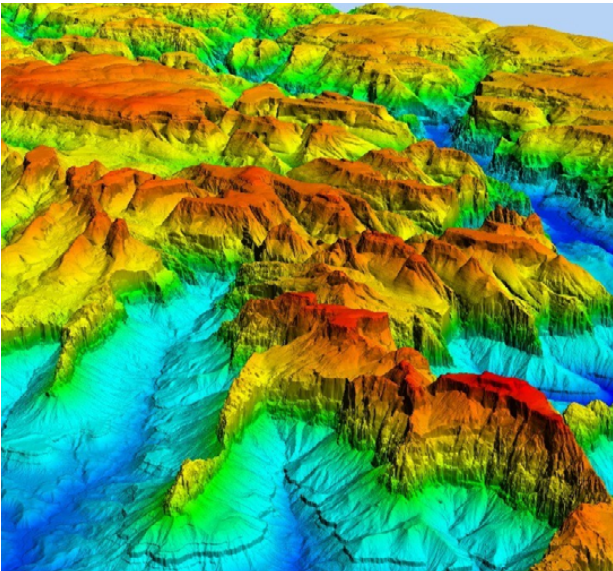
Fase 4 – Optimización de calicatas

- 1- Selección de puntos óptimos: Se seleccionan las zonas con alta favorabilidad y se reducen número de excavaciones junto con desplazamientos innecesarios.
- 2- Definición de huella mínima: Se delimita un polígono exacto de exploración y se excluyen zonas sensibles (pendientes altas)

b) Equipos y especificaciones

Tabla 3.9. Herramientas con sus parámetros técnicos

Herramienta	Parámetros técnicos
DEM utilizado (modelo digital de elevación)	Resolución del DEM: 1-5 m Modelos generados: • Pendiente • Curvatura • Acumulación de flujo • Relieve
Identificación de paleocanales (antiguos cauces de río o arroyos inactivos en la actualidad)	• Anchos detectados: 10-40 m • Espesores estimados de gravas: 1-3 m • Puntos optimizados de muestreo: reducción del 25-40% de excavaciones
Cálculo de accesibilidad	Pendiente máxima recomendada: <12° Distancia al cauce: > 30 m



Elaboración propia basada en: GIS-based identification of fluvial landforms and sediment management, Søndergaard, M. et al. (2019); y High-resolution topography for understanding Earth surface processes, Tarolli, P. (2014).

3.3 APLICACIÓN LÍNEAS ESTRATÉGICAS PARA LA ETAPA DE CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE

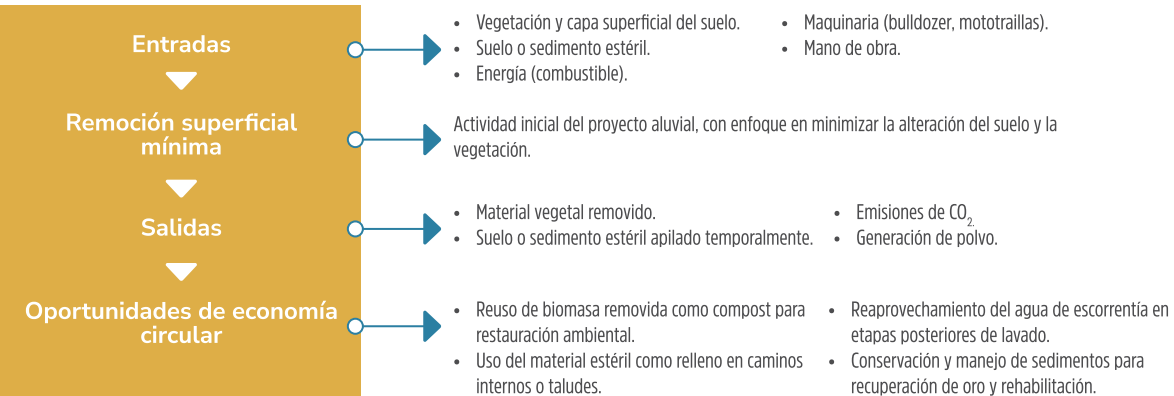
En la minería de oro aluvial de pequeña y mediana escala, la etapa de construcción y montaje comprende el acondicionamiento del área de explotación, la construcción de canalones, tolvas, mesas vibratorias y otras unidades de beneficio primario, así como la conformación de áreas de relaves, pozas de sedimentación y vías internas de acceso. Estas actividades se desarrollan a partir de la planeación establecida en el Programa de Trabajos y Obras (PTO) y en el Estudio de Impacto Ambiental (EIA), y generan flujos de materiales tales como suelos orgánicos, gravas y arenas aluviales, estériles, residuos de construcción y demolición (RCD), empaques e insumos de obra civil, además de consumos de agua y energía.

A continuación, se describen las características y el flujo general de operaciones en una mina de oro aluvial, estructurando un diagrama de entrada–proceso–salida desde un enfoque de circularidad. Esto permite, desde la fase inicial de exploración, planificar el manejo eficiente de residuos, materiales removidos y flujos generados, optimizando el uso de recursos minerales y no minerales. La organización se realiza conforme al Estándar Colombiano de Recursos y Reservas Minerales (ECRR-Col) y la Guía Técnica Colombiana GTC 314 para la gestión y trazabilidad de datos de exploración.

Figura 3.23. Etapas de arranque en minería aluvial

Etapa de arranque

Remoción superficial mínima (minería aluvial)



Elaboración propia basada en Propuesta de Lineamientos Técnicos de Política de Buenas Prácticas para Estandarizar los Procesos de Economía Circular en la Actividad Minera. Ministerio de Minas y Energía – ATG Ltda., 2021., y Guía Minero Ambiental de Explotación. Ministerio de Minas y Energía, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Agencia Nacional de Minería y GIZ, Bogotá D.C.

3.3.1 Lineamiento 5. Ejecutar el plan de obras con manejo eficiente de materiales

A partir del análisis bibliográfico de economía circular en pequeña minería aluvial, se identifican oportunidades concretas asociadas a la construcción modular y desmontable, el uso de áridos reciclados (RCD), la reutilización de suelo orgánico y el aprovechamiento de la geomorfología local en el diseño de la infraestructura (Guía Minero Ambiental, 2021).

3.3.1.1 Oportunidad de Economía Circular 1: Aprovechamiento de materiales generados en el proceso de infraestructura aluvial

Durante el descapote, la excavación y la conformación de plataformas, se generan materiales como arena, gravas aluviales, suelo orgánico y estériles que, debidamente caracterizados y clasificados, pueden ser utilizados como subproductos en la construcción de diques de relaves, terraplenes, canales de desvío, estructuras de control de erosión y recuperación de áreas explotadas. Esta estrategia reduce la necesidad de adquirir materiales de cantera, disminuye los volúmenes a disponer como residuo y acorta las distancias de transporte, contribuyendo a la eficiencia material y energética del proyecto (Ministerio de Minas y Energía – ATG Ltda., 2021).

A partir de la caracterización inicial de la exploración, se establece, según el tipo de material, volumen y características, las posibilidades de implementación de medidas como las siguientes: ver figura 3.24.

Figura 3.24. Implementación de medidas en materiales generados

Manejo y Aprovechamiento de Residuos en Minería Aluvial					
Fase Operativa	Tipo de Residuo	Almacenamiento	Tipo de Aprovechamiento	Manejo y Transformación	Manejo y Transformación
	Arena	Centro de disposición de estériles	Canales, bajantes, manejo de drenaje, obra civil	Ninguno	
	Material vegetal	Centro de disposición de estériles	Jardinería, recuperación de zonas expuestas según Plan de Manejo	Ninguno	
	Roca	Centro de disposición de estériles	Canales, bajantes, manejo de drenaje, obra civil	Separación en el centro de disposición de estériles y reutilización de material apto para ello.	Separación en la fuente y reutilización

3.3.1.2 Oportunidad de Economía Circular 2: Construcción modular y desmontable de infraestructura

La construcción modular y desmontable consiste en diseñar e instalar infraestructura minera mediante elementos prefabricados, transportables y reversibles, que puedan montarse, desmontarse y reutilizarse sin generar alteraciones permanentes en el terreno.

En minería aluvial es especialmente pertinente porque la explotación es móvil o por frentes sucesivos, de igual forma, la intervención del terreno es temporal y se busca restauración progresiva priorizando “cero pasivos ambientales”. (Guía Minero Ambiental, 2021).

La construcción modular y desmontable de campamentos, bodegas, talleres y estructuras auxiliares para el montaje de canalones y mesas vibratorias permite prolongar la vida útil de los activos, facilitar su relocalización a nuevas áreas de explotación y reducir los pasivos ambientales y económicos en el cierre de la mina.

En minería de oro aluvial, aplica para:



Planta de beneficio

- Estructura metálica atornillada.
- Bases sobre placas o losas prefabricadas.
- Sistemas de canaletas desmontables.
- Concentradores móviles.
- Tuberías con uniones bridadas o rápidas.



Plataformas operativas

- Geomembranas removibles.
- Bases granulares compactadas (sin concreto permanente).
- Placas prefabricadas de concreto si se requiere mayor capacidad de carga.



Campamentos y áreas administrativas

- Contenedores adaptados.
- Módulos prefabricados livianos.
- Sistemas eléctricos y sanitarios desmontables.



Sistemas hidráulicos

- Tuberías HDPE con acoples desmontables.
- Bombas móviles.
- Tanques modulares de almacenamiento.
- Piscinas con geomembrana removible.

Cuando un frente se agota:



Se recomienda que el proyecto implemente infraestructura modular y desmontable en áreas operativas, planta de beneficio y sistemas hidráulicos, mediante estructuras prefabricadas, bases granulares reutilizables y conexiones desmontables, garantizando reversibilidad, movilidad del frente minero y restauración progresiva del terreno intervenido.

3.3.1.3 Oportunidad de Economía Circular 3: Uso de áridos reciclados y materiales locales en vías, plataformas y obras hidráulicas

El proyecto prioriza el uso de áridos reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición (RCD) generados en las fases de descapote y excavación, así como la utilización de materiales locales disponibles dentro del área de explotación, en concordancia con los lineamientos de la Guía Minero Ambiental (2021).

Los materiales aprovechables (arena gruesa, gravas, cantos rodados y roca seleccionada) son segregados en la fuente y trasladados al centro de disposición de estériles, donde se realiza su clasificación granulométrica y evaluación geotécnica básica. Previo a su utilización, se verifica el cumplimiento de parámetros como:

Tabla 3.10. Cuadro técnico – evaluación de RCD para uso en vías / plataformas

Parámetro	¿Qué es? (concepto)	Requisitos técnicos de uso (referencia INVIAS*)	Decisión de uso (campo)
Granulometría	Distribución de tamaños de partículas (gravas, arenas, finos). Define el "esqueleto" del material.	Debe ajustarse a bandas granulométricas de la capa (base/subbase). Material bien gradado (mezcla equilibrada de tamaños). Sin sobre-tamaños ni huecos granulométricos.	● Usar: cumple banda. ● Mejorar: fuera leve → mezclar/cribar/triturar. ● Descartar: muy uniforme o muy heterogéneo (no ajustable).
% finos (pasa #200)	Porcentaje de partículas <0.075 mm (polvos/arcillas). Controla drenaje y cohesión.	Subbase: < 12% (típico). Base: < 8-10%, Ideal < 5%. Evitar finos plásticos.	● Usar: dentro de rango. ● Mejorar: 12-20% → lavado/mezcla con grava. ● Descartar: >20% o finos plásticos dominantes.
Límites de Atterberg (LL/IP)	LL: humedad a la que el suelo fluye. IP: rango plástico (sensibilidad al agua).	Subbase: IP < 12. Base: IP ≤ 6 (ideal). LL bajo (<25-35 según capa).	● Usar: IP bajo (material poco plástico). ● Mejorar: IP 12-20 → estabilizar (cal/cemento). ● Descartar: IP > 20 (alta plasticidad/ahuellamiento).
Compactación (Proctor)	Máxima densidad alcanzable con energía de compactación (control de vacíos/rigidez).	Subbase: ≥ 95% Proctor. Base: ≥ 98% Proctor.	● Usar: alcanza densidad especificada. ● Mejorar: 90-95% → más pasadas/ajuste humedad. ● Descartar: <90% (no logra densificar → material inestable).
CBR (capacidad de soporte)	Resistencia del material a la penetración (soporte estructural).	Subrasante mejorada: ≥ 5-8%. Subbase: ≥ 30%. Base: ≥ 80%.	● Usar: cumple para la capa. ● Mejorar: 10-30% → mezcla/estabilización. ● Descartar: <10% (no estructural).

OJO: * Ajustar a la especificación vigente de INVIAS y al nivel de tránsito del proyecto.

Notas específicas para RCD:

- Limpieza: retirar yesos, maderas, plásticos, orgánicos (rechazo).
- Homogeneidad: preferir RCD triturado y clasificado (evita segregación).
- Contaminantes: si hay sospecha (pinturas, suelos contaminados), realizar metales totales/lixiviabilidad antes de usar.
- Durabilidad: en bases, verificar desgaste (Los Ángeles) cuando aplique.

Regla operativa

- Ensayar --> comparar con INVIAS --> decidir: usar / mejorar / descartar.
- La economía circular con RCD es válida sólo si cumple desempeño geotécnico y no introduce riesgos ambientales.

Estos materiales son empleados en:

- Construcción y mantenimiento de vías de acarreo.
- Conformación de rampas de acceso.
- Estabilización de plataformas operativas.
- Revestimiento de cunetas y canales de desvío.
- Estructuras disipadoras de energía y obras de drenaje.

Adicionalmente, el diseño geomorfológico del proyecto aprovecha la topografía natural del terreno, reduciendo movimientos innecesarios de tierra y favoreciendo la estabilidad física y el manejo adecuado de aguas superficiales.

Esta estrategia se enmarca en el enfoque de economía circular minera y restauración progresiva del área intervenida.



Proceso constructivo

- a. Segregación en la fuente

1- Durante excavación, separar:

 - Material orgánico.
 - Gravas y roca.
 - Arena gruesa.

2- Evitar mezcla con lodos finos.
- b. Clasificación y almacenamiento

1- Trasladar al centro de disposición.

2- Organizar por pilas según tipo de material.

3- Verificar:

 - Granulometría.
 - Contenido de finos.
 - Plasticidad.
- c. Construcción de vías internas

1- Delimitación del área.

2- Extendido por capas.

3- Compactar material de relleno en capas delgadas sucesivas por separado antes de colocar la siguiente
- d. Construcción de plataformas

¿Por qué no se compacta todo de una vez?

Si colocas 60 cm de material y lo compactas de una sola vez:

 - ✗ La parte superior se compacta.
 - ✗ La parte inferior queda suelta.
 - ✗ Se generan asentamientos posteriores.
 - ✗ Se forman deformaciones en la vía.

Por eso se hace por capas.

4- Control de drenaje superficial es importante porque implementa obras hidráulicas menores destinadas a conducir de manera controlada las aguas lluvias y escorrentías naturales fuera de la plataforma vial, evitando procesos erosivos, inestabilidad estructural y aporte de sedimentos a cuerpos hídricos cercanos. Incluye la conformación de cunetas laterales, pendientes transversales del 2-4%, instalación de alcantarillas en cruces naturales y protección de taludes, garantizando la estabilidad operativa y el cumplimiento ambiental en explotaciones aluviales.

¿Por qué es clave en minería aluvial?

- En minería de oro aluvial:
- Hay suelos sueltos y altamente erosionables
 - Se trabaja cerca de cauces naturales
 - El incumplimiento puede generar sedimentación del río
 - Puede generar sanciones ambientales
- Un mal drenaje superficial puede destruir la vía en una sola temporada de lluvias.

Enfoque de economía circular		
Entrada	Transformación	Salida útil
Material excavado	Clasificación	Base granular
Roca seleccionada	Acomodo estructural	Gaviones
Roca seleccionada	Acomodo estructural	Gaviones
Arena gruesa	Compactación	Subbase
Tierra negra	Almacenamiento temporal	Revegetación

Figura 3.25. Cómo realizar la construcción de vías internas



e. Obras hidráulicas

1- Excavación de cuneta siguiendo pendiente natural (ver figura 3.26), es decir, alinear la cuneta con la dirección natural del escurrimiento del agua, evitando cambios bruscos de dirección, tramos planos donde el agua se estanque, pendientes muy fuertes que generen socavación. En minería aluvial, esto es clave porque los suelos son sueltos y fácilmente erosionables.

2- Revestimiento con grava gruesa.

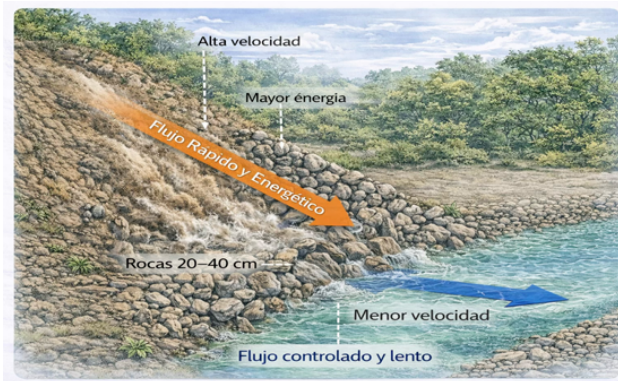
3- Colocación de roca en zonas de mayor velocidad.

4- Construcción de disipadores de energía en puntos críticos, es importante por que es una estructura hidráulica diseñada para reducir la velocidad del agua cuando esta baja con mucha fuerza por una pendiente o sale de una cuneta, canal o tubería. En minería aluvial se utilizan especialmente porque se manejan altos caudales, hay pendientes variables, los suelos son sueltos (gravas, arenas, limos y su función principal es evitar erosión, socavación y arrastre de sedimentos.

Figura 3.26. Cómo es la excavación de cuneta siguiendo pendiente natural



Figura 3.27. Funcionamiento de un disipador



Los puntos críticos son lugares donde el agua gana velocidad y puede dañar el suelo, en minería aluvial suelen ser:

- Descarga de bombas hacia canales
- Salida de canaletas o canalones
- Descarga de piscinas de sedimentación
- Transiciones de pendiente fuerte a suave
- Puntos cercanos a rondas hídricas o drenajes naturales

Figura 3.28. Tipos de disipadores en minería de oro aluvial



3.4 APLICACIÓN LÍNEAS ESTRATÉGICAS PARA LA ETAPA EXPLOTACIÓN Y BENEFICIO EN ORO ALUVIAL

3.4.1 Lineamiento 6. Optimización del proceso de explotación y beneficio con eficiencia tecnológica

La optimización del proceso de explotación en minería de oro de aluvión comienza con la ejecución disciplinada del planeamiento minero definido en el Programa de Trabajos y Obras (PTO), cuya función es orientar el

avance de labores, controlar la selectividad en la extracción y evitar aperturas innecesarias que incrementen la remoción de biomasa y la generación de estériles. La correcta aplicación de este diseño permite mantener el desarrollo dentro de los límites mineralizados previamente identificados y reducir la remoción de material sin valor económico.

Establecer un proceso de explotación aurífera aluvial técnicamente optimizado que maximice la recuperación del mineral, disminuya consumo de agua, energía y químicos, minimice pérdidas y reduzca impactos ambientales, mediante la implementación de tecnologías limpias, control hidráulico y recirculación de recursos, bajo un enfoque de economía circular y cumplimiento ambiental.

La eficiencia tecnológica en minería de oro aluvial es determinante para aumentar la recuperación de oro, reducir las pérdidas hacia los relaves y minimizar el consumo de agua, energía y reactivos, bajo un enfoque de economía circular y cumplimiento ambiental. La liberación adecuada del mineral mediante la planeación adecuada de las operaciones unitarias constituida bajo la correcta clasificación del tamaño de partícula y forma.

Descripción general del proceso

El proceso productivo se desarrolla mediante un sistema secuencial de operaciones unitarias que incluyen clasificación granulométrica, lavado hidráulico, concentración gravimétrica y manejo de efluentes, integrados en un circuito cerrado de agua.

Tendríamos las siguientes etapas iniciales en este proceso:



Preparación del frente de extracción

Es el descubrimiento del yacimiento o cuerpo mineral, mediante la remoción de la capa o cobertura vegetal o estéril. Generalmente se realiza con: - Bulldozer - Mototraillas - Otros .

Actividades:

Remoción de la vegetación



Arranque: Remoción superficial mínima para acceder al depósito aluvial

Consiste en la fragmentación del macizo rocoso a un tamaño que pueda ser manipulado por el sistema definido de cargue y transporte planeado. El arranque es la remoción del estéril y la extracción del mineral de interés. Estas operaciones se pueden realizar en forma directa, mecánica o con explosivos. En la extracción del cuerpo mineralizado se debe evitar la contaminación del material de interés con el estéril.

Actividades:

- La remoción de estéril: Puede ser mecánica o química. La voladura incluye perforación y fragmentación con explosivos.
- Explotación del mineral: es la extracción del yacimiento o la sustancia mineralizada de interés.

Tabla 3.11. Oportunidades de economía circular en la etapa de arranque

Etapas / Actividad	Entradas	Salidas	Oportunidades de Economía Circular
Arranque: Remoción superficial mínima	• Vegetación y capa superficial del suelo • Suelo o sedimento estéril • Energía (combustible, -maquinaria: bulldozer, mototraillas) • Mano de obra	• Material vegetal removido • Suelo o sedimento estéril apilado temporalmente • Emisiones de CO₂ y polvo	• Reuso de biomasa removida como compost para restauración • Material estéril puede utilizarse como relleno en caminos o restauración de taludes • Reaprovechamiento del agua de escorrentía de la zona de arranque en etapas posteriores de lavado • Reducción de erosión y conservación de sedimentos para uso posterior en recuperación de oro mediante manejo de sedimentos

Figura 3.29. Diagrama del proceso de explotación y beneficio

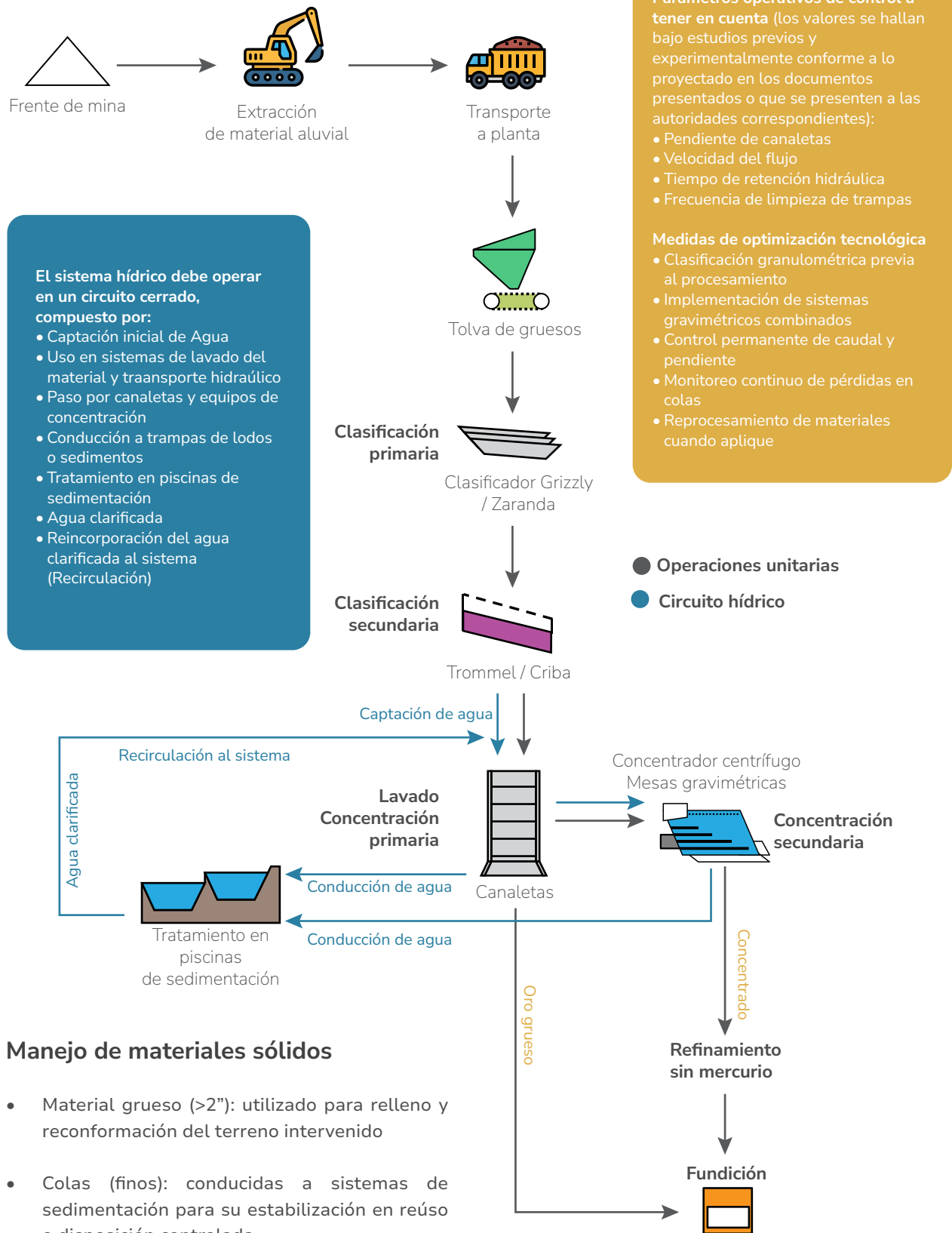


Tabla 3.12. Tecnología utilizada en la explotación aluvial

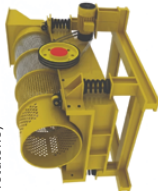
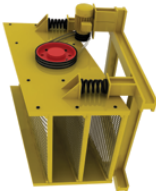
Etapa		Tecnología/equipo	Capacidad típica	Eficiencia de recuperación	Ventajas	Limitaciones
Clasificación		Zaranda vibratoria	5-50 m³/h	Media	- Bajo Costo - Fácil mantenimiento	Menor eficiencia con arcillas
		Trommel* (tambor rotatorio)	10-100 m³/h	Alta	Mejor desintegración de arcillas	Mayor consumo de agua
Lavado		Canaletas hidráulicas (Sluice box)	5-30 m³/h	50-70%	- Económica - Fácil operación	Baja eficiencia en oro fino
Concentración		Concentrador centrífugo	0.5-20 m³/h	80-95%	- Alta eficiencia - Sin químicos	Requiere energía estable
		Mesa gravimétrica	0.5-2 m³/h	70-90%	Alta recuperación de oro fino	Requiere operación técnica
Sistema integrado		Planta gravimétrica portátil	2-10 m³/h	85-95%	- Sistema completo - Alta eficiencia	Mayor inversión inicial
Bombeo (energía)		Bomba de agua de alta eficiencia	5-50 m³/h		Control hidráulico del proceso	Consumo de combustible (diesel o sistemas híbridos)
Tratamiento de agua		Piscinas de sedimentación (HDPE)	1-5 m³	60-80% turbidez	- Bajo costo - Fácil implementación	Requiere espacio
Control sólidos		Trampas de sedimentos	1-3 m³	Alta retención sólidos	- Simples - Eficientes	Limpieza frecuente

*Sistemas con Trommel pueden escalar hasta capacidades superiores (10-150t/h), dependiendo del diseño modular

El esquema de proceso de explotación y beneficio implementado con circuito de agua y manejo de materiales sólidos propuesto (sistema integrado) permite una operación minera técnicamente eficiente, ambientalmente sostenible y alineada con los lineamientos normativos vigentes, optimizando el aprovechamiento del recurso aurífero y reduciendo significativamente los impactos asociados a la actividad.



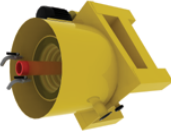
Tabla 3.13. Portafolio de tecnologías por etapa del proceso (Entradas – Salidas – Economía Circular)

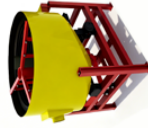
Operación unitaria o Actividad	Entradas	Tecnologías disponibles	Criterios de selección	Salidas	Limitantes / Consideraciones técnicas	Contribución a eficiencia EC / P+L y Aprovechamiento EC
Pretratamiento (clasificación y preparación del material)	- Material bruto aluvial. - Agua para lavado. - Energía.	 Trommel (tambor rotatorio)	- Permite un lavado eficaz de lodos y arcillas - Clasifica el material en función de tamaños, alimentando de forma más homogénea la siguiente etapa de concentración. - Se emplea cuando el material extraído contiene alta proporción de arcillas o aglomerados, y se requiere un proceso que combine lavado con separación por tamaño antes de ingresar a mesas, jigs o centrifugas de recuperación de oro.	Material clasificado por tamaño: - arena fina. - grava. - pedras. - lodo / arcilla.	Separar material mayor a 2" antes del lavado. Clasificar en fracciones: - gruesos (rechazo). - medios (tratamiento gravimétrico). - finos (requieren mejor control hidráulico). - reduce carga innecesaria mejorando eficiencia.	- Reuso de agua de lavado mediante sedimentación. - Aprovechamiento de arena fina como agregado o relleno. - Venta de gravilla para construcción.
		 Zaranda vibratoria (2 - 3 mallas) Grizzly (rejilla primaria)	- Permite una clasificación más precisa por tamaños que puede ser ajustada mediante diferentes mallas o múltiples niveles. - Tiene alta eficiencia de producción y es relativamente fácil de mantener. - La zaranda vibratoria es preferida cuando el material a procesar es comparativamente más limpio (menos arcilloso) o se necesita un control granulométrico más fino antes del ingreso a concentradores o mesas.			
BENEFICIO						
Concentración Gravimétrica (Sistema de lavado y transporte hidráulico)	- Material clasificado: gravas + arenas con oro (clasificado). - Agua: para transportar y separar (ideal en circuito cerrado). - Energía.	 Riffles	Para que funcione bien, tenga en cuenta: - Tipo de material: mejor con gravas y arenas limpias (poco barro). - Tamaño del material: ideal $\leq 2-3$ cm (use zaranda antes). - Tipo de oro: funciona mejor con oro medio y fino (bien ajustado) - Pendiente del canalón: entre 5° y 15° (ajustable). - Tipo de riffles / alfombra: Alfombra + expanded metal $\rightarrow$ captura oro fino / Riffles altos $\rightarrow$ mejor para oro más grueso. - Disponibilidad de agua: requiere flujo continuo (mejor si se recicla). - Regla práctica: si ve que el material corre muy rápido y no se "asienta", baje la pendiente o el caudal. Recomendación práctica (configuración básica) (opcional) - Zaranda $\rightarrow$ Canalón $\rightarrow$ Mesa/canaleta fina Así recupera: - Canalón: oro medio. - Etapas final: oro fino.	- Concentrado: queda en la alfombra/riffles (se limpia periódicamente). - Colas: arena y grava que salen al final. - Agua: puede reciclarse a la entrada.	- Mucho barro/arcilla $\rightarrow$ tapa la alfombra y se pierde oro. - Pendiente o caudal mal ajustado $\rightarrow$ el oro se va en las colas. - Oro muy fino (harina) $\rightarrow$ puede escaparse si no hay buena alfombra. - Sobrealimentación $\rightarrow$ satura el canalón y baja la recuperación. - Clasificar antes (zaranda): mejora mucho la recuperación. - Controlar pendiente y caudal: Muy rápido $\rightarrow$ pierde oro / Muy lento $\rightarrow$ se llena y tapa. - Espesor de la capa de material: delgada y continua. - Limpiezas periódicas: no deje saturar la alfombra. - Longitud del canalón: más largo = más oportunidad de capturar oro fino. - Distribución del flujo: el agua debe entrar pareja (sin chorros).	El canalón bien manejado ayuda a: - Reutilizar agua (poza + bomba $\rightarrow$ circuito cerrado). - Reducir retrabajos (mejor captura desde el inicio). - Aprovechar mejor el material (menos oro perdido en colas). - Disminuir consumo de insumos (equipo simple, baja energía). - Producción más limpia. - Sin mercurio. - Menor captación de agua si se recicla. - Menos generación de lodos si se desloma antes. - Menor impacto al río (sin vertimientos).

***Ficha técnica al finalizar de la guía**

El canalón es una canaleta inclinada por donde pasa el material con agua. Las riffles (trampas) y la alfombra hacen que: el oro (pesado) se quede atrapado: la arena y grava (liviano) siga y salga.

Operación unitaria o Actividad	Entradas	Tecnologías disponibles	Criterios de selección	Salidas	Limitantes / Consideraciones técnicas	Contribución a eficiencia EC / P+L y Aprovechamiento EC
BENEFICIO						
Concentración Gravimétrica	- Material aluvial clasificado (generalmente medio a grueso). - Agua de proceso (pulsaante y preferiblemente reciclada). - Energía eléctrica o mecánica (según el tipo de jig). *Ficha técnica al finalizar de la guía El jig es un equipo que separa el oro usando pulsos de agua. Es bueno para oro grueso y medio porque el agua sube y baja, y eso hace que: Lo pesado (oro) baje - Lo liviano (arena) suba Es como "sacudir" el material para que el oro se vaya al fondo pero necesita material limpio (poco barro) Permite reciclar agua y reducir impacto Es una herramienta clave para una minería más eficiente y limpia	Jig 	- Tipo de material: funciona mejor con gravas y arenas, no con mucho barro. - Tamaño del material: ideal entre 2mm y 20mm. - Contenido de oro: bueno cuando hay oro grueso o medio. - Disponibilidad de agua: necesita agua, pero se puede reciclar. - Capacidad: escoja según cuánto material procesa por día. - Regla práctica: Si el material tiene mucho barro, primero lave.	- Concentrado de minerales pesados (oro y otros). - Relaves livianos (gravas y arenas). - Agua reutilizable dentro del sistema.	No trabaja bien con: - Mucho barro o arcilla. - Material muy fino (oro muy fino se puede perder). Requiere: - Flujo de agua constante. - Buen control de pulsación. - Si se alimenta mal: - Baja recuperación. - Mantener flujo uniforme de material. - No sobrecargar el equipo. - Controlar: Frecuencia de pulsos / Altura de la cama (lecho de material). - Hacer limpiezas periódicas del concentrado - Usar clasificación previa (zaranda). - Combine el jig con: clasificación (zaranda) y canaleta o mesa. Así mejora la recuperación total.	El jig ayuda a trabajar mejor y gastar menos: - Reutiliza agua (circuito cerrado). - Reduce pérdida de oro (mejor aprovechamiento). - Disminuye retrabajos. - Menos material desperdiciado. Resultado con más eficiencia y menos impacto al río 🌱 Producción más limpia. Comparado con otros métodos: - No usa mercurio. - Puede trabajar con agua reciclada. - Reduce generación de lodos.
	- Pulpa mineral previamente clasificada (partículas finas a medias). - Agua de proceso. - Energía eléctrica	Mesas vibratorias 	Tamaño del grano: son eficientes para recuperar granos de oro de hasta 200 mallas (0,074 mm), la eficiencia depende del rango de distribución del tamaño de partícula Altura de la mesa: la altura de las plataformas vibratorias depende del tamaño del grano del mineral molido, pero suele ser de 3 a 5 mm Cantidad de mineral que procesa hasta 2 toneladas por hora (t/h) Velocidad: la alta velocidad es útil para tamaños de grano fino de oro Ángulos de pendiente: los ángulos más altos de la pendiente lateral de la mesa permiten procesar más mineral. Los ángulos más bajos de la pendiente frontal permiten la retención de materiales más finos y ligeros en la mesa.	- Concentrado de minerales pesados (oro libre). - Material intermedio (middlings), susceptible de reprocesamiento. - Relaves livianos (arena estéril). - Agua que puede ser reciclada.	- Se requiere trasladar el mineral hasta la planta de beneficio - Requieren alimentación controlada - Alta eficiencia en oro fino Optimización: - Combinar tecnologías (ej: canaleta + centrifugo) - Recircular colas para retratamiento - Para una eficiente concentración gravitacional debe tenerse en cuenta: -Una buena liberación de partículas -La distribución de tamaños en alimentación -La forma de las partículas -Las diferencias de densidad de los sólidos a separar -Disponibilidad de agua	- Permite la separación eficiente por gravedad sin uso de reactivos químicos. - Facilita la recuperación de oro fino que no se captura en canaletas o bateas. - Genera fracciones intermedias que pueden reintegrarse al circuito para retratamiento. - Reduce el contenido de oro en relaves, disminuyendo pérdidas económicas. - Favorece la recirculación del agua, reduciendo consumo hídrico y descargas al ambiente.

Operación unitaria o Actividad	Entradas	Tecnologías disponibles	Criterios de selección	Salidas	Limitantes / Consideraciones técnicas	Contribución a eficiencia EC / P+L y Aprovechamiento EC
BENEFICIO						
Concentración Gravimétrica	- Pulpa: arena fina + agua + oro. - Agua de proceso con caudal de alimentación controlado. - Energía eléctrica.	Concentrador centrífugo tipo Falcon  *Ficha técnica al finalizar de la guía Equipo que gira a alta velocidad y usa la fuerza centrífuga para separar por peso: oro (muy pesado) queda atrapado en los anillos del tazón y arena/liviano sale con el agua. Ideal para oro fino y muy fino que el canalón o jig pueden perder. El Falcon recupera el oro que no ves. Si el material está limpio y bien clasificado, la recuperación sube mucho.	- Tipo de oro: mejor para fino y muy fino. - Granulometría: material fino (≤ 2 mm). - Preparación previa: clasificado y deslamado (poco barro). - Capacidad del equipo: acorde a t/h de la operación. - Disponibilidad de agua: necesaria, preferible en circuito cerrado. - Energía: requiere motor eléctrico estable. - Objetivo: recuperación final (etapa de afinamiento). Regla práctica: si el oro no se ve en el canalón, el Falcon lo puede recuperar.	- Concentrado (oro fino) → descarga periódica. - Colas (material liviano). - Agua → recirculación.	- No funciona bien con: Mucha arcilla/lodo. Material grueso (sin clasificar). - Requiere: Energía eléctrica / Operación más técnica. - Mala operación: Sobrealimentación → pierde oro Mala limpieza → baja eficiencia. Clasificar y deslamar antes (muy importante). Controlar: - Velocidad de giro (G). - Caudal de alimentación. % de sólidos en la pulpa. Mantener flujo continuo y estable - Realizar descargas periódicas del concentrado. - Evitar vibraciones y desbalance del equipo. - Tamaño de alimentación: ≤ 2mm. % sólidos: 20 – 40%. - Operación: continua con descargas periódicas. Recomendaciones de uso (flujo) Zaranda → Canalón/Jig → Falcon Canalón/Jig: recupera oro grueso y medio. Falcon: recupera oro fino restante.	- Reutiliza agua (circuito cerrado). - Recupera oro fino que antes se perdía. - Reduce retrabajos de colas. - Mejora el aprovechamiento total del recurso. Resultado: - Más oro con el mismo material. - Menor pérdida al ambiente. Producción más limpia - Sin mercurio ni químicos. - Menor consumo de agua (recirculación). - Menos relaves con oro (menos pasivo ambiental) - Menor impacto al río.
	- Pulpa clasificada (partículas finas a medias). - Energía eléctrica. - Agua de fluidización.	Concentrador centrífugo Tipo Knelson	- Capacidad típica (~3–10tph según modelo). - Buena recuperación de oro fino - Fuerza centrífuga (G) Media (~60–80G).	- Concentrado gravimétrico de alta ley. - Relaves con menor contenido metálico. - Agua de proceso recirculable.	- Disminuye el rendimiento en tamaños de partícula ultrafinos - Sensible a flujo de agua (bajo uso de agua) y condiciones de alimentación - Optimización: - Combinar tecnologías (ej: canaleta + centrífugo) - Recircular colas para retratamiento	- Permite la recuperación eficiente de partículas finas retenidas en los riffles. - Reduce pérdidas de oro en relaves. - Facilita el reprocesamiento interno del material. - Contribuye a la optimización del recurso mineral sin aumentar extracción.

Operación unitaria o Actividad	Entradas	Tecnologías disponibles	Criterios de selección	Salidas	Limitantes / Consideraciones técnicas	Contribución a eficiencia EC / P+L y Aprovechamiento EC
BENEFICIO						
Concentración Gravimétrica	- Pulpa aluvial clasificada (medio-fino). - Agua de proceso. - Energía eléctrica (baja demanda).	Concentrador centrífugo tipo GoldKacha 	- Capacidad típica: Pequeña/mediana (1-3tph). - Consumo de agua moderado - Sencillo, económico, fácil transporte.	- Concentrado de oro fino. - Relaves con bajo contenido aurífero. - Agua reutilizable.	- Limitado para ultrafinos: menor fuerza centrífuga. - Optimización: - Combinar tecnologías (ej: canaleta + centrífugo) - Recircular colas para retratamiento	- Adecuado para operaciones pequeñas y medianas. - Mejora la recuperación frente a bateas tradicionales. - Reduce pérdidas de oro fino en procesos artesanales. - Promueve tecnologías de bajo impacto ambiental y fácil integración comunitaria.
	- Pulpa clasificada (fino a medio). - Agua. - Energía eléctrica.	Knudsen Bowl	- Tamaño de partícula: Fino a medio ($\geq 50\mu m$). - Capacidad típica: Media (~3-4tph). - Consumo de agua moderado - Complejidad de operación: Bajamedia; relativamente fácil de usar.	- Concentrado retenido en ranuras. - Relaves con menor contenido de oro. - Agua recuperable.	Menos eficiente que centrífugas modernas en finos.	- Permite la recuperación adicional de oro fino tras procesos primarios. - Funciona como etapa de re-beneficio. - Reduce acumulación de oro en relaveras. - Aumenta la eficiencia global del circuito sin ampliar huella minera.
	- Pulpa con material medio a grueso. - Agua (gravedad, sin energía eléctrica).	Concentrador en espiral 	- Tamaño de partícula: Mediogrueso (~0.5-2mm); - Consumo de agua: Bajomoderado (solo flujo de pulpa). - Complejidad de operación: Muy baja; sin partes móviles, solo agua y gravedad.	- Fracción concentrada (minerales pesados). - Fracción liviana (estériles). - Agua que puede recircularse.	- Poco eficiente para partículas finas. - Depende de liberación y tamaño uniforme.	- Equipo pasivo, de bajo consumo energético. - Ideal para preconcentración y clasificación. - Reduce carga a equipos posteriores (centrífugos). - Disminuye volumen de material enviado a relaves. - Favorece circuitos de beneficio más eficientes y sostenibles.

La eficiencia de cada método depende del tamaño de partícula. La amalgamación con mercurio es efectiva entre 70 μm y 1.5 mm. La cianuración recupera más del 90 % del oro fino (<70 μm) pero requiere más de 60 horas para partículas mayores a 300 μm . La gravimetría tradicional cae bruscamente por debajo de 100 μm ; los concentradores centrífugos modernos (Knelson, Falcon, BGS) recuperan 90-99 % hasta 10-40 μm sin químicos.

Caso de éxito: el Proyecto Río Suratá (CDMB-BGR, Vetas y California, Santander) demostró que la implementación de tecnologías limpias permite incrementar la recuperación de oro hasta 200 %, recuperar y reutilizar el 86 % del mercurio que antes se vertía al río, y eliminar totalmente el mercurio en algunas minas.

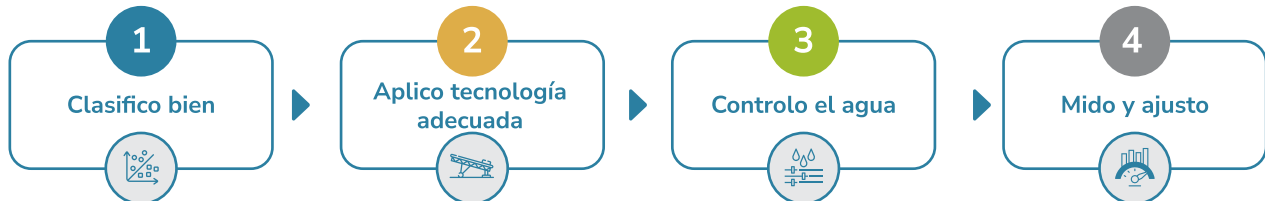
3.4.1.1 Oportunidad de Economía Circular 1: Enfoque integral de optimización del proceso

La mejora del proceso se basa en los siguientes 4 pilares, la integración de éstos permite un enfoque integral de optimización.

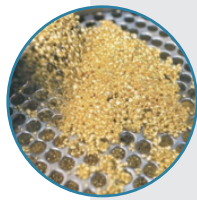
La optimización
NO funciona por separado
por lo siguiente:

Mala granulometría ---> falla la concentración
Mal flujo ---> pierde eficiencia el equipo
Sin monitoreo ---> no hay mejora continua

El ciclo ideal seria:



1- Selección granulométrica adecuada



Objetivo

Separar el material por tamaños para aplicar la tecnología adecuada a cada fracción y evitar pérdidas de oro (especialmente fino).

Criterios técnicos

Grueso: > 2" (50 mm) posible rechazo / inspección manual (puede haber nuggets).
Grava: 10-50 mm Trituración ligera o descarte
Arena gruesa: 2-10 mm Canaletas
Arena fina: 0.5-2mm Canaletas mejoradas / mesa
Finos: 0.1 - 0.5 mm Mesa / centrifugo
Ultrafinos: < 0.1 mm Difícil → centrifugo o reproceso

Nota: en muchos depósitos aluviales, especialmente cerca de la fuente del oro, pueden encontrarse pepitas entre las piedras grandes. Por esta razón, se recomienda revisar visualmente este material y, si es necesario, hacer muestreos antes de descartarlo, evitando así la pérdida de oro y mejorando el aprovechamiento del recurso.

Problemas comunes

- Mezcla de tamaños ---> pérdida de oro fino
- Exceso de finos ---> proceso de acumulación de sedimentos, lodos, arenas o materiales sólidos en las canaletas
- Material arcilloso sin desintegración

Buenas prácticas

- Prelavado en trommel con agua controlada
- Uso de dispersores (romper arcillas)
- Clasificación en al menos 2-3 fracciones

Indicador clave

% de material correctamente clasificado

2- Tecnologías gravimétricas eficientes



Objetivo

Aprovechar la alta densidad del oro (~19.3 g/cm³) para separarlo sin químicos.

Principios físicos

- Diferencia de densidad
- Velocidad de sedimentación
- Tamaño de partícula
- Acción del agua + gravedad + movimiento

Selección tecnológica según tamaño de partícula

- >2 mm: Canaletas (sluice), zarandas
- 0.5 - 2 mm: Canaletas mejoradas, mesas
- 0.1-0.5 mm: Mesa Wilfley, espirales
- <0.1 mm (fino): Centrifugos (Knelson, Falcon)
- <0.05 mm (ultrafino): Difícil → combinar métodos

Problemas comunes

- Caudal excesivo ---> arrastre de oro fino
- Mala inclinación ---> baja recuperación
- Falta de limpieza ---> saturación

Buenas prácticas

- Ajustar pendiente (5-15%) en canaletas
- Alimentación constante y controlada
- Limpieza periódica (cada 2-4 h)
- Retratamiento de colas

Indicador clave

% recuperación de oro (meta: 80-95%)

3- Control hidráulico del proceso



Objetivo

Mantener condiciones de flujo que permitan sedimentación selectiva del oro y transporte eficiente del material.

Variables críticas

1. Velocidad del flujo (V)

- (óptimo): 0.3 – 1.0 m/s. Flujo continuo, ligera turbulencia en rifles.
- (alerta): 1.0 – 1.2 m/s o <0.3 m/s. Flujo irregular o material acumulándose.
- (crítico): 1.2 m/s → oro fino se pierde. <0.2 m/s → canaleta colapsa

2. Caudal de agua (Q)

- (óptimo): 10 – 25 m³/h-m (estable, sin pulsaciones)
- (alerta): Variaciones leves de flujo (inicio de pulsaciones)
- (crítico): Flujo intermitente o excesivo → pérdida directa de oro fino

3. Pendiente de la canaleta

- (óptimo): 5° – 15° (~3°–8°). Flujo uniforme en toda la longitud
- (alerta): Ligeramente alta o baja. Cambios en velocidad del material
- (crítico): Muy inclinada → oro se va
Muy plana → taponamiento

5. Arcillas (slimes)

- (óptimo): Bajo contenido (<10%). Material lavado
- (alerta): Presencia moderada (material pegajoso)
- (crítico): Alta arcilla → oro encapsulado + colmatación

7. Distribución del flujo

- (óptimo): Flujo uniforme en todo el ancho
- (alerta): Pequeñas zonas muertas
- (crítico): Canalización marcada → solo parte del equipo trabaja

9. Frecuencia de limpieza

- (óptimo): Cada 2 – 6 horas
- (alerta): 6 horas
- (crítico): Limpieza tardía → re-movilización del oro

Problemas comunes

- Flujo turbulento ---> pérdida de oro fino
- Flujo muy bajo ---> sedimentación no deseada
- Falta de recirculación ---> alto consumo de agua

Buenas prácticas

- Válvulas de control en bombas
- Diseño en cascada (pozas + trampas)
- Monitoreo visual del flujo
- Ajuste continuo según carga de sólidos

Indicador clave

m³ de agua recirculada / total usado

4. Relación agua / sólidos

- (óptimo): 3:1 – 6:1. Pulpa fluida y estable
- (alerta): 2:1 – 3:1 o >6:1. Flujo denso o demasiado diluido
- (crítico): <2:1 → saturación → pérdida de eficiencia inmediata

6. Altura de lámina de agua

- (óptimo): 2 – 8 cm
- (alerta): 8 – 10 cm o <2 cm
- (crítico): 10 cm → oro fino se pierde
<1 cm → obstrucción total

8. Estado de rifles / alfombras

- (óptimo): Limpios, activos, buena textura
- (alerta): Inicio de eficiencia reducida
- (crítico): Desgastados → oro se remueve

4- Monitoreo y ajuste operativo continuo



Objetivo

Tomar decisiones en tiempo real para maximizar eficiencia y reducir pérdidas.

Qué monitorear

- Producción diaria de oro
- Consumo de combustible
- Caudal de agua
- Pérdidas en colas

Control clave: análisis de colas

- Muestreo cada 2-4 horas
- Si hay oro visible ---> ajustar proceso
- Reprocesar colas si es necesario

*Nota técnica: En depósitos de placer el tenor del oro se expresa en mg/m³ o g/m³ (no en g/t como en mena dura), porque se trabaja con volúmenes de aluvión. La conversión depende de la densidad del aluvión (típicamente 2.7-2.8 t/m³).

Problemas comunes

- Operación "empírica" sin datos
- No medir pérdidas ---> baja rentabilidad
- Falta de trazabilidad

Buenas prácticas

- Formatos simples de registro diario
- Capacitación de operarios
- Ajustes en tiempo real (pendiente, caudal, carga)

Indicadores clave

- % pérdidas en colas
- g/m³ recuperados*
- eficiencia operativa (% tiempo efectivo)

3.4.1.2 Oportunidad de Economía Circular 2: Uso eficiente del agua con recirculación y control de sólidos en el proceso de explotación y beneficio

La minería de oro aluvial es una actividad altamente dependiente del agua, utilizada principalmente para:

- Desagregación del material
- Transporte hidráulico
- Clasificación granulométrica
- Concentración gravimétrica



Objetivo

Minimizar captación de fuentes naturales

Para asegurar una captación sostenible, el pequeño minero debe implementar las siguientes acciones:

Acciones clave:

- Captación controlada y planificada: Toma de agua fuera del cauce principal, realizar la captación en periodos de mayor caudal, realizar aforo de la fuente hídrica impactada, realizar almacenamiento temporal en reservorios
- Aprovechamiento de aguas ya intervenidas: Reuso de agua de relaves, captación de escorrentía interna del área minera
- Optimización del lavado del material: Control de caudal en canaletas, ajuste de pendientes y velocidades, uso de equipos gravimétricos de bajo consumo
- Procesamiento secuencial: en la explotación por bloques, usar el mismo volumen de agua en ciclos sucesivos

La recirculación del agua en los procesos de explotación y beneficio minero es uno de los principios más consolidados de la economía circular aplicada a la minería, ya que permite reducir significativamente la captación de agua fresca, disminuir descargas de efluentes y mejorar la eficiencia operativa del sistema productivo. En minería, la recirculación consiste en recuperar el agua contenida en relaves y corrientes de proceso, tratarla hasta alcanzar condiciones operativas aceptables y reintroducirla en el circuito, configurando sistemas de uso múltiple o circuitos cerrados (Gunson et al., 2012). Diversos estudios demuestran que operaciones mineras con esquemas de recirculación bien diseñados pueden reutilizar más del 70 % del agua total del proceso, reduciendo la huella hídrica y aumentando la resiliencia frente a la variabilidad climática (Mudd, 2008; Northey et al., 2016). En minería de oro aluvial, donde el agua es esencial para la desagregación y concentración gravimétrica, la recirculación representa una oportunidad clave para transformar un uso lineal del recurso en un modelo circular de alta eficiencia hídrica (Lottermoser, 2010).

Como tecnologías más recomendadas (pequeña minería):

- Implementar circuitos cerrados de agua (recirculación $\geq 70-80\%$)
- Uso de piscinas de sedimentación (sistema en cascada 2-3 pozas), trampas de lodos y canales de recirculación
- Reutilización del agua clarificada en: lavado de material / transporte hidráulico

Como Tecnologías complementarias:

- Hidrociclones (cuando hay alta carga de sólidos finos)
- Geotubos (manejo de lodos)

Como Tecnologías condicionadas (según PMA):

- Coagulación-floculación (si se requiere mayor claridad del agua)
- Humedales (para cierre o restauración)

Indicadores clave

m^3 de agua reutilizada / m^3 total consumida





3.4.1.3 Oportunidad de Economía Circular 3: Aprovechamiento de aguas lluvias. Captación con atrapanieblas

Los atrapanieblas representan una alternativa interesante dentro de estrategias de economía circular aplicadas a la minería, al permitir la captación pasiva de agua atmosférica como fuente complementaria para usos operacionales o ambientales, reduciendo la presión sobre fuentes hídricas convencionales. Sin embargo, su implementación no es universal, ya que su viabilidad depende estrictamente de condiciones climáticas y geográficas específicas, como alta humedad relativa, presencia frecuente de niebla o neblina, patrones de viento favorables y topografías que faciliten la interceptación de masas de aire húmedo. En este contexto, su aplicación podría ser técnicamente viable en ciertas regiones mineras del Pacífico colombiano, donde convergen elevados niveles de precipitación, humedad atmosférica persistente y condiciones orográficas favorables, lo que abre oportunidades para su uso en abastecimiento auxiliar de agua, restauración ecológica, control de polvo o apoyo a procesos no críticos, integrando soluciones basadas en la naturaleza dentro de modelos de minería más sostenible y resiliente. No obstante, no se limita exclusivamente al Pacífico colombiano, su aplicabilidad debe evaluarse caso por caso, considerando variables climáticas

El aprovechamiento de aguas lluvias mediante el uso de atrapanieblas como sistema complementario, no principal pero que constituye una oportunidad para impulsar la economía circular hídrica, que permite captar agua atmosférica (niebla/rocío) para reducir la captación de fuentes superficiales en operaciones aluviales y así abastecer cierta parte de agua al casino o campamento o humectación de vías (control de polvo) y parte del proceso de beneficio en la concentración gravimétrico como lo es lavado inicial del material, alimentación de canaletas, reposición de pérdidas en recirculación. De ello depende altamente las condiciones climáticas (niebla) por ende su producción es variable.

¿Cómo funciona un atrapanieblas?

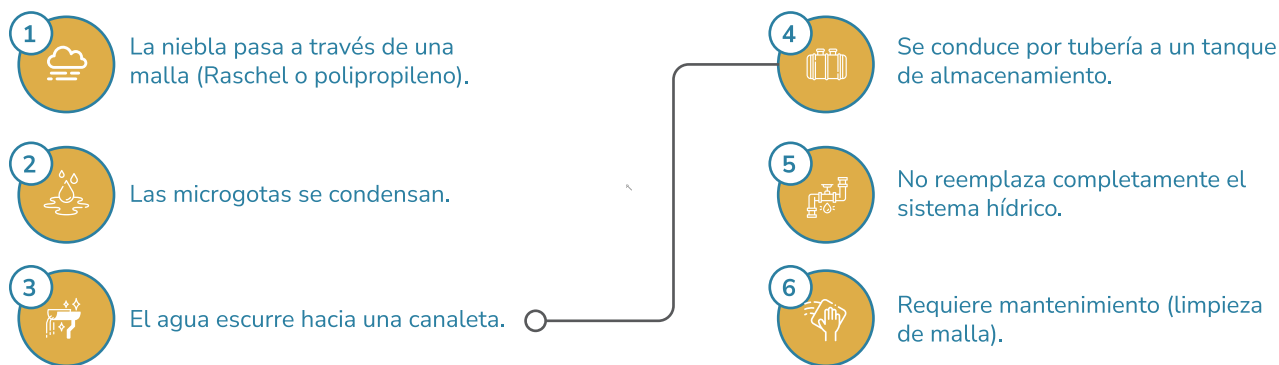


Figura 3.30. Componentes de un atrapaniebla



Lo ideal es de 2 - 5 paneles integrados al sistema de recirculación para poder lograr cubrir de 5 a un 20% del consumo de agua

Tabla 3.14. Clasificación de tecnologías de tratamiento de aguas para minería aluvial artesanal y de pequeña escala

Categoría	Tecnología de tratamiento	Principio de funcionamiento	Eficiencia típica	Ventajas / Cuando aplicar	Limitaciones	Aplicabilidad
Físicas (primarias)	Sedimentación (pozas)	Decantación por gravedad de sólidos suspendidos.	60 – 80% turbidez.	• Simples, bajo costo, fácil operación de remoción de sólidos gruesos y medios. • Primer tratamiento del agua de lavado y relaves.	Baja eficiencia para partículas finas (<20 µm); requiere gran superficie	Alta
	Pozas en cascada	Sedimentación progresiva	Mejora remoción de sólidos finos frente a una sola poza	Cuando se busca aumentar % de recirculación sin alta inversión		
	Espesadores gravitacionales	Aumentan concentración de sólidos (Sedimentación acelerada); recuperación rápida y con grandes volúmenes de agua clara.		Beneficio gravimétrico continuo y relaves finos; cuando se busca recircular agua al proceso.	Sensibles a variaciones de caudal y granulometría; requieren control de floculación	Alta
	Espesadores de alta densidad	• Sedimentación + reología controlada. • Mayor recuperación de agua; menor volumen de relaves.	• Diseño cono profundo 54-70% sólidos • Recuperación agua: 85-95%	Cuando el agua es crítica		
	Trampas de sedimentos	Retención de partículas gruesas por reducción de velocidad.	50 – 70% sólidos.	Simples, mantenimiento básico.	Limpeza frecuente.	Alta
	Lechos de secado / geotextiles drenantes	• Deshidratación pasiva de relaves; recuperación progresiva de agua. • Evaporación y drenaje natural.		Operaciones aluviales de baja a mediana escala (bajo costo); climas cálidos, operación pasiva.	Dependencia climática (seca); tiempos largos de secado.	
	Clasificadores hidráulicos: Canales de desaceleración o de decantación	• Disminución de velocidad de flujo para favorecer sedimentación. • Permiten separar fracciones granulométricas.	40 – 60%.	Fácil implementación en explotación aluvial continua, Integrables al diseño del frente minero.	• Baja eficiencia en finos. • Pretratamiento antes de espesadores.	Media
	Filtración en grava/arena	Retención física de partículas finas (filtración por medio granular).	50 – 80%.	• Mejora calidad del agua porque mejora turbidez del agua recirculada. • Pulido del agua antes del reuso.	Colmatación (proceso de relleno o acumulación de sedimentos)	Media
Físico-químicas	Relaves espesados o en pasta	Relaves con alto % de sólidos; mínima pérdida de agua.		Gestión integral de relaves y maximización de recuperación hídrica.	Requiere diseño especializado y control geológico.	
	Coagulación – floculación	Agrupación de partículas finas mediante químicos.	80 – 95% turbidez.	Alta eficiencia.	Requiere insumos químicos.	Media
Biológicas (naturales)	Clarificadores con floculantes	Sedimentación acelerada con polímeros.	85 – 95%.	Reduce tamaño de piscinas.	Costos operativos.	Media
	Humedales artificiales (NBS)	Tratamiento pasivo; remoción adicional de sedimentos y metales por plantas y microorganismos.	50 – 80%.	• "Bajo impacto ambiental. • Mejora de calidad antes de recirculación o descarga controlada".	No aptos como único sistema de tratamiento; requieren espacio.	Baja-Media
	Fitorremediación	Absorción de contaminantes por vegetación.	Variable.	Solución sostenible.	Lenta.	Baja

Categoría	Tecnología de tratamiento	Principio de funcionamiento	Eficiencia típica	Ventajas / Cuando aplicar	Limitaciones	Aplicabilidad
Tecnologías avanzadas	Hidrociclones o ciclones hidráulicos	Separación por fuerza centrífuga.	60 – 90% sólidos.	Compacto, eficiente, alta capacidad, separación rápida.	- Requiere presión. - Se usa cuando hay alto contenido de arenas finas.	Media
	Filtros prensa (placa o banda)	- Deshidratación de lodos (filtración forzada). - Alta eficiencia de separación sólido-líquido; agua recuperada con bajo contenido de sólidos.	>90% sólidos.	- Reduce volumen de residuos. - Cuando se requiere alta recirculación (>80 %) y control ambiental estricto.	- Alto costo. Alto CAPEX y OPEX. - Manejo de tortas secas.	Baja
	Geotubos drenantes (geobolsas)	- Filtración pasiva y secado de lodos con geotextil. - Portátiles, rápidos de instalar.	80 – 95%.	Fácil manejo de lodos para operaciones temporales.	Requiere insumos.	Media
Sistemas integrados	Circuito cerrado con recirculación de agua de proceso	Reuso continuo del agua tratada dentro del sistema.	70 – 90% ahorro agua.	- Reduce captación. - Operaciones con infraestructura estable y control operativo.	- Requiere diseño adecuado. - Acumulación de sales y finos; requiere monitoreo.	Alta

Criterios de selección

Para elegir la tecnología adecuada se debe considerar:

- Caudal de agua (m³/h)
- Carga de sólidos suspendidos
- Espacio disponible
- Nivel de cumplimiento ambiental requerido
- Costos de operación

Configuración óptima recomendada

Sistema escalonado:

- Trampas de sedimentos
- Piscinas de sedimentación (2–3 en serie)
- (Opcional) Hidrociclón o floculación
- Recirculación del agua

Cumplimiento ambiental en Colombia

Este esquema permite cumplir con:

- Reducción de turbidez (<50 NTU aguas abajo, según PMA)
- Disminución de vertimientos
- Uso eficiente del recurso hídrico
- Lineamientos del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible



3.4.2 Lineamiento 7. Valorización de subproductos

Durante la exploración aluvial se identifica el contenido de oro. Sin embargo, también se generan concentrados pesados (magnetita, ilmenita, rutilo, circón) y volúmenes significativos de gravas y arenas. La valorización temprana de estos materiales como posibles subproductos (si cumplen normativa ambiental y de calidad) permite diseñar modelos de negocio circulares y reducir la fracción que terminaría con estéril en la fase de explotación.

3.4.2.1 Oportunidad de Economía Circular 1: Aprovechar los relaves generados en el proceso de beneficio

Oro residual fino y ultrafino

Tabla 3.15. Variables principales en la selección de tecnologías para valorización de relaves

Variable	Parámetros a evaluar		Implicación para Selección Tecnológica
1. Tipo de subproducto	• Oro residual (fino / ultrafino) • Arena silícea • Grava / canto rodado • Limos y arcillas	• Minerales pesados (Fe-Ti-Zr) • Óxidos Fe-Mn • Agua de relaves	Oro ---> tecnologías de concentración. Arenas / gravas ---> clasificación y uso directo. Finos ---> deshidratación y transformación. Pesados ---> separación física especializada.
2. Granulometría	• > 2 mm (gravas) • 63 µm – 2 mm (arenas)	• 20–63 µm (limos) • < 20 µm (arcillas / Au ultrafino)	Gruesos ---> cribado y trituración. Finos ---> espesadores, filtros prensa. Arenas ---> lavado, ciclones. Ultrafinos ---> flotación o lixiviación.
3. Mineralogía asociada	• Cuarzo dominante • Arcillas (caolinita, illita) • Magnetita / ilmenita	• Óxidos Fe-Mn • Sulfuros traza	Cuarzo limpio ---> construcción / filtración. Arcillas plásticas ---> cerámica / suelos. Minerales magnéticos ---> separación magnética. Sulfuros ---> evitar oxidación / encapsular.
4. Contenido metálico	• Au (g/t) • Fe (% Fe₂O₃) • TiO₂ (%)	• Zr (ppm) • Metales traza (As, Pb, Hg)	Au alto ---> reprocesamiento rentable. Fe/Ti ---> pigmentos o abrasivos. Zr ---> mercado especializado. Metales tóxicos ---> tratamiento previo o restricción de uso.

3.4.2.2 Oportunidad de Economía Circular 2: Simbiosis industrial para arenas, gravas y concentrados pesados

Consiste en evaluar arenas y gravas como materiales de construcción (previa caracterización), analizar magnetita, ilmenita y otros minerales pesados como subproductos según la Ley 685 (art. 61). Aprovechar más materiales desde exploración reduce impactos, aumenta eficiencia y mejora productividad.

Según Méndez et al. (2022), se demostró que las arenas y gravas provenientes de actividades auríferas poseen propiedades geotécnicas adecuadas para su uso como agregados en bloques de hormigón, reemplazando hasta un 50% del agregado natural y reduciendo la necesidad de extraer nuevos materiales. Mediante la toma sistemática de muestras de arenas y gravas (material estéril), ensayos geotécnicos de aptitud (granulometría por tamizado, límites de Atterberg, ensayo de Proctor para densificación y resistencia a la compresión), evaluación de metales asociados o trazas (análisis de elementos potencialmente tóxicos como As, Hg, Pb utilizando ICP-MS), pruebas piloto de sustitución en agregados (monitorear la resistencia mecánica).

Las arenas negras provenientes de la concentración gravimétrica de oro aluvial colombiano contienen aproximadamente un 74 % de minerales pesados aprovechables, distribuidos entre ilmenita (≈20 %), magnetita, circón (≈4-5 %), rutilo y monacita. Una ruta de beneficio integral (clasificación + separación magnética baja intensidad + mesa Wilfley + separación magnética alta intensidad) permite recuperar aproximadamente 6 kilogramos por hora de minerales de tierras raras por cada 10 toneladas por hora alimentadas, sin requerir inversión adicional sustancial.

Normatividad a tener en cuenta: Ley 685 de 2001 – Art. 61: Permite el aprovechamiento integral de minerales y materiales asociados (base legal para reutilizar material no mineralizado), siempre que cumplan la normativa ambiental. Resolución 472 de 2017: Gestión de residuos aprovechables (arenas y gravas). Norma base: ICONTEC, especifica calidad, gradación y límites de impurezas de agregados para concreto (equivalente a ASTM C33). Las normas complementarias (métodos de ensayo NTC/ASTM adoptados): Granulometría, finos, Atterberg, densidad/absorción; Abrasión Los Ángeles (durabilidad); Materia orgánica, equivalente de arena, etc; Desempeño en concreto: NTC 673 (compresión) y NSR-10 (requisitos estructurales). En la práctica: NTC 174 define qué debe cumplir el agregado; las demás normas miden cómo verificarlo.

Tabla 3.16. Aplicación directa en minería aluvial

Tipo de material	Evaluación clave	Decisión
Gravas aluviales	Granulometría + Los Ángeles + CBR	Uso en vías
Arenas	Finos + SE + IP	Uso en concreto o rellenos
Relaves limpios	Granulometría + CBR + finos	Uso condicionado
Relaves con Hg o sulfuros	Metales + TCLP + PGA/PNA	✗ No reutilizar directo

a) Metodología



Fase 1 – Caracterización inicial del material

Durante la exploración se debe ampliar el análisis más allá del contenido de oro:

Caracterización mineralógica

Este conjunto de análisis (los que aplique) permite determinar la fracción económicamente aprovechable, identificar subproductos potenciales, diseñar procesos más eficientes, reducir generación de estériles, incorporar principios de economía circular desde fase exploratoria minimizando riesgos ambientales asociados a mala caracterización.

Tabla 3.17. Diferentes análisis para caracterización de materiales

Etapas	Objetivo Técnico	Método / Técnica	Información que Genera	Aplicación en Minería Aluvial	Nivel de Complejidad
Análisis granulométrico	- Determinar la distribución de tamaños de partícula del material. - Establecer la fracción granulométrica asociada a la mineralización aurífera. - Optimizar el diseño de sistemas de concentración.	Tamizado en seco o húmedo, curva granulométrica.	% de gravas, arenas y finos; tamaño dominante del oro.	- Diseño de canaletas y equipos - Estimación de recuperación - Planificación de sedimentación.	Bajo
Separación gravimétrica preliminar	Concentrar fracción pesada por densidad.	Métodos físicos basados en diferencias de densidad (canaletas, mesas concentradoras o bateo, centrifugas).	- Concentrado pesado preliminar. - Estimación de la ley de oro recuperable.	Evaluación inicial de viabilidad económica y presencia de minerales acompañantes.	Bajo – Medio
Identificación de minerales pesados	- Determinar composición del concentrado. - El concentrado gravimétrico es evaluado para identificar minerales acompañantes con potencial de valorización como subproductos.	Separación magnética manual, lupa binocular, análisis visual.	Presencia de magnetita, ilmenita, rutilo, circón u otros.	Evaluación de subproductos y modelo de negocio circular.	Medio
Difracción de Rayos X (DRX)	Confirmar fases minerales cristalinas, permitiendo confirmar composición mineralógica.	Análisis instrumental en laboratorio especializado.	Identificación mineralógica precisa y cuantificación de fases.	Sustento técnico para valorización comercial y cumplimiento normativo.	Alto
Microscopía óptica	Analizar morfología y tamaño del oro.	Observación con microscopio petrográfico o binocular.	Forma, tamaño, grado de liberación del oro.	Selección de método de beneficio (gravimétrico, combinado, etc.).	Medio
Microscopio Electrónico de Barrido (SEM-EDS)(Si llegase a aplicar)	Caracterización microestructural y química.	Imagen de alta resolución + microanálisis elemental.	Asociación mineralógica, inclusiones, composición puntual.	Optimización metalúrgica y análisis de recuperación potencial.	Alto

Caracterización físico-química

• Densidad y susceptibilidad magnética.

La densidad al ser la relación entre masa y volumen (g/cm^3), es muy importante porque el oro y los minerales pesados tienen alta densidad, lo que permite al tener conocimiento de esta densidad diseñar procesos gravimétricos eficientes y ayuda a estimar comportamiento hidráulico en canaletas. Mientras mayor la diferencia de densidad, más eficiente la separación gravimétrica.

Ejemplo: Oro $\approx 19.3 \text{ g/cm}^3$; Magnetita $\approx 5.2 \text{ g/cm}^3$; Arena silíceas $\approx 2.6 \text{ g/cm}^3$

Mientras que la susceptibilidad magnética es la capacidad de un mineral para responder a un campo

magnético, la cual sirve para separar magnetita del concentrado pesado, preconcentrar fracciones antes de análisis químico y evaluar potencial de subproducto (magnetita comercial).

- **Contenido de Fe, TiO₂, ZrO₂.**

Son análisis químicos que determinan concentración de elementos clave, siendo importantes porque permite evaluar si el concentrado pesado puede comercializarse como subproducto y no considerarse estéril.

- **Ensayos de lixiviabilidad.**

El ensayo TCLP puede emplearse como herramienta complementaria para evaluar la lixiviabilidad de contaminantes en relaves, es decir, estimar del material el potencial de liberación de contaminantes (metales pesados, por ejemplo) bajo condiciones específicas; sin embargo, su uso debe enmarcarse dentro de la normativa colombiana vigente y no sustituye una caracterización integral del material, la cual debe incluir análisis geoquímicos y de generación de drenaje ácido, conforme a los lineamientos del Decreto 4741 de 2005 y la Resolución 1023 de 2005.

- **Determinación de potencial generación de drenaje ácido (si aplica).**

En los depósitos aluviales y de placer colombianos —tales como los distritos de Bajo Cauca antioqueño (Nechí, Cáceres, El Bagre, Zaragoza), Sur de Bolívar, ríos San Juan y Atrato (Chocó), Complejo de Humedales de Ayapel (Córdoba) y Barbacoas (Nariño)—, el oro se ha concentrado por procesos sedimentarios junto con minerales pesados resistentes a la meteorización: magnetita, ilmenita, circón, rutilo, monacita y, en proporciones variables, sulfuros residuales (pirita detrítica, arsenopirita parcialmente oxidada) que no alcanzaron a destruirse durante el transporte fluvial (SGC, 2019; ANM, 2022).

En la minería aluvial, el riesgo de Drenaje Ácido de Mina (DAM) suele ser menor que en depósitos filonianos primarios, ya que buena parte de los sulfuros originales ha sido oxidada o removida durante el transporte sedimentario y la meteorización natural. Sin embargo, esta condición no debe generalizarse: en zonas cercanas a la fuente primaria —Bajo Cauca, Sur de Bolívar y paleoplaceres profundos— los relaves y arenas negras de beneficio pueden contener sulfuros residuales o concentrarlos como minerales pesados, principalmente pirita y, en ciertos casos, arsenopirita, galena o esfalerita, que al quedar expuestos al oxígeno y al agua pueden generar procesos de acidificación y movilización de metales (INAP-GARDGuide, 2009; MEND 1.20.1 (Price, 2009)).

La valorización o reutilización de relaves aluviales (como agregado fino para construcción, relleno estructural, concentrados de arenas negras o separación de minerales pesados valiosos) no debe basarse únicamente en el supuesto de bajo riesgo por tratarse de minería aluvial, sino en una caracterización geoquímica específica del material. En consecuencia, se recomienda realizar ensayos de Balance Ácido-Base (ABA) y las determinaciones complementarias que se describen en la Sección 2, con el fin de determinar si el relave presenta comportamiento generador, no generador o incierto frente al DAM. Este análisis puede ser requerido por la autoridad ambiental como soporte técnico para definir su manejo, aprovechamiento o disposición final (Términos de Referencia ANLA; Decreto 1076 de 2015).

Enfoque de caracterización en tres niveles progresivos

El esquema siguiente sigue el principio de caracterización proporcional al riesgo establecido en MEND 1.20.1 (Price, 2009) y recogido por INAP-GARDGuide (2009, Capítulo 4). La estrategia permite avanzar gradualmente —desde una inspección visual de campo hasta ensayos estáticos de laboratorio y, cuando aplique, ensayos cinéticos— optimizando recursos y escalando la profundidad del estudio solo cuando los resultados del nivel previo lo ameriten. Esta guía presenta el enfoque interpretativo; los procedimientos analíticos detallados deben consultarse en las normas de referencia citadas en cada nivel.

Error conceptual frecuente en pequeña minería aluvial

Afirmación común (incorrecta): “Como es minería aluvial, entonces no genera ácido.” **Lo correcto:** el relave puede concentrar sulfuros residuales en la fracción de arenas negras; por lo tanto, se debe evaluar caso a caso antes de valorizar, reutilizar o disponer el material. Además, en aluvión el riesgo dominante en términos de salud pública y ecosistemas acuáticos suele ser el mercurio residual proveniente de amalgamación previa. Ambos riesgos —acidez potencial y mercurio— deben evaluarse en conjunto y no son mutuamente excluyentes.

NIVEL 1

Evaluación rápida en campo (screening visual y pH en suspensión)

Propósito del nivel. Identificar indicios visuales y fisicoquímicos inmediatos que sugieran la presencia de sulfuros residuales reactivos, sulfatos secundarios (DAM activo o histórico) o productos de oxidación de hierro. Este nivel no clasifica el material como NAF o PAG: es un tamiz que decide si se avanza al Nivel 2.



Qué aporta:

detección temprana de señales críticas (eflorescencias, agua ácida visible, olor a sulfuro) que justifican intervención inmediata.



Qué NO puede responder:

(i) cuantificar el potencial ácido-base; (ii) descartar DAM en sulfuros encapsulados o en fase de lag (latencia, sin acidificación externa aún); (iii) confirmar contenido de mercurio residual.



Costo y tiempo indicativos:

bajo (tiras de pH, frasco de muestreo, agua destilada); ~30 minutos por punto. Ejecutable por el operador o supervisor de planta con capacitación básica.

Tabla 3.18. Indicadores visuales y de campo para riesgo de DAM en relaves aluviales

Indicador	Qué observar	Interpretación preliminar
Color del relave / arenas	Presencia abundante de arenas negras (capas oscuras con brillo metálico).	Concentración de minerales pesados (magnetita, ilmenita) y posibles sulfuros residuales. No indica DAM por sí solo.
Brillos metálicos en partículas	Partículas doradas latón (pirita), gris acero (arsenopirita) o gris plomo (galena).	Sulfuros residuales sobrevivientes al transporte fluvial. Confirmación mineralógica (DRX, lupa binocular, microscopía) recomendada.
Eflorescencias	Costras blancas, amarillas o rojizas sobre pilas secas.	Sulfatos secundarios (jarosita, melanterita, yeso). Señal directa de oxidación de sulfuros. Puede reflejar DAM activo o histórico; requiere confirmación con Nivel 2.
Agua de infiltración o charcos	Coloración rojiza, naranja o marrón en zanjas y pozas de decantación.	Puede indicar oxidación de Fe^{2+} de DAM, pero en regiones tropicales con suelos ferralíticos (Chocó, Bajo Cauca) también refleja hierro natural del suelo o materia orgánica húmica. Medir pH in situ: pH < 4.5 con color ferruginoso es indicativo fuerte de DAM; pH > 6 con el mismo color probablemente es hierro natural.
Olor	Azufre ("huevo podrido") al remover el relave húmedo.	Posible H_2S por oxidación activa de sulfuros o reducción bacteriana en condiciones anóxicas. Interpretar junto con pH y coloración.
pH en suspensión 1:1 (screening de campo)	Mezclar 1 parte de relave con 1 parte de agua destilada; agitar; reposar 10 min; medir con tira o electrodo. NOTA: esto NO es pH de pasta en sentido estricto (Price, 2009 §8.2).	pH < 4: generador activo, pH 4-6: riesgo medio, requiere Nivel 2, pH > 6: no descarta riesgo. Para decisiones formales, confirmar con electrodo calibrado (± 0.1); tiras de pH solo para screening visual.

Fuente: Elaboración propia con base en Tremblay & Hogan eds., (2001), INAP-GARDGuide (2009), Price (2009), Nordstrom & Alpers (1999).

Decisión al final del Nivel 1

- Sin señales visuales y pH > 6: riesgo aparente bajo. Avanzar al Nivel 2 solo si se planea valorizar formalmente el material, si lo exige la autoridad ambiental o si la operación dispone de sulfuros residuales confirmados por mineralogía.
- Una o más señales o pH 4-6: riesgo incierto ---> obligatorio pasar al Nivel 2.
- Eflorescencias, agua ácida visible o pH < 4: evidencia de DAM activo. Aplicar controles de contención inmediatos (Tabla 3.21) y escalar al Nivel 2/3 para cuantificar balance ácido-base y diseñar manejo.

Limitación del Nivel 1: La ausencia de señales visuales no descarta el riesgo de DAM. Los sulfuros pueden estar encapsulados en granos de cuarzo o en fase de latencia (lag phase), sin acidificación externa medible. Para toda valorización formal o disposición controlada se requiere avanzar al Nivel 2. En aluvión, evalúe además el mercurio residual: si existe historial de amalgamación, solicite determinación de Hg total antes de reutilizar el material. El Nivel 1 es un tamiz, no un criterio de aprobación.

NIVEL 2

Ensayos estáticos de laboratorio (Balance Ácido-Base y complementos)

Propósito del nivel. Cuantificar el balance entre la capacidad de generar acidez (AP, Acid Potential) y la capacidad de neutralizarla (NP, Neutralization Potential) del material, y derivar una clasificación preliminar que soporte la decisión de manejo o el escalamiento a ensayos cinéticos.



Qué aporta:
un estimado conservador del balance ácido-base bajo el supuesto de reacción completa; clasificación preliminar PAG / Incierto / Non-PAG; evidencia de especies de azufre y carbonatos presentes.



Qué NO puede responder:
(i) la velocidad de oxidación de sulfuros y de liberación de metales en condiciones de campo; (ii) la duración del periodo de latencia antes de la acidificación; (iii) la movilidad real de metales a pH neutro (ML - Metal Leaching). Para estos aspectos se requieren ensayos cinéticos (Nivel 3).



Muestreo mínimo:
una muestra compuesta representativa por cada tipo de relave o unidad geoquímica, integrada por al menos 5 submuestras de ~1 kg. En operaciones aluviales, separar: (i) arenas negras concentradas (fracción pesada), (ii) colas gruesas, (iii) lodos finos. Documentar coordenadas, profundidad y tiempo de almacenamiento.



Costos indicativos (laboratorios colombianos, 2024):
del orden de ~\$500.000 COP por muestra para ABA Sobek modificado; consultar cotización específica. Tiempo: 10-15 días hábiles.n básica.

Tabla 3.19. Determinaciones estáticas recomendadas y su rol en la interpretación

Parámetro	Qué aporta a la predicción
Azufre total (S _{total} , %)	Contenido total de azufre en la muestra (todas las formas: sulfuros, sulfatos, azufre orgánico si aplica). Valor bruto, NO apto para calcular AP directamente.
Azufre sulfato (S _{sulfato} , %)	Azufre presente como sulfatos. Diferenciar dos categorías: (a) sulfatos inertes (yeso CaSO ₄ ·2H ₂ O, baritina BaSO ₄): no son fuente de acidez; (b) sulfatos secundarios que ALMACENAN acidez (jarosita KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆ , melanterita FeSO ₄ ·7H ₂ O, copiapita, halotrichita): liberan H ⁺ al disolverse o al hidrolizarse cuando sube el pH ambiental. Estos sulfatos SÍ son fuente de acidez futura latente y deben evaluarse mineralógicamente; cuando estén presentes en proporciones significativas se recomienda complementar el ABA con un balance de acidez almacenada.
Azufre sulfuro (S _{sulfuro} , %)	Azufre contenido en minerales sulfurados reactivos (pirita, arsenopirita, etc.). Base correcta para el cálculo del AP. ----> S_{sulfuro} = S_{total} – S_{sulfato}
AP – Potencial de Acidez (kg CaCO ₃ eq./t)	Acidez potencial máxima asumiendo oxidación completa de sulfuros a H ₂ SO ₄ e hidrólisis de Fe ³⁺ . *AP = %S_{sulfuro} × 31,25 Supone 2 moles H ⁺ por mol S. Para arsenopirita, galena o sulfuros no-Fe el factor puede diferir (MEND 2009 §12.7).
NP – Potencial de Neutralización (kg CaCO ₃ eq./t)	Capacidad de neutralización aportada por carbonatos reactivos (calcita > dolomita >> siderita) y, marginalmente, silicatos reactivos. La NP medida por Sobek puede sobrestimar la NP efectiva si hay siderita (FeCO ₃), que al disolverse libera Fe ²⁺ que se oxida y vuelve a consumir alcalinidad.
NPR = NP / AP (adimensional)	Relación normalizada. Criterio PRIMARIO de clasificación (MEND, 2009 §14).
NNP = NP – AP (kg CaCO ₃ eq./t)	Diferencia neta. Criterio COMPLEMENTARIO. Cuando NPR y NNP dan clasificaciones discordantes, prevalece NPR (Price, 2009).
NAG (pH tras oxidación forzada con H ₂ O ₂)	Test NAG (Net Acid Generation) que combina componentes cualitativos y cuantitativos: (i) NAG pH – categoría cualitativa: pH < 4,5 = PAF, pH 4,5-5,5 = incierto, pH > 5,5 = NAF; (ii) NAG capacity – kg H ₂ SO ₄ por tonelada de material; (iii) NAG total acidity – titulado a pH 4,5 y pH 7,0, expresado en kg H ₂ SO ₄ /t. Útil para detectar materiales cerca del umbral o con S no-reactivo. Se interpreta en conjunto con NPR/NNP, no como reemplazo.
Mineralogía (DRX, microscopía óptica o QEMSCAN/MLA)	Línea de evidencia crítica en aluvión. Permite: (i) distinguir pirita detrítica (poco reactiva) de pirita primaria fresca; (ii) verificar si el NP viene de calcita, dolomita o siderita; (iii) Identificar tres categorías mineralógicas: (a) DAM activo actual: melanterita, copiapita, halotrichita, schwertmannita (precipitan en condiciones recientes y/o son altamente solubles); (b) DAM histórico con acidez almacenada: jarosita, schwertmannita transformándose (su disolución o hidrólisis a pH > 4 libera nuevamente acidez); (c) DAM atenuado: goethita, hematita, ferrihidrita estable (productos finales de transformación, relativamente inertes en condiciones óxicas estables). Esta clasificación informa tanto el manejo actual como el riesgo de reactivación. Identificar productos secundarios diagnósticos con colores y rangos de pH de estabilidad: • Schwertmannita Fe ₈ O ₈ (OH) ₆ SO ₄ – amarillo brillante, pH 2,8–4,5 (DAM activo). • Jarosita KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆ – amarillo paja, pH 1,5–3 (acidez almacenada). • Ferrihidrita 5Fe ₂ O ₃ ·9H ₂ O – marrón rojizo, pH 4–7 (atenuación temprana). • Goethita α-FeOOH – marrón amarillento, pH 4–8 (producto final estable). • Melanterita FeSO ₄ ·7H ₂ O – verde-azulado, sulfato eflorescente soluble (DAM activo, first flush). • Copiapita Fe ²⁺ Fe ³⁺ ₄ (SO ₄) ₆ (OH) ₂ ·20H ₂ O – amarillo-naranja, sulfato eflorescente complejo (DAM extremo). • Halotrichita FeAl ₂ (SO ₄) ₄ ·22H ₂ O – blanco-amarillento fibroso, sulfato eflorescente (DAM activo en clima semi-árido).
Hg total (específico para aluvión)	Concentración de mercurio residual por historial de amalgamación. Parámetro crítico en aluvión colombiano. Nota: el TCLP (EPA 1311) no es adecuado para evaluar lixiviableidad de Hg metálico en relaves de amalgamación; complementar con EPA 1631/7474 para Hg disuelto en lixiviados.

Fuente: Elaboración propia con base en Sobek et al. (1978), Tremblay & Hogan eds., (2001), INAP-GARDGuide (2009), AMIRA (2002), EPA (2007).

***Cálculo del factor 31,25:**

- Pirita: $\text{FeS}_2 + 7/2 \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}^+ \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2 \text{SO}_4^{2-} + 2 \text{H}^+$
- Oxidación posterior: $\text{Fe}^{2+} + 1/4 \text{O}_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{Fe}^{3+} + 1/2 \text{H}_2\text{O}$
- Hidrólisis: $\text{Fe}^{3+} + 3 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + 3 \text{H}^+$

- Balance neto: $\text{FeS}_2 + 15/4 \text{ O}_2 + 7/2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + 2 \text{ SO}_4^{2-} + 4 \text{ H}^+$
- Por mol FeS_2 (que contiene 2 mol S): 4 mol H^+ = 2 mol H^+ por mol S
- 1 mol CaCO_3 neutraliza 2 mol H^+ : factor 50 g CaCO_3 /mol H^+
- Por % S sulfuro (10 kg S/t): $10 \times (2/32) \times 50 = 31,25 \text{ kg CaCO}_3/\text{t}$

La advertencia para arsenopirita, galena y sulfuros no-Fe es correcta:

- Arsenopirita: $\text{FeAsS} + 14 \text{ Fe}^{3+} + 10 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 12 \text{ Fe}^{2+} + \text{H}_3\text{AsO}_3 + \text{SO}_4^{2-} + 11 \text{ H}^+$. Factor diferente.
- Galena: $\text{PbS} + 2 \text{ O}_2 \rightarrow \text{PbSO}_4$ (sulfato insoluble). No genera acidez neta significativa.
- Esfalerita: $\text{ZnS} + 2 \text{ O}_2 \rightarrow \text{ZnSO}_4$. Mínima acidez (Zn^{2+} no hidroliza significativamente a pH típico).



Interpretación técnica, clasificación y decisión de manejo

Propósito del nivel. Integrar las líneas de evidencia del Nivel 2 (ABA, mineralogía, Hg, NAG) para clasificar el material y decidir su manejo. Cuando el material cae en zona incierta o se destina a valorización formal, se requiere escalar a ensayos cinéticos (celdas de humedad según ASTM D5744, ≥ 21 semanas) para estimar la velocidad real de reacción.



Criterios de clasificación: la siguiente tabla adopta el marco internacional estándar establecido en MEND 1.20.1 (Price, 2009) y recogido por INAP-GARD Guide (2014). Los umbrales NPR = 1 y NPR = 2 no son valores arbitrarios: derivan del balance estequiométrico de la reacción pirita-calcita bajo condiciones de intercambio de CO_2 con la atmósfera, donde la neutralización efectiva requiere al menos 2 moles de CaCO_3 por mol de S oxidado para mantener $\text{pH} > 6,3$ (MEND 2009, §14.3).

Tabla 3.20. Clasificación por criterios MEND 1.20.1 / INAP-GARD

NPR = NP/AP	NNP (kg CaCO_3 /t)	Clasificación	Decisión de manejo
< 1	< -20	● PAG – Potencialmente generador de acidez	Manejo controlado (Tabla 3.21). No valorizable sin tratamiento. Ensayos cinéticos recomendados para dimensionar tasa de oxidación si la escala lo justifica.
1 - 2	-20 a +20	● Incierto	Ensayos cinéticos obligatorios (celdas de humedad ASTM D5744, ≥ 20 semanas) antes de definir manejo definitivo. Caracterización mineralógica recomendada.
> 2	> +20	● Non-PAG – No generador de acidez (bajo supuestos ABA)	Potencialmente apto para valorización, previa verificación de: (i) TCLP para metales (EPA 1311) conforme a Decreto 4741/2005; (ii) Hg total; (iii) evaluación de lixiviación de metales a pH neutro (ML) si aplica.

Nota técnica — Factor de seguridad para diseño en contexto colombiano

El criterio MEND NPR > 2 separa materiales Non-PAG de materiales inciertos bajo supuestos ideales (AP y NP correctamente medidos, reactividad uniforme). Algunos autores (Price, 1997; Soregaroli & Lawrence, 1998) y jurisdicciones específicas recomiendan un factor de seguridad adicional (NPR > 3 o incluso > 4) cuando concurren: (i) climas muy húmedos con alta lixiviación preferencial de NP; (ii) fracciones finas con AP preferencialmente expuesto; (iii) presencia de siderita o silicatos en el NP medido; (iv) cercanía a receptores sensibles (humedales Ramsar, rondas hídricas, captaciones). Para proyectos en el ámbito de licenciamiento ANLA en zonas sensibles esta guía recomienda adoptar NPR > 3 como factor de seguridad de diseño.

Complementos obligatorios para valorización formal

Para cualquier material destinado a valorización (agregado, relleno, restauración), además del ABA y la mineralogía se requiere:

- **TCLP (EPA Method 1311)** para metales regulados, comparado con los límites del Decreto 0631 de 2015 ($\text{As} \leq 5,0 \text{ mg/L}$; $\text{Pb} \leq 5,0 \text{ mg/L}$; $\text{Cd} \leq 1,0 \text{ mg/L}$; $\text{Hg} \leq 0,2 \text{ mg/L}$).
- **Hg total en sólido (EPA 7473)** y, si aplica, Hg disuelto en lixiviado (EPA 1631/7474). El TCLP por sí solo no es suficiente para evaluar riesgo por mercurio metálico en relaves de amalgamación.
- **Evaluación de lixiviación de metales a pH neutro (ML)** cuando haya sulfuros distintos de pirita (galena, esfalerita, arsenopirita). El drenaje neutro con altos metales es un riesgo real, aunque el material sea Non-PAG (Tremblay & Hogan eds., 2001).

Protocolo de manejo según clasificación

Tabla 3.21. Acciones según clasificación ABA en minería aluvial

Clasificación	Acciones permitidas	Controles obligatorios	Prohibiciones / limitaciones
● Non-PAG (NPR > 2, o > 3 con factor de seguridad en zonas sensibles; TCLP y Hg conformes)	Valorización de arenas negras (ilmenita, circón, rutilo, monacita-REE), relleno de piscinas, subbase vial, material de cobertura en restauración. Uso condicionado al cumplimiento simultáneo de ABA, TCLP y Hg.	Control de erosión y SST en escorrentía (Resolución 631/2015); monitoreo semestral de pH, conductividad, sulfatos y metales prioritarios (As, Pb, Cd, Hg); registro de volúmenes y destinos; reevaluación anual.	Uso en contacto directo con cuerpos de agua sin pantalla hidráulica; uso en zonas de ronda hídrica sin estudio específico.
● Incierto (NPR 1-2)	Uso controlado solo tras ensayos cinéticos (ASTM D5744, ≥ 20 semanas). Si se opta por mezcla con material alcalino: proporción calculada por balance estequiométrico contra NNP con factor de seguridad FS ≥ 1,5 (caliza molida) o FS ≥ 1,2 (cal hidratada); proporción efectiva validada con NAG o celdas cinéticas antes de aplicación a escala.	Celdas cinéticas activas; monitoreo trimestral de lixiviados; pH objetivo > 6; cobertura vegetal; caracterización mineralógica; seguimiento por profesional idóneo.	Uso en taludes expuestos sin cobertura; disposición cerca de ciénagas, humedales o paleocauces activos; aplicación a escala sin validación cinética previa.
● AG (NPR < 1)	Disposición controlada, seleccionando la opción viable según condiciones hidrogeológicas y ambientales del sitio: (i) cobertura seca multicapa: arcilla compactada ≥ 0,5 m sobre geomembrana, capa de suelo vegetal. Recomendada cuando no se puede garantizar saturación permanente. (ii) disposición subacuática: solo si se garantiza saturación permanente y O₂ disuelto < 1 mg/L en el agua de cubrimiento. No recomendada en zonas de humedal Ramsar, ronda hídrica ni donde haya fluctuaciones estacionales marcadas del nivel freático. (iii) co-disposición con material alcalino, proporción validada con ensayos cinéticos. Diseño por ingeniero geotécnico/ambiental aplicando criterios MEND 2.21.3 y 2.21.4.	Sistema de captación y tratamiento de lixiviados (activo o pasivo según caudal); monitoreo mensual de pH, acidez, sulfatos, Fe, Mn y metales prioritarios; plan de cierre y monitoreo post-cierre documentado. En presencia de arsenopirita evaluar cuidadosamente la opción subacuática: el As puede movilizarse más en condiciones reductoras que óxicas.	Uso como relleno en vías, plataformas o zonas expuestas; venta como agregado; retorno directo a cauces; disposición sin cobertura o sin garantías de saturación.

Fuente: Elaboración propia con base en Tremblay & Hogan eds., (2001), INAP-GARDGuide (2009), Resolución 631/2015, Decreto 4741/2005, Decreto 1076/2015.

Factores de sitio que aumentan el riesgo en aluvión

En zonas auríferas aluviales colombianas, los siguientes factores amplifican la velocidad de generación de acidez y/o la movilización de contaminantes. Deben documentarse explícitamente en el EIA/PMA como parte del análisis de riesgo:

- Material fino (lodos, limos y relaves finos): mayor área superficial expuesta, mayor velocidad de oxidación.
- Exposición al aire en pilas no cubiertas: activación de procesos de oxidación de sulfuros residuales.
- Lluvia constante y alta precipitación: zonas como Chocó, Bajo Cauca y Sur de Bolívar (> 3.000 mm/año) aceleran la lixiviación y favorecen la pérdida preferencial de NP.
- Ausencia de cobertura vegetal o mantas: exposición directa del material a agentes atmosféricos.
- Acumulación en pilas sin compactación: pilas mayores a 3 m favorecen infiltración preferencial y canales de oxidación interna.
- Cercanía a cuerpos de agua sensibles: ciénagas, humedales Ramsar (Ayapel), paleocauces y nacimientos — riesgo de contaminación directa y de incumplimiento del principio precautorio.
- Mercurio residual de amalgamación: aunque no causa DAM, coexiste con el riesgo y debe evaluarse y tratarse antes de cualquier valorización.
- Cercanía a la roca fuente primaria: paleoplaceres profundos en Bajo Cauca y Sur de Bolívar concentran más sulfuros que placeres distales.
- Presencia de arsenopirita: el As de arsenopirita se moviliza más en condiciones reductoras que óxicas, al contrario del Fe y Pb. Esto condiciona la elección entre cobertura seca y disposición subacuática.

Costo-beneficio: prevenir vs. remediar

Muchos casos documentados muestran que el costo de la caracterización geoquímica temprana (Nivel 2 completo) representa una fracción marginal del costo de remediación posterior de un pasivo ambiental por DAM o por contaminación con Hg. En operaciones aluviales pequeñas este costo de remediación puede superar los cientos de millones de pesos por hectárea afectada,

Principio de Economía Circular aplicado a aluvión

Caracterizar desde la exploración permite: (1) separar y valorizar arenas negras con minerales de alto valor (ilmenita, circón, rutilo, monacita-REE); (2) identificar materiales Non-PAG aptos para restauración de piscinas y taludes; (3) aislar tempranamente los sulfuros residuales o el Hg para manejo controlado; y (4) evitar que hoy se construya el pasivo ambiental de mañana en zonas de humedal. La caracterización geoquímica no es un costo, es la puerta de entrada a la economía circular.

como evidencian los estudios en el Complejo de Humedales de Ayapel (MinEnergía, 2022; Universidad de Córdoba, 2023). La relación costo-beneficio favorece de forma consistente la caracterización preventiva.

Mensaje clave: en la pequeña minería aluvial no se trata de demostrar que el material es inocuo para poder usarlo, sino de caracterizarlo para decidir cómo usarlo con seguridad. La decisión de manejo debe ser proporcional al riesgo documentado, trazable en el EIA/PMA y revisable por la autoridad ambiental.



Fase 2 – Identificación temprana del subproducto

- 1- Durante el muestreo aurífero se separan: Concentrado aurífero, arenas y gravas.
- 2- Cada fracción se almacena por separado y se etiqueta.



Fase 3 – Clasificación y preparación del material

- 1- Clasificación granulométrica preliminar: Separación por tamices y definir porcentaje de arena fina, media, gruesa y grava.
- 2- Homogeneización: Mezcla representativa para ensayo, con esto se evitan sesgos en laboratorio.

Fracción	Potencial de uso
Concentrados pesados	Industria pigmentos, abrasivos, fundición
Gravas clasificadas	Agregados para construcción
Arenas limpias	Material de relleno o prefabricados
Fracción fina	Rehabilitación o mezcla controlada



Fase 4 – Caracterización técnica (NTC)

Los siguientes ensayos (ver tabla 3.16) permiten convertir gravas y arenas en subproductos útiles, reducir volumen de estéril, diseñar restauración técnica estable y sustentar aprovechamiento ante autoridad ambiental.

Tabla 3.22. Cuadro técnico - caracterización NTC de agregados

Ensayo (NTC / referencia equivalente)	¿Qué evalúa?	Parámetros que determina	¿Qué indica técnicamente?	Aplicación en minería aluvial / valorización
Granulometría (NTC equivalente ASTM C136)	Distribución de tamaños.	% retenido/pasante por mallas.	- Intertrabado. - estabilidad. - drenaje.	Selección de gravas/arenas para vías, subbases y concretos; clasificación de relaves limpios.
Material fino (#200) (NTC equivalente ASTM C117)	Contenido de partículas finas.	% finos (<0.075 mm).	- Permeabilidad. - cohesión. - riesgo de plasticidad.	Control de relaves: altos finos → no aptos sin tratamiento
Límites de Atterberg (NTC equivalente ASTM D4318)	Plasticidad del material fino.	LL, LP, IP.	- Sensibilidad al agua. - deformabilidad.	Identificar arcillas en arenas/relaves → decidir estabilización o descarte
Densidad y absorción (NTC equivalente ASTM C127/C128)	Propiedades físicas del agregado.	- Peso específico. % absorción.	- Porosidad. - Calidad del agregado.	Evaluar agregados reciclados (RCD) o aluviales para concreto.
Abrasión Los Ángeles (NTC equivalente ASTM C131/C535)	Resistencia al desgaste.	% pérdida por abrasión.	Durabilidad mecánica.	Selección de gravas para bases, subbases y disipadores hidráulicos.
Materia orgánica (NTC equivalente ASTM C40)	Contaminación orgánica.	- Coloración. - índice comparativo.	Interferencia con cemento.	Rechazo de materiales con restos orgánicos (RCD o aluvial).
Equivalente de arena (NTC equivalente ASTM D2419)	Limpieza del material.	Valor SE (%).	Proporción arena vs arcilla.	Control de finos en arenas recicladas o aluviales.
CBR (NTC equivalente ASTM D1883)	Capacidad de soporte.	% CBR.	Resistencia estructural.	Decidir uso en subrasantes, plataformas y vías mineras.
Proctor (NTC equivalente ASTM D698/D1557)	Compactabilidad.	- Densidad máxima. - humedad óptima.	Comportamiento en obra.	Control de compactación de materiales reciclados o naturales.
pH (NTC laboratorio)	Condición química básica.	Valor de pH.	Acidez o alcalinidad.	Identificar riesgo geoquímico (DAM en relaves).
Metales totales (NTC laboratorio)	Contaminantes.	Hg, Pb, As, Cd, etc.	Riesgo toxicológico.	Determinar si el material puede reutilizarse o debe confinarse.
Lixiviabilidad (TCLP u otros)	Movilidad de contaminantes.	Concentración lixiviada.	Riesgo de liberación al agua.	Evaluar relaves antes de uso en economía circular.
PGA/PNA (ABA)	Generación de acidez.	Relación NP/AP.	Riesgo de DAM.	Crítico en relaves con sulfuros antes de reutilización.



Fase 5 – Evaluación normativa y ambiental

- 1- Análisis químico: Búsqueda de metales potencialmente tóxicos (As, Hg, Pb, Cd) mediante ICP-MS (Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente), el cual es un ensayo de laboratorio especializado como herramienta de control ambiental y caracterización química que permite detectar y cuantificar metales en concentraciones muy bajas (trazas), garantizando que los materiales extraídos no representen riesgo.
- 2- Verificar cumplimiento con normativa minera nacional, normativa ambiental (manejo de residuos mineros), normas técnicas de calidad de agregados (si se destinan a construcción), permisos de aprovechamiento o comercialización.
- 3- Comparación normativa: Se comparan resultados con límites ambientales y guías internacionales de calidad
- 4- Debe verificarse: ausencia de contaminación, no afectación a cauce activo y compatibilidad con plan de manejo ambiental.



Fase 6 – Definición de destino

- 1- Si cumple con las normas técnicas y ambientales, puede ser utilizado como agregado, material de relleno o insumo industrial.
- 2- Si no cumple, se retorna de forma controlada como relleno de calicatas y se le da manejo como material inerte.



Fase 7 – Registro y trazabilidad

- 1- Reporte ambiental: Se integra al PMA o informe de exploración. Además, se dejan evidencias de la reducción de estériles.

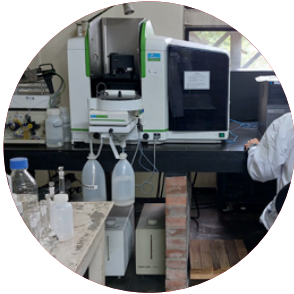


Figura 3.31. Reciclaje del material estéril
Fuente: Tomado de: Jordan (2021). How to make recycled concrete aggregate: Process and uses. <https://www.ftmmachinery.com/blog/how-to-make-recycled-concrete-aggregate-and-what-is-it-used-for.html>

c) Herramientas y especificaciones

Tabla 3.23. Herramientas con sus parámetros técnicos

Herramientas	Parámetros técnicos
Ensayos granulométricos	Tamices utilizados: ASTM • 3/8" (9.5 mm) • N°4 (4.75 mm) • N°10 (2 mm) • N°40 (0.425 mm) • N°200 (0.075 mm) Balanza de precisión: ±0.1g Horno 110 ± 5°C Prensa Proctor
Caracterización	ICP-MS: Identificación de metales traza • Límite de detección: ppb • Metales: As, Hg, Pb, Cd Límites de Atteberg: No plásticos Proctor estándar: Energía Proctor Energía estándar: 600 kN*m/m ³ • Densidad seca máxima: 1.88 - 2.05 g/cm³ • Humedad óptima: 9- 12%
Ensayos de reemplazo en bloques de concreto	• Porcentaje de reemplazo por material minero: 10%, 20%, 30%, 40% y 50% • Mejor desempeño: 30-50% de reemplazo del agregado natural
Subproductos pesados	Molinos y separación magnética: Imán de 0.3-0.5 Tesla (se recupera magnetita e ilmenita en proporción 1-5%)

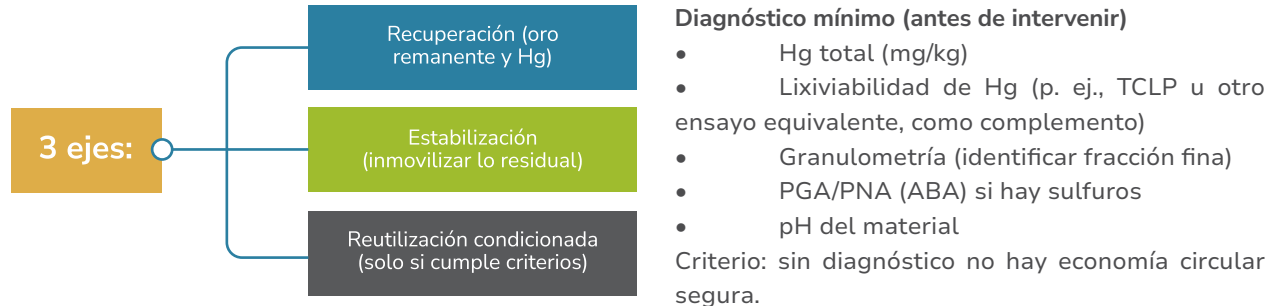


Elaboración propia basada en: Evaluation of gold mining sands and gravels as construction aggregates, Méndez, J. A., Ramírez, F. J., & López, A. M. (2022); An integrated framework for evaluating leaching in waste materials, Kosson, D. S. et al. (2002); y las Normas Técnicas Colombianas NTC 1522 (Ensayo Proctor estándar) y NTC 77 (Análisis granulométrico por tamizado) del Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación – ICONTEC, 2011, 2013.

3.4.2.3 Oportunidad de economía circular 3: Relaves históricos con mercurio

Enfoque y principio

La economía circular en relaves históricos con Hg no consiste en reutilizar indiscriminadamente, sino en recuperar valor (Au/Hg), reducir riesgo y cerrar ciclos sin liberar contaminantes.



Estrategias de valorización (en orden de prioridad)

1- Reprocesamiento gravimétrico (recuperar Au y concentrar Hg)



Objetivo

Recuperar oro residual y concentrar el Hg en un volumen pequeño (facilita su manejo posterior).

Qué hacer

Reprocesar relaves con:

- Canaletas optimizadas
- Concentradores centrifugos
- Mesas gravimétricas

Condiciones técnicas

- Clasificación previa: <2 mm (ideal <1 mm para finos).
- Circuito: canaleta optimizada (alfombras + rifles) → centrifugo → mesa.
- Hidráulica: flujo estable (evitar pérdidas de finos).
- Alimentación: pulpa diluida (relación agua/sólidos 3:1-6:1).

Controles

- Pérdidas de finos (chequeo en colas).
- Estabilidad de caudal (sin pulsaciones).

Indicadores de éxito

- ↑ ley del concentrado pesado
- ↓ Hg en colas (relave reprocesado)

Riesgos / mitigación

- Pérdida de oro fino → ajustar clasificación/mesa.
- Arrastre de Hg fino → segunda pasada o limpieza.

2- Recuperación segura de Hg



Objetivo

Extraer y capturar el Hg contenido en el concentrado/amalgama sin liberarlo al ambiente, para reducir la carga en el relave final.

Qué hacer

Preparación del material (previo a retorta)

- Alimentación: solo concentrado pesado/amalgama, no relave total.
- Desagüe: retirar exceso de agua (material húmedo, no saturado).
- Remoción de impurezas gruesas: cribado rápido para evitar inclusiones que dificulten la separación.
- Tamaño: preferible material fino y homogéneo (mejor transferencia de calor).

Indicador de calidad de alimentación: concentrado denso, sin grava gruesa visible.

Equipo: retorta cerrada (requisito, figura 3.31)

Operación (parámetros prácticos)

- Calentamiento gradual (evitar choques térmicos)
 - Rango típico: elevar hasta volatilizar Hg ($\approx 300-600^\circ\text{C}$ en la cámara; depende del diseño)
 - Tiempo: 1-3 horas según carga y equipo
 - Enfriamiento: mantener el condensador frío (agua o aire) para licuar el Hg
 - Cierre del ciclo: esperar enfriamiento antes de abrir
- Indicadores en operación
- Salida de Hg líquido en el colector
 - Ausencia de humo/vapores en uniones (fugas)

Producto y residuos

- Mercurio recuperado (líquido): Reutilizar de forma controlada o entregar a gestor autorizado
- Residuo sólido (esponja de oro + ganga)
Sin Hg libre (o muy reducido) / Enviar a fusión (p. ej., con bórax)

Controles de seguridad y ambiente

- Operar en zona ventilada y señalizada
- Uso de EPP: guantes, protección respiratoria adecuada para vapores metálicos
- Prohibido: Quema abierta de amalgamas / Operar sin condensador
- Verificación de hermeticidad antes de cada corrida

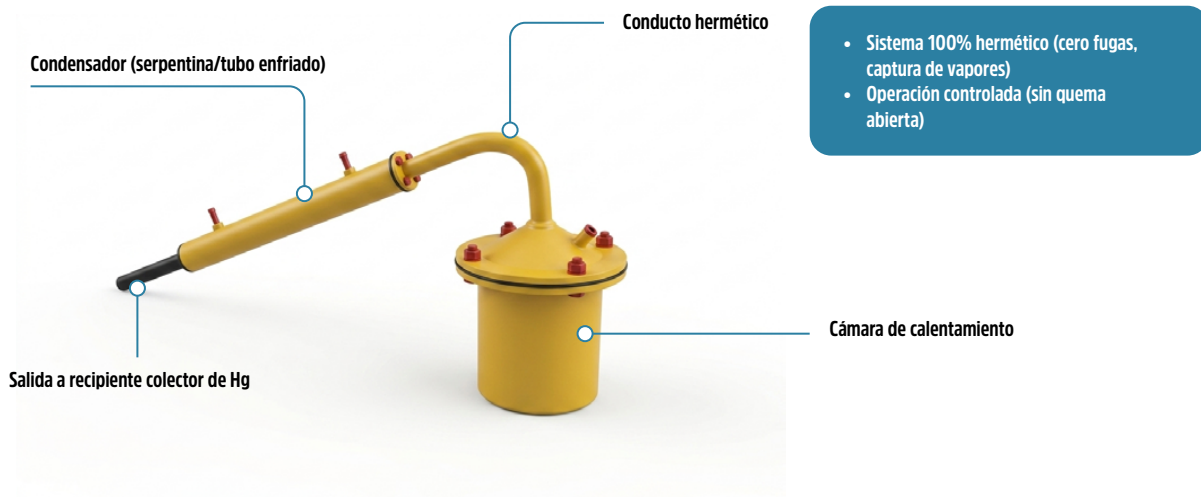
Verificación de eficacia

- Balance simple de masa: Hg recuperado vs. Hg estimado en alimentación
- Inspección del residuo: no debe observarse Hg libre
- (Opcional) ensayo de lixiviabilidad en el residuo para confirmar reducción de movilidad

Errores comunes (y cómo evitarlos)

- ✗ Usar recipientes abiertos → emisión de vapores
- ✗ Alimentar relave total → baja eficiencia y mayor riesgo
- ✗ Condensador caliente → no se recupera Hg
- ✗ Fugas en uniones → pérdida y exposición
- ✓ Solución: retorta cerrada, alimentación adecuada y control térmico.

Figura 3.32. Componentes de un equipo de retorta cerrada



3- Estabilización / solidificación del relave residual



Objetivo

Inmovilizar Hg para que no se lixivie ni migre

Cómo (opciones técnicas)

- Suelo-cemento: 5-15% cemento.
- Cal: 3-10% (mejora pH/estructura).
- Mezcla homogénea + compactación $\geq 95\%$ Proctor.

Controles

- Ensayo de lixiviabilidad post-tratamiento (p. ej., TCLP como complemento).
- Resistencia/consistencia del material.

Indicadores

- $\downarrow$ concentración lixiviada de Hg
- Matriz densa, baja permeabilidad

Riesgos / mitigación

- Dosificación insuficiente $\rightarrow$ reensayar/ajustar.
- Heterogeneidad $\rightarrow$ mejorar mezclado por capas.

4- Reutilización condicionada (solo si es seguro)



Objetivo

Incorporar el material a usos de bajo riesgo

Qué hacer

Condiciones obligatorias

- Cumplir geotecnia (INVIAS): granulometría, % finos, IP, Proctor, CBR.
- Baja lixiviabilidad de Hg (validada).
- No generar aporte de SST ni metales en escorrentía.

Aplicaciones típicas

- Subrasante mejorada, rellenos confinados, plataformas.
- No usar en capas expuestas sin control de erosión.

Controles

- Drenaje y cobertura (evitar contacto directo con lluvia).
- Monitoreo de escorrentía.

5- Alternativas cuando NO es reutilizable



Objetivo

Aislar el material cuando presenta Hg alto o lixiviable.

Qué hacer

- Confinamiento en celdas controladas (con cobertura)
- Encapsulamiento (barreras físicas)
- Evitar: uso en vías, exposición a lluvia, erosión

Condiciones técnicas

- Celdas con base de baja permeabilidad (arcilla/geomembrana).
- Cobertura (suelo) para limitar oxígeno/lluvia.
- Drenaje perimetral y control de escorrentía.

Controles

- Integridad de cobertura
- Ausencia de erosión

Secuencia operativa recomendada

1. Diagnóstico (Hg total, lixiviabilidad, ABA si hay sulfuros)
2. Reprocesamiento gravimétrico
3. Retorta cerrada (recuperación de Hg)
4. Estabilización del residual
5. Decisión: reutilizar (si cumple) / confinar (si no)

3.5 APLICACIÓN LÍNEAS ESTRATÉGICAS PARA LA ETAPA DE CIERRE DE MINA DE ORO DE ALUVIÓN

3.5.1 Lineamiento 8. Restauración inmediata con manejo circular del agua

La restauración inmediata y el manejo circular del agua en minería aluvial consisten en la recuperación progresiva de áreas intervenidas mediante reconformación y revegetación simultánea a la explotación para evitar inestabilidad, erosión o arrastre de sedimentos del río, junto con la implementación de sistemas de recirculación hídrica que permiten reutilizar el agua del proceso previo tratamiento por sedimentación, reduciendo captaciones externas, evitando vertimientos directos al cauce activo y manejo responsable de lodos finos.

3.5.1.1 Oportunidad de Economía Circular 1: Cero excavaciones abiertas y cero descargas directas

El principio de “Cero excavaciones abiertas y cero descargas directas”.

Como oportunidad de circularidad en esta actividad corresponde a una estrategia de intervención modular con restauración inmediata y manejo hídrico en circuito cerrado, evitando frentes abandonados y vertimientos a cuerpos de agua naturales. Se propone el relleno y compactación de cada hoyo o zanja al finalizar el muestreo, junto con el uso de piscinas o tanques para retener finos y reutilizar el agua. En Perú, el programa planetGOLD (2020) mostró que implementar circuitos cerrados de agua con piscinas de sedimentación portátiles permite reutilizar el 80-90% del agua usada en concentración aurífera, eliminando descargas al cauce y permitiendo tapar las calicatas. Por medio de la implementación de piscinas móviles de sedimentación con capacidad adecuada al caudal del equipo de concentración.

El agua decantada se bombea de regreso al proceso, reduciendo la extracción de agua fresca, mientras que los lodos sedimentados se drenan y retornan a las calicatas restauradas, siendo compactadas por capas y evitando la erosión. De esta forma se rellena con material original y reconformando el terreno para evitar las zanjas o canales profundos y estrechos.

Normatividad a tener en cuenta:

Decreto 1076 de 2015: Prohíbe vertimientos directos sin tratamiento y exige control de sedimentos y turbidez.
Resolución 0631 de 2015: Establece límites máximos de sólidos suspendidos totales (SST) en vertimientos.

a) Metodología



Fase 1 – Excavación y muestreo controlado

- 1- Delimitación del área del hoyo o zanja: Se marca el perímetro exacto de excavación (normalmente $\leq 1.5 \times 1.5 \text{m}$).
- 2- Excavación progresiva: Excavación manual o semimecanizada, retirando por capas naturales (estratos).
- 3- Separación inmediata del material: Material con potencial se toma como muestreo y el no mineralizado se lleva a un acopio temporal.





Fase 2 – Concentración gravimétrica en circuito cerrado

1- Ingreso del material al sistema gravimétrico: Canaletas, bateas o mesas concentradoras y el uso de agua mínima necesaria.

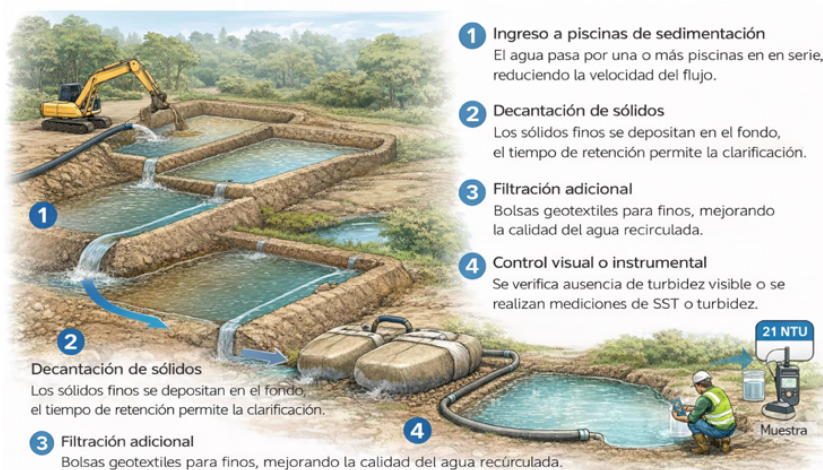
2- Captación total del agua usada: El agua de lavado no se descarga, sino que se dirige por gravedad o bombeo a sedimentación.

3- Circuito cerrado: Funcionando como un ciclo Concentración -> Sedimentación -> Recirculación. Sólo reponiendo agua por evaporación y/o pérdidas menores por manipulación.

Figura 3.33. Concentración gravimétrica en circuito cerrado



Figura 3.34. Sedimentación y clarificación del agua



Fase 3 – Sedimentación y clarificación del agua



Fase 4 – Manejo y retorno de lodos

Figura 3.35. Manejo y retorno de lodos





Fase 5 – Relleno, compactación y restauración

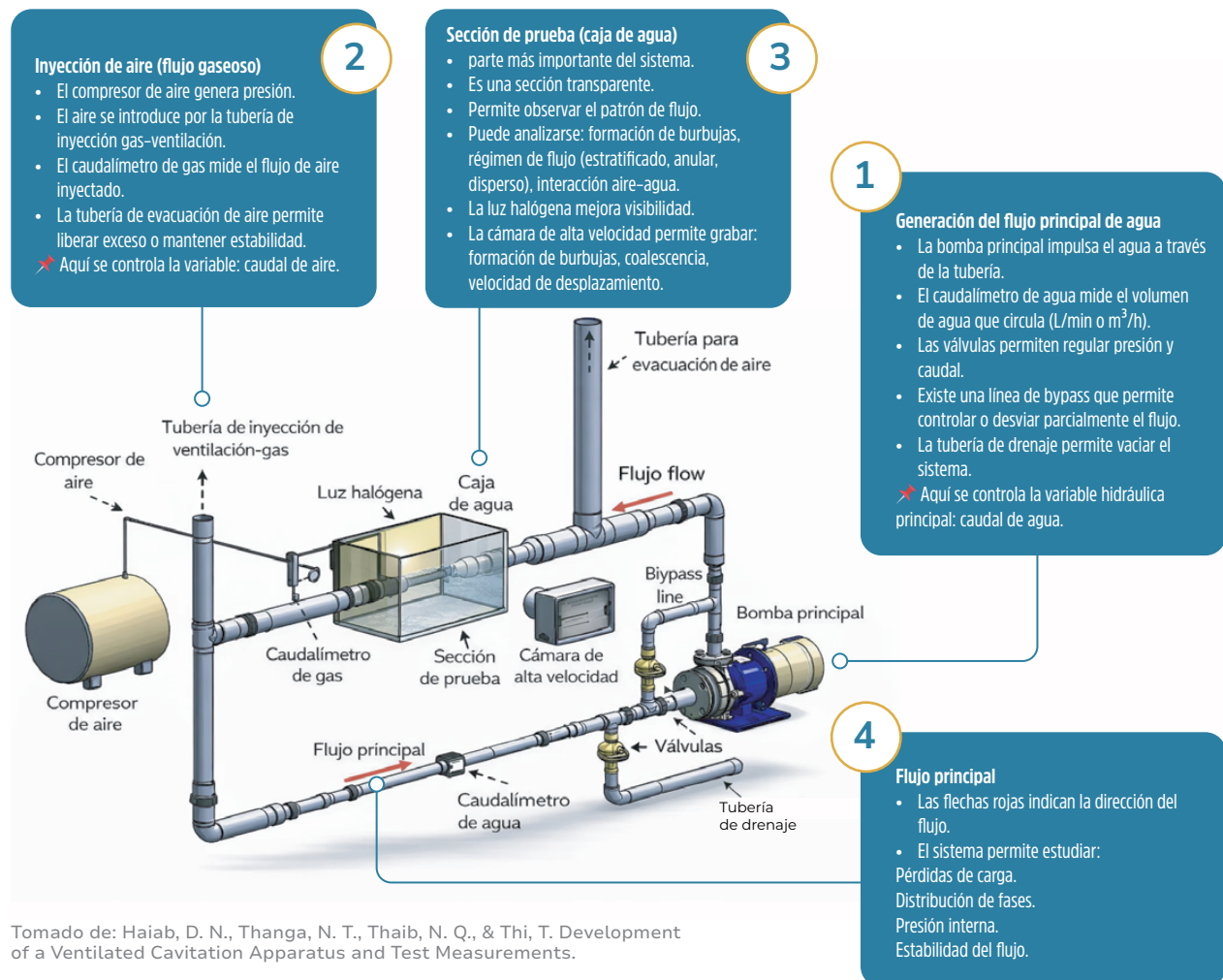
- 1- Relleno por capas: Se utiliza el material original y los lodos deshidratados, tratando de respetar el orden estratigráfico.
- 2- Compactación de cada capa: Se compacta manualmente o con equipo ligero, buscando una compactación $\geq 90\%$ de compactación Proctor.
- 3- Reconformación topográfica o del terreno: Se restituye la forma original del terreno, evitando la formación de depresiones o zonas de erosión. Se restablece la configuración morfológica del terreno intervenido, garantizando estabilidad física, drenaje adecuado y control de procesos erosivos.
- 4- Estabilización superficial: Compactación final, pudiendo agregar cobertura vegetal o material fino

Esta oportunidad de economía circular se puede basar en un sistema experimental de flujo en circuito cerrado que permite simular, controlar y optimizar condiciones hidráulicas (flujo, aireación, presión) aplicables al manejo, tratamiento y recirculación del agua en entornos mineros, como el de la figura 3.35.

Lo anterior teniendo en cuenta que el agua utilizada en actividades mineras es recirculada, tratada y reincorporada al sistema sin necesidad de descargas externas. La aireación inducida y el control del flujo favorecen procesos de oxidación y sedimentación, contribuyendo a la mejora de la calidad del agua desde etapas tempranas, lo cual es coherente con estrategias de restauración inmediata del sistema hídrico intervenido.

La aplicación conceptual de este tipo de sistema permite diseñar operaciones sin excavaciones abiertas permanentes, donde el agua es gestionada mediante circuitos cerrados que integran captación, uso, tratamiento y recirculación. Esto elimina la necesidad de vertimientos directos a cuerpos de agua, reduciendo impactos sobre la ronda hídrica y favoreciendo un modelo de economía circular basado en la eficiencia del recurso hídrico.

Figura 3.36. Sistema experimental de flujo de agua en circuito cerrado



Lo observado en la figura 3.32 explica que los principios del equipo se aplican a:

- Canales de recirculación
- Piscinas de sedimentación
- Sistemas de aireación
- Control de sedimentos
- Tratamiento pasivo/activo de agua

Lo anterior permite analizar, modelar y optimizar el comportamiento hidráulico del transporte de pulpas y procesos de separación gravimétrica, mejorando la eficiencia de recuperación y reduciendo impactos ambientales. Es decir,

- No perder oro fino.
- No dañar bombas.
- Reducir consumo de energía.
- Evitar taponamientos.
- Mejorar recuperación.

b) Herramientas y especificaciones

Tabla 3.24. Herramientas con sus parámetros técnicos

Herramientas	Parámetros técnicos
Circuito cerrado de agua	Piscinas portátiles: • Volumen: 500 – 1000 L cada una • 2 piscinas en serie • Tiempo de retención: 15-30 min Eficiencia de recirculación: 80-90% • Bombas 2- 4"
Manejo de lodos	• Peso de lodos por calicata: 20-40 kg Secado: 24 – 48 horas • Reincorporación al terreno: Mezclado con grava del relleno
Cierre de calicatas	• Capas compactadas: 20-30 cm Material utilizado: • Grava gruesa abajo • Arena fina arriba • 5 cm de suelo orgánico • Tiempo estimado de cierre: 20 – 40 min



Elaboración propia basada en: Water management and sediment control in artisanal and small-scale gold mining, PlanetGOLD Programme – United Nations Environment Programme (2020); y Sediment pond removal and enhanced design practices, Environmental Protection Agency – U.S. EPA (2015).

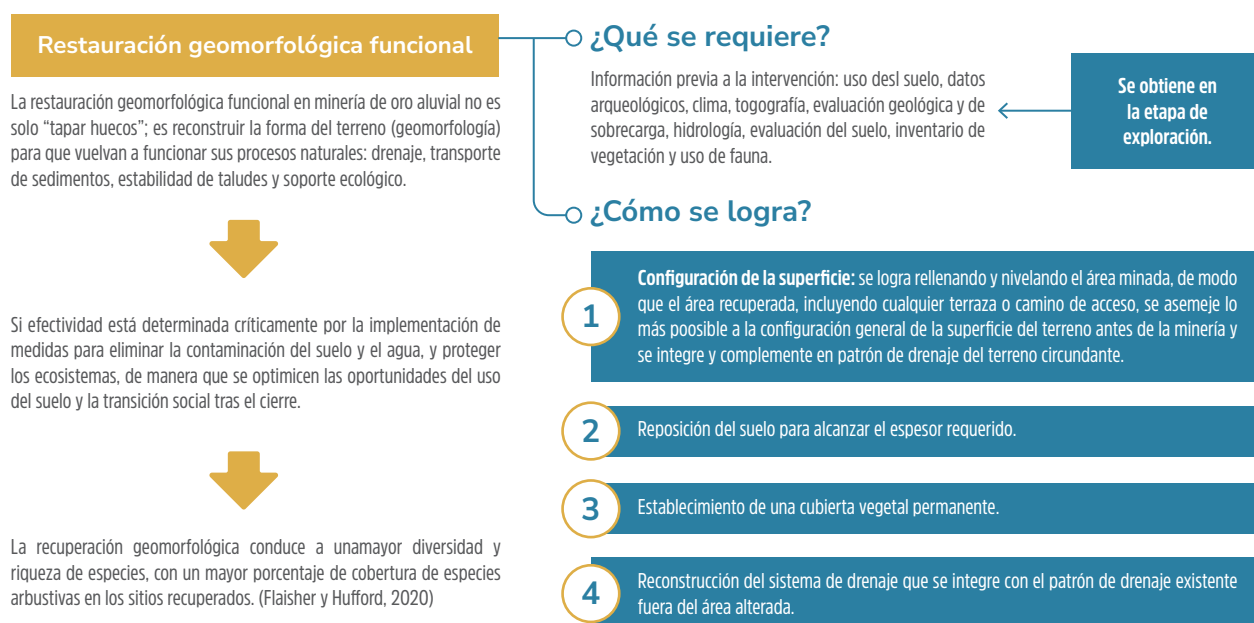
3.5.1.2 Oportunidad de Economía Circular 2: Reconversión paisajística y uso del suelo

La revegetación

- La revegetación permanente debe ser diversa, eficaz y estar compuesta por especies nativas de la zona.
- El área revegetada debe ser compatible con el uso aprobado del suelo tras la minería.
- En los casos en que el terreno se recupera utilizando comunidades de plantas nativas, la vegetación se establece mediante la plantación de mezclas de semillas diseñadas, con una densidad y profundidad de siembra específicas, y durante períodos específicos (Sheley et al., 2008; Strom et al., 2010).
- El uso de especies nativas promueve la estabilidad ecológica y la integridad de la comunidad vegetal, y reduce el riesgo de siembra de especies agresivas o invasoras (Mangold et al., 2008).



Figura 3.37. Restauración geomorfológica funcional



Reutilización de áreas intervenidas para proyectos productos sostenibles

Esta guía al ser desarrollada como se presenta en sus lineamientos y oportunidades como principios de la economía circular ofrecen oportunidades para regenerar el terreno alterado y crear zonas agrícolas, forestales o pesqueras productivas que apoyen las economías locales.

La producción de biomasa mediante cultivos energéticos de rotación corta también puede ser un componente muy importante en un modelo de economía circular aplicable en terrenos mineros recuperados, tanto en términos de producción de materiales como de energía.

A menudo se requiere un tratamiento físico, químico o biológico para eliminar contaminantes del suelo y las aguas subterráneas, con el fin de preparar el terreno minero para el desarrollo de nuevos usos con el mínimo riesgo para las funciones ecológicas y la salud humana.

Una alternativa para la reutilización de terrenos mineros es la construcción de parques fotovoltaicos.

Regeneración de suelos degradados

El estudio **“Alternativas basadas en la naturaleza para la recuperación de ecosistemas degradados por minería aurífera bajo un enfoque de economía circular”**, editado por José Luis Marrugo Negrete, Roberth de Jesús Paternina Uribe, y Amado Navarro Frómata, ofrece una visión integral y práctica para abordar los complejos desafíos ambientales resultantes de la minería de oro en Colombia. Esta obra se centra en proponer soluciones sostenibles que integran principios de la economía circular. A través de enfoques innovadores como la fitorremediación (Capítulo II), el uso de humedales artificiales (Capítulo V), y la valorización de biomasa contaminada (Capítulo IV), además de la inmovilización de contaminantes mediante enmiendas (Capítulo III: **“Evaluación de Materiales Orgánicos e Inorgánicos para la Inmovilización de Pb, Cd, As Y Hg en Suelos Contaminados”**), el texto aborda la problemática de los Pasivos Ambientales Mineros (PAM) y la contaminación por mercurio (Hg) en departamentos como Córdoba, Sucre y Chocó, con el fin de mitigar los impactos en los ecosistemas y las comunidades.

A continuación, se resaltan los siguientes diagramas relevantes del estudio mencionado, que es de gran importancia traerlo a colación en esta guía:

Figura 3.38. Diagrama de actividades para inmovilización de metales pesados en suelos mineros

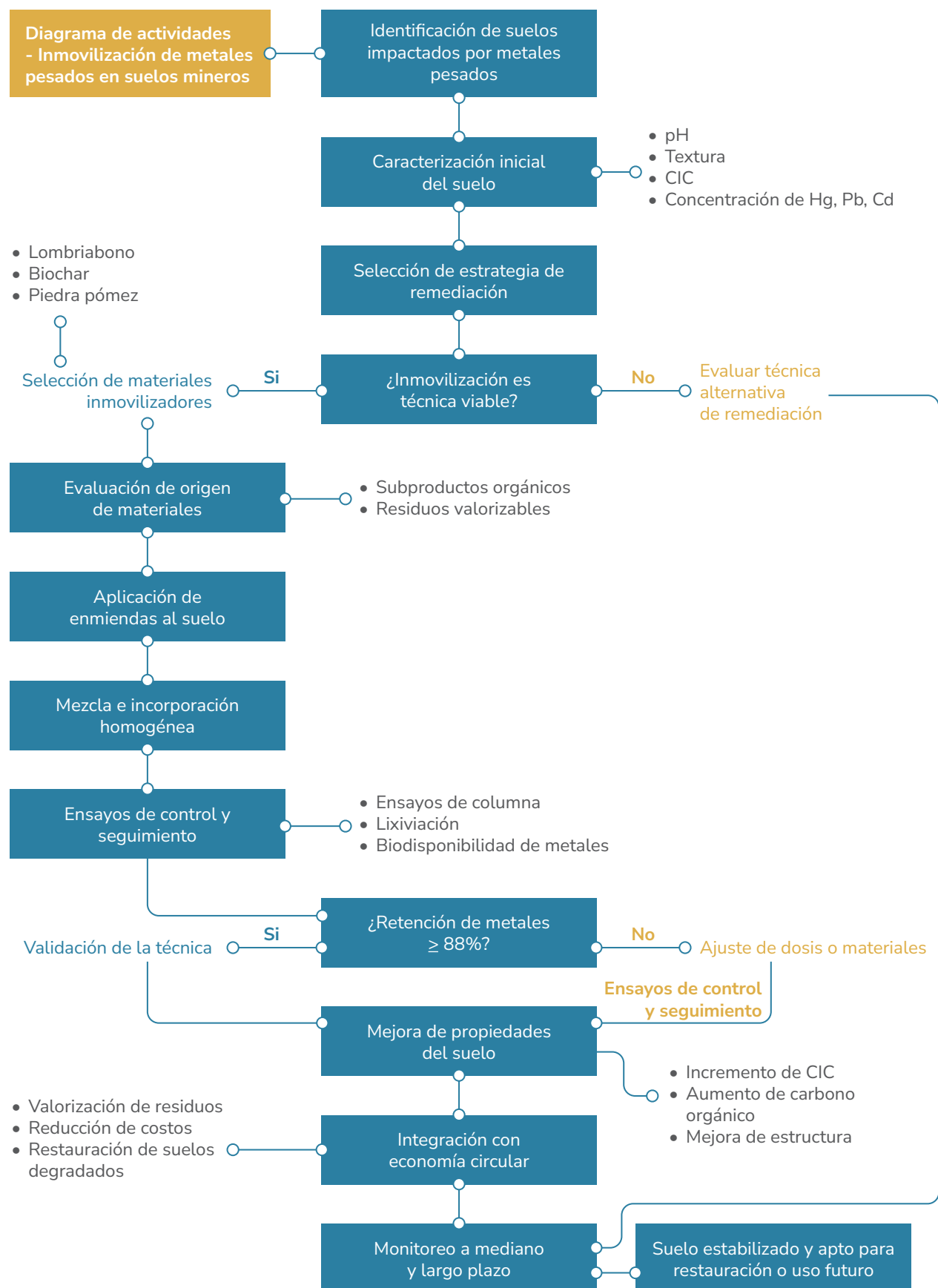
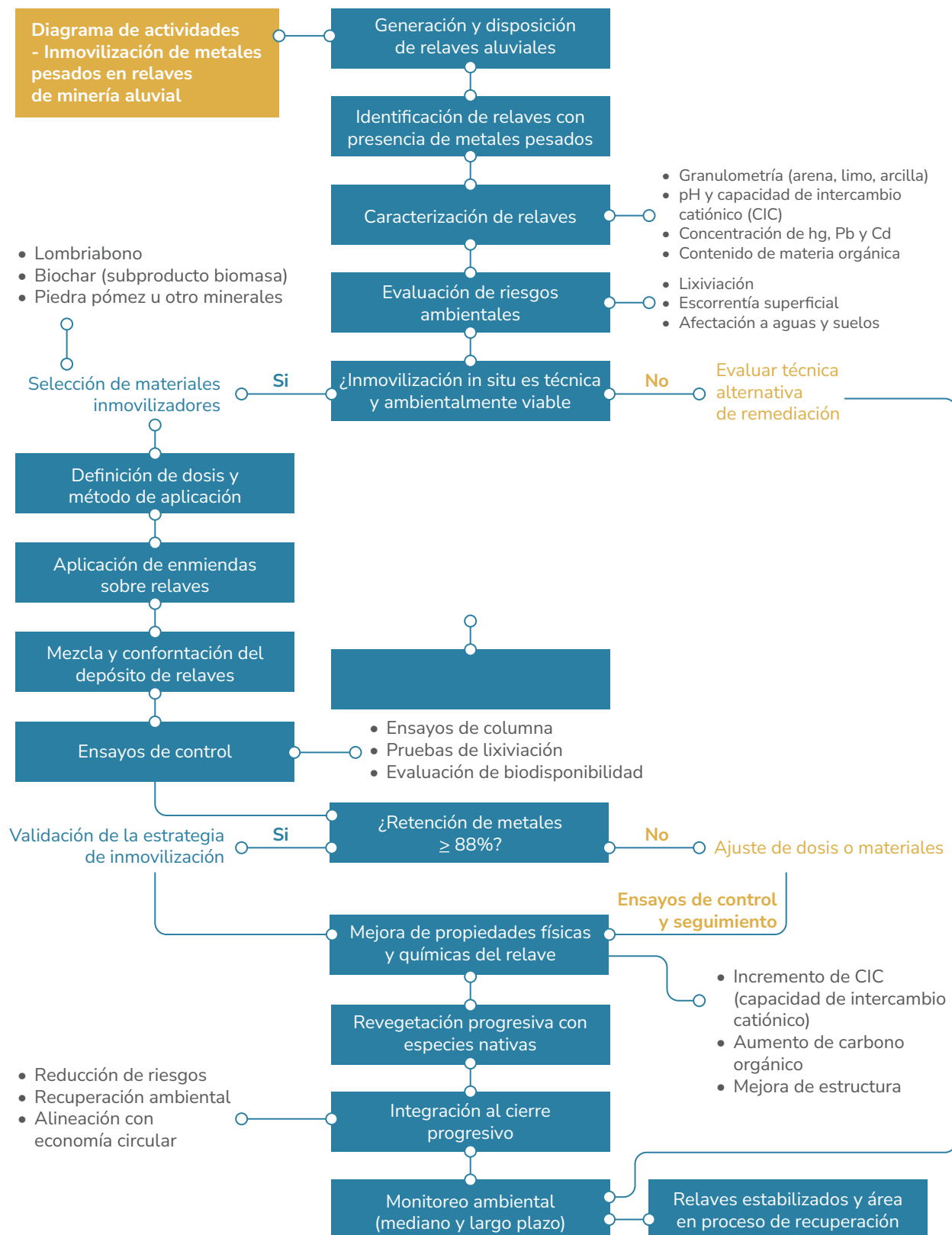


Figura 3.39. Diagrama de actividades para inmovilización de metales pesados en relaves de minería aluvial



3.6 APLICACIÓN LÍNEA ESTRATÉGICA TRANSVERSAL PARA TODAS LAS ETAPAS MINERAS

3.6.1 Lineamiento 9. Establecer indicadores de monitoreo y verificación

ntes de recomendar un cambio tecnológico es indispensable medir las pérdidas reales de la operación. El protocolo Teschner consiste en tomar 8 muestras del material antes del canalón y 8 al salir, dividir en tres fracciones (<75 µm, 75-500 µm, >500 µm) y hacer ensayo al fuego en cada fracción. Costo aproximado: USD 160 por muestra (USD 3 200 por operación completa).

Este sistema de indicadores permite un control integral de la operación minera aluvial, asegurando eficiencia productiva, sostenibilidad ambiental y cumplimiento normativo bajo un enfoque de economía circular.

Formato de resumen diario de indicadores

Fecha	Recuperación (%)	Agua recirculada (%)	Consumo combustible (L/m³)	Pérdidas en colas (%)	Cumplimiento ambiental
-----	-----	-----	-----	-----	-----

Componente hídrico

Tabla 3.25. Componente hídrico

Indicador	Fórmula	Unidad	Frecuencia	Meta
Consumo de agua	Volumen agua / m³ material	m³/m³	Diario	↓ progresivo
Recirculación de agua	(Agua recirculada / total usada) × 100	%	Diario	≥ 70%
Turbidez aguas abajo	Medición directa	NTU	Semanal	< 50 NTU
Eficiencia sedimentación	(Entrada - salida) / entrada	%	Semanal	≥ 70%
Cumplimiento vertimientos	Cumple / No cumple	Cualitativo	Mensual	100%

Formato control de agua y recirculación

Fecha	Caudal estimado (m³/h)	Agua recirculada (%)	Estado de piscinas	Turbidez visual (Alta/Media/Baja)	Ajustes realizados
-----	-----	-----	-----	-----	-----

Componente suelo y restauración

Tabla 3.26. Componente suelo y restauración

Indicador	Fórmula	Unidad	Frecuencia	Meta
Componente suelo y restauración	(Área restaurada / intervenida) × 100	%	Mensual	≥ 80%
Estabilidad del terreno	Nº fallas (deslizamientos)	Nº	Mensual	0
Cobertura vegetal	Área cubierta / área restaurada	%	Trimestral	≥ 70%
Erosión	Observación o medición	Cualitativo	Mensual	Baja
Reutilización de estériles	Volumen reutilizado / total	%	Mensual	≥ 75%

Componente productivo (eficiencia minera)

Tabla 3.27. Componente productivo (eficiencia minera)

Indicador	Fórmula	Unidad	Frecuencia	Meta
Recuperación de oro	Oro recuperado / oro estimado	%	Diario	≥ 80-95%
Pérdidas en colas	Oro en colas / total	%	Semanal	↓ mínimo
Producción	g de oro / m ³	g/m ³	Diario	Optimizar
Tiempo efectivo	Horas operativas / totales	%	Diario	≥ 85%

Formato control de clasificación granulométrica

Fecha	Tipo de material	% gruesos (>2")	% medios	% finos	Problemas detectados	Acción correctiva
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Formato control de recuperación de oro

Fecha	Equipo	Alimentación (m ³)	Oro recuperado (g)	Estimación en colas	Eficiencia (%)	Acción
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Formato monitoreo de colas (control clave)

Fecha	Punto de muestreo	Presencia de oro (Sí/No)	Tipo de partícula	Decisión (reprocesar/ajustar)	Observaciones
-----	-----	-----	-----	-----	-----

Formato limpieza de trampas de sedimentos

Fecha	Hora	Volumen retirado	Estado del sistema	Disposición del lodo	Responsable
-----	-----	-----	-----	-----	-----

Frecuencia recomendada: cada 2 – 3 horas

Componente tecnológico

Tabla 3.28. Componente tecnológico

Indicador	Fórmula	Unidad	Frecuencia	Meta
Componente tecnológico	Producción / capacidad	%	Mensual	≥ 80%
Disponibilidad mecánica	Tiempo operativo / total	%	Mensual	≥ 90%
Fallas de equipos	Nº fallas	Nº	Mensual	↓ mínimo
Uso de tecnologías limpias	Equipos sin mercurio / total	%	Mensual	100%

Formato control de equipos y mantenimiento

Fecha	Equipo	Estado (Bueno/Regular/Malo)	Mantenimiento realizado	Tiempo fuera de servicio	Responsable
-----	-----	-----	-----	-----	-----

Componente economía circular

Tabla 3.29. Componente economía circular

Indicador	Fórmula	Unidad	Frecuencia	Meta
Reuso de agua	Agua reutilizada / total	%	Diario	≥ 70%
Reaprovechamiento de residuos	Material reutilizado / total	%	Mensual	≥ 70%
Reducción de residuos	Comparativo mensual	%	Mensual	↓ progresivo
Uso de fuentes alternativas (lluvia/niebla)	Volumen alternativo / total	%	Mensual	≥ 5-20%

Componente ambiental

Tabla 3.30. Componente ambiental

Indicador	Fórmula	Unidad	Frecuencia	Meta
Calidad del agua	Análisis físico-químico	Cumple/No	Trimestral	Cumple
Ruido	Medición dB	dB	Semestral	< límites
Material particulado	Observación / medición	Cualitativo	Mensual	Bajo
Afectación a flora/fauna	Inspección	Cualitativo	Trimestral	Nula

Formato de registro de manejo ambiental

Fecha	Actividad	Área intervenida (m²)	Área restaurada (m²)	Acción realizada	Responsable
-----	-----	-----	-----	-----	-----

Consumo de recursos

Tabla 3.31. Consumo de recursos

Indicador	Fórmula	Unidad	Frecuencia	Meta
Consumo de combustible	Litros / m³	L/m³	Diario	↓ progresivo
Consumo energético	Energía / producción	kWh/m³	Mensual	Optimizar

Formato control de consumo de combustible

Fecha	Equipo	Combustible consumido (L)	Horas de operación	Consumo (L/h)	Observaciones
-----	-----	-----	-----	-----	-----

Componente social y seguridad

Tabla 3.32. Componente social y seguridad

Indicador	Fórmula	Unidad	Frecuencia	Meta
Accidentes laborales	Nº eventos	Nº	Mensual	0
Uso de EPP	Trabajadores con EPP / total	%	Diario	100%
Capacitación	Nº capacitaciones	Nº	Trimestral	≥ 1

Mecanismos de verificación

Bitácoras de campo diaria de operación

Fecha	Frente de trabajo	Hora inicio	Hora fin	Volumen procesado (m³)	Producción de oro (g)	Equipo en operación	Observaciones
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----



Registro fotográfico



Georreferenciación
(GPS)



Análisis de laboratorio



Reportes mensuales



Inspecciones técnicas



The background image shows a rural scene with a wooden structure on the left, a dirt road in the center, and people walking. The image is overlaid with a semi-transparent orange filter.

4

GLOSARIO

Aa

ABA (Acid Base Accounting)-Balance Ácido-Base: son pruebas geoquímicas que permiten saber si un material de mina: puede generar drenaje ácido (PAF), o no genera acidez (NAF). En minería de oro se usan para: clasificar estériles y relaves, separar material PAF y NAF, diseñar botaderos y coberturas, prevenir drenaje ácido de mina (DAM), cumplir requisitos ambientales. Las pruebas ABA comparan: Potencial de Acidez (PA): Depende del contenido de azufre (sulfuros como pirita) y Potencial de Neutralización (PN): Depende de minerales carbonatados (caliza, dolomita). Se calcula un balance: $PN - PA$.

Apique: se usa mucho en minería y geotecnia, y es similar a “calicata”, pero con un matiz técnico importante. Es una excavación puntual, generalmente más profunda y localizada, que se realiza para exploración o extracción directa de material.

Cc

Calicatas: es una excavación manual o mecánica de poca profundidad que se realiza para inspeccionar directamente el suelo o material geológico. Allí se observa estratos del suelo, color (indicador mineralógico), humedad, presencia de agua, tamaño de partículas y materia orgánica.

Una calicata es una herramienta de conocimiento del terreno, pero si no se restaura, se convierte en un impacto ambiental.

Capacidad de intercambio catiónico (CIC): es un parámetro fundamental de suelos y materiales finos. Es la capacidad que tiene un suelo para retener e intercambiar iones positivos (cationes) en su superficie, indicando si un suelo puede inmovilizar o liberar contaminantes. En relaves y suelos una CIC Alta retiene Hg y metales, menor riesgo de lixiviación, puede ayudar a estabilizar y una CIC Baja metales se movilizan fácilmente y con mayor riesgo ambiental.

Dd

DAM - Drenaje Ácido de Mina: Es un agua ácida y contaminada que se forma cuando Materiales con sulfuros (como pirita) entran en contacto con agua y oxígeno, esto genera ácido y puede arrastrar metales tóxicos.

En minería de oro puede aparecer en los botaderos de estériles, relaves, frentes de mina, tajos abandonados, drenajes y escorrentías.

Deslamado: es un proceso de separación en el que se eliminan las partículas finas (lodos, arcillas y limos) de una mezcla de material (pulpa), antes de su procesamiento.

DRX-Difractometría de Rayos X: Análisis que permite saber qué minerales tiene la roca (cuarzo, pirita, calcita, feldspatos, etc.) o el relave, que puedan generar acidez o neutralizarla.

Ee

EC - Economía Circular: es un modelo de producción y consumo que busca reducir residuos, reutilizar materiales y cerrar ciclos, para aprovechar mejor los recursos y disminuir el impacto ambiental.

Estratigrafía: estudia la disposición en capas (estratos) de los sedimentos/rocas, su orden, espesor, continuidad y edad relativa. En placeres auríferos es clave para ubicar la capa productiva (pay layer) y optimizar la explotación.

Excavaciones exploratorias: son aperturas controladas del terreno (calicatas, apiques, trincheras y hoyos) para identificar, muestrear y cuantificar el depósito aurífero antes de explotar. Su objetivo es reducir incertidumbre (ley, espesor, continuidad) y minimizar movimiento de material estéril.

Ff

FRX – Fluorescencia de Rayos X: Análisis que indica qué elementos químicos tiene el material y cuánto, permitiendo evaluar riesgo de drenaje ácido, controlar relaves y estériles y reconocer zonas con sulfuros.

Gg

Geología de placer: es un depósito sedimentario secundario donde minerales densos (como el oro) se han concentrado mecánicamente por acción del agua (ríos, corrientes, lluvias).

Geomembrana de HDPE (Polietileno de Alta Densidad): es una lámina sintética impermeable usada para confinar líquidos y evitar infiltraciones, ampliamente aplicada en minería, obras hidráulicas y manejo de residuos.

Hh

Hoyo: es una excavación puntual y generalmente irregular, producto de actividades de exploración o extracción (p. ej., extracción manual de gravas auríferas), que no sigue una geometría técnica definida como una zanja, calicata o apique.

Ii

ICP-OES (Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectrometry) - Espectrometría de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente:

es una técnica de laboratorio usada para medir metales y elementos químicos a la vez en muestras ambientales y mineras, con buena precisión y límites de detección bajos (ppm–ppb).

IP - Índice de Plasticidad: es un parámetro geotécnico que indica qué tan plástico (arcilloso y deformable) es un suelo cuando está húmedo. INVÍAS exige límites máximos de IP para materiales viales: Subrasante: IP bajo o moderado; Subbase: IP generalmente $\leq 6 - 12$; Base granular: IP muy bajo o no plástico. Un IP alto significa que se hincha con agua, pierde resistencia y genera baches y deformaciones.

Nn

NAF (No Acid Forming)-No Generador de Acidez: un material NAF es un material de mina (estéril, roca, suelo o relave) que NO produce drenaje ácido cuando entra en contacto con: agua, oxígeno porque tiene pocos o

nada de sulfuros, o tiene minerales que neutralizan la acidez (como caliza). En pequeña minería de oro se usa para: rellenar tajos y depresiones, reconformar botaderos, cubrir y encapsular material PAF, reducir el riesgo de drenaje ácido y apoyar el cierre minero. Se identifica mediante pruebas ABA (Balance Ácido–Base), análisis de azufre, DRX / FRX, verificación técnica de laboratorio.

NAG (Net Acid Generation)-Generación Neta de Acidez: son pruebas geoquímicas que indican si un material realmente genera acidez cuando se oxidan completamente sus sulfuros. En minería de oro se usan para: confirmar si un material es PAF o NAF, complementar las pruebas ABA que predice el potencial (teórico) mientras que la NAG muestra el comportamiento real del material, por otro lado, reducir la incertidumbre en la clasificación, diseñar mejor el manejo de estériles y relaves y prevenir drenaje ácido de mina (DAM). Consiste en que la muestra se trata con peróxido de hidrógeno (H_2O_2), esto oxida rápidamente los sulfuros, se mide el pH final y la acidez generada y se evalúa si la acidez supera la capacidad de neutralización.

Pp

PAF (Potentially Acid Forming)-Potencialmente Generador de Acidez: es un material de mina (roca, estéril o relave) que PUEDE producir drenaje ácido cuando: entra en contacto con agua, entra en contacto con oxígeno.

Esto ocurre porque contiene sulfuros, principalmente pirita. El material PAF puede: generar drenaje ácido de mina (DAM), liberar metales pesados, contaminar quebradas y suelos, generar sanciones ambientales. Se identifica con Pruebas ABA (Balance Ácido–Base), Análisis de azufre, DRX / FRX, Observación de óxidos rojizos (solo indicativo). En pequeña minería se debe hacer buenas prácticas como no mezclarlo con material NAF, encapsularlo con NAF, evitar exposición en taludes, cubrirlo progresivamente, controlar infiltración de agua.

PA-Potencial de Acidez: el PA indica cuánta acidez puede generar un material de mina (roca, estéril o relave) cuando: se moja y se expone al oxígeno. Está relacionado principalmente con el contenido de azufre (sulfuros como la pirita). El PA viene de sulfuros en la roca principalmente pirita (FeS_2), cuando se oxida, produce ácido. En minería de oro se usa para: evaluar riesgo de drenaje ácido de mina (DAM), compararlo con el PN (Potencial de Neutralización), clasificar material como PAF o NAF y diseñar botaderos y coberturas.

Pirita (FeS_2): es un mineral sulfuro de hierro comúnmente asociado a depósitos auríferos, que puede contener oro en forma diseminada. Su presencia es relevante tanto para la exploración como para el procesamiento mineral, así como para la gestión ambiental debido a su potencial de generación de drenaje ácido.

PN-Potencial de Neutralización: el PN indica la capacidad de un material de mina (roca, estéril o relave) para neutralizar acidez. Es como medir qué tanto puede “apagar” un ácido. El PN depende principalmente de: minerales carbonatados (caliza, dolomita) y otros minerales alcalinos presentes en la roca. A mayor contenido de estos minerales, mayor PN. En minería de oro se usa para: evaluar si un material puede compensar acidez, compararlo con el PA (Potencial de Acidez), clasificar material como NAF o PAF, diseñar botaderos y coberturas.

PUEAA - Programa de Uso Eficiente y Ahorro del Agua: es un requisito de la autoridad ambiental cuando un minero solicita o tiene una concesión de aguas (quebrada, río, pozo, manantial). Su objetivo es que el minero use solo el agua necesaria, la cuide y no la desperdicie.

| Ss

Sedimentología: estudia cómo se generan, transportan, depositan y se organizan los sedimentos. En minería aluvial es la base para entender dónde está el oro, cómo separarlo y cómo controlar los impactos (SST/ erosión).

SST (sólidos suspendidos totales): es la cantidad de partículas sólidas que están flotando o suspendidas en el agua, y que no están disueltas, sino que se han sedimentado, se expresa en mg/L (miligramos por litro) y sirve como indicador de calidad del agua, control ambiental y para evaluar eficiencia de sedimentos.

| Tt

TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure)-Prueba de Lixiviación por Característica de Toxicidad: Es una prueba que evalúa qué tan tóxicos pueden ser los relaves o residuos, si metales peligrosos pueden

disolverse y salir con el agua y el riesgo de contaminación de suelos y aguas. Consiste en que el material (relave o estéril) se mezcla con una solución ácida, se simulan condiciones de lixiviación y se mide la concentración de metales liberados. Los metales típicos analizados: arsénico, plomo, mercurio, cadmio, cromo. En minería se usa para clasificar relaves y estériles, definir si un residuo es peligroso, diseñar medidas de manejo y disposición y cumplir requisitos de la autoridad ambiental.

Trincheras: es una excavación lineal, continua y más profunda que una zanja, utilizada principalmente para exploración geológica o evaluación de materiales en superficie.

| Vv

Velocidad cuasi laminar: intermedio, pero controlado y sin turbulencia fuerte (lo que se busca en sedimentación, que las partículas caigan por gravedad sin ser arrastradas).

Velocidad de flujo cuasi-laminar: es un flujo muy suave, ordenado y lento, donde el agua se mueve en “capas” sin mezclarse violentamente.

Velocidad de flujo laminar puro: capas totalmente ordenadas (ideal teórico).

Velocidad de flujo turbulento: caótico, con remolinos.

| Zz

Zanja: es una excavación lineal y alargada, generalmente poco profunda, utilizada para conducir, desviar o controlar agua, o para instalación de infraestructura.

Fichas técnicas



CANALÓN (SLUICE BOX) PARA PEQUEÑO MINERO DE ORO ALUVIAL

SENCILLO • EFICIENTE • ECONÓMICO • LIMPIO

¿QUÉ ES?

El canalón es una canaleta inclinada por donde pasa el material con agua. Las rifles y la alfombra hacen que el oro (pesado) se quede atrapado y la arena y grava (liviano) sigan y salgan.

1. CÓMO FUNCIONA



2. CRITERIOS DE SELECCIÓN

- Tipo de material:** Gravas y arenas limpias (poco barro).
- Tamaño del material:** Ideal $\leq 2-3$ cm (usar zaranda antes).
- Tipo de oro:** Funciona mejor con oro medio y fino.
- Pendiente del canalón:** Entre 5° y 15° (ajustable).
- Rifles / Alfombra:** Según el tamaño del oro a recuperar.
- Disponibilidad de agua:** Requiere flujo continuo. Mejor si se recircula.

3. LIMITANTES

- ❌ Mucho barro/arcilla tapa la alfombra y se pierde oro.
- ❌ Pendiente o caudal mal ajustado hace que el oro se vaya.
- ❌ Oro muy fino (harina) puede escaparse si no hay buena alfombra.
- ❌ Sobrealimentación: satura el canalón y baja la recuperación.

4. CONSIDERACIONES TÉCNICAS CLAVE

- ✓ Clasificar el material antes (zaranda).
- ✓ Controlar pendiente y caudal:
 - Muy rápido = pierde oro.
 - Muy lento = se llena y tapa.
- ✓ Espesor de la capa de material: delgada y continua.
- ✓ Más largo el canalón = más oportunidad de capturar oro fino.
- ✓ Distribuir el agua de entrada de forma pareja (sin chorros).
- ✓ Hacer limpiezas periódicas del concentrado.

5. APOORTE A LA ECONOMÍA CIRCULAR

- Reutiliza el agua (circuito cerrado).
- Mejor aprovechamiento del oro (menos pérdidas).
- Reduce retrabajos y movimientos de material.
- Menor consumo de recursos e insumos.
- Equipo simple, de bajo consumo energético.

6. PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA

- No usa mercurio ni químicos contaminantes.
- Menor consumo de agua si se recircula.
- Menor generación de lodos y sedimentos.
- Menor impacto ambiental al río y al entorno.
- Cumple mejores prácticas de minería responsable.

7. RECOMENDACIÓN DE USO (FLUJO)



8. ERRORES COMUNES

- ❌ Alimentar con mucho barro.
- ❌ No ajustar pendiente y caudal.
- ❌ Sobrealimentar el canalón.
- ❌ No limpiar la alfombra a tiempo.
- ❌ No clasificar el material.
- ❌ Canalón muy corto para oro fino.

9. MANTENIMIENTO BÁSICO

- ✓ Lavar y revisar la alfombra y las rifles.
- ✓ Verificar nivelación e inclinación.
- ✓ Revisar fugas y distribución de agua.
- ✓ Cambiar alfombras o partes desgastadas.
- ✓ Limpiar el concentrado con frecuencia.

10. CONFIGURACIÓN RECOMENDADA

Pendiente del canalón	$5^\circ - 15^\circ$
Caudal de agua	Constante y parejo
Longitud recomendada	3 - 6 m o más
Ancho del canalón	30 - 50 cm
Tipo de alfombra	Miners moss o similar + metal desplegado
Altura de rifles	1.5 - 3 cm

REGLA DE ORO

EL ORO SE QUEDA DONDE EL AGUA PIERDE FUERZA Y PUEDE ASENTARSE.

Buen control de pendiente + caudal + limpieza = más oro recuperado.



TRABAJO SEGURO, EFICIENTE Y LIMPIO = MÁS ORO, MENOR IMPACTO



MINERÍA RESPONSABLE
FUTURO SOSTENIBLE

FICHA TÉCNICA JIG CONCENTRADOR

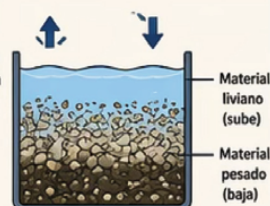
Para pequeño minero de oro aluvial

Separa el oro por peso usando pulsos de agua

¿QUÉ ES UN JIG?

El jig es un equipo que concentra el oro aprovechando la diferencia de peso entre los minerales.

El agua sube y baja (pulsos) y hace que lo pesado (oro) baje y lo liviano (arena) suba.



1. CRITERIOS DE SELECCIÓN



Tipo de material
Funciona mejor con gravas y arenas, no con mucho barro.



Tamaño del material
Ideal entre 2 mm y 20 mm.



Contenido de oro
Mejor para oro grueso o medio.



Disponibilidad de agua
Necesita agua, pero se puede reciclar.



Capacidad del equipo
Escoja según el volumen de material que procesa por día.



Regla práctica:
Si el material tiene mucho barro, primero lave o deslime.

2. ENTRADAS Y SALIDAS DEL EQUIPO

ENTRADAS

Material
(gravas y arenas con oro)

Agua
(puede ser reciclada)

SALIDAS

Colas
(material liviano: arena, grava fina)

Concentrado
(material pesado con oro)

Agua
(retorno al sistema para recirculación)

CÓMO FUNCIONA



3. LIMITANTES

- ✗ No trabaja bien con mucho barro o arcilla.
- ✗ No recupera bien el oro muy fino (menor a 0,2 mm).
- ✗ Requiere flujo de agua constante.
- ✗ Si se alimenta mal o se sobrecarga, baja la recuperación.

4. CONSIDERACIONES TÉCNICAS CLAVE

- ✓ Mantener flujo uniforme de material.
- ✓ No sobrecargar el equipo.
- ✓ Controlar la frecuencia de pulsos y la altura de la cama (lecho).
- ✓ Hacer limpiezas periódicas del concentrado.
- ✓ Usar clasificación previa (zaranda) para tamaños adecuados.

5. APOORTE A LA ECONOMÍA CIRCULAR



- ✓ Reutiliza el agua (circuito cerrado).
- ✓ Mejor aprovechamiento del oro (mayor recuperación).
- ✓ Menos retrabajos y menos movimiento de material.
- ✓ Reduce la generación de residuos y el impacto al río.

Más eficiencia • Menor consumo • Menor impacto

6. PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA

- ✓ No usa mercurio ni químicos contaminantes.
- ✓ Permite reciclar el agua y reducir la captación.
- ✓ Reduce la generación de lodos y sólidos finos.
- ✓ Menor afectación ambiental y mejor cumplimiento legal.



7. RECOMENDACIÓN PRÁCTICA

Combinar el jig con otros equipos mejora la recuperación total del oro.



Zaranda
(clasifica y separa tamaños)



Jig
(concentra el oro)



Canaleta o Mesa
(mejora la recuperación del oro fino)

★ La combinación correcta reduce pérdidas y aumenta la eficiencia.

8. ERRORES COMUNES

- ✗ Alimentar material con mucho barro.
- ✗ Sobrealimentar el jig.
- ✗ Pulsos muy fuertes o muy débiles.
- ✗ No limpiar el concentrado a tiempo.
- ✗ No clasificar el material antes de entrar al jig.

9. MANTENIMIENTO BÁSICO

- ✓ Revisar y limpiar el pistón y las válvulas de pulso.
- ✓ Verificar que no haya fugas de agua.
- ✓ Lubricar las partes móviles.
- ✓ Limpiar el concentrado con frecuencia.
- ✓ Revisar la estructura del equipo periódicamente.



REGLA DE ORO

El oro se concentra donde el agua pierde fuerza y se deposita.
Un buen control del agua, el material y los pulsos = más oro recuperado.

TRABAJO SEGURO, EFICIENTE Y LIMPIO.





CONCENTRADOR CENTRÍFUGO TIPO FALCON

PARA PEQUEÑO MINERO DE ORO ALUVIAL
RECUPERA ORO FINO Y MUY FINO CON ALTA EFICIENCIA

¿QUÉ ES?

Es un equipo que gira a alta velocidad y usa la fuerza centrífuga para separar por peso.



Oro (pesado) se queda atrapado en los anillos.



Arena y material liviano salen con el agua.

1. CRITERIOS DE SELECCIÓN



Tipo de oro: Ideal para oro fino y muy fino.



Granulometría: Material fino ≤ 2 mm.



Preparación previa: Clasificado y deslamado (poco barro).



Capacidad del equipo: Según la producción (t/h).



Disponibilidad de agua: Necesaria, preferible en circuito cerrado.



Energía: Requiere motor eléctrico estable.

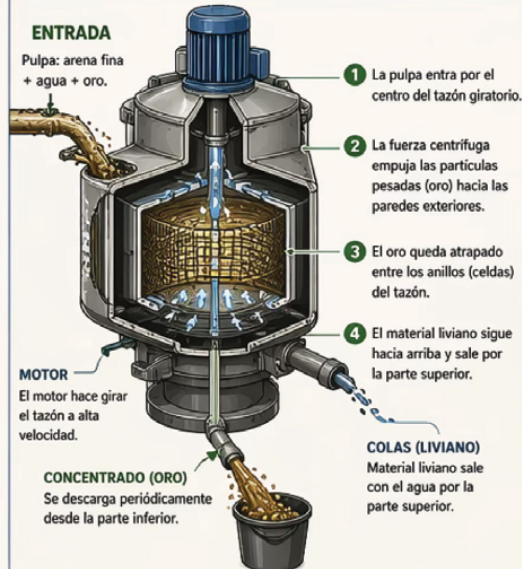


Objetivo: Recuperación final (etapa de afinamiento).



Regla práctica: Si el oro no se ve en el canalón, el Falcon lo puede recuperar.

2. ¿CÓMO FUNCIONA?



3. ENTRADAS Y SALIDAS

ENTRADAS



Pulpa: arena fina, agua + oro.



Caudal de alimentación controlado.

SALIDAS



CONCENTRADO (oro)
Descarga periódica desde la parte inferior.



COLAS (material liviano)
Sale con el agua por la parte superior.



Agua
Se recircula al sistema.

4. LIMITANTES

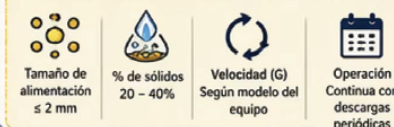
- ✗ No funciona bien con mucha arcilla o lodo.
- ✗ No trabaja bien con material grueso (sin clasificar).
- ✗ Requiere energía eléctrica estable.
- ✗ Operación más técnica que otros equipos.
- ✗ Mala operación (sobrealimentación, mala limpieza) baja la eficiencia.



5. CONSIDERACIONES TÉCNICAS CLAVE

- ✓ Clasificar y deslamar antes (muy importante).
- ✓ Controlar: velocidad de giro (G), caudal de alimentación y % de sólidos en la pulpa.
- ✓ Mantener flujo continuo y estable.
- ✓ Realizar descargas periódicas del concentrado.
- ✓ Evitar vibraciones y desbalance del equipo.

CONFIGURACIÓN RECOMENDADA (REFERENCIAL)



6. APOORTE A LA ECONOMÍA CIRCULAR

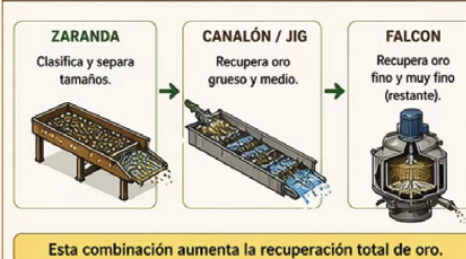
- Recicla agua (circuito cerrado).
- Recupera oro fino que antes se perdía.
- Reduce retrabajos de colas y reprocesos.
- Mejora el aprovechamiento total del recurso.
- Más oro con el mismo material, menos pérdida al ambiente.

7. PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA

- No usa mercurio ni químicos.
- Menor consumo de agua (al recircular).
- Menos relaves con oro (menos pasivo ambiental).
- Menor impacto al río y al entorno.
- Cumple mejores prácticas de minería responsable.



8. RECOMENDACIÓN DE USO (FLUJO)



9. ERRORES COMUNES

- ✗ Alimentar con barro o lodo.
- ✗ No clasificar el material.
- ✗ Sobrealimentar el equipo.
- ✗ No controlar caudal y % de sólidos.
- ✗ No hacer descargas a tiempo.
- ✗ No dar mantenimiento periódico.

10. MANTENIMIENTO BÁSICO



Revisar tazón y anillos (desgaste y limpieza).



Verificar motor y sistema eléctrico.



Limpiar equipo periódicamente.



Controlar vibraciones y desbalance.



Revisar tuberías y conexiones de agua.

REGLA DE ORO



El Falcon recupera el oro que no ves.

Si el material está limpio, bien clasificado y el equipo bien ajustado, la recuperación sube mucho.

EN RESUMEN

- ✓ Recupera oro fino y muy fino con alta eficiencia.
- ✓ Necesita material limpio y bien preparado.
- ✓ Requiere operación técnica y controlada.
- ✓ Aumenta la recuperación total del proceso.
- ✓ Permite una minería más eficiente, rentable y limpia.



TRABAJO SEGURO, EFICIENTE Y LIMPIO = MÁS ORO, MENOR IMPACTO

**MINERÍA RESPONSABLE
FUTURO SOSTENIBLE**





MESA VIBRATORIA

PARA PEQUEÑO MINERO DE ORO ALUVIAL

RECUPERA ORO FINO Y MUY FINO CON ALTA PRECISIÓN

¿QUÉ ES?

Equipo que usa vibración y agua para separar el oro por gravedad. El oro (pesado) se concentra en la parte final de la mesa, mientras la arena y el material liviano se desplazan y salen.

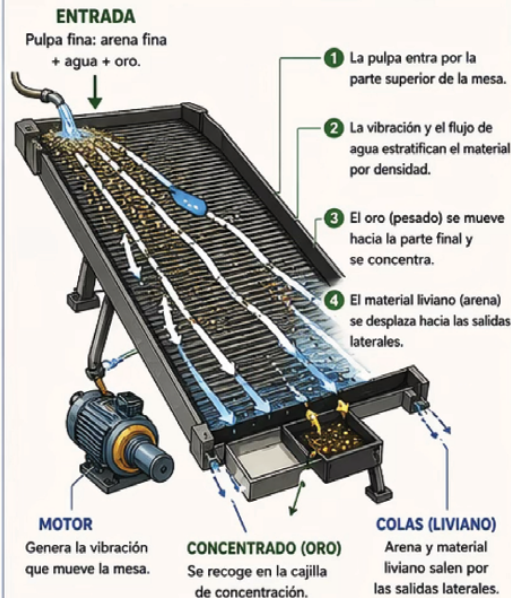


1. CRITERIOS DE SELECCIÓN

- Tipo de oro:** Ideal para oro fino y muy fino (microoro).
- Granulometría:** Material fino $\leq 0,5$ mm.
- Preparación previa:** Clasificado y deslamado (poco barro).
- Capacidad del equipo:** Según la producción (t/h).
- Disponibilidad de agua:** Necesaria y limpia, preferible en circuito cerrado.
- Energía:** Requiere motor eléctrico y alimentación estable.
- Objetivo:** Etapa de concentración final y limpieza del oro.

Regla práctica:
Si el oro es muy fino y no se ve en el canalón ni en el Falcon, la mesa lo puede recuperar.

2. ¿CÓMO FUNCIONA?



3. ENTRADAS Y SALIDAS



4. LIMITANTES

- ✗ No funciona bien con mucha arcilla o lodo.
- ✗ No trabajar con material grueso (sin clasificar).
- ✗ Requiere energía eléctrica estable.
- ✗ Operación más técnica que otros equipos.
- ✗ Mala operación (pendiente, agua, vibración) reduce la eficiencia.



5. CONSIDERACIONES TÉCNICAS CLAVE

- ✓ Clasificar y deslamar antes (muy importante).
- ✓ Controlar: inclinación de la mesa, caudal de agua y frecuencia de vibración.
- ✓ Mantener flujo de pulpa constante y uniforme.
- ✓ Distribuir bien el agua de lavado.
- ✓ Limpiar la mesa periódicamente.
- ✓ Ajustar la mesa según el tipo de oro y material.

AJUSTES IMPORTANTES

Inclinación Longitudinal	Inclinación Transversal	Caudal de agua	Frecuencia (Hz)
2° - 4°	0,5° - 1°	Constante y parejo	Según modelo de mesa

6. APOORTE A LA ECONOMÍA CIRCULAR

- ♻️ Reutiliza agua (circuito cerrado).
- 🌟 Recupera oro fino que antes se perdía.
- ♻️ Reduce retrabajos de colas y reprocesos.
- 🌱 Mejora el aprovechamiento total del recurso.
- 📈 Más oro con el mismo material, menos pérdida al ambiente.

7. PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA

- 💧 No usa mercurio ni químicos.
- 💧 Menor consumo de agua (al reciclar).
- 🌱 Menos relaves con oro (menos pasivo ambiental).
- 🌱 Menor impacto al río y al entorno.
- 🌱 Cumple mejores prácticas de minería responsable.



8. RECOMENDACIÓN DE USO (FLUJO)



9. ERRORES COMUNES

- ✗ Alimentar con barro o lodo.
- ✗ No clasificar el material.
- ✗ Sobrealimentar la mesa.
- ✗ Mala distribución del agua.
- ✗ No ajustar la inclinación y la vibración.
- ✗ No limpiar la superficie de la mesa.
- ✗ No recoger el concentrado a tiempo.

10. MANTENIMIENTO BÁSICO

- ⚙️ Revisar sistema de vibración y sujeciones.
- ⚙️ Verificar motor y sistema eléctrico.
- 💧 Limpiar la superficie de la mesa.
- ⚙️ Revisar tuberías y distribución de agua.
- ⚙️ Revisar cajilla de concentración y limpiar.

Mantenimiento constante = mayor recuperación y vida útil del equipo.

REGLA DE ORO

El oro fino se recupera con paciencia y buen control. Material limpio + agua bien ajustada + mesa bien calibrada = máxima recuperación.

EN RESUMEN

- ✓ Recupera oro fino y muy fino con alta precisión.
- ✓ Requiere material bien preparado y operación controlada.
- ✓ Es el equipo final para una recuperación completa y eficiente.
- ✓ Permite una minería más rentable, responsable y limpia.



TRABAJO SEGURO, EFICIENTE Y LIMPIO = MÁS ORO, MENOR IMPACTO

MINERÍA RESPONSABLE
FUTURO SOSTENIBLE

FICHA TÉCNICA

TROMMEL
MINERÍA DE ORO ALUVIAL (PEQUEÑA ESCALA)

FUNCIÓN PRINCIPAL

Clasificación y deslamado del material para mejorar la recuperación de oro.

1. DESCRIPCIÓN

El trommel es un equipo de clasificación rotatorio que separa el material por tamaño mediante una malla perforada, mientras se lava con agua para remover arcillas y finos.

Aplicación:
Preparación del material previo a la concentración gravimétrica.

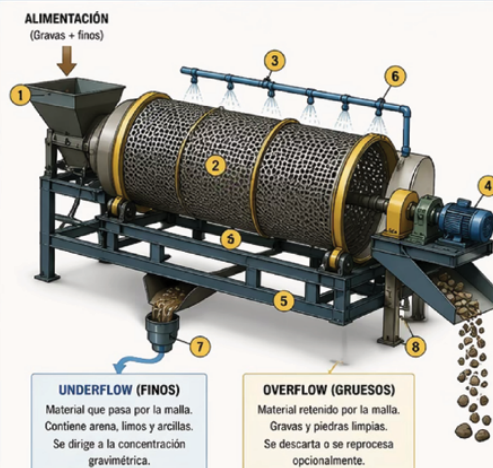
2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

PARÁMETRO	VALOR RECOMENDADO
Diámetro del tambor	0.8 – 1.5 m
Longitud del tambor	2 – 4 m
Tamaño de malla (perforación)	2 – 10 mm
Capacidad de procesamiento	5 – 20 m³/h
Velocidad de rotación	15 – 25 rpm
Inclinación del tambor	3° – 7°
Potencia requerida	3 – 10 HP
Consumo de agua	1 – 5 m³/h
Material del tambor	Acero al carbono
Tipo de transmisión	Motor eléctrico + reductor + piñón
Dimensiones generales (referenciales)	Según diseño

3. COMPONENTES PRINCIPALES

1. Tolva de alimentación
2. Tambor rotatorio (cilíndrico con malla)
3. Aros de soporte y refuerzo
4. Sistema de transmisión (motor + reductor + piñón)
5. Chasis estructural
6. Sistema de lavado (spray de agua)
7. Descarga de finos (underflow)
8. Descarga de gruesos (overflow)

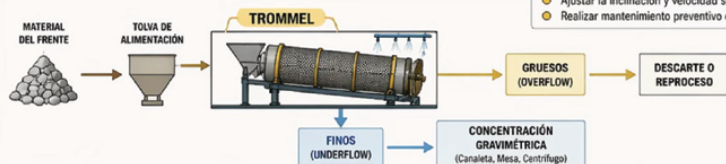
4. DIAGRAMA DEL EQUIPO



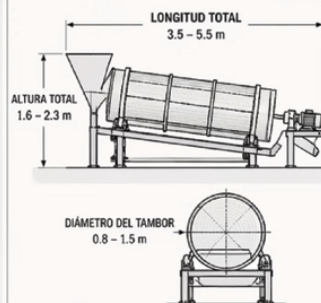
UNDERFLOW (FINOS)
Material que pasa por la malla. Contiene arena, limos y arcillas. Se dirige a la concentración gravimétrica.

OVERFLOW (GRUESOS)
Material retenido por la malla. Gravas y piedras limpias. Se descarta o se reprocessa opcionalmente.

8. FLUJO DE PROCESO



5. DIMENSIONES REFERENCIALES



6. VENTAJAS

- ✓ Remueve arcillas y finos que atrapan el oro.
- ✓ Mejora la eficiencia de recuperación.
- ✓ Clasificación efectiva por tamaño.
- ✓ Equipo robusto, simple y de bajo mantenimiento.
- ✓ Apto para operaciones de pequeña escala.

7. CONSIDERACIONES OPERATIVAS

- Mantener flujo de agua constante para un buen deslamado.
- No exceder la capacidad de alimentación.
- Revisar y limpiar la malla periódicamente.
- Ajustar la inclinación y velocidad según el material.
- Realizar mantenimiento preventivo en transmisión y rodamientos.

9. CONTROL AMBIENTAL

- Manejar los lodos (SST) en piscinas de sedimentación.
- Recircular el agua siempre que sea posible.
- Disponer los sedimentos de forma controlada.

10. MENSAJE CLAVE

Un buen deslamado y clasificación en el trommel es clave para una alta recuperación de oro.



FICHA TÉCNICA

ZARANDA VIBRATORIA GRIZZLY
MINERÍA DE ORO ALUVIAL – CLASIFICACIÓN GRUESA

FUNCIÓN PRINCIPAL

Separar y clasificar el material grueso, protegiendo los equipos aguas abajo y mejorando la eficiencia del proceso.

1. DESCRIPCIÓN

La zaranda vibratoria tipo grizzly es un equipo de clasificación primaria que separa el material grueso del fino mediante barras paralelas vibrantes, permitiendo el paso del material menor a través de los espacios entre barras.

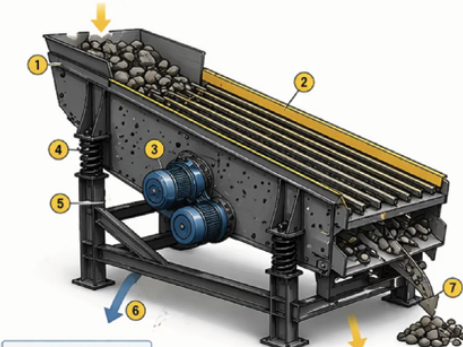
2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

PARÁMETRO	VALOR TÍPICO
Ancho de zaranda	0.8 – 1.5 m
Longitud de zaranda	1.5 – 3.0 m
Abertura entre barras	30 – 150 mm
Inclinación de trabajo	15° – 25°
Capacidad de procesamiento	20 – 80 m³/h
Frecuencia de vibración	700 – 1100 rpm
Amplitud de vibración	4 – 8 mm
Potencia del vibrador	2 x 1.5 – 2 x 5 HP
Número de decks (pisos)	1 deck
Material de barras	Acero al manganeso
Tipo de accionamiento	2 Vibradores eléctricos
Peso aproximado	600 – 1800 kg

3. COMPONENTES PRINCIPALES

1. Estructura de alimentación
2. Barras grizzly (fijas o reemplazables)
3. Caja o cuerpo de zaranda
4. Vibradores eléctricos
5. Resortes de suspensión
6. Descarga de finos (pasante)
7. Descarga de gruesos (rechazo)
8. Chasis de soporte

ALIMENTACIÓN
(Material Grueso)



DESCARGA DE FINOS (PASANTE)
El material menor al espacio entre barras pasa a través de la zaranda y se dirige a la siguiente etapa del proceso.

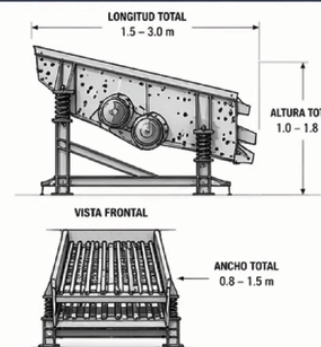
NOTA:
La abertura entre barras define el tamaño de corte del equipo.

DESCARGA DE GRUESOS (RECHAZO)
El material retenido sobre las barras avanza por la superficie y se descarga al final.

7. FLUJO DE PROCESO



4. DIMENSIONES REFERENCIALES



5. VENTAJAS

- ✓ Alta capacidad de clasificación gruesa.
- ✓ Resistente a impactos y materiales abrasivos.
- ✓ Protege equipos de trituración y transporte.
- ✓ Bajo mantenimiento y fácil instalación.
- ✓ Mejora la eficiencia del circuito de proceso.

6. CONSIDERACIONES OPERATIVAS

- Verificar ajuste de vibradores y tensión de resortes.
- Mantener barras limpias para evitar atascos.
- Revisar pernos y soldaduras periódicamente.
- Asegurar una alimentación uniforme.
- No operar con sobrecarga.

8. SELECCIÓN DE ABERTURA (GUÍA RÁPIDA)

APLICACIÓN	ABERTURA ENTRE BARRAS
Preclasificación gruesa	100 – 150 mm
Clasificación media	60 – 100 mm
Clasificación fina	30 – 60 mm

- Menor abertura = mayor clasificación fina
- Mayor abertura = mayor capacidad

9. CONTROL AMBIENTAL

- Control de polvo y salpicaduras de material.
- Recirculación de agua en el proceso.
- Uso de piscinas de sedimentación para lodos.
- Disposición adecuada de material de rechazo sin afectar drenajes.

10. MENSAJE CLAVE

Una buena clasificación con la zaranda grizzly garantiza la eficiencia, protege tus equipos y maximiza la recuperación de oro.



¿DÓNDE EXACTAMENTE EXCAVAR PARA NO PERDER ORO?

Minería de Oro Aluvial – Trabaja donde el río ya concentró el oro

1. LEE EL RÍO: EL RÍO SEPARA Y CONCENTRA



2. ZONAS CLAVE DONDE EXCAVAR

A CURVAS INTERNAS (POINT BAR)



- El agua pierde velocidad en la parte interna.
- Depósito de gravas y arenas pesadas (oro).
- Busca grava compacta y arena negra.

DÓNDE ABRIR:

Orilla interna de la curva, en zonas con grava y arena negra.

B CONTACTO CON ROCA DURA (BEDROCK)



- El oro baja hasta encontrar la roca dura.
- Se detiene y se acumula en grietas, huecos y superficies irregulares.

DÓNDE ABRIR:

Excavar hasta tocar fondo (ROCA DURA). No te quedes a media profundidad.

C TRAMPAS NATURALES (ATRAPAN EL ORO)

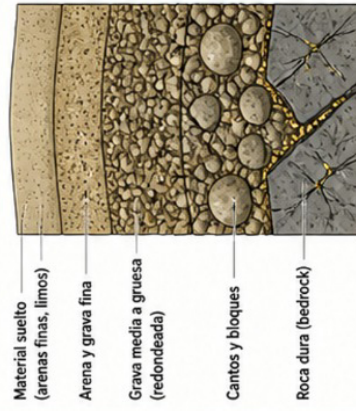


- El oro se queda donde encuentra obstáculos o huecos.
- Son trampas donde se concentra el oro fino.

DÓNDE ABRIR:

Detrás de rocas grandes, grietas, huecos, raíces, troncos enterrados.

3. PERFIL DEL DEPÓSITO ALUVIAL (SECCIÓN TÍPICA)



Lo liviano se mueve

¡IMPORTANTE!
Aquí se concentra el oro

El oro cae hasta tocar la roca dura

AQUI NUNCA TE QUEDES

4. INDICADORES EN CAMPO (BUSCA ESTO)



5. SECUENCIA CORRECTA DE EXCAVACIÓN



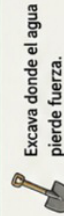
DÓNDE NO EXCAVAR (EVITA PÉRDIDAS)

- Orilla externa de la curva (alta velocidad, erosional).
- Zonas de arena suelta sin grava (poco oro).
- Superficie sin llegar a fondo (dejas oro enterrado).
- Mixclar material limpio con contaminado (dilución y pérdida).

BENEFICIOS DE EXCAVAR BIEN

- Más oro por volqueta.
- Menos material movido.
- Menos diésel y desgaste de equipos.
- Menos impacto ambiental.
- Más ganancia.

RECUERDA SIEMPRE



Excava donde el agua pierde fuerza.



Llega siempre hasta la roca dura.



Busca trampas naturales: grietas, huecos y obstáculos.



No olvides el nivel freático: El agua dentro del suelo mueve lo liviano y deja el oro atrapado.



TRABAJA INTELIGENTE, NO MÁS DURO.



FICHA TÉCNICA 2

VALORIZACIÓN DE ESTÉRILES Y RELAVES EN MINERÍA DE ORO ALUVIAL



CONVERTIR LO QUE ANTES ERA DESECHO, EN RECURSOS ÚTILES Y SEGUROS

1 ¿QUÉ BUSCA ESTA FICHA?

Aprovechar arenas, gravas, estériles y relaves limpios generados en la minería de oro aluvial como materiales útiles para obras y productos comerciales.

✓ Arreglo de vías internas

✓ Conformación de plataformas

✓ Subbases y rellenos compactados

✓ Bloques, prefabricados o concreto no estructural

✓ Recuperación de áreas intervenidas

MATERIAL	POSIBLE USO	CONDICIÓN MÍNIMA
Arenas aluviales limpias	Morteros, bloques, filtros, rellenos	Baja materia orgánica y bajo arcilla
Gravas aluviales	Afirmados, subbases, mejoras, plataformas	Buena granulometría y resistencia
Estériles gruesos	Vías internas, rellenos, conformación de taludes	Estabilidad física y sin contaminación
Relaves arenosos	Bloques, rellenos, mezclas estabilizadas	Sin Hg, baja lixiviación y bajo contenido de finos
Concentrados gruesos	Subproducto comercial potencial	Caracterización mineralógica y legal

3 REGLA BÁSICA PARA EL PEQUEÑO MINERO

"No todo relave o estéril se puede usar directamente. Primero se debe demostrar que es seguro y que sirve técnicamente."

PRINCIPIOS CLAVE

✓ No contamina el ambiente

✓ Cumple los requisitos técnicos

✓ Es estable y durable

✓ Genera beneficio económico

4 ¿QUÉ SE DEBE HACER?

1. SEPARAR EL MATERIAL EN LA OPERACIÓN

2. CARACTERIZAR EL MATERIAL

3. EVALUAR SEGURIDAD AMBIENTAL

4. EVALUAR DESEMPEÑO TÉCNICO

5. USO APROPIADO

CRITERIOS DE ACEPTACIÓN	SI PUEDE VALORIZARSE SI:	NO DEBE VALORIZARSE SI:
✓ No tiene mercurio residual	✓ No tiene mercurio residual	✗ Tiene mercurio
✓ No lixivia metales peligrosos contaminados	✓ No lixivia metales peligrosos contaminados	✗ Alto contenido de finos
✓ No genera drenaje ácido	✓ No genera drenaje ácido	✗ Presenta pH ácido
✓ Buena granulometría	✓ Buena granulometría	✗ Libera As, Hg, Pb, Cu u otros metales
✓ Compacta bien	✓ Compacta bien	✗ Olor químico, coloración anormal o todos reactivos
✓ Tiene resistencia suficiente	✓ Tiene resistencia suficiente	✗ No cumple con normatividad o resistencia
✓ No contiene exceso de arcillas o materia orgánica	✓ No contiene exceso de arcillas o materia orgánica	

ADVERTENCIA: Los relaves con mercurio residual o de procesos de amalgamación NO deben usarse directamente como materiales de construcción sin tratamiento previo.

6 ¿CÓMO SE PUEDE USAR?

A. PARA ABRILLO DE VÍAS INTERNAS

B. PARA PLATAFORMAS MINERAS

C. PARA BLOQUES O PREFABRICADOS

D. PARA RECUPERACIÓN DE ÁREAS

7 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL (ENSAYOS RECOMENDADOS)

ENSAYO	¿PARA QUÉ SIRVE?	APLICACIÓN
Granulometría	Define si sirve para vías, concreto o rellenos	Todos los usos
Materiales (pasa #200)	Controla excesos de lodo/arcilla	Vías, concreto, bloques
Limites de Atterberg	Evita plasticidad y problemas de compactación	Vías y rellenos
Píctor	Define humedad óptima de compactación	Vías, plataformas, rellenos
CBR	Evalúa capacidad de resistencia a la deformación	Vías y subbases
Abrasión Los Angeles	Mide la resistencia al desgaste	Vías y subbases
Densidad y absorción	Evalúa calidad del agregado	Concreto y bloques
Materia orgánica	Evita problemas en el concreto	Concreto y morteros
pH	Identifica acidez o alcalinidad	Ambiental
Metales totales (Hg, As, Pb, Cd, Cu)	Evalúa presencia de metales	Ambiental
TCLP / Lixiviación	Define si libera contaminantes	Ambiental
ABA / NAG	Evalúa potencial de lixiviación	Ambiental

Solo si el material es AMBIENTALMENTE SEGURO y TÉCNICAMENTE APTO puede ser valorizado.

8 DIAGRAMA SIMPLE DEL PROCESO

MATERIAL GENERADO (estéril / relave limpio)

SEPARAR MATERIAL (arena / grava / fino)

CARACTERIZAR EN LABORATORIO (granulometría, metales, pH, TCLP)

¿ES SEGURO AMBIENTALMENTE?

SI

EVALUAR USO TÉCNICO (resistencia, compactación, granulometría)

¿CUMPLE REQUISITOS TÉCNICOS?

SI

USO FINAL

TRATAR / ESTABILIZAR / CONFIRMAR

MEZCLAR / ESTABILIZAR / DESCARTAR

10 NORMATIVIDAD Y REFERENCIAS CLAVE

TEMA	NORMA / REFERENCIA	¿QUÉ EXIGE O PERMITE?
Aprobación de subproductos mineros	Ley 489 de 2001 - Art. 41	Permite aprovechar materiales obtenidos como subproductos de la explotación minera, siempre que tengan valor técnico o económico.
Residuos de construcción y demolición (RCD)	Resolución 472 de 2017 - Medioambiente	Regula la gestión integral de RCD, incluyendo su identificación, aprovechamiento y disposición final controlada.
Vías, afirmados y subbases	INVIAS 2022 (Resolución 4561 de 2022)	Define especificaciones técnicas para materiales usados en vías (granulometría, compactación y resistencia).
Agregados para concreto	NTC 176-2008 / ASTM C33	Establece requisitos de calidad, limpieza y gradación de agregados para uso en concreto.
Concreto estructural	NSR-10 - Título C	Regula el diseño y construcción de estructuras en concreto, incluyendo resistencia y control de calidad.
Vehículos a correa de agua	Resolución 831 de 2019 - Medioambiente	Define límites máximos permisibles para vertimientos líquidos a cuerpos de agua.
Residuos peligrosos	Decreto 4341 de 2005 / TCLP	Establece el manejo de residuos peligrosos y determina si un material requiere tratamiento especial.

11 MENSAJE FINAL

"El estéril o relave solo se convierte en producto cuando la ciencia demuestra dos cosas: que no contamina y que cumple una función técnica."

ESA ES LA DIFERENCIA ENTRE "BOTAR MATERIAL" Y HACER MINERÍA INTELIGENTE Y CIRCULAR.

9 PASOS PRÁCTICOS PARA EL PEQUEÑO MINERO

1 Planificar la separación de materiales

2 Clasificar y almacenar por tipo

3 Tomar muestras representativas

4 Realizar ensayos en laboratorio

5 Analizar resultados

6 Usar el material adecuado

7 Monitorear y mejorar

RECUERDA: LO QUE HOY BOTAS, MAÑANA PUEDE SER TU MEJOR RECURSO.

✓ Menos desecho

✓ Menos impacto

✓ Más ahorro

✓ Más ganancia

✓ Minería responsable y circular

12 MENSAJE FINAL

"El estéril o relave solo se convierte en producto cuando la ciencia demuestra dos cosas: que no contamina y que cumple una función técnica."

ESA ES LA DIFERENCIA ENTRE "BOTAR MATERIAL" Y HACER MINERÍA INTELIGENTE Y CIRCULAR.



CARACTERIZACIÓN Y VALORIZACIÓN DE RELAVES DE MINERÍA DE ORO ALUVIAL

CONVERTIR PASIVOS EN RECURSOS – MINERÍA CIRCULAR, RESPONSABLE Y RENTABLE

- SOSTENIBLE**
Protege el río y el territorio
- RENTABLE**
Recupera oro y genera nuevos ingresos
- RESPONSABLE**
Reduce impactos y conflictos
- CIRCULAR**
Aprovecha cada recurso

1. ¿QUÉ SE EVALÚA?

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

- Cuarzo, feldespatos, micas, arcillas
- Magnetita, hematita, pirita, arsenopirita
- Sulfuros (pirita, arsenopirita)
- Oro residual

PROPIEDADES FÍSICAS

- Granulometría (gravas, arenas, limos, arcillas)
- Densidad y gravedad específica
- Forma y redondez de partículas
- Contenido de finos y arcillas

CONDICIÓN AMBIENTAL

- Mercurio (Hg) y otros metales pesados (As, Pb, Cd, etc.)
- Potencial de lixiviación (TCLP)
- Presencia de sulfuros y potencial ácido (drenaje ácido)

2. TÉCNICAS ANALÍTICAS RECOMENDADAS

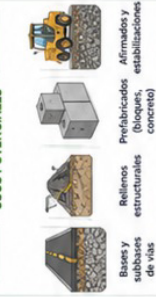
PARÁMETRO	TÉCNICA
Mineralogía	DRX (XRD)
Química total	FRX (XRF)
Metales traza / pesados	ICP-MS / ICP-OES
Mercurio total	Analizador de Hg directo / Absorción Atómica
Lixiviación ambiental	TCLP / SPLP (difracción)
Granulometría	Tamizado / Láser (difracción)
Morfología de partículas	SEM-EDS
Propiedades geotécnicas	Proctor, CBR, Atterberg, Los Angeles, Equivalente de Arena
Materia orgánica / arcillas	Azul de metileno, Límites de Atterberg
Potencial ácido	ABA / NAG (si hay sulfuros)

3. CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL

✓ APTO PARA CONSTRUCCIÓN / VÍAS

- Arenas limpias (bajo contenido de finos)
- Gravas bien graduadas
- Bajo contenido de arcillas
- Sin lixiviación de contaminantes

USOS POTENCIALES



✗ NO APTO (SIN TRATAMIENTO)

- Arcillas expansivas
- Limos en exceso
- Sulfuros reactivos (pirita)
- Alta materia orgánica
- Contaminación con Hg o metales pesados
- Alta salinidad o lixiviación

⚠ RIESGOS

- Contaminación de suelo y agua
- Generación de drenaje ácido
- Riesgos para la salud humana
- Fallas en estructuras y vías

5. PROCESO DE APROVECHAMIENTO (RUTA TÉCNICA)



7. CRITERIOS DE DECISIÓN

CONDICIÓN DEL MATERIAL	ACCIÓN RECOMENDADA
Material limpio y apilado	Uso directo en construcción / Vías
Con finos altos	Clasificar y mejorar gradación
Con minerales valiosos	Procesar para concentración y venta
Con contenido de Hg	Regenerar, concentrar, reinar y soldar
Con lixiviación de contaminantes	No usar sin tratamiento previo
Con sulfuros reactivos	Estabilizar y confinar
Con materia orgánica alta	No usar para estructuras o vías

8. BENEFICIOS DEL ENFOQUE

ECONÓMICOS	AMBIENTALES	OPERATIVOS
• Recuperación de oro perdido • Nuevos ingresos por subproductos • Reducción de costos de disposición • Menor consumo de agua y combustible	• Eliminación de pasivos ambientales • Protección del cauce y ecosistemas • Reducción de contaminación por Hg • Menor extracción de materiales vírgenes • Cumplimiento normativo	• Mayor eficiencia del proceso • Menor volumen de material movido • Continuidad operativa • Mejor aceptación social y licencia para operar

6. MANEJO DE RELAVES CON MERCURIO (Hg)



9. RUTA INTEGRAL DE VALORIZACIÓN



10. INSIGHT TÉCNICO CLAVE

“El relave aluvial no es un residuo homogéneo, sino un sistema separable en fracciones con valor técnico, económico y ambiental. Es siempre que se caracterice correctamente y se gestione el riesgo de contaminantes como el mercurio.”



UN RELAVE MAL GESTIONADO ES UN PASIVO; BIEN CARACTERIZADO, ES UNA FUENTE DE VALOR.

LA MINERÍA QUE REGENERA, PROSPERA.





FICHA PRÁCTICA
APLICABLE EN CAMPO

¿CÓMO DESCARGAR EL MATERIAL DEL RÍO?

DESCARGA MAL VS DESCARGA BIEN

La forma como devolvemos el material al río define si protegemos el ambiente o lo dañamos.



REGLA DE ORO
El río debe verse igual antes y después de tu trabajo.

DESCARGA MAL – DAÑA EL RÍO



Descarga directa y sin control.
Genera turbidez, sedimentación y contaminación.

	1. AUMENTA LA TURBIDEZ El agua se vuelve lechosa. Aumentan los sólidos suspendidos (TSS).	IMPACTO - Afecta las branquias de los peces. - Reduce el oxígeno del agua.
	2. SEPULTA HÁBITATS El lodo y los finos tapan el fondo del río (gravas y rocas).	IMPACTO - Pierde biodiversidad. - Afecta la reproducción de peces e insectos.
	3. CAMBIA LA FORMA DEL RÍO Genera sedimentación artificial y altera el cauce natural.	IMPACTO - Desvía el flujo del río. - Genera erosión en otros puntos.
	4. MOVILIZA CONTAMINANTES Si hubo mercurio o sulfuros, puede liberar Hg, As, Fe y generar drenaje ácido.	IMPACTO - Contamina el agua. - Afecta la salud humana y los ecosistemas.

¡EVITALO! Descargar así es dañino y puede generar sanciones. No lo hagas.

¿QUÉ DICE LA NORMA?

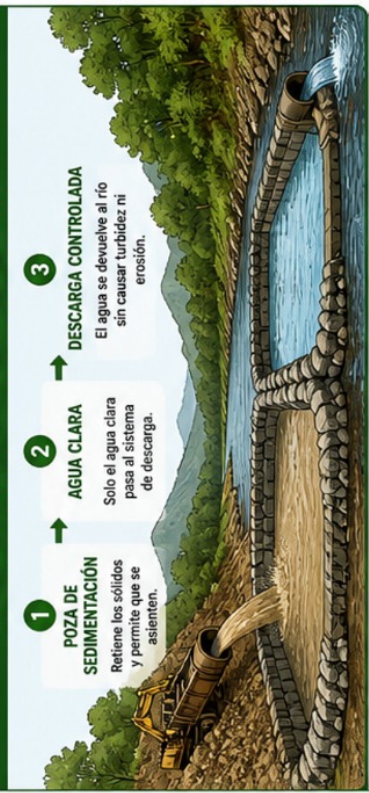
- Resolución 631 de 2015: regula los vertimientos a cuerpos de agua.
- PMA y Autoridad Ambiental: debes demostrar que no hay afectación al río (turbidez, cauce, calidad del agua).
- Decreto 4741 de 2005: si el material tiene contaminantes, no puede disponerse libremente.



CLAVES PARA RECORDAR

- No descargues material turbio.
- Controla los finos antes de devolver el agua.
- No uses mercurio ni químicos.
- Cuida el cauce y la vida del río.

DESCARGA BIEN – PROTEGE EL RÍO



- POZA DE SEDIMENTACIÓN**
Retiene los sólidos y permite que se asienten.
- AGUA CLARA**
Solo el agua clara pasa al sistema de descarga.
- DESCARGA CONTROLADA**
El agua se devuelve al río sin causar turbidez ni erosión.

	1. SIN CONTAMINANTES El material no contiene mercurio ni químicos.	RESULTADO - No se liberan sustancias tóxicas. - Se protege la salud y el ambiente.
	2. CONTROL DE FINOS Se usan pozas de sedimentación para retener lodos y arenas finas.	RESULTADO - Disminuye la turbidez. - El agua sale limpia.
	3. DESCARGA CONTROLADA El agua se devuelve de forma distribuida y sin erosión.	RESULTADO - No se altera el cauce. - No se generan plumas de sedimento.
	4. RECIRCULACIÓN DE AGUA Se reutiliza el agua en el proceso para minimizar descargas.	RESULTADO - Ahorro de agua. - Menor impacto ambiental.
	5. RESPETO DE LA HIDRÁULICA NATURAL No se bloquea el flujo ni se cambia la forma del río.	RESULTADO - El río mantiene su equilibrio natural. - Se conserva la vida acuática.

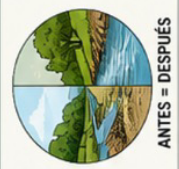
USOS ALTERNATIVOS DEL MATERIAL (MEJOR OPCIÓN)
Aprovecha el material estéril en:

- Vías y carreteras (afirmado, subbase)
- Rellenos y estabilización
- Bloques y prefabricados
- Recuperación de zonas degradadas

RECUERDA SIEMPRE

"El problema no es devolver el material... el problema es devolverlo mal."

Si lo que botas enturbia el río o lo cambia... lo estás dañando.



LABORATORIO DE CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA, GEOQUÍMICA Y AMBIENTAL MINERÍA SOSTENIBLE Y RESPONSABLE



CONOCER EL MATERIAL PARA TOMAR BUENAS DECISIONES

PREVENIR LA CONTAMINACIÓN ES MÁS BARATO QUE REMEDIAR

ANÁLISIS CONFIABLE, MINERÍA RESPONSABLE

CIENCIA + TECNOLOGÍA = MINERÍA SOSTENIBLE



Bibliografía

- Agencia Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). (2016). Términos de referencia para estudios de impacto ambiental: Proyectos de explotación minera. ANLA.
- Aliaga Churruarín, D. G. (2023). La reutilización del agua en la minería con enfoque en economía circular. *Fides Et Ratio*, 25(25), 193–228.
- Álvarez-Pugliese, C. E. (2018). Aproximación a la estimación de la huella hídrica minera en el municipio de Suárez (Cauca). Tesis de Maestría. Universidad del Valle.
- Álvarez-Pugliese, C. E., Machuca-Martínez, F., & Pérez-Rincón, M. (2021). Water footprint in gold extraction: A case-study in Suárez, Cauca, Colombia. *Heliyon*, 7(9), e07949.
- AMIRA International (2002). ARD Test Handbook, Project P387A, secciones 4.5-4.7. Miller, S., Robertson, A. & Donahue, T. (1997). Advances in acid drainage prediction using the NAG test. *Proc. 4th ICARD*.
- Anglo American. (2024). Premios Avonni: proyecto de relaves deshidratados reduce impacto ambiental. [Comunicado de prensa].
- ANLA. (2016). Términos de Referencia para la Elaboración del Estudio de Impacto Ambiental - Proyectos de Explotación Minera.
- ANM (2022), Guía de Buenas Prácticas para la Exploración y Estimación de Recursos y Reservas Minerales de Depósitos de Placer, p. 48 y p. 66.
- ASOMIAT. (2023). Experiencias de biorremediación pasiva en minería de oro. Tadó, Chocó. [Documentación de proyecto].
- Bigham, J.M. & Nordstrom, D.K. (2000). Iron and aluminum hydroxysulfates from acid sulfate waters. *Reviews in Mineralogy* 40, 351-403.
- Bigham, J.M. & Nordstrom, D.K. (2000). *Reviews in Mineralogy* 40, 351-403. Cornell, R.M. & Schwertmann, U. (2003). *The Iron Oxides*, 2nd ed. Wiley-VCH.
- Boger, D. V. (2013). Rheology and the resource industries. *Chemical Engineering Science*.
- Botz, M. M. (2001). Overview of cyanide treatment methods. In *Mining Environmental Management*. Mining Journal Books.
- Burt, R. Gravity concentration technology. In *Development of Mineral Processing*, 5th ed.; Fuerstenau, D.W., Ed.; Elsevier: New York, NY, USA, 1984; p. 605.
- CARDER. (2010). Guía para la elaboración del Programa de Uso Eficiente y Ahorro del Agua en la minería de metales preciosos y carbón – PUEAA.
- CEPAL. (2020). Estado del arte de las estadísticas mineras del uso de agua y energía en los países andinos. Santiago de Chile.
- CEPAL. (2021). La ENAMI de Chile: Modelo y buenas prácticas para pequeña minería y artesanal. CEPAL.
- CEPIS. (1988). Sistemas de abastecimiento de agua para pequeñas comunidades. Lima, Perú.
- Chalov, S. R., et al. (2014). Anthropogenic sediment redistribution and impacts on river systems. *Water Resources Research*, 50(3), 2264–2280.
- Chibueze, V. O., et al. (2020). Assessment of heavy metal contamination from artisanal gold mining in alluvial sediments and soils. *Environmental Monitoring and Assessment*.
- Colombia. Decreto 050 de 2018. Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 1076 de 2015 en materia de vertimientos.
- Colombia. Decreto 1076 de 2015. Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Colombia. Decreto 1090 de 2018. Relacionado con el Programa de Uso Eficiente y Ahorro del Agua (PUEAA).
- Colombia. Decreto 4741 de 2005. Prevención y manejo de residuos peligrosos.
- Colombia. Ley 373 de 1997. Por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua.
- Colombia. Ley 685 de 2001. Código de Minas. Diario Oficial.
- Colombia. Ley 2250 de 2022. Por la cual se establece un marco jurídico especial en materia de Legalización y Formalización Minera. Diario Oficial 52.092, 11 de julio de 2022.
- Colombia. Ley 2327 de 2023. Régimen para la identificación y gestión de pasivos ambientales en Colombia.
- Colombia. Resolución 0330 de 2017. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS).

- Colombia. Resolución 631 de 2015. Parámetros y valores límites máximos permisibles en vertimientos puntuales.
- Colombia. Resolución 865 de 2004. Metodología para el cálculo del índice de escasez.
- Colombia. Resolución 1256 de 2021. Por la cual se reglamenta el reúso de las aguas residuales.
- Colombia. Resolución 1362 de 2007. Registro de generadores de RESPEL.
- Colombia. Resolución 1402 de 2018. Metodología general para la elaboración de estudios ambientales.
- COCHILCO. (2024). Consumo de Agua en la Minería del Cobre. Actualización 2024. Santiago de Chile.
- Davies, M. P., & Rice, S. (2001). An alternative to conventional tailings management: Dry stack filtered tailings. *Proceedings of Tailings and Mine Waste '01*.
- Department of Energy (DOE). (2023). *Rainwater Harvesting Systems Technology Review*. U.S. DOE.
- Ellen MacArthur Foundation. (2015). *Towards a circular economy: Business rationale for an accelerated transition*.
- Ellen MacArthur Foundation. (2020). *The Circular Economy: A Wealth of Flows* (2nd ed.). Isle of Wight.
- EPA. (2014). *Reference Guide to Treatment Technologies for Mining-Influenced Water*.
- Evaluation of gold mining sands and gravels as construction aggregates, Méndez, J. A., Ramírez, F. J., & López, A. M. (2022); An integrated framework for evaluating leaching in waste materials, Kosson, D. S. et al. (2002); y las Normas Técnicas Colombianas NTC 1522 (Ensayo Proctor estándar) y NTC 77 (Análisis granulométrico por tamizado) del Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación – ICONTEC, 2011, 2013.
- EY-SNMPE. (2021). *Economía Circular en la Minería: Oportunidades y desafíos*.
- FAO. (2013). *Captación y almacenamiento de agua de lluvia en América Latina y el Caribe*.
- FAO Colombia. (2023). *Con lluvia potabilizada, comunidades de la Amazonía colombiana se proveen de agua*.
- Geological Survey of Finland (GTK). (2024). *Mine closure guidance*.
- Gerson, J. R., & O'Connor, G. A. (2014). Mercury in soils of mining regions: pathways and environmental fate. *Environmental Science & Technology*.
- GISTM. (2020). *Global Industry Standard on Tailings Management*. ICMM, UNEP, PRI.
- González-Valencia, J. E., et al. (2012). Aproximación a la estimación de la Huella Hídrica de la minería del oro en Segovia, Antioquia.
- Grayson, R. (2007). *World Placer Journal* vol. 7, p. 73 Figs. 8-11; p. 75 Fig. 14.
- Grayson, R. (2007). *Fine Gold Recovery — Alternatives to Mercury and Cyanide*. *World Placer Journal*, vol. 7, pp. 127-128.
- Gunson, A. J., et al. (2012). Water use and sustainability in mining. *Journal of Cleaner Production*
- Haggard, E. L., et al. (2015). *Water footprint for a South African platinum mine*. University of the Witwatersrand.
- Hentschel, Priester & Hruschka, (2002). *Global Report on Artisanal and Small-Scale Mining*. IIED/WBCSD.
- ICMM. (2017). *Water Stewardship Position Statement*. Londres.
- ICMM. (2019). *Integrated mine closure: Good practice guide* (2nd ed.). Londres.
- ICMM. (2021). *Water Stewardship Framework*. Londres.
- ICMM. (2023). *Water Stewardship Maturity Framework*. Londres.
- ICONTEC. (2011). *NTC 1522: Ensayo Proctor estándar*.
- ICONTEC. (2013). *NTC 77: Análisis granulométrico por tamizado*.
- ICONTEC. (2020). *GTC 314 – Marco para la implementación de los principios de la economía circular*.
- IDEAM. (2020). *Atlas Interactivo Climatológico de Colombia*.
- IMTA. (2024). *Plataforma Agua y Minería – Huella Hídrica*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Intergovernmental Forum on Mining (IGF). (2017). *Global trends in artisanal and small-scale mining (ASM)*.
- Intergovernmental Forum on Mining (IGF). (2025). *Best practices for responsible ASM gold supply chains*.
- *International Journal of Coal Science & Technology* (2022) 9:32 <https://doi.org/10.1007/s40789-022-00502-3> pag. 5.
- International Network for Acid Prevention (INAP). (2009). *Global acid rock drainage guide (GARDGuide)*.
- Instituto Tecnológico Geominero de España. (1989). *Manual de Restauración de Terrenos y Evaluación de Impactos Ambientales en Minería*.
- Jewell, R. J., & Fourie, A. B. (2006). *Paste and thickened tailings*. Australian Centre for Geomechanics.
- Julca, J. (2023). *Economía Circular en la Minería: Marco conceptual y aplicaciones*.

- Kerguelen Bendeck, J. L. (2016). Caracterización y Aprovechamiento de Recursos Minerales en Colas de Terrazas Aluviales del Distrito Bagre-Nechí [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Facultad de Minas, Medellín, Colombia.
- Kondolf, G. M., et al. (2002). Geomorphic and environmental effects of instream gravel mining. *Landscape and Urban Planning*.
- Kosson, D. S., et al. (2002). An integrated framework for evaluating leaching in waste materials. *Environmental Engineering Science*, 19(3).
- Kurşunoglu, S. (2025). A review on the recovery of critical metals from mine and mineral processing tailings: Recent advances. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 11, 2023–2050. <https://doi.org/10.1007/s40831-025-01126-y>.
- Li, X., et al. (2014). Mixed-integer programming model for optimal waste rock dump design. *SME Annual Meeting*.
- Lottermoser, B. G. (2010). *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts*. Springer.
- Marcello M. V., Aaron J. G. (2020, 18 de noviembre). Gravity Concentration in Artisanal Gold Mining. <https://www.mdpi.com/2075-163X/10/11/1026>.
- Marrugo Negrete, J., et al. (2017). Removal of mercury from gold mine effluents using *Limnocharis flava*. *Chemosphere*, 167.
- Marrugo Negrete, J. L., Paternina Uribe, R. de J., & Navarro Frómata, A. (Eds.). (2024). Alternativas basadas en la naturaleza para la recuperación de ecosistemas degradados por minería aurífera bajo un enfoque de economía circular. Editorial Navegante. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14826208>
- Matebese, F., et al. (2024). Mining wastewater treatment technologies and resource recovery techniques: A review. *Heliyon*, 10(3).
- Mathioudakis et al., (2023). Mathioudakis, S., Xiroudakis, G., Petrakis, E., & Manoutsoglou, E. (2023). Alluvial Gold Mining Technologies from Ancient Times to the Present. *Mining*, 3(4), 618–644. <https://doi.org/10.3390/mining3040034>
- MEND. (2004). Design, construction and performance monitoring of cover systems for waste rock and tailings.
- Méndez, J. A., et al. (2022). Evaluation of gold mining sands and gravels as construction aggregates. *Construction and Building Materials*, 314.
- Metso. (2024). Tailings filtration and water recovery solutions. Metso Corporation.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) & DNP. (2019). Estrategia Nacional de Economía Circular.
- Ministerio de Desarrollo Económico. (2000). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2000).
- Ministerio de Energía y Minas del Perú (MINEM). (2005). Guía ambiental para el manejo de relaves mineros.
- Ministerio de Minas y Energía & Universidad de Córdoba. (2021). Propuesta de lineamientos técnicos de buenas prácticas de economía circular para la minería del oro.
- Ministerio de Minas y Energía & ATG Ltda. (2022). Lineamientos Técnicos de Buenas Prácticas de Economía Circular para la Actividad Minera.
- Mudd, G. M. (2008). Sustainability reporting and water resources. *Environmental Management*.
- Mudder, T. I., et al. (2001). *Chemistry and Treatment of Cyanidation Wastes* (2nd ed.). Mining Journal Books.
- Nordstrom, D.K. & Alpers, C.N. (1999). Geochemistry of acid mine waters. En *Reviews in Economic Geology* 6A, 133-160.
- Northey, S. A., et al. (2016). Water use in mining. *Journal of Cleaner Production*.
- Ochoa Correa, L.I. (2022). Tesis MSc UNAL, pp. 75, 107, 112, 139-140.
- O'Kane, M., & Wels, C. (2003). Mine waste cover system design. *Proceedings of ICARD*, Cairns.
- OPS. (2004). Guía de diseño para captación del agua de lluvia. Organización Panamericana de la Salud.
- Pardavé, W., & Delvasto, P. (2017). Evaluación de la huella hídrica en la mina Reina de Oro, Vetás (Santander). UIS.
- Pat-Espadas, A. M., et al. (2018). Review of Constructed Wetlands for Acid Mine Drainage Treatment. *Water*, 10(11).
- Peragallo, N., & Martínez, P. (2023). Uso de relaves como relleno de labores subterráneas. *Revista de Minería y Geología*, 39(2).

- PlanetGOLD (2022). Best practices for water management in artisanal and small-scale gold mining. United Nations Environment Programme / GEF. <https://www.planetgold.org/>
- Poling y Hamilton, 1986 Poling, G.W.; Hamilton, J.F. Fine Gold Recovery of Selected Sluicelike Configuration; University of British Columbia. Report of Program 3, Placer Mining; The University of British Columbia: Vancouver, BC, Canada, 1986; p. 85. Available online: https://www.hecklerfabrication.com/files/fine_gold_recovery_sluicelikeboxes__Poling.pdf
- Portal Minero Chile. (2020). Consumo de agua en procesos mineros. [Fuente web].
- Price, W. A. (2009). Prediction manual for drainage chemistry from sulphidic materials. MEND Report 1.20.1.
- Ráez, E. (2018). Gestión del agua en minería: Desafíos y oportunidades para la sostenibilidad.
- Rötting, T. S., et al. (2008). Improved passive treatment of high-strength acid mine drainage. *Environmental Science & Technology*, 42(24).
- Servicio Geológico Colombiano [SGC]. (2019). Protocolo para manejo de relaves mercuriales. Nariño.
- Skousen, J., et al. (2017). Review of passive systems for acid mine drainage treatment. *Mine Water and the Environment*, 36(1).
- Society for Ecological Restoration (2019). International Principles and Standards for the Practice of Ecological Restoration, 2nd ed. *Restoration Ecology* 27(S1), S1-S46.
- Sobek, A. A., et al. (1978). Field and laboratory methods applicable to overburdens and minesoils. U.S. EPA.
- Teschner et al. (2017). *Minerals Engineering* 105, 44-51.
- Tremblay, G.A. & Hogan, C.M. (Eds.) (2001). MEND Manual. Volumes 1-6. Mining Environment Neutral Drainage Program.
- UICN. (2016). Defining nature-based solutions. UICN.
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2019). Global mercury assessment 2018. UNEP.
- Universidad de Córdoba. (2025). Estado del Arte de las Mejores Técnicas Disponibles y Alternativas de Economía Circular para la Pequeña Minería Aurífera.
- UPME (2007), Producción Más Limpia en la Minería del Oro en Colombia, p. 13.
- UPME. (2015). Guía de orientación para el manejo de vertimientos en minería de metales preciosos y carbón.
- UPME. (2024). Plan Nacional de Desarrollo Minero 2024–2035. UPME.
- U.S. Environmental Protection Agency (2007). Method 1313: Liquid-Solid Partitioning. SW-846.
- Veiga, M. M., & Gunson, A. J. (2020). Gravity Concentration in Artisanal Gold Mining. *Minerals*, 10(11), 1026. <https://doi.org/10.3390/min10111026>
- Vekua, N., et al. (2023). Gravity concentration techniques for fine gold recovery: A review of sustainable practices.
- Villegas, C., et al. (2015). Artisanal and Small-scale Gold Mining in Colombia.
- Vymazal, J. (2014). Constructed wetlands for treatment of mining wastewater. *Ecological Engineering*.
- Von der Heyden, C. J., & New, M. G. (2010). Sediment dynamics and environmental contamination in gold-mining areas. *Journal of Soils and Sediments*.
- WEF (World Economic Forum). (2015). Mining & Metals in a Sustainable World 2050.
- Wills, B. A., & Finch, J. (2016). *Wills' Mineral Processing Technology*, 8th ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2016; p. 498.
- Williams, D. J., et al. (2006). Kidston waste rock dump design and performance. *Proceedings of ICARD*, St. Louis.
- World Bank. (2020). Climate-Smart Mining: Minerals for Climate Action. Washington, D.C.
- Younger, P. L., Banwart, S. A., & Hedin, R. S. (2002). *Mine Water: Hydrology, Pollution, Remediation*. Springer.

GUÍA DE ECONOMÍA CIRCULAR PARA LAS ETAPAS MINERAS

DE ORO ALUVIAL



Energía



"VIGILADA MINEEDUCACIÓN"

