AGENCIA NACIONAL DE MINERÍA

Guía de buenas prácticas para la

Exploración y estimación de recursos y reservas de

MATERIALES DE ARRASTRE

ASOGRAVAS

CCRR® Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales

R R Recursos y Reservas Mineras

MaPriC Materias primas y clima

Implementado por

giz Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Por encargo de:

Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear

de la República Federal de Alemania

Agencia Nacional de Minería

Juan Miguel Durán
Presidente

Gustavo Adolfo Raad
Vicepresidente de Seguimiento, Control y Seguridad Minera

Germán Barco López
Vicepresidente de Promoción y Fomento

Alba Mery Bustamante
Equipo de Recursos y Reservas - RyR

Comisión Colombiana de Recursos y Reservas (CCRR)

Wilfredo López
Presidente

Asociación Colombiana de Productores de Agregados Pétreos (Asogravas)

Carlos Fernando Forero
Presidente

Deutsche Gesellschaft für Internationate Zusammenarbeit (GIZ)

Sergio Ruiz
Coordinador programa de materias primas y clima

Patricia Dávila Pinzón
Asesora en políticas públicas. Programa de materias primas y clima

Autores
María Victoria Vélez Otálvaro
Alexander Mora Bayter
Bonny Alejandro Pacheco Cohecha
Fabio Mauricio Pinzón Jiménez

Aportes técnicos
John Jairo Guerrero Baez
Cristina Dávila Bolívar
Sergio Escudero
César Mauricio Vega
Daniel García Ávila
Diego Felipe Gómez Gutiérrez
Equipo de Recursos y Reservas RyR

Diagramación y diseño
GIZ-Puntoaparte
Oficina de Comunicaciones ANM

Bogotá, octubre de 2021

ASOGRAVAS · CCRR® Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales · RyR Recursos y Reservas Mineras · MaPriC Materias primas y clima · Implementado por giz Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH · Por encargo de: Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de la República Federal de Alemania

Juan Miguel Durán Prieto
Presidente Agencia Nacional de Minería

La Guía de Buenas Prácticas para la Exploración y Estimación de Recursos y Reservas de Materiales de Arrastre, es el resultado del trabajo conjunto entre la Agencia Nacional de Minería, como autoridad minera del país, en coordinación con la Comisión Colombiana de Recursos y Reservas -CCRR-, la Asociación Colombiana de Productores de Agregados Pétreos -ASOGRAVAS- y el apoyo del Programa de Materias Primas y Clima de Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit - GIZ.

Este documento es una herramienta que orienta a los profesionales y titulares mineros del sector de materiales de arrastre, para que lleven a cabo operaciones más organizadas, encaminadas a minimizar la incertidumbre y los impactos negativos que pudieran causar sus operaciones.

Los materiales de arrastre son materias primas clave para el desarrollo social y económico de nuestras comunidades, la explotación de estos materiales implica el reto de lograr una sostenibilidad adecuada, encaminada a la conservación y equilibrio de los ecosistemas presentes en las áreas de aprovechamiento, además, que genere un beneficio para las comunidades, el titular minero y que a su vez garantice la disponibilidad de recursos para las generaciones futuras.

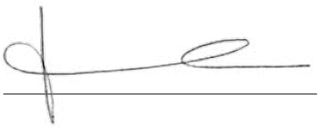
La guía está alineada con los principios de materialidad, transparencia, competitividad e imparcialidad, que rigen el Estándar Colombiano de Recursos y Reservas -ECRR y se ajusta a las características particulares del sector de materiales de arrastre.

Nuestra expectativa es que, a través de la implementación de buenas prácticas en los procesos y actividades de las fases de exploración y estimación de recursos y reservas, se estandarice la información que soporta los proyectos mineros, de manera que sea de utilidad no solo a la autoridad minera y a la institucionalidad del sector minero energético, sino también a la autoridad ambiental, a titulares, inversionistas y a la comunidad en general.

Tener un conocimiento más preciso de la riqueza de estos materiales es clave para continuar contribuyendo con el desarrollo económico del país.

Para la ANM es un privilegio ofrecer este documento, el cual esperamos sea de gran aporte a nuestros mineros en sus labores de exploración y estimación de recursos y reservas. Estamos seguros de que esta herramienta les ayudará y agregará valor a sus proyectos productivos.

Como autoridad minera ratificamos nuestro compromiso de seguir trabajando para transformar la minería en oportunidades, enfocándonos en el desarrollo de una actividad minera responsable, moderna y eficiente.



Ing. Wilfredo Lopez Piedrahita
Presidente CCRR®

Una de las actividades fundamentarles de la Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales (CCRR) es elaborar o contribuir en la elaboración de guías de buenas prácticas para diferentes tipos de materias primas y minerales que son primordiales para el buen desarrollo de los proyectos mineros en el país. El propósito de estas guías es estandarizar las actividades para los estudios técnicos alrededor de estos materiales y minerales, generar confianza en la industria y conocer con más certeza las reservas de mineral que contiene el país, además de atraer capitales tanto nacionales como extranjeros.

La CCRR, en conjunto con la ANM y su equipo de Recursos y Reservas, ha trabajado en este propósito, y esto nos concentra alrededor del lanzamiento de este documento, la **Guía de Buenas Prácticas de Material de Arrastre (GBPMA).**Mientras el Estándar Colombiano de Recursos y Reservas Minerales (ECRR) nos indica qué hacer para implementar buenas prácticas, las GBP nos enseñan cómo hacerlo bien. La minería sobre lechos de ríos y afluentes genera muchos comentarios negativos, y cada día hay más controversia alrededor de esta práctica. Precisamente por esto, la misión de esta guía es mejorar la imagen de las empresas que operan en este sector, fomentando las buenas prácticas y generando confianza entre las comunidades, los grupos de interés y las entidades gubernamentales que controlan estas operaciones.

Teniendo en cuenta lo anterior, la CCRR presenta con orgullo y gran responsabilidad el presente documento de consulta, que contribuirá a mejorar y optimizar el proceso extractivo de este tipo de materiales en títulos mineros de una forma sostenible. La guía es un documento dinámico, que se puede actualizar con el tiempo para adaptarse a las circunstancias propias de cada época. Buscamos con esto tener un buen nivel de aceptación de las operaciones mineras de material de arrastre, que se desarrollan en estos ambientes tan frágiles.

Este proyecto fue liderado por la ANM desde el equipo de Recursos y Reservas, a la cabeza de la Ingeniera Geóloga Alba Mery Bustamante, y contó con el apoyo de Asogravas; del proyecto Materias Primas y Clima, de la Cooperación Alemana GIZ; y de la CCRR, que tuvo el apoyo del ingeniero Sergio Escudero. A todos ellos se les agradece este enorme y valioso esfuerzo en pro del sector minero colombiano.

Ing. Carlos Fernando Forero
Director General ASOGRAVAS

La importancia en la vida cotidiana de los materiales de construcción es una realidad indiscutible, solo basta con mirar a nuestro alrededor para descubrir que nos rodean estructuras de concreto y morteros en casas, edificios, hospitales, colegios, puentes; en mobiliario urbano, adoquines, fachadas, andenes, asfalto; en las calles, bases y subbases, y también en los balastos para las vías férreas.En Colombia se explotan materiales de construcción provenientes de canteras, graveras y del arrastre de los ríos. Para este último, se requiere la adopción no solo de las mejores prácticas de extracción, sino también de unos principios orientadores que le permitan a los titulares mineros y a las autoridades respectivas poder tener certeza de que la actividad se lleve a cabo con el menor impacto ambiental. Además, manteniendo las características hidráulicas y la preservación de la riqueza ecológica que tiene el cuerpo de agua.Para esto, hemos venido trabajando de la mano de la **Agencia Nacional de Minería,** de la **Comisión Colombiana de Recursos y Reservas** y del **Proyecto de Materias Primas y Clima de Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit – GIZ**. Con un equipo de expertos en todas las ramas de la ingeniería y las ciencias naturales, podemos presentar la Guía de Buenas Prácticas Para la Explotación y Estimación de Recursos y Reservas de Material de Arrastre, que beneficia a la industria; las autoridades mineras, ambientales y locales; la academia; e incluso a las comunidades circundantes. Con esta se garantiza no solo el abastecimiento de los insumos necesarios para la construcción, sino también el cumplimiento de normas y estándares. Igualmente, lo anterior agrega valor para que los ríos puedan tener el comportamiento y manejo adecuado durante los periodos invernales, con la implementación de mecanismos que prevengan y mitiguen el riesgo por desbordamiento que naturalmente tienen la mayoría de nuestros cuerpos de agua.Finalmente, es necesario destacar que, bajo los principios de adaptación y mitigación al cambio climático, recomendamos consultar y aplicar el conocimiento aquí consignado para que Colombia pueda prevenir, mitigar, corregir y compensar los impactos asociados a los fenómenos (tanto de El Niño como de La Niña) que inciden de forma sustancial en nuestros territorios.

Dr. Sergio Antonio Ruiz
Coordinador GIZ del Proyecto Materias Primas y Clima -MaPriC-

Para una economia colombiana en franco proceso de transición hacia el desarrollo, la extracción de materias primas se convierte en un pilar fundamente de su estrategia de diversificacion economica. En este contexto, los materiales de arrastre además de ser importantes insumos para el desarrollo de la construcción de infraestructura y de espacios urbanos podrian garantizar el crecimiento de otros sectores productivos como el de la industria quimica y la metalurgia.

Con el apoyo del Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear (BMU) de la República Federal de Alemania, la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH viene ejecutando en Colombia el Proyecto “Materias Primas y Clima” (MaPriC) desde el año 2019. Bajo el liderazgo del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MinAmbiente) y el Ministerio de Minas y Energía (Minenergía), MaPriC tiene como objetivo el desarrollar y mejorar instrumentos de política medioambiental para promover la extracción de materias primas con bajas emisiones y uso eficiente de los recursos.

Desde sus inicios, los encargados de llevar adelante MaPriC han priorizado la cooperacion y el apoyo técnico al subsector de agregados petreos, no solo por el sector con el mayor número de titulos de explotacion minera en el pais, si no tambien por ser un segmento extractivo que requeriere ajustar sus normativas ambientales a mejores y más modernos estandares internacionales.

Los contenidos de las “Guía de Buenas Prácticas para la Explotación y Estimación de Recursos y Reservas de Material de Arrastre” aquí presentadas se convierten en herramientas poderosas para el abastecimiento sostenible de los materiales de construccion en Colombia, cuya implementación no solo beneficiara el desarrollo de la industria minera en el territorio, sino tambien permitira un mejor control por parte de las autoridades nacionales, locales y sectoriales.

Como equipo GIZ queremos enaltecer el compromiso, esfuerzo y la participación activa de la Agencia Nacional de Mineria, de la Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales (CCRR®) y de la Asociacion Asociación Colombiana de Productores de Agregados Pétreos (ASOGRAVAS).

Contenido

1 Normatividad vigente 11

2 Contexto de la industria de agregados pétreos en colombia 14

2.1 Tendencias futuras, producción y títulos 16

3 Instrumentos de planificación 18

3.1 Planeación de un proyecto minero 20

3.2 Instrumentos de planeación ambiental 23

4 Exploración 24

4.1 Compilación y análisis de la información secundaria 25

4.2 Estudios geológicos 27

4.3 Estudios geomorfológicos 32

4.4 Estudios hidrológicos 34

4.5 Estudios de hidráulica fluvial 46

4.6 Análisis hidráulico y de sedimentos 48

4.7 Técnicas de muestreo 52

4.8 Número y tamaño de las muestras 57

4.9 Cadena de custodia 59

4.10 Análisis de laboratorio 60

4.11 Aseguramiento y control de calidad (qa/qc) 62

4.12 Bases de datos 63

4.13 Almacenamiento de la información 65

4.14 Seguridad de la información 66

4.15 Densidad de la información 67

5 Estimación de recursos minerales 68

5.1 Modelo geológico 70

5.2 Técnicas de estimación 71

5.3 Categorización de recursos minerales 74

6 Factores modificadores 77

6.1 Factores técnicos 79

6.2 Factores ambientales 90

6.3 Factores sociales 91

6.4 Factores de Infraestructura 93

6.5 Factores jurídicos 94

6.6 Factores económicos 95

7 Estimación de reservas 100

7.1 Preparación 102

7.2 Categorización 102

7.3 Verificación de entradas 102

7.4 Practicidad de la minería 102

7.5 Evaluación de riesgos del proyecto 103

7.6 Revisiones hechas por pares 103

7.8 Auditorías 103

7.9 Documentación 104

7.10 Declaraciones de Reserva Mineral 105

7.11 Discusión de la confianza relativa 105

8 Preparación de reportes 106

8.1 Objetivo del reporte 109

8.2 Descripción del proyecto 109

8.3 Localización 110

8.4 Salidas gráficas 110

Introducción

La Guía de Buenas Prácticas para la Exploración y Estimación de Recursos y Reservas de Materiales de Arrastre (GBPMA) es un compilado de recomendaciones que están encaminadas a garantizar la calidad de las actividades y de los datos obtenidos en las fases exploratorias y de estimación de recursos y reservas de materiales de arrastre. Este documento es un complemento al Estándar Colombiano de Recursos y Reservas (ECRR), el cual indica qué debe contener un reporte público o documento técnico de recursos y reservas para depósitos minerales en general. La GBPMA contiene, de acuerdo con las particularidades propias de los depósitos de materiales de arrastre, las buenas prácticas que se sugiere aplicar en cada fase de trabajo y actividad para caracterizar el depósito y estimar adecuadamente los recursos y reservas.

El concepto de "buena práctica" que se tuvo en cuenta para la elaboración de la presente guía se basa en la siguiente definición:

Una buena práctica no es tan sólo una práctica que se define buena en sí misma, sino que es una práctica que se ha demostrado que funciona bien y produce buenos resultados, y, por lo tanto, se recomienda como modelo. Se trata de una experiencia exitosa, que ha sido probada y validada, en un sentido amplio, que se ha repetido y que merece ser compartida con el fin de ser adoptada por el mayor número posible de personas. (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2015).

De acuerdo con el Glosario Técnico Minero (Resolución 40599 de 2015), los materiales de arrastre hacen parte del caudal sólido, y son los materiales pétreos desintegrados en tamaños de gravas y arenas que yacen en el cauce y las orillas de las corrientes de agua, vegas o llanuras de inundación. En la presente GBPMA, esta es la definición que se tiene en cuenta para abordar los diferentes componentes de las actividades de exploración y estimación de recursos y reservas.

El objetivo específico de la GBPMA es asistir a los profesionales del sector minero y a los titulares mineros en las fases de trabajo requeridas para la exploración y estimación de recursos y reservas de materiales de arrastre, con enfoque en un trabajo de alta calidad y confianza. La implementación de buenas prácticas permite comprender el valor de los datos que se generan durante las operaciones mineras y contribuye en la disminución de la incertidumbre inherente a los depósitos aluviales. Esto permite optimizar la vida útil de los yacimientos y lograr una explotación sostenible (social, ambiental y económicamente) de las reservas minerales.

Los capítulos que conforman la GBPMA se presentan de acuerdo con el orden secuencial, por fases de trabajo, que normalmente se desarrolla en un proyecto minero. Para cada tema tratado se incluye una descripción de su relevancia para la caracterización del proyecto y un listado de recomendaciones que se deben tener en cuenta para su desarrollo, así como fuentes de información adicional para ampliar dicho tema.

Actualmente, el reto del sector de la construcción en Colombia es pasar de una explotación tradicional (minería artesanal o minería de subsistencia) a una explotación industrializada (minería formal bien hecha) que garantice el aprovechamiento casi permanente, de acuerdo al periodo climático, la tipología (con base en las configuraciones posibles de extracción) y las diferencias de comportamiento de acuerdo al tipo de cauce: alta montaña, meándrico, trenzado y deltaico (Unidad de Planeación Minero Energética [UPME] & Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia [UPTC], 2015).

En este sentido, la GBPMA es una herramienta de consulta para los profesionales del sector que deben asumir este reto. Sin embargo, las recomendaciones y pautas contenidas en este documento son sugerencias, el profesional líder debe considerar su propio criterio para decidir si su aplicación es adecuada para el proyecto minero. Las buenas prácticas resumidas en este documento no pretenden inhibir el pensamiento creativo ni evitar la aplicación de nuevos criterios, que puedan convertirse en componentes fundamentales en programas exitosos de exploración minera (modificado de CIM Mineral Resource & Mineral Reserve Committee, 2018).

Finalmente, la expectativa de las entidades y autores de la GBPMA es que los líderes de proyectos de materiales de arrastre seleccionen el conjunto de buenas prácticas que más convenga a sus actividades —y que puedan ser adaptadas al contexto específico en el que se desarrolla su proyecto— para que a partir de él puedan construir relaciones positivas con las comunidades, reducir los impactos ambientales mediante una planificación y aplicación de protocolos adecuados, disminuir la incertidumbre de su proyecto y lograr una operación exitosa que beneficie tanto a la empresa como a las comunidades cercanas.

1

Normatividad vigente

Conocer la normatividad que aplica a cualquier proyecto minero y cumplir a cabalidad con los requisitos de ley es **parte fundamental del éxito del proyecto.**

El sector minero se rige por una normatividad que está compuesta por un conjunto de leyes, decretos y resoluciones que lo regulan en aspectos fundamentales, como la titulación o concesión de áreas o títulos (régimen contractual), el cumplimiento de los requisitos para la ejecución de la producción, la fiscalización de la producción, la liquidación y recaudo de regalías y compensaciones, la distribución y transferencia de los ingresos, la inversión social y la responsabilidad y manejo ambiental, entre otros.

La normativa minera está enfocada en diseñar una política que integre de manera armónica el aprovechamiento del potencial minero del país, sustentado en una planeación escalonada de largo plazo. La viabilidad de la actividad minera requiere un marco claro de reglas para la inversión responsable, que establezca los deberes y los derechos de las empresas y los grupos de interés; esto es, de los accionistas, proveedores, clientes, trabajadores y la comunidad.

Conocer la normatividad que aplica a cualquier proyecto minero y cumplir a cabalidad con los requisitos de ley es parte fundamental del éxito de un proyecto. Por esto, se recomienda a los titulares estar siempre actualizados respecto a la normatividad vigente. En la Tabla 1 se resumen algunas leyes, decretos y resoluciones que deben considerarse en las diferentes fases que conforman un proyecto minero.

Tabla 1. Compilación de la normatividad minera vigente. Fuente: varios.

Normativa	Resumen
Decreto 2462 de 1989, Artículo 3	Señala la exigibilidad del título minero para la explotación de materiales de arrastre.
Constitución Política de Colombia, Artículo 332	Señala que todo yacimiento mineral que se halle en el territorio Nacional, es propiedad inalienable e imprescriptible del Estado.
Decreto 2222 de 1993	Seguridad e Higiene Industrial en la minería a cielo abierto.
Ley 141 de 1994, artículo 13	Ley de regalías, mediante la cual el Estado percibe contraprestación del minero por la explotación de los recursos naturales no renovables.
Resolución 18-1847 de 2001	Adopta el formulario para la legalización de explotaciones mineras sin título inscrito en el Registro Minero Nacional.
Ley 685 de 2001, actual Código de Minas	Tiene como objetivos fomentar la exploración técnica y la explotación de los recursos mineros de propiedad estatal y privada; estimular estas actividades en orden a satisfacer los requerimientos de la demanda interna y externa de los mismos y a que su aprovechamiento se realice en forma armónica con los principios y normas de explotación racional de los recursos naturales no renovables y del ambiente, dentro de un concepto integral de desarrollo sostenible y del fortalecimiento económico y social del país
Decreto 2390 de 2002	Reglamenta el artículo 165 del código de Minas sobre legalización de explotaciones mineras sin título.
Ley 756 de 2002	Determinó que las regalías por la explotación de los recursos naturales no renovables de propiedad del Estado, se calculan sobre el valor de la explotación en boca o borde de mima o pozo, según corresponda.
Decreto 2191 de 2003	Glosario Técnico Minero, señala a los Materiales de construcción en los mismos términos que el Código de Minas y dentro de su definición incluye los materiales de arrastre.
Acuerdo 29 de 2008	Establece normas de carácter ambiental para la explotación de materiales de arrastre en la jurisdicción de la CAR.
La Ley 1333 de 2009	Regula el procedimiento sancionatorio ambiental
Decreto 4134 de 2011	Se crea la Agencia Nacional de Minería como administradora de los recursos mineros.
El Decreto 933 de 2013	Regula la formalización de la minería tradicional.
Resolución 143 del 29 de marzo de 2017	Adopta los términos de referencia y acoge las guías minero – ambientales junto con sus anexos, con el fin de que se cumplan los objetivos señalados en los artículos 80, 81 y 84 del C.M. y lo dispuesto por la honorable Corte Constitucional en sentencia C-389 de 2016 estableciendo los mínimos de idoneidad laboral y ambiental
Resolución 299 de junio de 2018	Modifica la resolución 143 del 29 de marzo de 2017, en el sentido de incluir el reporte de recursos y reservas bajo loes estándares CRIRSCO.
Resolución 100 de marzo de 2020	Establece la periodicidad y condiciones para la presentación de la información sobre los recursos y reservas minerales existentes en el área concesionada

2

Contexto de la industria de agregados pétreos en Colombia

...se estima que **entre 32 y 50 mil millones de toneladas** de agregado (arena y grava) se extraen globalmente cada año (Steinberger et al., 2010)

Los agregados pétreos, entre ellos los materiales de arrastre, son considerados como la principal fuente de materia prima para la industria de la construcción, aunque también tienen diversas aplicaciones en los sectores de metalurgia, de industria química y de alimentos; su uso en un sector u otro depende de su composición y características físicas. Los mayores consumidores de materiales de arrastre son la industria de la construcción y la industria química. En la primera se utilizan principalmente para la elaboración de concreto y como afirmado de las diferentes capas que conforman las vías, y en la segunda, para la fabricación de vidrio y otros productos.

En un resumen compilado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) (2014), se estima que entre 32 y 50 mil millones de toneladas de agregado (arena y grava) se extraen globalmente cada año (*Steinberger et al.,* 2010). Según el informe de arena y sostenibilidad presentado por la ONU en Ginebra en el año 2019, el consumo anual de materiales de arrastre equivale al doble de la cantidad anual de sedimentos arrastrados por todos los ríos del mundo. Esta situación da cuenta del alto consumo de este tipo de recursos y de la necesidad de procurar su explotación racional.

En el contexto de Colombia, el aumento en la extracción de agregados ha sido en gran parte el resultado de una mayor demanda de los materiales de construcción en las principales ciudades, lo cual ha sido impulsado por la construcción de vías —en especial las de cuarta generación (4G)—, la expansión urbana y las construcciones hidroeléctricas. En el país, las explotaciones de materiales de arrastre predominan en las zonas planas del territorio, dado que la granulometría de mayor demanda se asocia con sistemas de drenajes maduros, como los que se encuentran en los departamentos de Tolima, Casanare, Meta, Arauca, Vichada, Guainía, Amazonas, Putumayo y los de la región Caribe. Sin embargo, la demanda y necesidad de estos materiales ha generado el aprovechamiento en diversos tipos de cauces, relieves y regiones del país (Figura 1). El valor de dichos materiales está influenciado principalmente por la cercanía a los centros de consumo, como zonas urbanas y polos de construcción de infraestructura civil.

La alta demanda de estos materiales y la tendencia al aumento de su consumo generan la necesidad de conocer en mayor detalle los recursos y reservas de materiales de arrastre, con el fin de asegurar la sostenibilidad del negocio a largo plazo y de ejercer un control más eficiente por parte de las autoridades reguladoras a este tipo de proyectos.

2.1

Tendencias futuras, producción y títulos

Según la trayectoria de los datos de extracción de materiales de construcción, es probable que continúe la tendencia creciente en la demanda de agregados en el futuro. A nivel mundial, se prevé que el crecimiento demográfico y la urbanización que ocurran en las próximas décadas requerirá la construcción de más viviendas e infraestructura; construcción que probablemente demandará mayores cantidades de agregados.

Las cifras de producción de arenas y gravas, reportadas por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) (2021), muestran un aumento en el consumo de estos materiales en el periodo 2012-2019 (figura 2A), dicho aumento se vio interrumpido en el año 2020 debido a la emergencia sanitaria causada por el covid-19. En la Figura 2B se muestra la titulación minera en Colombia, con 2780 títulos de materiales de construcción, de los cuales 1013 (37 %) corresponden a material de arrastre; 533 (19 %), a material de arrastre y canteras; y 1234 (44 %) corresponden a canteras (ANM, 2020).

Figura 1. Localización de los títulos de materiales de construcción en Colombia. Fuente: ANM, 2020

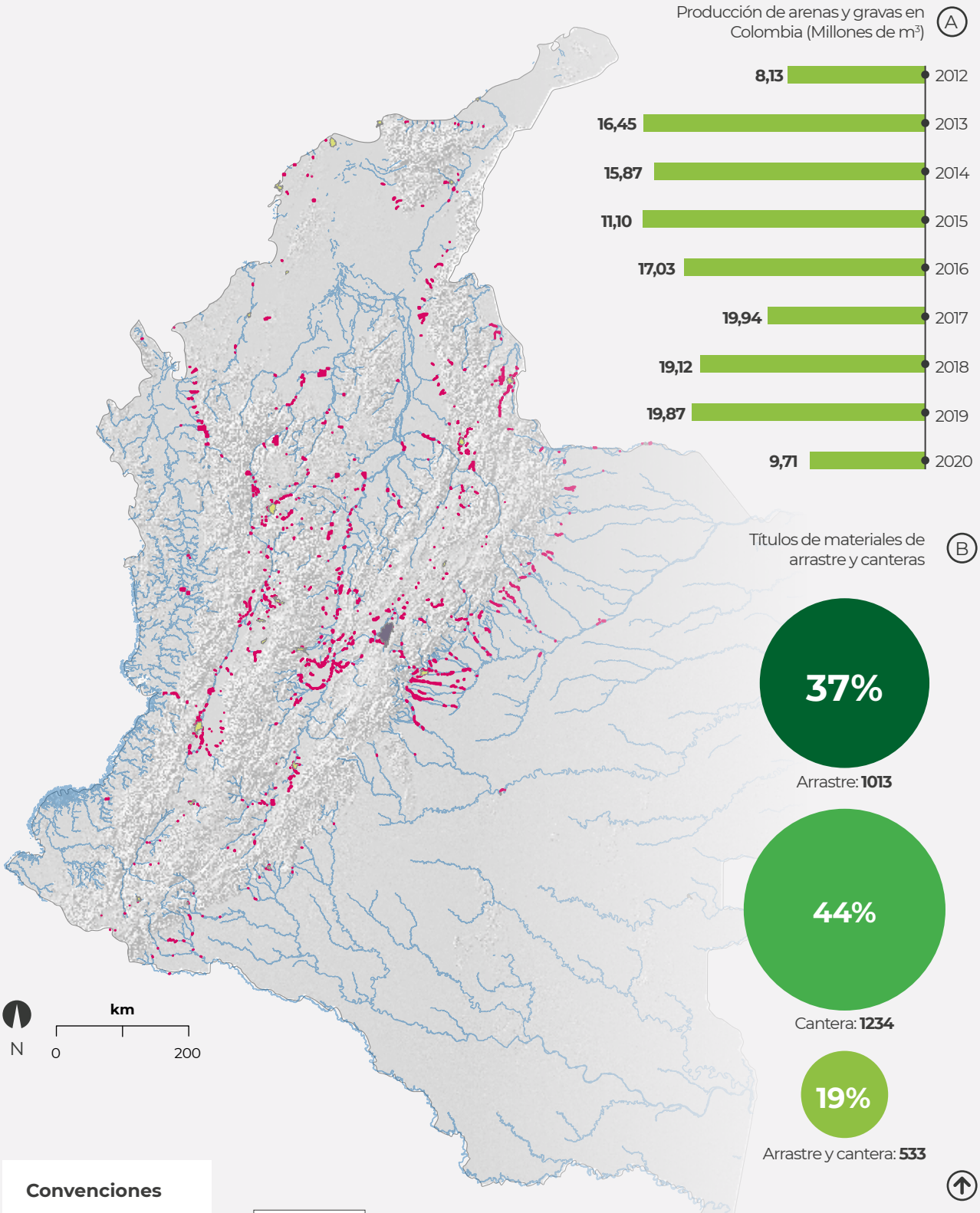


Figura 2. A) Producción de arenas y gravas para el periodo 2012-2020 (Fuente UPME, 2021). B) Títulos de materiales de construcción vigentes en Colombia (Fuente ANM, 2020)

3

Instrumentos de planificación

La planeación de fases de trabajo facilita la organización del proyecto y la toma de decisiones en el momento indicado.

La planeación de un proyecto es un proceso que facilita la adquisición, administración y distribución de los recursos y se basa en el diagnóstico de todas las fases de trabajo, requerimientos técnicos, actores involucrados, horizonte temporal, posibles dificultades y demás variables que puedan intervenir. Con este diagnóstico y con un objetivo claro para el proyecto, se definen las actividades, responsables, recursos y productos a generar en cada fase de trabajo.

Los proyectos mineros, además de todas las variables inherentes a cualquier proyecto, deben considerar factores particulares del sector que aumentan la incertidumbre, tales como: dificultad para determinar la recarga de sedimentos al tramo de interés (que se subsana con adquisición de datos y análisis de modelos hidráulicos), las restricciones normativas para el control del impacto social y ambiental (que se subsana con los programas sociales, los planes de manejo ambiental y la consecución de los permisos requeridos), los ciclos de subida y bajada de los precios (que se subsana con un estudio de mercado y financiero), entre otros. Estas particularidades hacen aún más importante tener una adecuada planeación del proyecto minero que permita disminuir la incertidumbre y prepararse para las eventualidades que puedan ocurrir.

Tanto la planeación, como la ejecución del proyecto requieren de un adecuado liderazgo y del apoyo de un equipo de trabajo capacitado y comprometido. Para el cumplimiento de las actividades y objetivos de la exploración y estimación de recursos y reservas, debe asignarse a un profesional líder encargado de la dirección del proyecto (Persona Competente, Profesional Idóneo) con un perfil adecuado para el cargo, y conformar un equipo de trabajo con personal idóneo para la correcta ejecución de las actividades.

El profesional líder requiere entender los aspectos administrativos, logísticos y de gestión de cada una de las fases de trabajo, además debe conocer y comprender las particularidades inherentes a los depósitos de materiales de arrastre. Como parte de sus responsabilidades, debe identificar y gestionar las necesidades en áreas tales como presupuesto, programación, recursos humanos, gestión de contratistas, políticas de seguridad y salud en el trabajo, transporte y manipulación de mercancías peligrosas, uso de la tierra, derechos de los pueblos indígenas y negritudes y medidas anticorrupción, entre otros. (modificado de CIM, 2018).

La planeación de fases de trabajo facilita la organización del proyecto y la toma de decisiones en el momento indicado. Cada una de las fases requiere de inversiones para el desarrollo de las actividades y el cumplimiento de los objetivos, los cuales deben ser evaluados, junto con los productos generados, al final de cada fase, para tener un balance que permita encaminar las actividades subsecuentes.

3.1

Planeación de un proyecto minero

Un proyecto cuyo objetivo final sea el aprovechamiento económico de recursos naturales no renovables, tales como los materiales de arrastre, debe planearse ordenadamente en fases de trabajo diseñadas para disminuir la incertidumbre y el riesgo y para garantizar el menor impacto posible al medio ambiente y el mayor beneficio a los inversionistas, empleados y comunidades.

Los materiales de arrastre son un caso especial dentro de los recursos naturales no renovables, ya que éstos se ubican en cauces activos y orillas de las corrientes, los cuales constituyen ambientes particularmente sensibles en términos ambientales y sociales. A diferencia de otros yacimientos, la disponibilidad de material es dinámica ya que depende de factores climáticos, fisiográficos e hidrográficos que pueden tener alguna aleatoriedad. Además, este tipo de proyectos requieren una ubicación estratégica respecto a los centros de consumo, pues este factor es uno de los más determinantes en términos de rentabilidad.

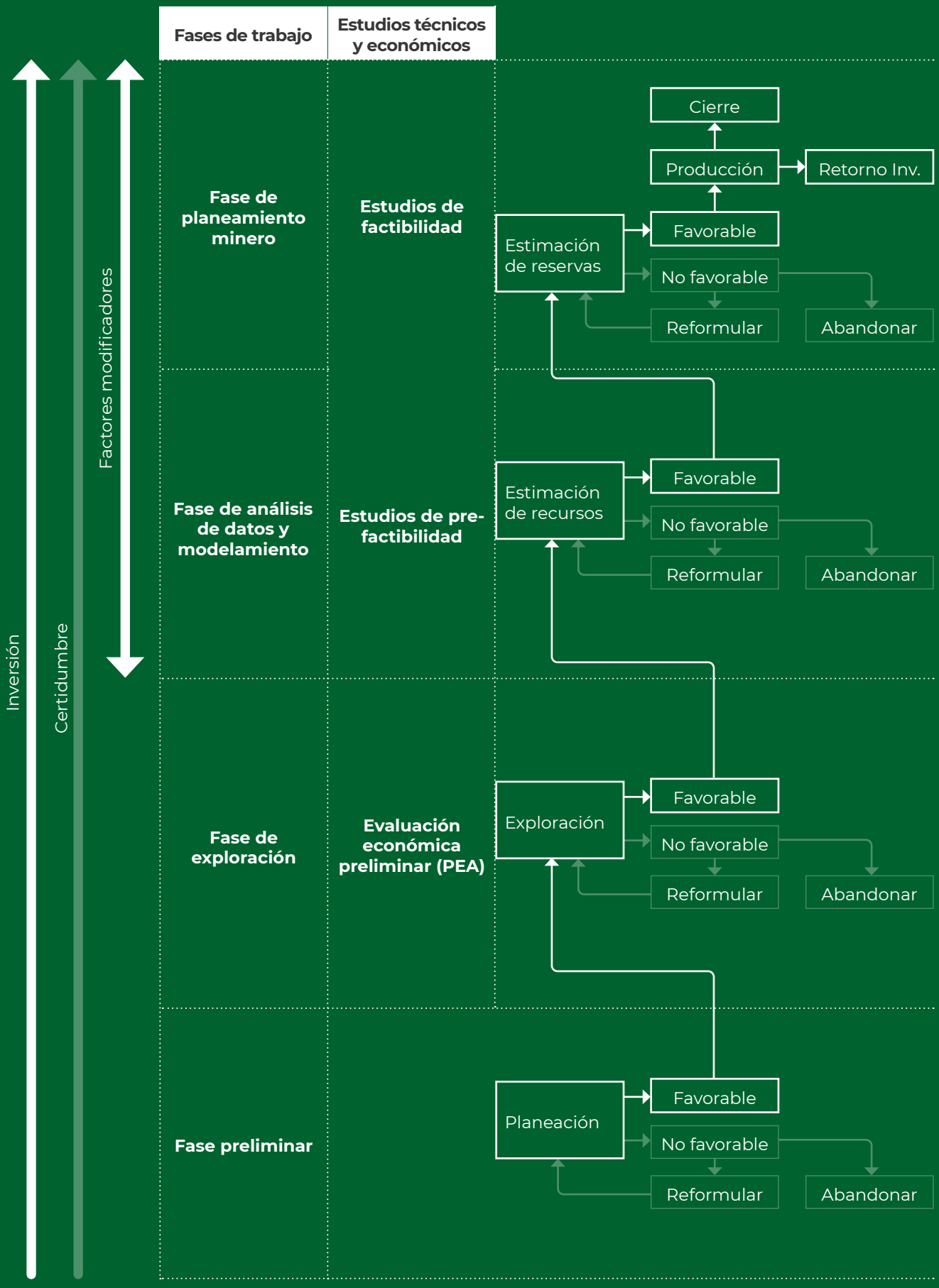
Las circunstancias anteriores refuerzan la necesidad de un adecuado planeamiento para este tipo de proyectos mineros. Si bien las particularidades deben ser analizadas en cada caso, algunas fases son comunes y sirven de base para todos los proyectos de explotación de materiales de arrastre.

En la Figura 3 se presenta una propuesta de fases de trabajo para este tipo de depósitos, éstas se organizan de manera que la inversión va aumentando a medida que se avanza en cada fase, pero la incertidumbre disminuye con los datos adquiridos a partir de las actividades desarrolladas. Si bien las inversiones son permanentes a lo largo de todo el proyecto, las primeras fases implican mayores inversiones ya que aún no hay una producción que sustente dichas inversiones; sin embargo, una vez iniciada la producción, es probable que el retorno de la inversión garantice los recursos necesarios para continuar con el proyecto.

Se recomienda realizar un balance de los resultados al final de cada fase, para tomar la decisión de continuar con la fase subsecuente, en caso de que los resultados sean satisfactorios; replantear las actividades y procedimientos, en caso de que haya duda respecto a los resultados o procedimientos, o abandonar la siguiente fase cuando los resultados no son satisfactorios. Este análisis ayuda a reducir la incertidumbre y riesgos asociados al proyecto y facilita la optimización de la inversión.

La planeación debe incluir una fase preliminar para el análisis de las condiciones iniciales del proyecto, una fase de exploración, de estimación de recursos y otra de estimación de reservas, la cual incluye un análisis razonable de la rentabilidad y las ganancias, la escala óptima de inversión, la selección adecuada de las fuentes de financiación, la identificación de las fortalezas y debilidades del proyecto, el diseño de una estrategia que aproveche las oportunidades y reduzca las amenazas que enfrentan este tipo de proyectos; así como los requerimientos para la operación minera. Una vez surtidas dichas fases se ejecuta la producción y el plan de cierre y abandono cuando se han agotado las reservas.

Figura 3. Fases de trabajo comunes en los proyectos mineros

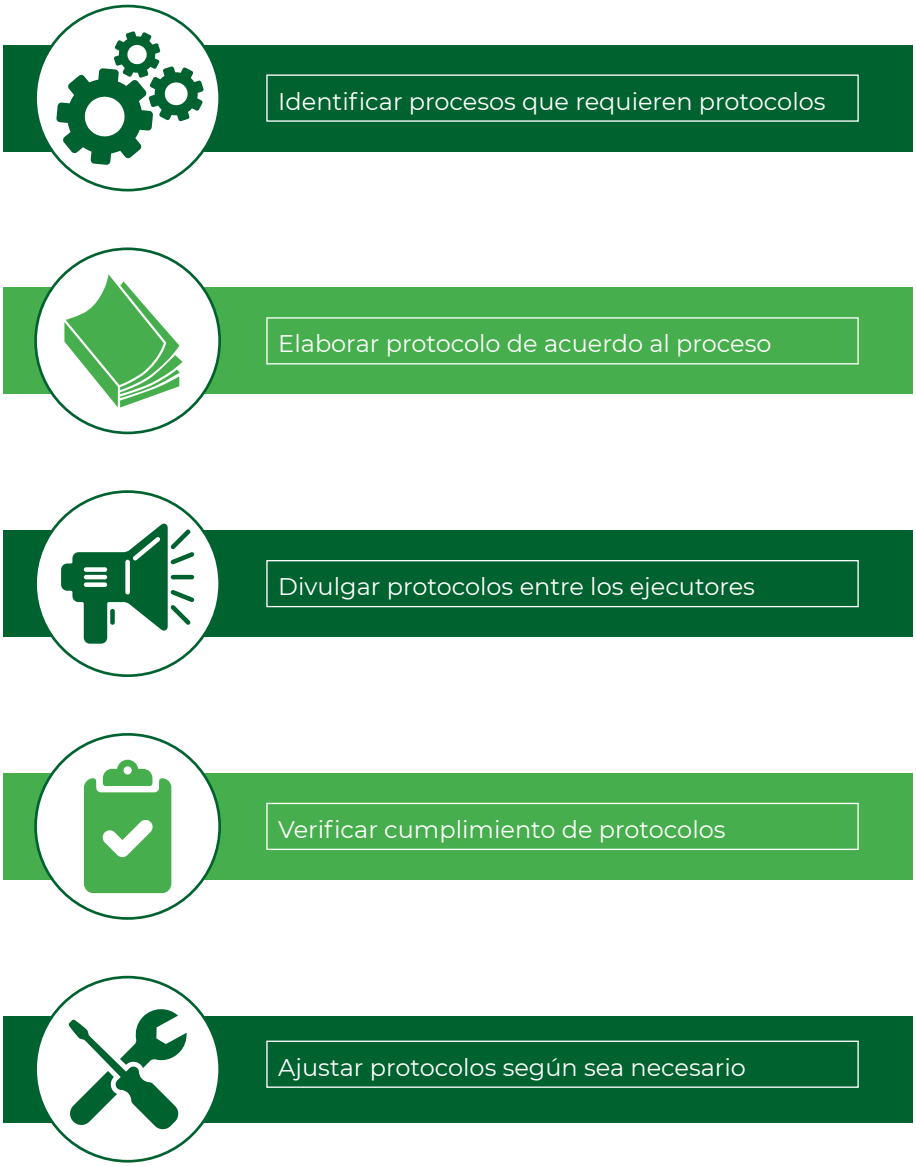


Algunas actividades son transversales a todas las fases de trabajo. El planeamiento del proyecto incluye la elaboración de protocolos para las diferentes actividades a ejecutar, tales como levantamiento de información en campo, muestreos, administración de bases de datos, respaldo de la información, disposición de muestras y control de calidad en la producción, entre otros. Los protocolos se elaboran de acuerdo con la actividad a realizar y se divulgan entre los interesados. Se requiere siempre verificar su cumplimiento y ajustarlos o modificarlos según sea necesario (figura 4).

Las medidas de Aseguramiento y Control de la Calidad (QA/QC, por sus siglas en inglés) se plantean desde la planificación, pero se ajustan a medida que se van ejecutando las actividades para lograr mejores resultados y generar confianza en los datos.

En todas las fases de trabajo es importante contar con un estricto almacenamiento de datos y documentos que funcione como respaldo del proyecto y facilite los análisis.

Figura 4. Síntesis de los pasos que siguen los protocolos para tener calidad en un proceso.
Fuente: autores



3.2

Instrumentos de planeación ambiental

Para garantizar un adecuado manejo ambiental del proyecto, es necesario conocer las políticas de protección, manejo sostenible y preservación de los recursos naturales renovables establecidas por la Autoridad Ambiental que rigen el área de interés. Las restricciones, obligaciones y determinantes ambientales deben ser verificadas por los titulares mineros con el fin de determinar si existen limitantes para el desarrollo del proyecto.

Las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR), las Autoridades Ambientales Urbanas y, en general, las entidades responsables de la gestión del ambiente y de los recursos naturales renovables han puesto a disposición del público documentos guía para el cumplimiento de los requisitos exigidos por la Autoridad Ambiental, al igual que plataformas de consulta que ayudan a identificar las restricciones en materia ambiental que rigen en los territorios.

Algunos de los documentos que pueden consultarse se mencionan a continuación:

» **Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas – POMCA:** es la hoja de ruta que permite el planeamiento del uso y manejo sostenible de los recursos naturales renovables en una cuenca, de manera que se consiga mantener o restablecer un adecuado equilibrio entre el aprovechamiento económico de tales recursos y la conservación de la estructura físico-biótica de la cuenca, particularmente de sus recursos hídricos.

» **Plan de Ordenamiento Territorial:** es el conjunto de objetivos, directrices, políticas, estrategias, metas, programas, actuaciones y normas destinadas a orientar y administrar el desarrollo físico del territorio y la utilización del suelo.

Al consultar estos documentos, debe prestarse atención a la identificación de zonas con restricciones para minería. También se recomienda consultar los Esquemas de Ordenamiento Territorial (EOT) y el Plan Básico de Ordenamiento Territorial – PBOT, según sea necesario.

» Términos de referencia para elaboración de Estudios de Impacto Ambiental (EIA) y Diagnóstico Ambiental de Alternativas (DAA), entre otros.

» **Plan de Manejo Ambiental de Acuíferos:** instrumento de planificación y administración del agua subterránea que permite conocer los acuíferos, las zonas de descarga y recarga, y la utilización de este recurso en un área.

» **Planes de Ordenación y Manejo de Recursos Hídricos - PORH:** instrumentos de planificación y administración del recurso hídrico que permiten conocer su estado (superficial y subterráneo) en una cuenca y su posible utilización.

» Guías Minero-Ambientales de exploración, de explotación y de beneficio y transformación.

» Planes de ordenamiento minero-ambiental (POMIA y POASM).

Más información

» Proyect Management Institute (2017). *Guía de los Fundamentos para Dirección de Proyectos (Guía del PMBOOK®)* (sexta edición).

» Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (2018). *Metodología para la Elaboración y Presentación de Estudios Ambientales.*

4

Exploración

...se procede con la fase de exploración, en la cual se abordan los aspectos **geológicos, de caracterización del material, geomorfológicos e hidrológicos, entre otros,**

Como se menciona en el capítulo 3, es conveniente realizar un análisis de los resultados obtenidos en cada fase para tomar la decisión de pasar a la siguiente, replantear las actividades y procedimientos, o abandonar el proyecto (si las condiciones no son favorables). En este sentido, una vez surtida la fase de análisis preliminar de las condiciones del área del proyecto —y si los resultados fueron favorables—, se procede con la fase de exploración, en la cual se abordan los aspectos geológicos, de caracterización del material, geomorfológicos e hidrológicos, entre otros, que permiten la delimitación de las áreas de mayor interés dentro del proyecto para pasar a la siguiente fase de estimación de recursos.

Las principales actividades y procedimientos que se recomienda realizar en esta fase se describen en los siguientes párrafos.

4.1 Compilación y análisis de la información secundaria

S Esta actividad consiste en la recopilación y análisis de la información existente relacionada con geología regional y estructural; los estudios petrográficos, físico-químicos, geofísicos, hidrogeológicos y ambientales; las bases topográficas; los puntos geodésicos; la información minera; hidrología; sedimentología; hidráulica; y clima, entre otros, que puedan aportar a la comprensión y caracterización del depósito y del área de trabajo.

La información secundaria puede consistir en mapas, informes, tesis y reportes públicos, entre otros, y puede adquirirse en agencias gubernamentales, corporaciones autónomas, universidades o estudios particulares. Se recomienda realizar una revisión cuidadosa de dicha información para determinar cuáles datos son realmente útiles al propósito del proyecto, bajo los criterios de pertinencia, fiabilidad, actualidad y calidad. Si el área ya ha sido objeto de trabajos exploratorios anteriores, es posible que se cuente con datos que ayuden a establecer la metodología del programa exploratorio, pero esta información debe ser validada y aprobada antes de su uso.

En lo posible, es adecuado consultar datos de las propiedades mineras o contratos de concesión adyacentes para evaluar las condiciones de los depósitos en las zonas aledañas al área de interés, y así seleccionar los parámetros y condiciones que pueden proyectarse dentro del área propia. Parte de la información que puede evaluarse de las propiedades adyacentes se relaciona con infraestructura disponible, producción e impacto sobre el área propia, entre otros parámetros. Por las condiciones de exposición de los depósitos aluviales y su extensión a lo largo de los cauces, la información sobre las características de los materiales de arrastre presenta similitudes cuando se trata de la misma corriente, y las condiciones de recarga pueden evaluarse considerando las operaciones de títulos vecinos, principalmente aquellos ubicados aguas arriba.

Recomendaciones

» Realizar un balance de la información obtenida y de la que hace falta para completar los estudios, con el fin de destinar los recursos necesarios a la consecución de la información faltante.

» Citar adecuadamente las fuentes de información cuando es el caso y obtener los permisos de uso de la información cuando haya restricciones por parte de los autores.

» Realizar un análisis riguroso de los trabajos de exploración previos y validar los datos antes de usarlos para el proyecto.

» Revisar la información de las propiedades adyacentes.

» Fundamentar los estudios en información primaria obtenida con labores de campo y usar la información secundaria como complemento.

Más información

» Servicio Geológico Colombiano (SGC).
https://www.sgc.gov.co

» Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).
https://geoportal.igac.gov.co

» Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).
http://www.ideam.gov.co

» Geoportal AnnA Minería de la Agencia Nacional de Minería (ANM).
https://www.anm.gov.co/?q=anna-mineria

» Ministerio de Medio Ambiente.
https://www.minambiente.gov.co

4.2

Estudios geológicos

Se debe recopilar información del área de interés para generar cartografía temática sobre litología, estructuras, ocurrencias minerales y distribución de las unidades geológicas en el área, entre otros. Lo anterior funciona como base para proyectar una exploración más detallada, y así identificar los diferentes tipos de depósitos aluviales, la posible incidencia de estructuras y los potenciales recursos presentes en las áreas concesionadas para el aprovechamiento de materiales de arrastre.

La caracterización geológica debe abordarse desde las escalas regional y local **para lograr una completa comprensión de la dinámica y las características de los materiales de arrastre en el área de interés.**

4.2.1

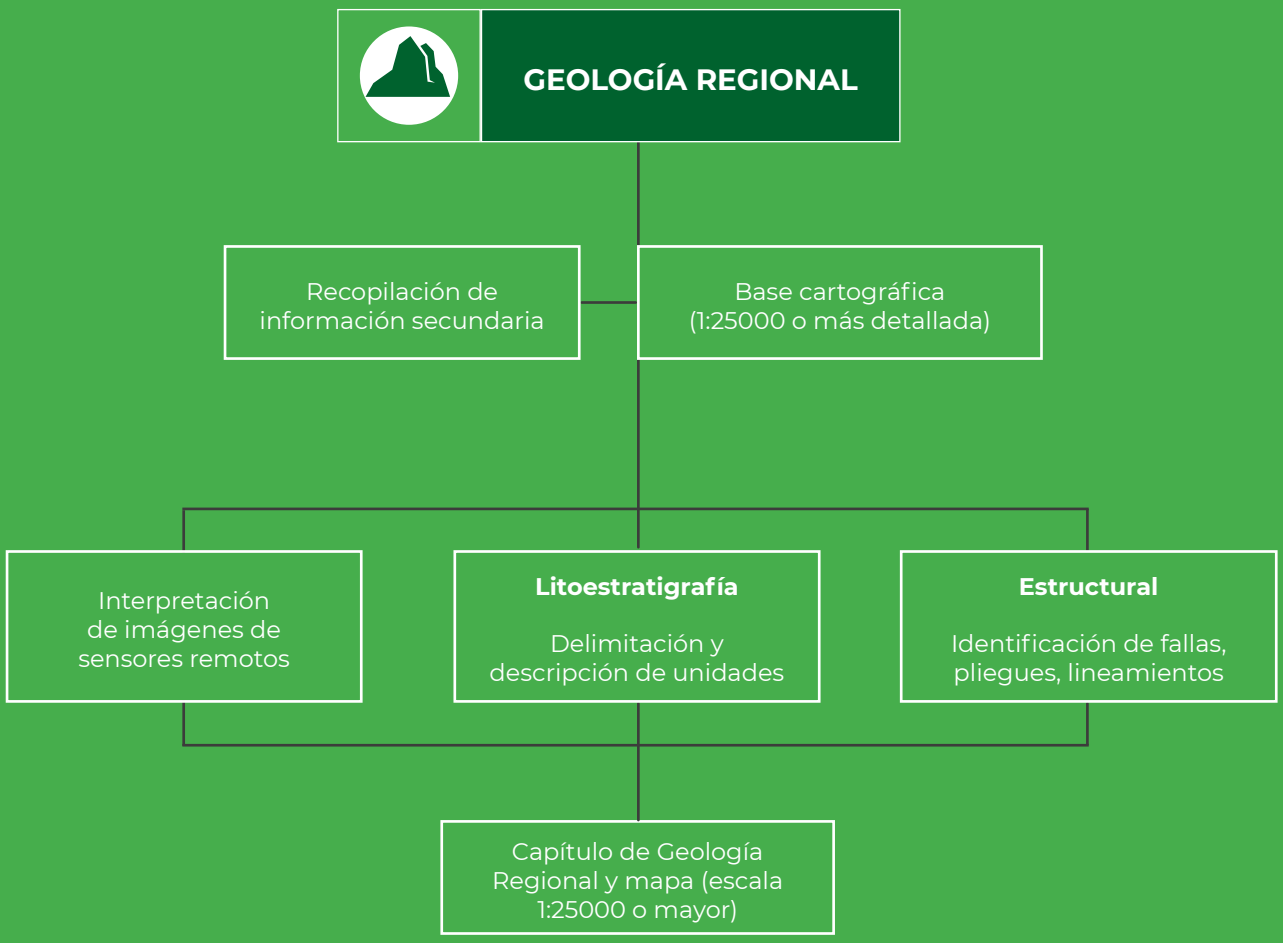
Geología regional

Los depósitos recientes generados por la acumulación de materiales de arrastre están compuestos por elementos de las unidades litológicas presentes en la cuenca aferente, es esa roca madre la que fija las condiciones de la calidad de los agregados y subproductos obtenidos. La evaluación geológica regional debe determinar los aspectos estratigráficos (grupo, formación, unidad litoestratigráfica) y estructurales significativos (pliegues y fallas) que condicionan el régimen de aporte de sedimentos a los afluentes y corrientes principales.

Los resultados de este estudio se plasman en mapas, secciones transversales, columnas estratigráficas y demás elementos que permitan comprender la configuración geológica regional. En la Figura 5 se muestra un ejemplo de flujograma de trabajo que se recomienda seguir para la caracterización geológica regional del área.

Esta información debe ser ajustada a partir de la bibliografía existente utilizando las técnicas disponibles, y debe ser consistente con la nomenclatura establecida por el Servicio Geológico Colombiano (SGC). La información debe generarse en escala 1:25.000 o más detallada, de acuerdo con las condiciones particulares del área.

Figura 5. Flujograma del componente geológico regional a desarrollar en un proyecto minero. Fuente: autores



4.2.2

Geología local

Una vez definido el contexto geológico regional, se procede a realizar el levantamiento geológico local, a partir del cual se delimitan las unidades geológicas superficiales. Hay que hacer énfasis en los depósitos recientes (aluviones, coluviones, barras, entre otros) con potencial para albergar el material de interés.

Para determinar la geología local, se requiere integrar la información secundaria seleccionada para caracterización del área con los datos tomados durante los trabajos de levantamiento de campo. Para cada unidad geológica se describen los niveles estratigráficos, el espesor, la distribución y posición de las diferentes capas de materiales, el ambiente de deposición, la granulometría presente y la composición, entre otras características. Los rasgos estructurales del área (indicadores de neotectónica, basculamiento, fallas, pliegues, etc.), cuando sea posible identificarlos, también se incluyen en el levantamiento geológico de campo.

Además, en esta fase pueden tomarse algunos datos útiles para el diseño y selección del método de minado y estabilidad del cauce. Algunos parámetros a tener en cuenta para lograr un registro completo son color, textura, consistencia de suelos finos, densidad relativa de arenas y otros suelos gruesos; resistencia, determinada cualitativa o cuantitativamente con penetrómetro y Humedad Natural o Condición de Humedad; y dureza, que corresponde a una medida de la resistencia física de los componentes de los suelos aluviales (se mide mediante métodos sencillos, como golpes del martillo). Los datos obtenidos de los registros se organizan en un base de datos que servirá para usos diferentes: modelos clásicos o numéricos, mapas y secciones para el conocimiento a profundidad del proyecto, modelamiento del depósito y procesos de estimación.

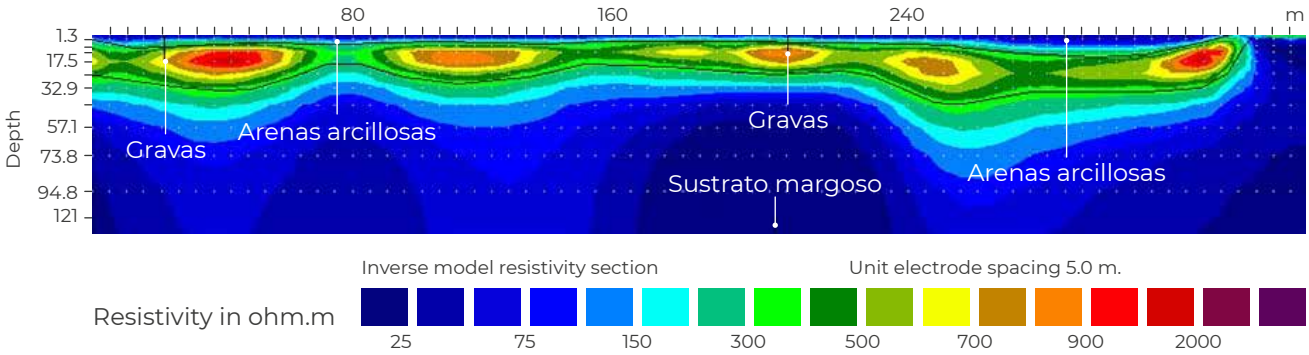
Los estudios geológicos pueden ser complementados con estudios geofísicos, tales como los sondeos eléctricos verticales y la tomografía, para estimar el espesor de los depósitos y la distribución de granulometrías. En la Figura 6 se muestra un ejemplo de registro geofísico en materiales pétreos.

Los estudios geológicos pueden ser complementados con **estudios geofísicos, tales como los sondeos eléctricos verticales y la tomografía**

Una manera de optimizar los trabajos de campo y garantizar la captura de la información relevante es el diseño de protocolos (ver numeral 3.1) y plantillas para toma de datos en campo para todos los procesos que han de ejecutarse durante la exploración. También es útil establecer los protocolos de registro y almacenamiento de la información capturada en campo, considerando los responsables y frecuencia del registro, el manejo de la información digital y análoga, y la disposición de las muestras.

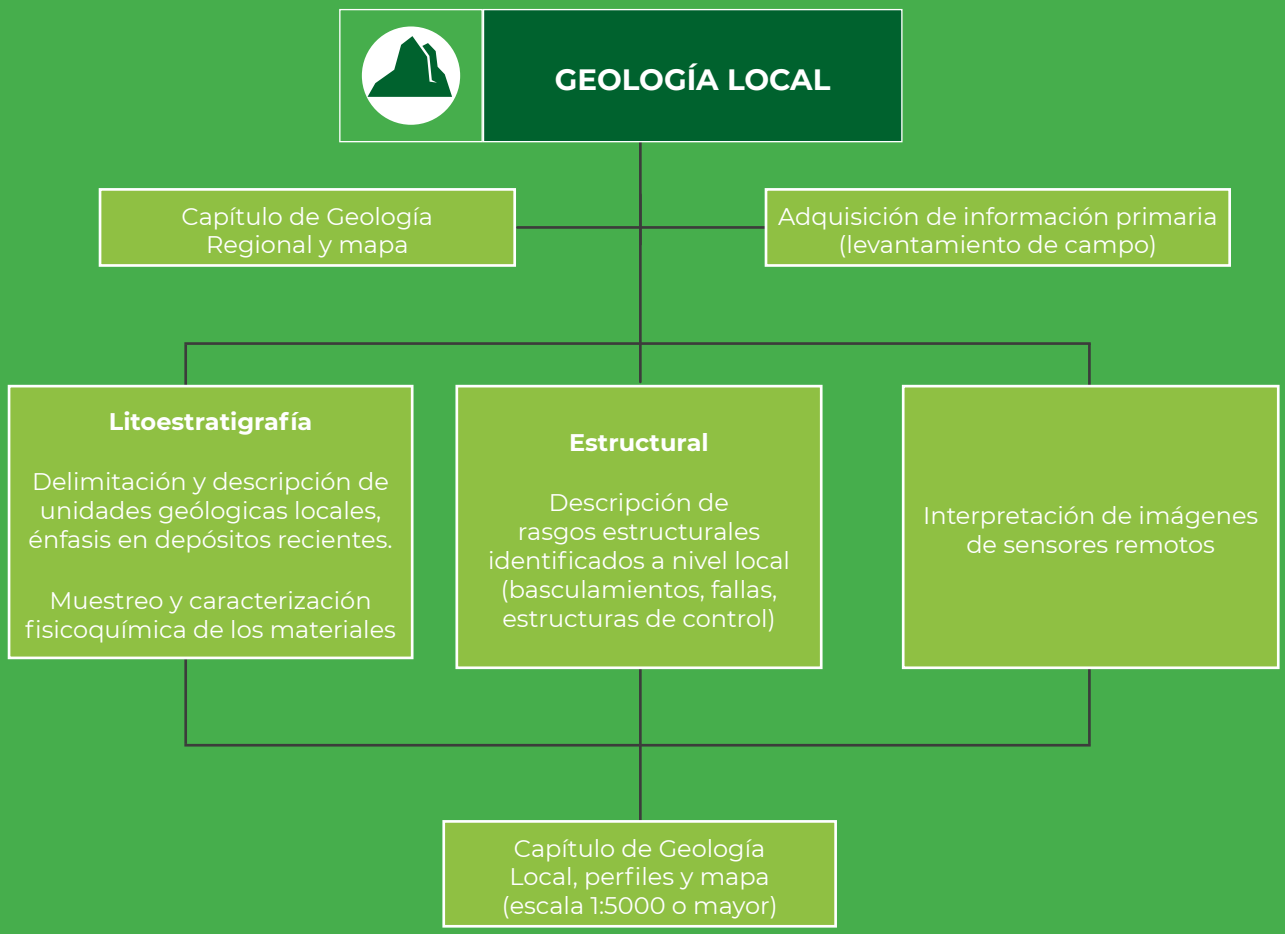
El adecuado análisis de la información tomada en campo o proveniente de fuentes secundarias incluye representaciones gráficas —como columnas estratigráficas, mapas, perfiles geológicos y esquemas, entre otras—, las cuales facilitan la comprensión del depósito y la interpretación de los datos. En estos gráficos se representan cambios de litología, variaciones de tamaño de grano, composición, estructuras sedimentarias y demás características que puedan documentarse.

Figura 6. Perfil geológico-geofísico para materiales de arrastre.
Fuente: Centro de Capacitación Minera (CECAMIN)



La selección de la escala para la representación cartográfica del área se realiza con base en la extensión del área y con el detalle de los datos tomados en campo y de la topografía. Para depósitos de materiales de arrastre es recomendable considerar escalas 1:5.000 o más detalladas. En la Figura 7 se muestra un resumen del componente geológico local.

Figura 7. . Flujograma del componente geológico local a desarrollar en un proyecto minero. Fuente: autores



Recomendaciones

» Documentar adecuadamente los trabajos de levantamiento geológico.

» Diseñar plantillas y protocolos para la toma de datos en campo y el manejo de la información.

» Determinar la escala más conveniente para la cartografía geológica y el levantamiento detallado, teniendo en cuenta que es necesario identificar los tramos óptimos de deposición.

» La presentación de los resultados de sondeos geofísicos debe incluir un perfil de la zona evaluada y los datos de campo.

» Usar tablas explicativas de los valores de las propiedades físicas que pueden medirse en campo, tales como dureza, resistencia y textura, entre otras.

Más información

» Caicedo, J. (2003). *Toma de datos en la libreta de campo. Ingeominas.*

» US. Geological Survey (2006). *FGDC Digital Cartographic Standard for Geologic Map Symbolization.*

4.3

Estudios geomorfológicos

En el proceso de caracterización y exploración de depósitos de materiales de arrastre, el análisis geomorfológico es imprescindible porque permite identificar los procesos denudacionales que ocurren en la cuenca y que pueden generar recarga de material; las unidades, subunidades y elementos geomorfológicos que ayudan a determinar las áreas más favorables para acumulación del material —y, por lo tanto, para seleccionar el sector de trabajo más conveniente—; y las huellas dejadas en el terreno por la variaciones multitemporales de el o los caudales de interés en el área.

En el estudio geomorfológico se integra la información de los estudios geológicos, la topografía base y los análisis de imágenes de sensores remotos (modelo digital del terreno, fotografías aéreas, etc.), entre otros (Figura 8). Las imágenes de sensores remotos facilitan el análisis multitemporal, que es especialmente importante para este tipo de depósitos, ya que permite identificar zonas de posible inestabilidad del cauce y zonas de sedimentación y temporalidad de eventos. Una buena práctica al realizar el análisis multitemporal es establecer la envolvente de mínimo tres periodos (actual, entre 5 a 20 años atrás y la más antigua). Los modelos digitales del terreno facilitan la identificación de rasgos tales como aspecto de las laderas, pendientes y perfiles del terreno, forma del drenaje y lineamientos, entre otros.

Las imágenes de sensores remotos facilitan el análisis multitemporal, que es especialmente importante para **este tipo de depósitos, ya que permite identificar zonas de posible inestabilidad del cauce** y zonas de sedimentación y temporalidad de eventos.

Los estudios geomorfológicos permiten realizar una evaluación morfodinámica donde se identifican los procesos activos o aquellos que se pueden activar por cuenta de factores como la gravedad, las corrientes de agua que transportan los materiales o los agentes atmosféricos. El inventario de los procesos de erosión y demás movimientos en masa suministra información sobre el posible aporte de sedimentos a la corriente. De acuerdo con la evaluación geomorfológica, es necesario identificar cartográficamente los sitios más propensos a sufrir desprendimientos de suelos, deslizamientos, erosión o socavación, entre otros.

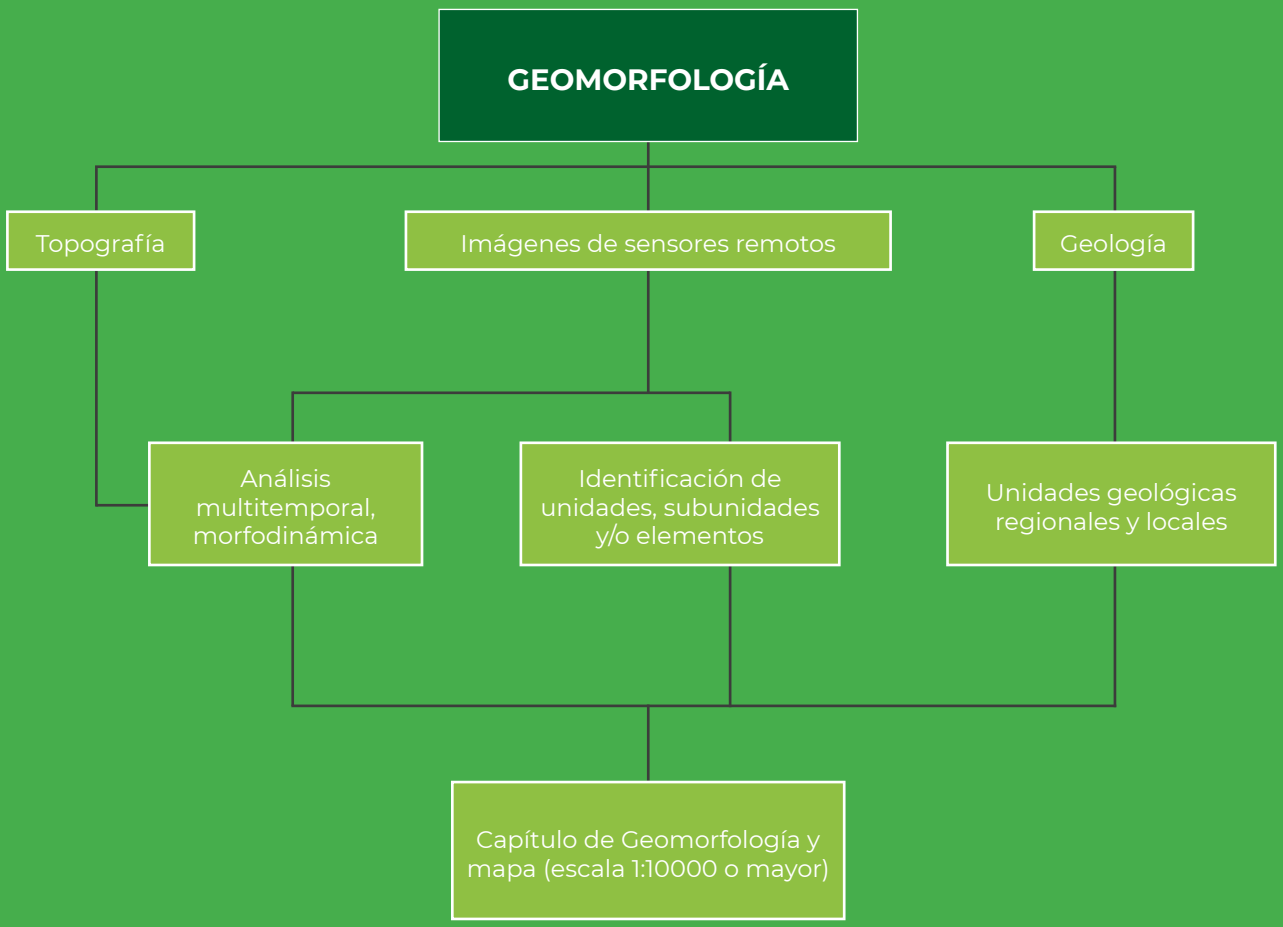


Figura 8. . Flujograma del componente geomorfológico a desarrollar en un proyecto minero. Fuente: autores

Para desarrollar los estudios geomorfológicos, se recomienda partir desde el nivel regional hasta el nivel de detalle, con base en la jerarquización geomorfológica. Para esto, Carvajal (2012) establece el elemento geomorfológico como la unidad más detallada en la caracterización geomorfológica y presenta una metodología para la definición de los aspectos más relevantes de un estudio geomorfológico.

Recomendaciones

» Seleccionar una escala de trabajo adecuada para el análisis geomorfológico, preferiblemente hasta el nivel de elementos.

» Seleccionar la escala temporal más conveniente para el análisis multitemporal y contrastar las envolventes del cauce activo con la mayor cantidad de imágenes posible de diferentes periodos, con el fin de evaluar la estabilidad lateral del cauce.

» Considerar el uso de diferentes tipos de imágenes de sensores remotos, de acuerdo con la información que ofrezca cada una de ellas.

Más información

» Carvajal Perico, J. H. (2012). *Propuesta de Estandarización de la Cartografía Geomorfológica en Colombia*. Servicio Geológico Colombiano [SGC].

El estudio del transporte de sedimentos es un tema clave **para garantizar la estabilidad del cauce del río a largo plazo**

4.4

Estudios hidrológicos

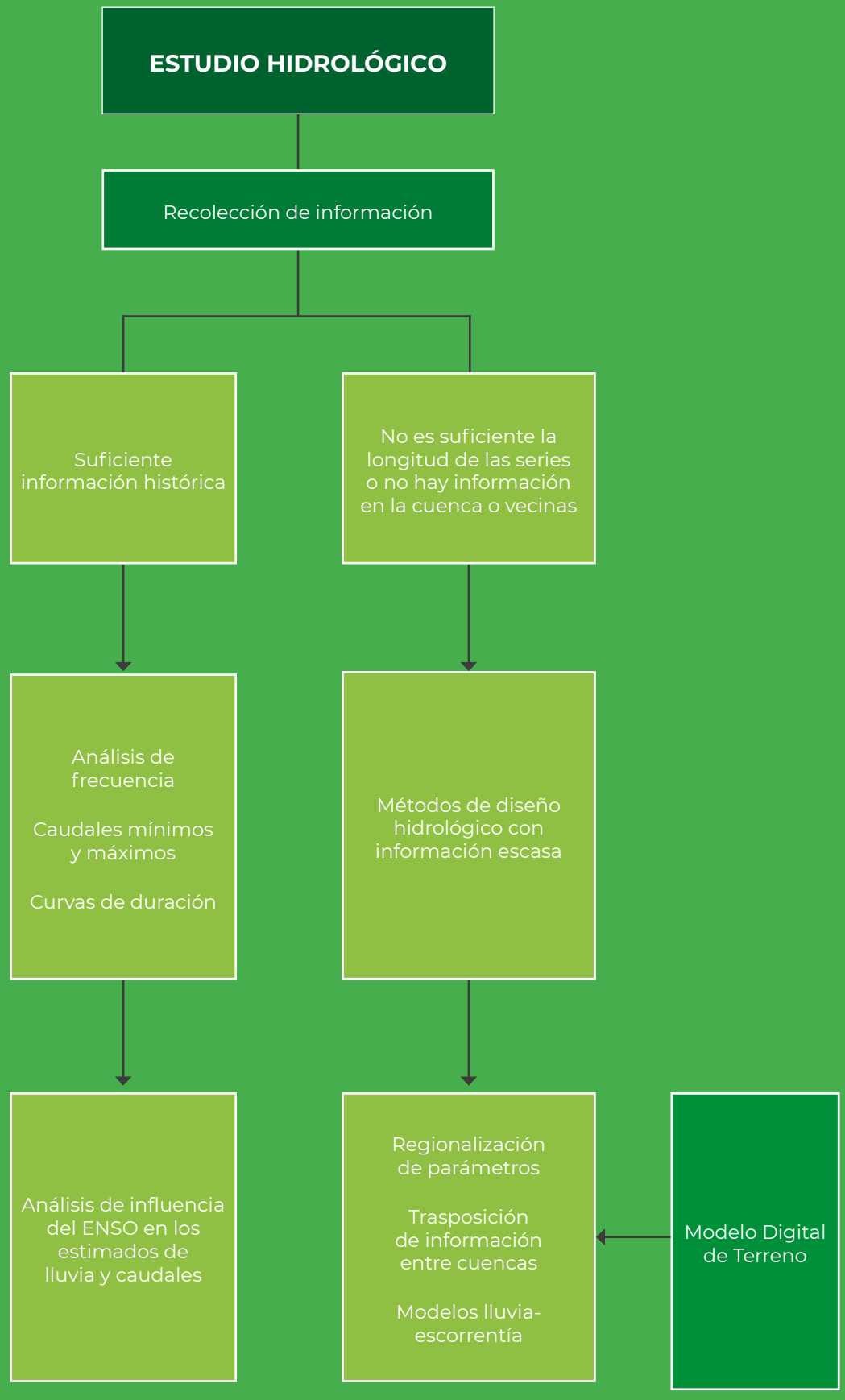
El objetivo del estudio hidrológico es entender el comportamiento de las variables de interés, como precipitaciones; caudales mínimos; medios y máximos, y su relación con la producción; y comportamiento y recarga de los sedimentos. Para conseguir este fin, es necesario analizar la información de caudales y precipitaciones de estaciones situadas en la cuenca o cercanas al proyecto, realizar aforos líquidos y sólidos, e integrar estos datos para la generación de los modelos interpretativos.

El estudio del transporte de sedimentos es un tema clave para garantizar la estabilidad del cauce del río a largo plazo, determinar la recarga en un tramo específico y viabilizar la explotación minera; así como garantizar la salud de los hábitats acuáticos y ribereños, al permitir que solo un volumen sostenible de arena y grava sea explotado durante la operación minera.

Las principales actividades a desarrollar en campo para la caracterización hidrológica se enfocan en determinar la recarga de sedimentos —fundamentalmente en la construcción de la curva de relación de caudal sólido versus caudal líquido, por medio de aforos en las corrientes de interés—, hacer las batimetrías de secciones de aguas arriba y aguas abajo del posible sitio de explotación y tomar muestras granulométricas que posteriormente permitirán determinar la curva granulométrica, para luego correr un modelo de transporte de sedimentos.

En la Figura 9 se presenta un esquema para el desarrollo de los estudios hidrológicos, el cual considera dos posibilidades, cuando se cuenta con suficiente información o cuando esta es escasa.

Figura 9. . Metodología para el estudio hidrológico. Fuente: autores



4.4.1

Aforos líquidos y sólidos

El objetivo principal de los aforos líquidos y sólidos en una corriente es determinar la relación de caudal líquido versus caudal sólido que es necesaria para construir el modelo de transporte y recarga de sedimentos. Las siguientes consideraciones deben tenerse en cuenta para seleccionar una sección de aforo adecuada:

» Se recomiendan secciones transversales de geometría regular. En lo posible, se deben evitar las secciones con cambios bruscos de profundidad entre ambas márgenes. El material del lecho debe ser tan uniforme como sea posible y no debe haber escombros ni vegetación.

» Se recomiendan tramos rectos, sin controles hidráulicos aguas abajo.

» Se deben evitar las secciones con altas turbulencias, remolinos y ondas estacionarias.

Para los aforos líquidos pueden usarse, dependiendo de la geometría y caudales de la corriente, los llamados correntómetros o molinetes (como el que se muestra en la Figura 10), o equipos para ríos más anchos y profundos acoplados a un pequeño bote, que registran en una unidad de almacenamiento datos de profundidades, velocidades y caudal (Figura 11). Una descripción detallada de los procedimientos que deben seguirse para estos aforos se encuentra en el documento *Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua* (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2007), que puede descargarse libremente.

Figura 10. . Molinete o correntómetro. Fuente: www.ott.com

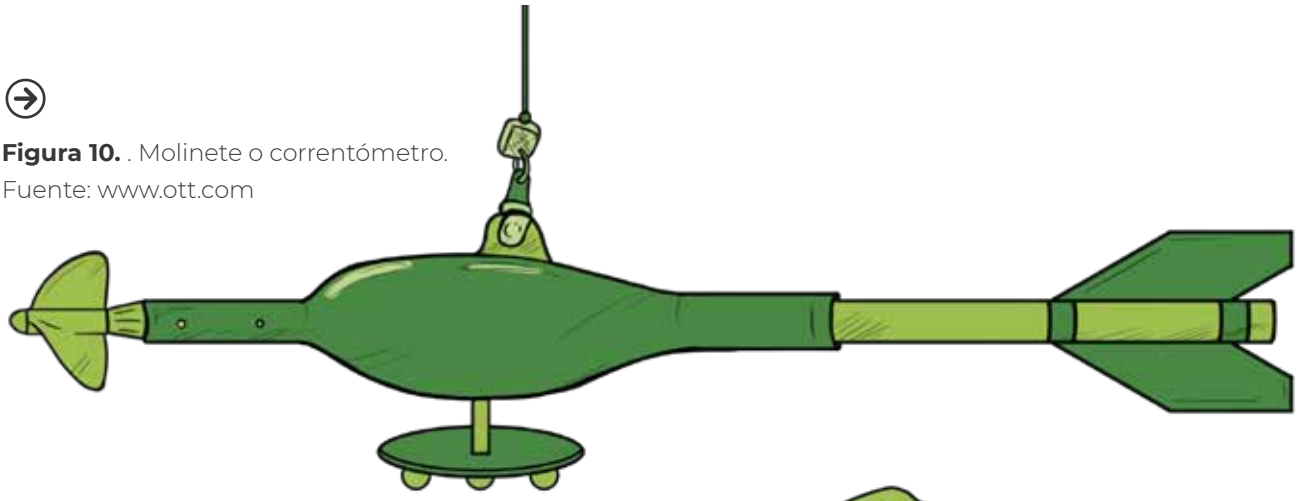
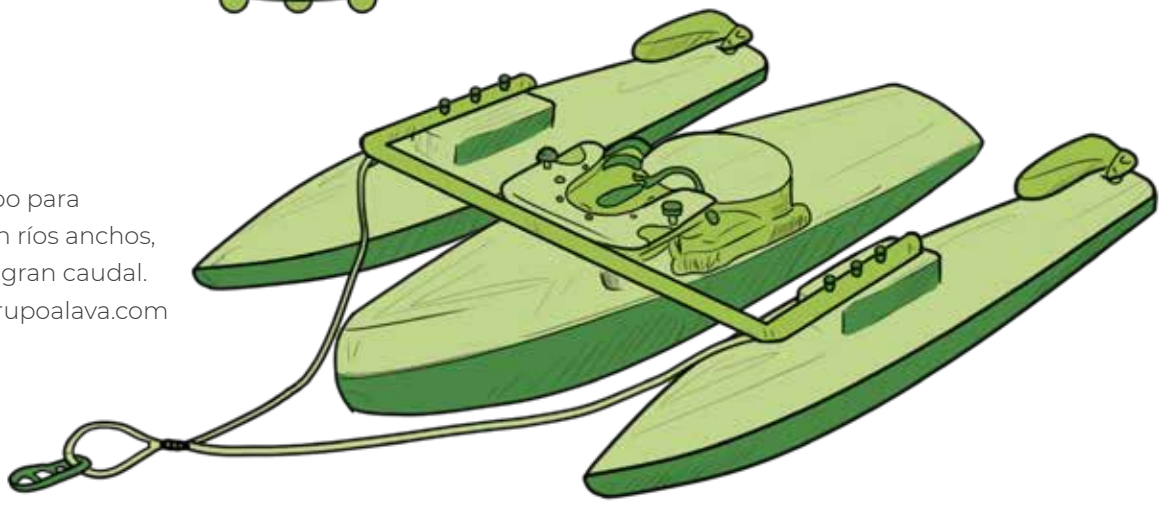


Figura 11. Equipo para medir caudal en ríos anchos, profundos y de gran caudal. Fuente: www.grupoalava.com



Los caudales sólidos se miden, según los protocolos del IDEAM, con equipos muestreadores tipo USDH-48, USD-49, USDH-59 Y US-P-61. La Figura 12 muestra un equipo comúnmente utilizado en Colombia. Lo ideal es tomar aforos líquidos y sólidos en varias épocas del año, que permitan construir la curva caudal sólido vs. caudal líquido (Figura 13). Esta relación es necesaria para determinar la recarga de sedimentos.

Figura 12. Muestreador de sedimentos US-P-61. Fuente: IDEAM, 2007

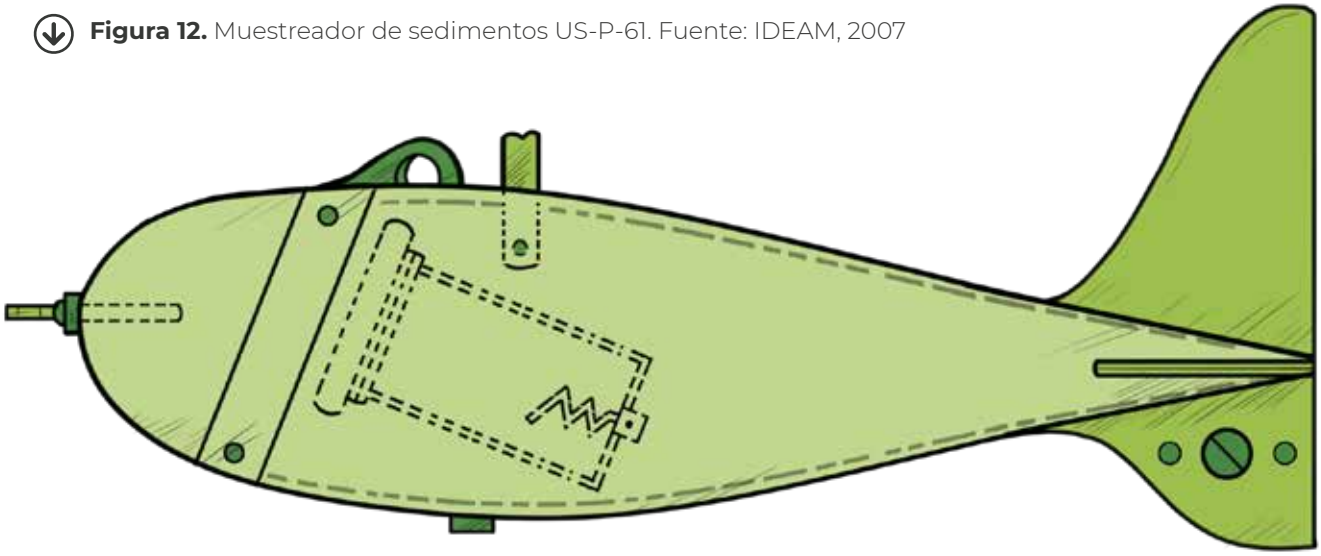
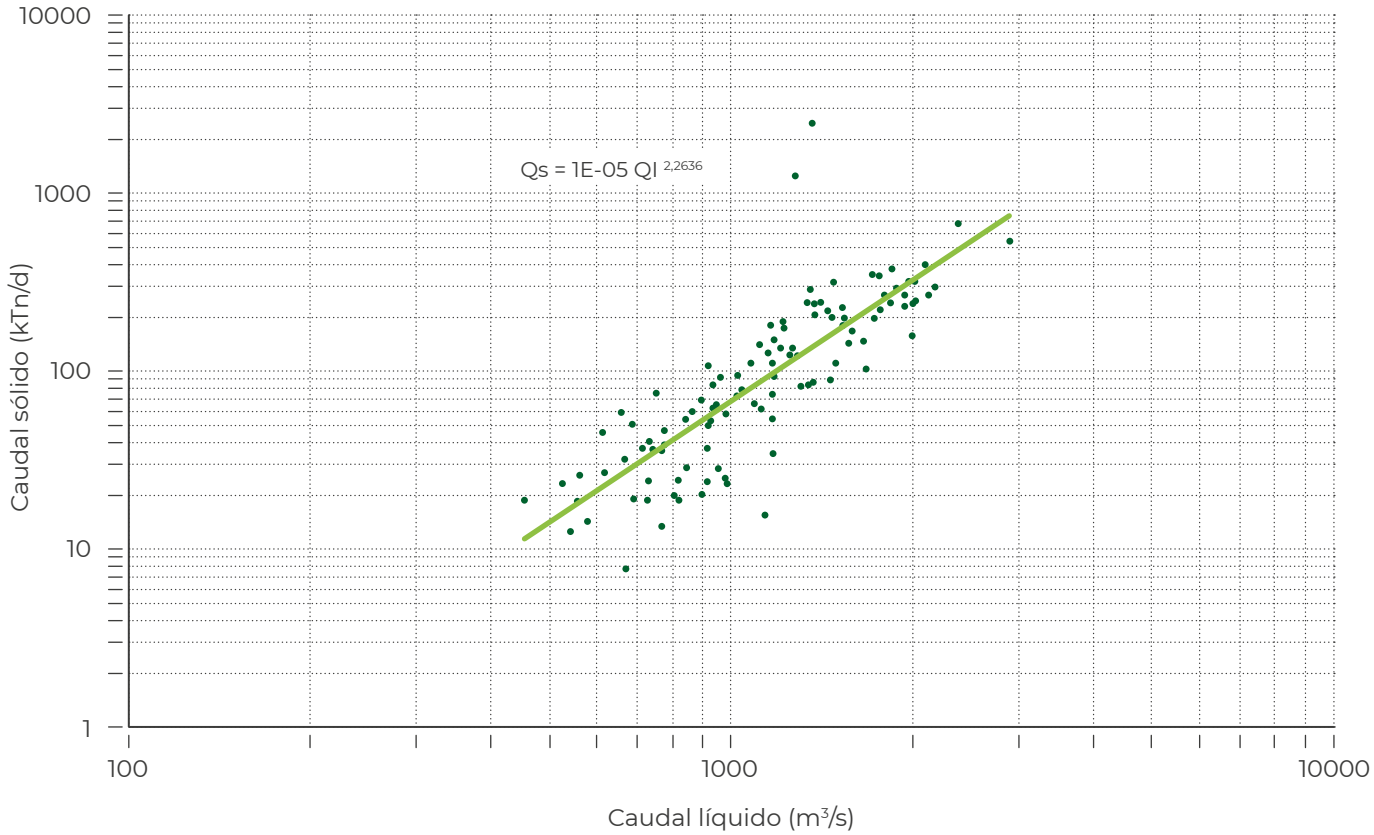


Figura 13. Relación caudal sólido versus caudal líquido. Fuente: IDEAM 2007



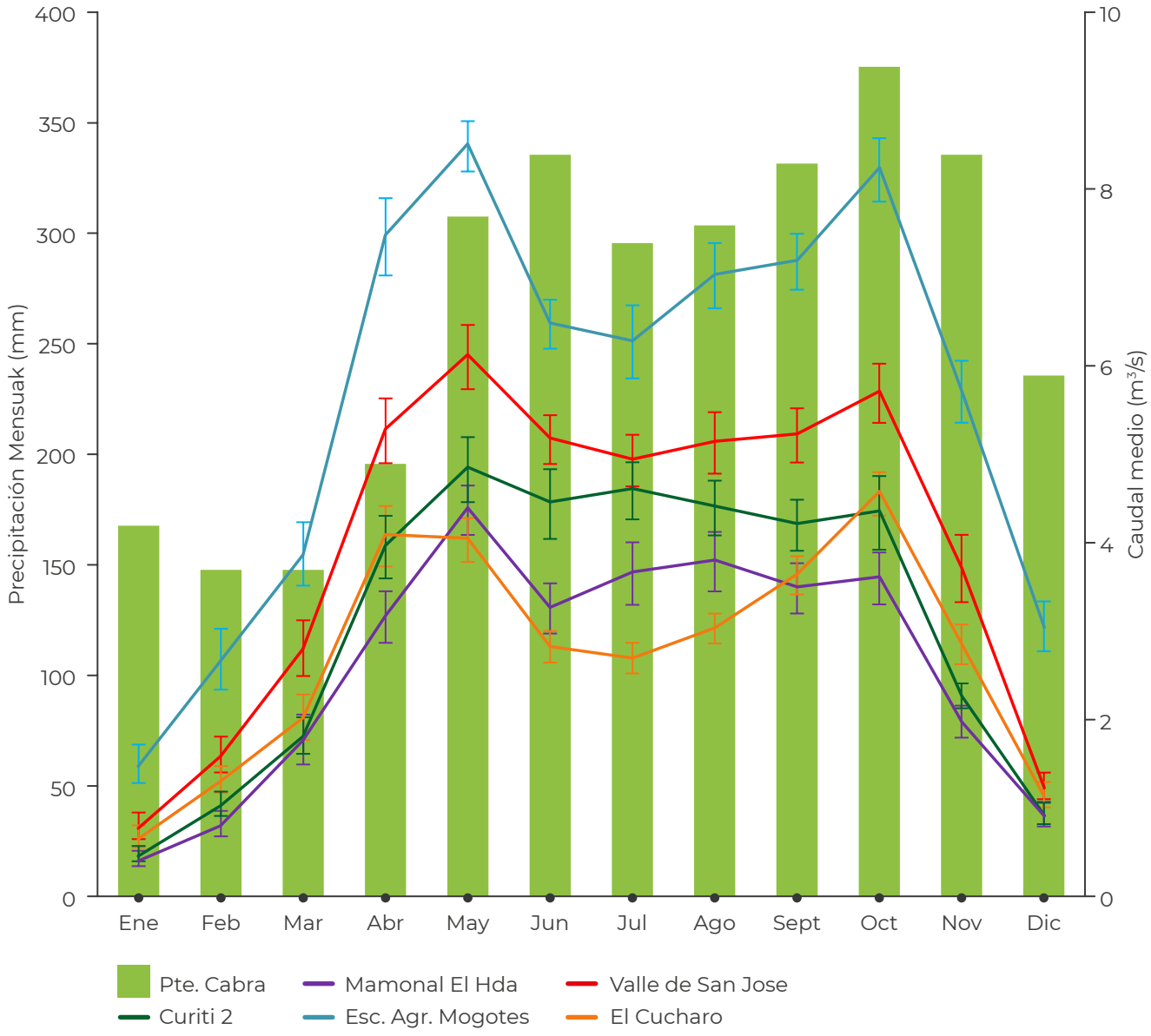
4.4.2

Precipitación y caudales

Los estudios hidrológicos incluyen el análisis de la información de caudales y precipitaciones de estaciones situadas en la cuenca donde se encuentre el proyecto o cercanas a este. El IDEAM es la entidad encargada de recolectar y suministrar datos oficiales de la información hidrometeorológica (precipitación, caudal, evaporación) disponible en el país.

Es importante conocer el ciclo anual de precipitaciones y su relación con el ciclo de caudales medios, con sus correspondientes errores medios estadísticos asociados a cada media mensual (el error medio está definido como la relación entre la desviación estándar y la raíz cuadrada del número de datos mensuales disponibles) (Figura 14).

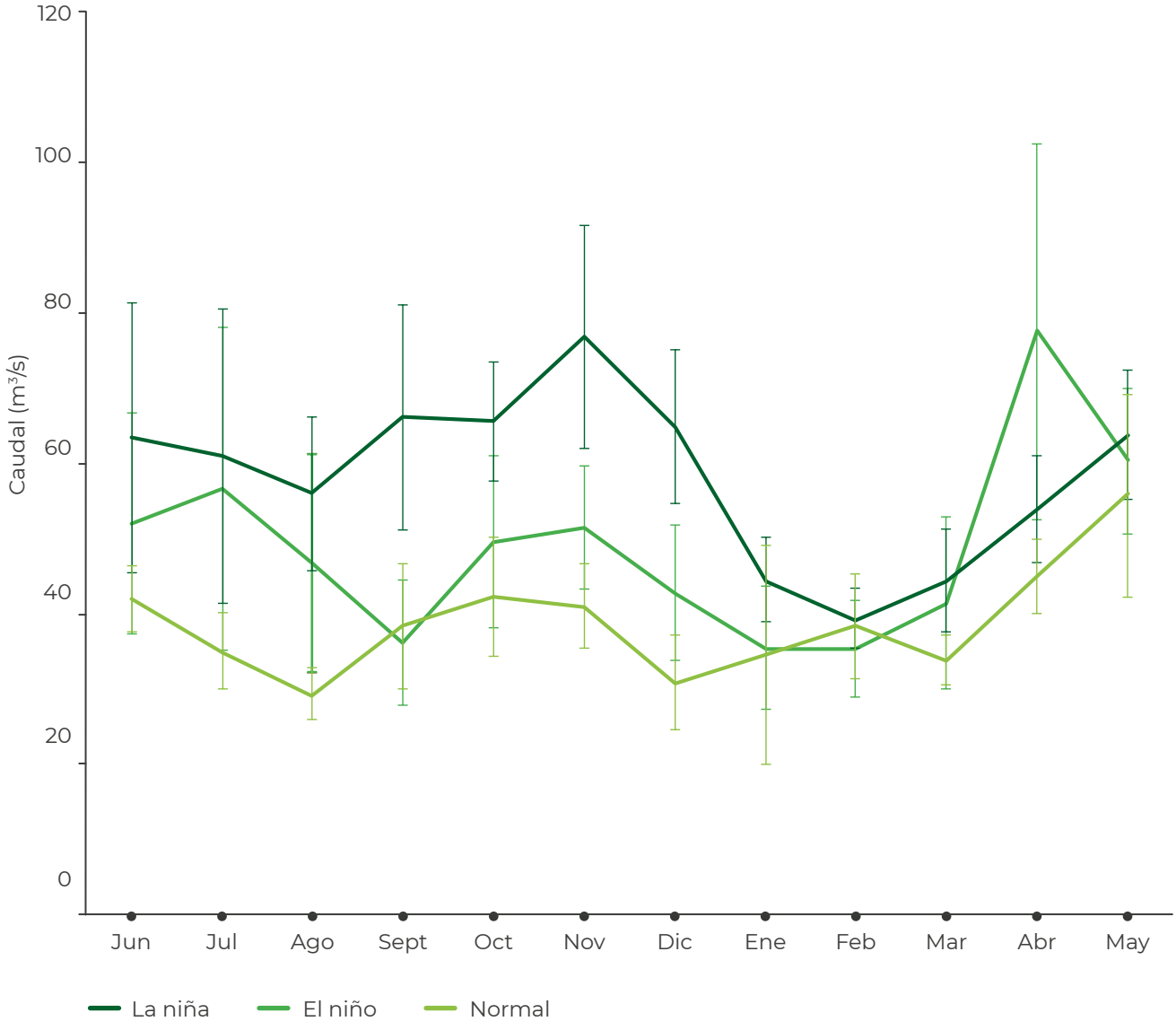
Figura 14. Correlación temporal entre la precipitación y el caudal de la estación 2402704 Pte. Cabra (Santander). Fuente: SHI, 2014



Debido a la Influencia del fenómeno El Niño–Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés), en el régimen de caudales y precipitaciones en Colombia se determinan los ciclos de precipitación para cada estación, clasificando los años hidrológicos (comprendidos entre junio del año 0 y mayo del año +1) de acuerdo con las tres fases del fenómeno ENSO (El Niño, la Niña y la fase normal), como se muestra en la Figura 15. La finalidad de esto es determinar los efectos de este fenómeno sobre el régimen de precipitaciones y caudales. Los efectos ENSO en la mayor parte del país se reflejan en un aumento en las precipitaciones para la fase Niña y una disminución de estas para la fase Niño.

El estudio del transporte de sedimentos es un tema clave **para garantizar la estabilidad del cauce del río a largo plazo**

Figura 15. Ciclo anual de caudales medios y la influencia del ENSO. Estación Corea. Fuente: SHI & Goliat, 2020



4.4.3

Caudales máximos y mínimos

El objetivo de esta etapa es obtener los caudales máximos y mínimos asociados a varios períodos de retorno, y así construir la curva de duración de caudales. Este es un insumo necesario para estimar la recarga de sedimentos en la corriente, asociada a varios escenarios climatológicos. Se debe determinar la distribución de caudales medios mensuales multianuales en el posible tramo de explotación, si esta es de tipo unimodal o bimodal, y sus valores máximos y mínimos. Los caudales extremos (máximos y mínimos) se deben asociar a sus correspondientes períodos de retorno. Los caudales máximos sirven, conjuntamente con las batimetrías del cauce levantadas en el tramo de interés, para determinar las velocidades medias de flujo en el lecho principal, las cuales indican la variabilidad e inestabilidad morfodinámica del cauce.

Para el caso de la recarga de sedimentos, se debe aplicar un modelo o un conjunto de modelos hidrológicos, que se utilizan para estimar las condiciones hidrológicas críticas necesarias para el diseño de la explotación minera. Los modelos y los valores estimados con ellos serán tan buenos como la calidad de la información utilizada, la cual está asociada a la calidad del proceso de recolección de información y a la longitud de los registros.

4.4.4

Análisis de frecuencia

Cuando existen registros de caudales en la cuenca o cuencas vecinas, se puede hacer la estimación de caudales máximos y mínimos a partir de estos. Para tal fin se usan distribuciones de frecuencia de valores extremos, la más utilizada en Colombia es la distribución Gumbel. El caudal asociado a un período de retorno se puede hallar empleando la ecuación:

$$Q_T = \mu_{Max} + K_{Max}\hat{\sigma}_{Max}$$

Donde:
Q_T: caudal en m³/s asociado a un período de retorno Tr
μ_{Max}: media estimada anual de los caudales máximos en [m³/s]
$\hat{\sigma}_{Max}$: desviación estándar estimada anual de los caudales máximos en [m³/s]
K: factor de frecuencia de la distribución Gumbel, que se estima con la expresión siguiente:

$$\mathbf{K} = -\frac{\sqrt{6}}{\pi}\left\{0.577 + \mathbf{h}\left[\mathbf{h}\,\mathbf{T_r} - \mathbf{h}\left(\mathbf{T_r} - 1\right)\right]\right\}$$

Donde $\mathbf{T_r}$ es el período de retorno.

4.4.5

Estimación de caudales máximos con información escasa

Como se indica en el numeral 4.4.2, el IDEAM es la entidad encargada de recolectar y suministrar datos oficiales de la información hidrometeorológica disponible en el país; sin embargo, para la mayoría de cuencas pequeñas no se cuenta con registros suficientes de las series históricas. Cuando este es el caso, los Modelos de lluvia-escorrentía y la Regionalización de Parámetros Hidrológicos, sumados al análisis de Modelos Digitales del Terreno (MDT o DTM, por sus siglas en inglés), se convierten en herramientas que ayudan a suplir esta necesidad.

4.4.5.1 Modelo Digital de Terreno (MDT)

Un MDT es una representación digital del terreno que permite el almacenamiento de la variable cota y su procesamiento en sistemas de información geográfica (Figura 16). Sirve esencialmente para conocer la configuración del relieve, en formato digital, de una zona específica, y es una herramienta ampliamente usada en el análisis hidrológico. A partir de un MDT pueden obtenerse los parámetros morfométricos de las cuencas, que son necesarios para estimar caudales en estudios hidrológicos con información escasa.

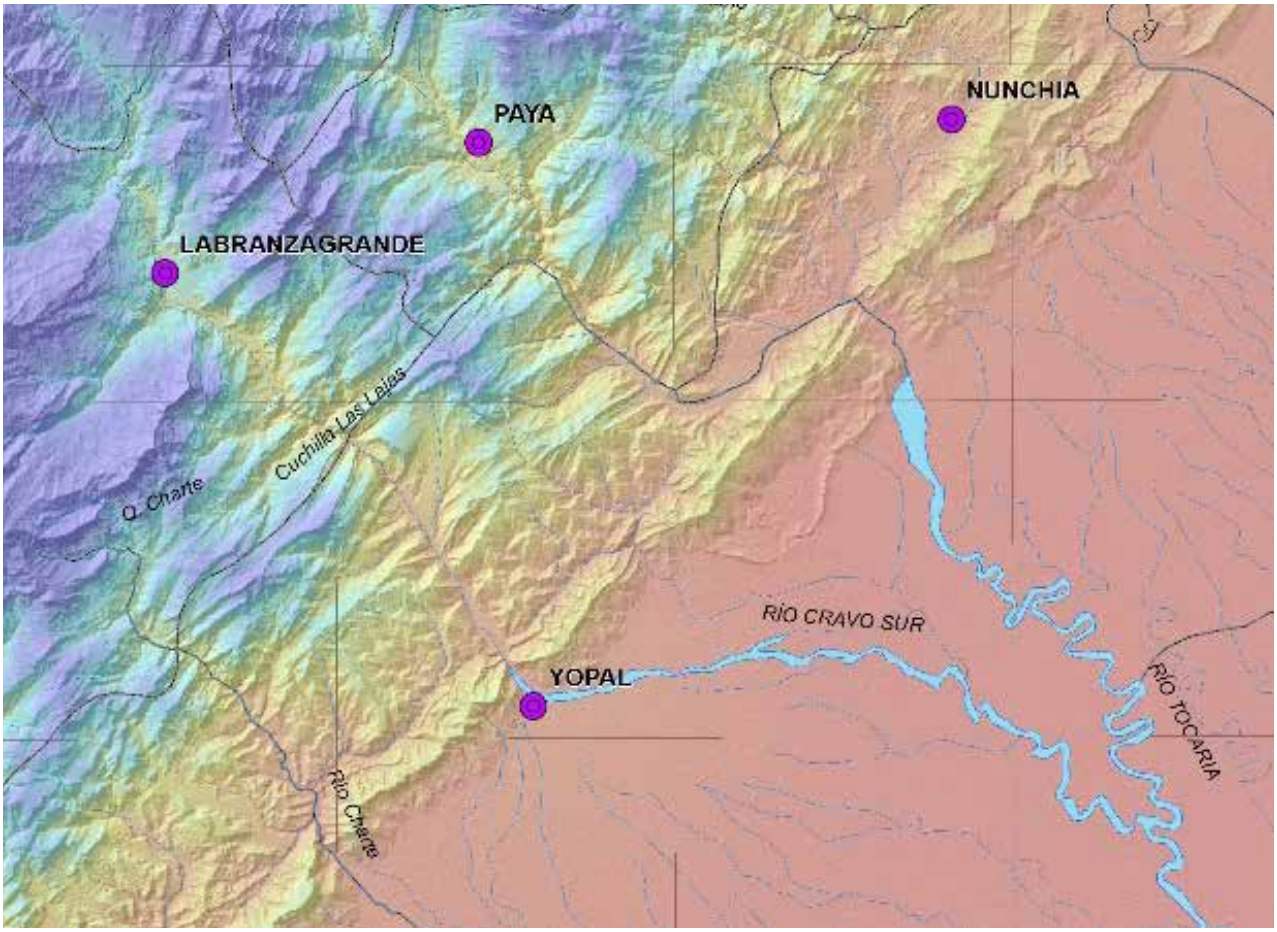


Figura 16. Ejemplo de modelo digital de terreno. Zona Yopal, Piedemonte llanero. Fuente: modificado de ASTER Global Digital Elevation Map (MDT ASTER GDEM)

4.4.5.2 Modelos lluvia-escorrentía

Los modelos lluvia-escorrentía transforman la precipitación en escorrentía superficial directa a través de mecanismos de caja negra. Los métodos de este tipo más conocidos son el método racional y las hidrógrafas unitarias sintéticas. Uno de los más usados es el método racional, que se describe a continuación.

Método Racional

La técnica conocida como Método Racional se usa ampliamente en nuestro medio, debido a su aparente simplicidad. La forma más conocida de la fórmula racional es:

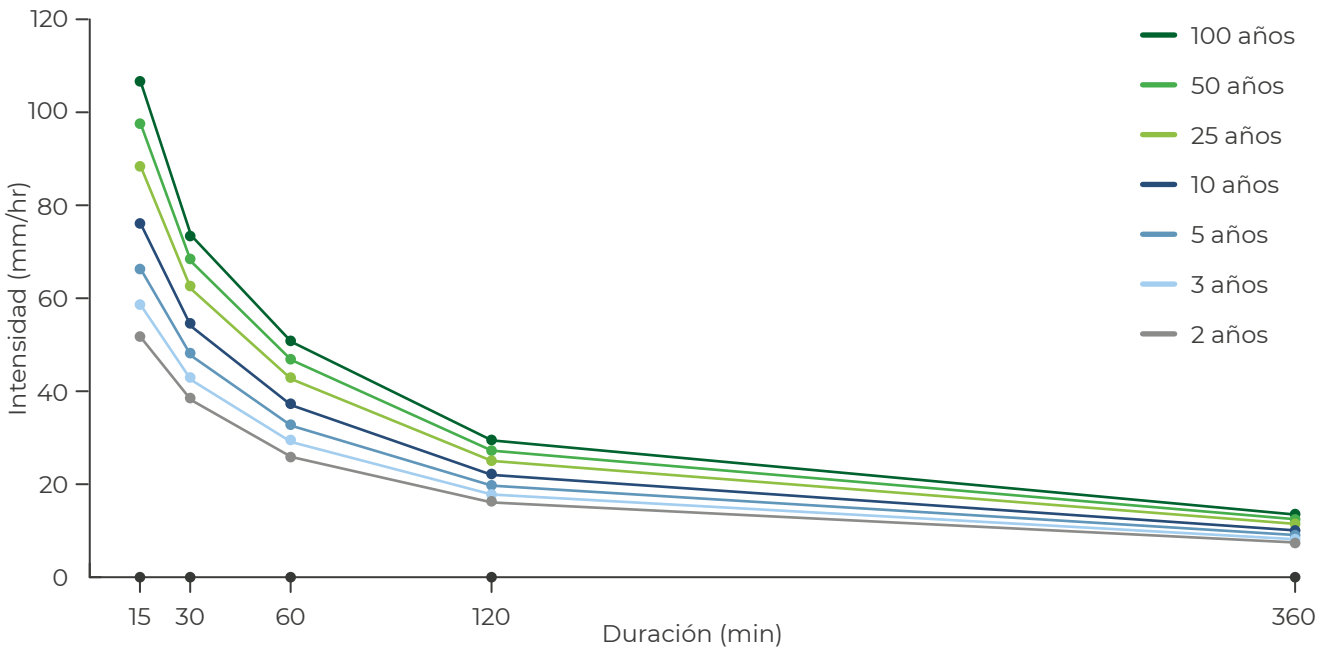
$$Q_{Tr} = CIA/3.6$$

en donde:
QTr : caudal pico en m^3/s, para un período de retorno Tr
C : coeficiente de escorrentía, que depende del tipo de suelo
I : intensidad de la lluvia, en mm/h, para una duración dada y un período de retorno
A : área de la cuenca en km^2

Los efectos de la lluvia y del tamaño de la cuenca son considerados en la expresión explícitamente, y otros procesos son considerados implícitamente en el tiempo de concentración y el coeficiente de escorrentía. El método da buenos resultados en cuencas inferiores a 50 km2. La intensidad se obtiene de las curvas Intensidad (I)-Duración (D)-Frecuencia (F), para una lluvia con un período de retorno y con una duración de tormenta igual al tiempo de concentración Tc de la cuenca. Expresiones para el Tc se pueden consultar en Vélez Otálvaro y Smith Quintero (1994).

El IDEAM tiene disponibles vía web curvas IDF en algunas de sus estaciones de lluvia, ubicadas en todo el país. La Figura 17 muestra una de estas estaciones. En caso de no existir curvas IDF en la cuenca, estas se pueden construir a partir de la metodología presentada por Wilches (2001).

Figura 17. Curva IDF de la estación Guadalupe. Fuente: IDEAM, 2020



Hidrogramas unitarios sintéticos

El concepto de hidrograma unitario (HU) fue introducido por Sherman (1932). El hidrograma unitario es un gráfico que muestra las variaciones que sufre con el tiempo la escorrentía producida por una lluvia de duración y profundidad unitarias, distribuida uniformemente sobre toda la cuenca.

Se han desarrollado técnicas que relacionan características morfométricas de la cuenca (área, perímetro, pendiente, etc.) con características del hidrograma unitario (tiempo al pico, caudal pico, tiempo base, etc.). Estas relaciones se conocen con el nombre de hidrogramas unitarios sintéticos. Los modelos de este hidrograma más utilizados en Colombia son Snyder, Williams y Hann, y Servicio de Conservación de Suelos (SCS). Una descripción detallada de estos métodos y su utilización puede verse en Vélez Otálvaro y Smith Quintero (1994).

4.4.5.3 Regionalización de parámetros

Según la expresión de Ven Te Chow para estimar un caudal máximo o mínimo, es necesario conocer la media y la desviación estándar de los caudales. El "Atlas Hidrológico de Colombia" (UPME & Universidad Nacional de Colombia, 2000) tiene varias expresiones para hallar estos parámetros en el país. Para la región andina, por ejemplo, se tienen las siguientes:

$$\mu_{Max} = 21{,}543\left(P - E\right)^{0{,}7167} A^{0{,}7167}$$

$$\sigma_{Max} = 15{,}2844\left(P - E\right)^{0{,}5357} A^{0{,}5357}$$

donde:
$\boldsymbol{A}$: área de la cuenca en [km2]
μ_{Max}: media estimada anual de los caudales máximos en [m³/s]
σ_{Max}: desviación estándar estimada anual de los caudales máximos en [m³/s]
$\boldsymbol{P}$: precipitación promedia sobre la cuenca en [mm/año]
$\boldsymbol{E}$: evaporación promedia sobre la cuenca en [mm/año]

El caudal máximo asociado a un período de retorno dado se puede hallar usando la ecuación de Ven Te Chow:

$$Q_{Tr} = \mu_{Max} + K_{Tr}\,\hat{\sigma}_{Max}$$

Donde $\boldsymbol{K}$ es el factor de frecuencia de la distribución de valores extremos. Generalmente se usa la distribución Gumbel, donde el factor de frecuencia para un período de retorno Tr se puede estimar así:

$$\mathrm{K} = -\frac{\sqrt{6}}{\pi}\left\{0.577 + \mathrm{h}\left[\mathrm{h}\ \mathrm{T_r} - \mathrm{h}\left(\mathrm{T_r} - 1\right)\right]\right\}$$

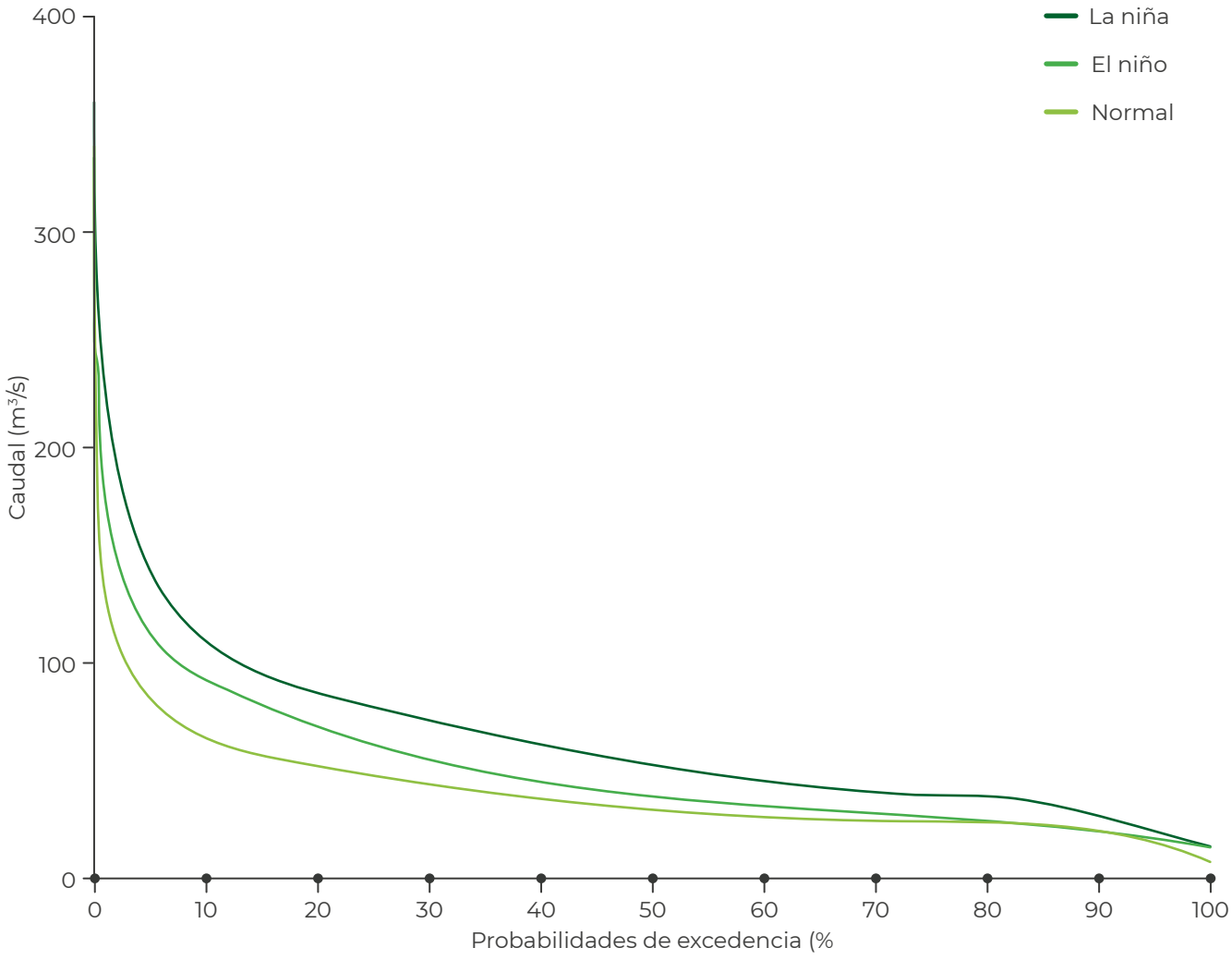
Información detallada de esta metodología se puede consultar en Maidment (1994).

4.4.6

Curva de duración

La curva de duración es un procedimiento gráfico para el análisis de la frecuencia de los datos de caudales. Es una gráfica que tiene el caudal (Q) como ordenada y el número de días del año (generalmente expresados en porcentaje de tiempo) en que ese caudal (Q) es excedido o igualado como abscisa (Figura 18).

Figura 18. Curva de duración de caudales de la estación Corea del IDEAM. Fuente: SHI & Goliat, 2020



La ordenada Q para cualquier porcentaje de probabilidad representa la magnitud del flujo en un año promedio que espera que sea excedido o igualado un porcentaje (P) del tiempo. La curva es un insumo indispensable para el modelo hidráulico de recarga de sedimentos. Las curvas se determinan para años normales, Niño y Niña, tal como se muestra en la figura antes mencionada.

En caso de que la cuenca no tenga registros de caudal, esta curva se puede construir con los datos de la estación más cercana con condiciones de lluvia y climáticas semejantes (Vélez Otálvaro & Smith Quintero, 1994; Chow *et al.*, 1988). A partir de esta curva se determinan los caudales medios para cada temporada normal, El Niño y la Niña.

Recomendaciones

» Cuando se encuentre disponible, puede utilizarse información de Corporaciones Autónomas Regionales (CAR), universidades y entes privados.

» La información pluviográfica y de caudales debe analizarse aplicando los test estadísticos corrientes: detección de tendencias en la media o la varianza y detección de valores anómalos.

» En caso de que no existan registros hidrológicos, se recomienda aplicar, por lo menos, dos metodologías diferentes para hallar caudales máximos asociados a varios períodos de retorno.

» Dada la longitud de la serie de registros de precipitación o caudal en Colombia, lo más recomendable es utilizar la distribución Gumbel para valores extremos.

Más información

» Wilches, S. (2001). *Estudio de las propiedades de invarianza de las precipitaciones máximas puntuales en el departamento de Antioquia* [tesis de maestría]. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

» Unidad de Planeación Minero-Energética [UPME] & Universidad Nacional de Colombia (2000). Atlas Hidrológico de Colombia.

» Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM] (2007). *Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua. IDEAM, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.* www.ideam.gov.co

» Maidment, D. (ed.) (1994). *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill.

» Vélez Otálvaro, M., & Smith Quintero, R. (1994). *Hidrología de Antioquia*. Secretaría de Obras Públicas de Antioquia.

» SHI & Goliat (2020). Estimación de la dinámica de recarga de sedimentos en un tramo del río Cucuana, municipios de Ortega y San Luis, Tolima. Informe final.

» Organización Meteorológica Mundial [OMM] (2020). *Guía de prácticas hidrológicas. Volumen I. Hidrología – De la medición a la información hidrológica*.

» Páginas web de las corporaciones ambientales del país

4.5

Estudios de hidráulica fluvial

La hidráulica fluvial estudia los efectos del clima sobre el comportamiento de los ríos, y las modificaciones que puedan ocasionar los eventos climáticos y las intervenciones antrópicas. Un río está caracterizado por su caudal líquido y su caudal sólido, este último está compuesto por los sedimentos en suspensión y de fondo.

En los estudios de hidráulica fluvial se abordan los ítems necesarios para estimar la recarga de sedimentos en un tramo de interés. Para esto es necesario determinar los principales parámetros morfométricos de la cuenca en la cual se encuentra el título minero, tales como área, pendiente de la cuenca, pendiente del cauce principal, longitud y ancho. Para clasificar las corrientes se determina la llamada curva hipsométrica.

Para el tramo de posible explotación, los trabajos de campo consisten básicamente en realizar aforos de caudal líquido y sólido (ver numeral 4.4.1), con el fin de determinar la curva de caudales sólidos vs caudales líquidos y las batimetrías de la corriente en tramos aguas arriba y aguas abajo del posible sitio de explotación, con las correspondientes granulometrías del material del lecho.

Una vez se hayan cumplido las anteriores etapas, se emplea un modelo de transporte de sedimentos, el cual permite determinar velocidades críticas, comportamiento de orillas y recarga de sedimentos en el tramo de interés para diferentes escenarios de lluvia, teniendo en cuenta los efectos del ENSO (El Niño-La Niña).

En la Figura 19 se resume el proceso de estimación de la recarga, utilizando la información hidrológica y de hidráulica fluvial tomada hasta esta fase de trabajo.

Recomendaciones

» Estimar la recarga para diferentes escenarios de lluvia (teniendo en cuenta los efectos del ENSO), determinar velocidades críticas y comportamiento de orillas, entre otros.

» En lo posible, las mediciones de campo se toman en varios tramos del río, antes y después de la explotación minera.

» Establecer un monitoreo anual de los tramos analizados. Esto permite tener siempre una estimación de la recarga de sedimentos, pues dicho parámetro es dinámico porque está sujeto a variabilidad climática.

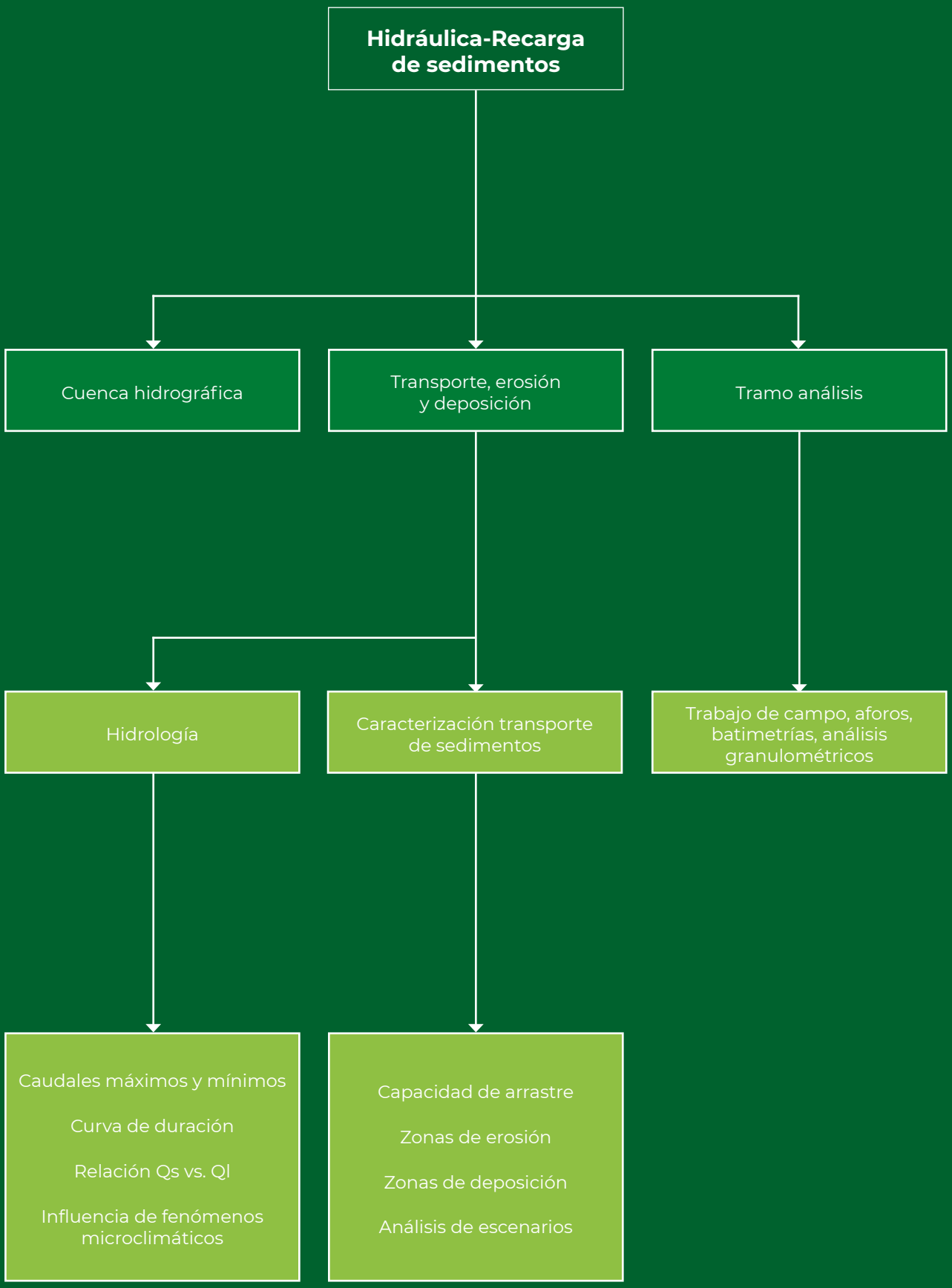
Más información

» Morris, G.L. & Fan, J. (1998). *Reservoir Sedimentation Handbook*. McGraw-Hill.

» Julien, P. Y. (2010) *Erosion and Sedimentation* (2da edición). Cambridge University Press.

» https://www.hec.usace.army.mil/software/HEC-RAS/documentation.aspx (www.usace.army.mil)

Figura 19. Proceso para estimar la recarga de sedimentos. Fuente: autores



4.6

Análisis hidráulico y de sedimentos

Existen numerosos códigos de computador, algunos de libre acceso, que permiten estimar el transporte de sedimentos en una corriente. Esta guía no pretende indicar cuál *software* debe escoger el usuario; sin embargo, para facilitar la comprensión del proceso, se menciona uno de los más conocidos: HEC-RAS. Es un *software* desarrollado por el US Army Corps of Engineers que permite modelar, en una dirección, un flujo estacionario y no estacionario.

El módulo de sedimentos que ofrece el HEC-RAS permite la simulación del transporte de material de arrastre y la estimación de los límites de cada sección transversal resultantes de procesos de erosión y deposición durante períodos de tiempo moderados (generalmente años, aunque es posible la aplicación de eventos de creciente). Las características principales del módulo de sedimentos del HEC-RAS incluyen la opción de modelar un sistema compuesto por varias corrientes, dragado de canales, diversas alternativas de intrusión y diques, además del uso de hasta seis ecuaciones diferentes para el cálculo del transporte de sedimentos.

Para correr el modelo es necesario el levantamiento de secciones transversales a lo largo de la corriente a escalas 1:1 (Figura 20).

El modelo permite obtener perfiles de flujo para las corrientes con datos de entrada que incluyan las diferentes fases hidrológicas que tiene el fenómeno macroclimático ENSO, caudales en época normal, El Niño y La Niña. Para cada una de ellas se debe obtener la curva de duración, las propiedades de los sedimentos y las fuentes de sedimentos, tal como se explicó anteriormente.

Los resultados de la modelación se presentan en figuras (o tablas) como la Figura 21, que presenta las profundidades para varios caudales asociados a una probabilidad de ocurrencia, que se obtiene de la curva de duración.

Figura 20. Secciones transversales para el HEC-RAS. Fuente: www.cursosgis.com

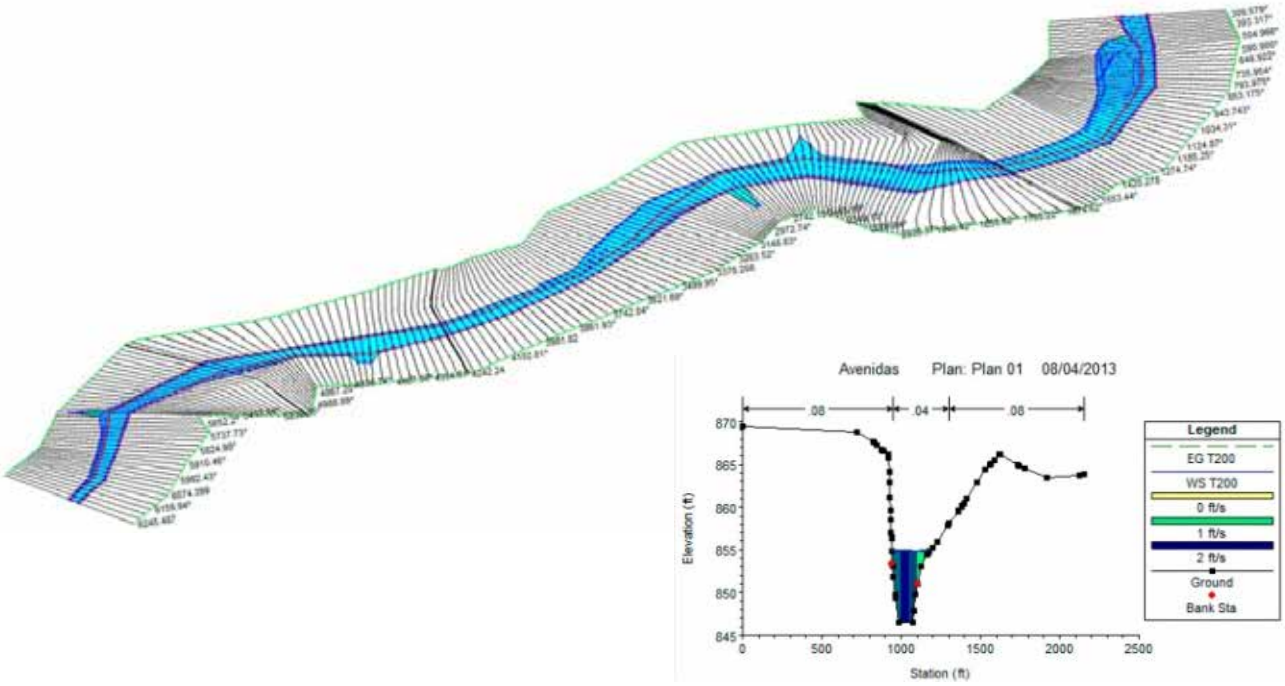
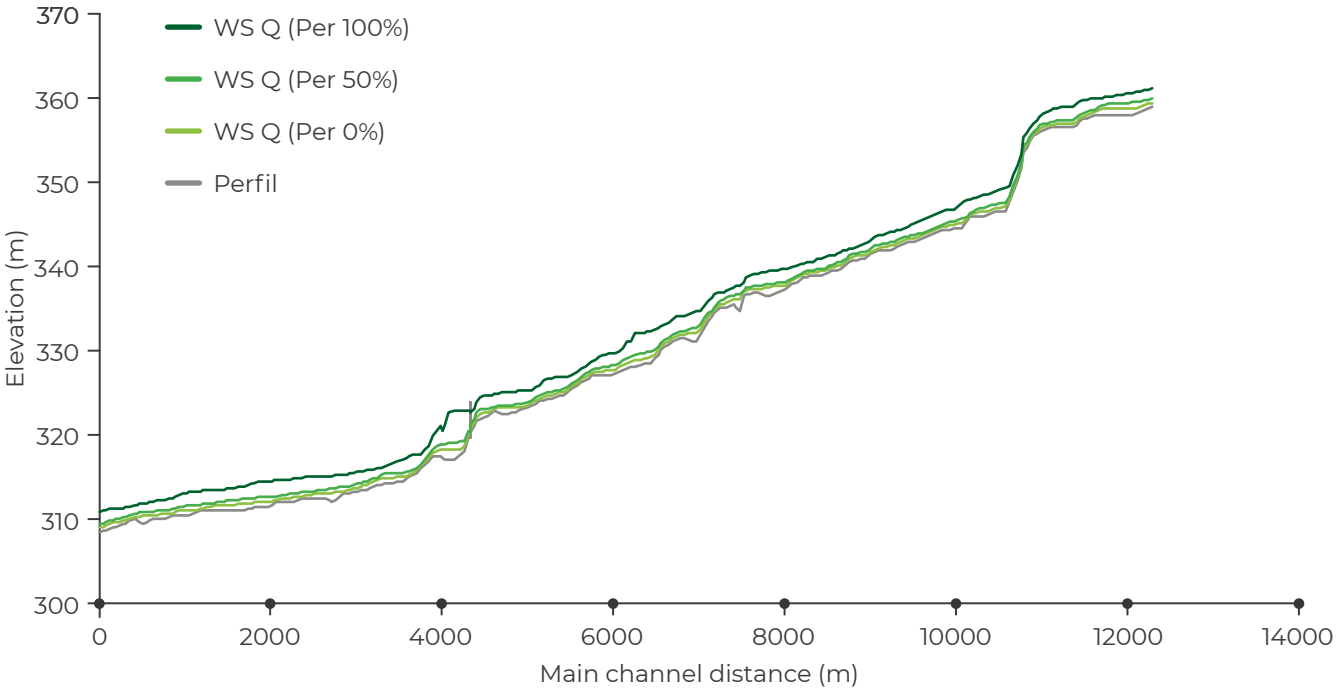


Figura 21. Resultados del HEC-RAS sobre profundidades de flujo. Fuente: US Army Corps of Engineers (2020). Manual HEC-RAS



4.6.1

Diseño e implementación de la modelación hidráulica y de sedimentos

Después de calibrar el modelo hidráulico (con profundidades obtenidas vs. profundidades reales), se hace el análisis de sedimentos a través del módulo SIAM (*Sediment Impact Analysis Method)*, incorporado al HEC-RAS. SIAM es una herramienta de balance de sedimentos que compara la capacidad de transporte anual en tramos de corrientes e indica el exceso o déficit global de sedimentos en los tramos de interés. El programa define zonas de erosión de y sedimentación, estas últimas serían las zonas donde se haría explotación minera. Se debe caracterizar el tramo de interés y los tramos aguas arriba y aguas abajo de este. También hay que tomar granulometrías en orillas y barras en varias épocas del año, que correspondan a condiciones climáticas diferentes.

Además de las características granulométricas, SIAM requiere que el usuario defina propiedades de los sedimentos, la función de transporte, el método de la velocidad de caída, la carga de lavado y la gravedad específica, entre otras. Así, la herramienta predice tendencias anuales de deposición o arrastre de sedimentos.

El módulo SIAM permite estimar en toneladas/año la capacidad de transporte de cada tramo, haciendo uso de las seis (6) funciones de transporte incorporadas en el modelo (Ackers-White, Engelund Hansen, Laursen Copelan, Meyer-Peter y Müller, y Toffaleti y Yang) que pueden presentar diferentes resultados. Corresponde a un profesional entrenado determinar cuáles serían las más adecuadas para cada tramo de estudio. Los resultados que arroja el modelo incluyen balances para cada tramo, recarga anual promedio de sedimentos y granulometría, entre otros.

Con la información anterior se plantean, entonces, diferentes escenarios de recarga de sedimentos para las tres fases del ENSO. El programa permite localizar los tramos donde hay un balance positivo de recarga de sedimentos, estos serían los que presentarían mayor

factibilidad para una explotación de material de arrastre. Igualmente, se pueden hallar las granulometrías del material de recarga de sedimentos —un parámetro fundamental para realizar los estimativos económicos— y se pueden implementar diferentes escenarios para estimar los impactos de explotación de sedimentos a través de una modelación hidráulica, que puede hacerse con el mismo programa HEC-RAS.

Los resultados se presentan en gráficas como la Figura 22, donde se pueden ver las zonas principales de deposición y erosión según la función de transporte seleccionada. También se obtienen estimativos de la granulometría de sedimentos (Figura 23).

Figura 22. Esquemas de transporte utilizando varias ecuaciones. Fuente: Modificado de SHI & Goliat, 2020

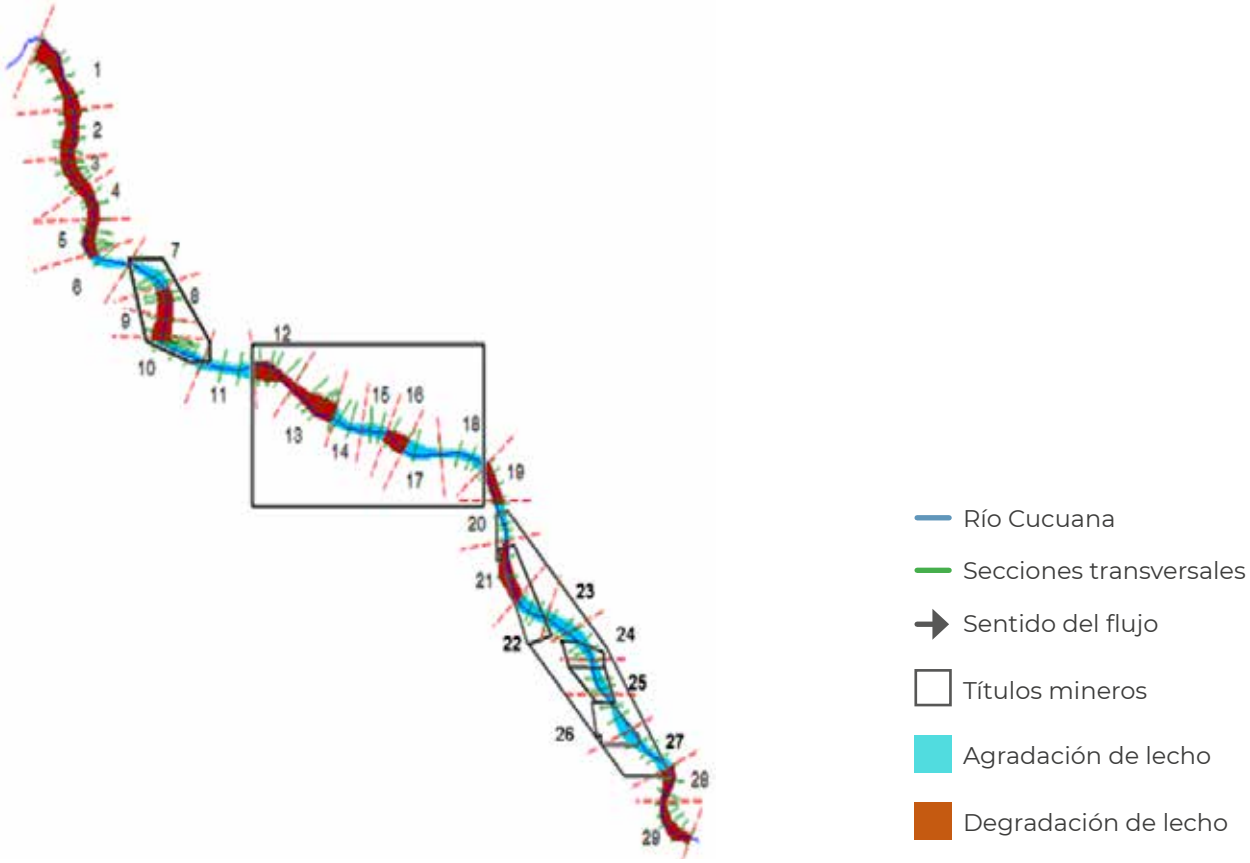
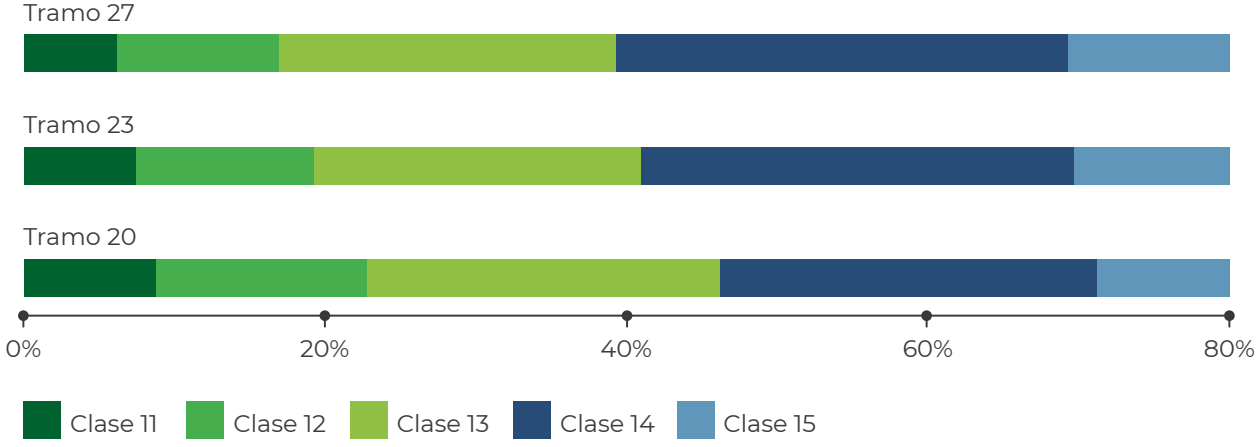


Figura 23. Granulometría de un tramo de análisis. Fuente: Modificado de SHI & Goliat, 2020



En la Figura 24 se muestra un resumen de las etapas de un proceso de estimación de recarga, considerando la integración de los estudios desarrollados hasta esta fase del proyecto.

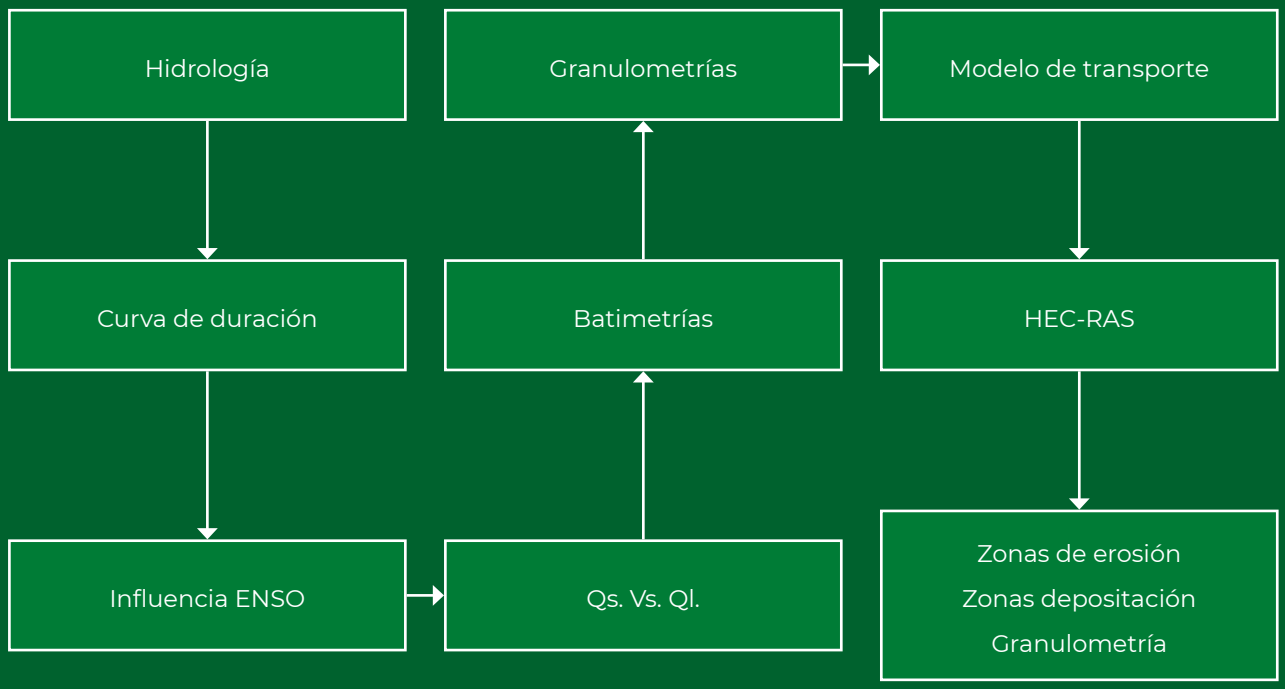


Figura 24. Etapas de estimación de la recarga de sedimentos en una cuenca. Fuente: autores

Recomendaciones

» Evaluar al menos cada 5 años los estimados de caudales máximos.

» Simular escenarios hidráulicos ante cualquier posible modificación del cauce que no esté contemplada en los estudios iniciales.

» Seleccionar adecuadamente el *software* para modelamiento hidráulico.

» Una vez iniciada la operación minera, se deben monitorear anualmente mediante estudios topo-batimétricos los diferentes tramos en los cuales se proyecta explotar los materiales pétreos. Esto se hace con el fin de verificar su geometría y, de esta manera, establecer el volumen de extracción que permita hacer una explotación sostenible.

Más información

» Chow, V.T. (2004) *Hidráulica de canales abiertos* (J.G. Saldarriaga trad.). McGraw-Hill.

» Hudson, N.W. (1997). Medición sobre el Terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía. (boletín de suelos de la FAO 68). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO].

4.7

Técnicas de muestreo

El muestreo es el procedimiento mediante el cual se recolecta porciones representativas de los depósitos de materiales de arrastre para su debida caracterización física y química. El muestreo de material debe llevarse a cabo en la fase de exploración para conocer las características de calidad, distribución de tamaños, redondez y esfericidad, entre otras, que permitan una adecuada caracterización del depósito y estimación de recursos. En la fase de producción, el muestreo es necesario para tener un control de calidad del producto y cumplir con los estándares exigidos en el mercado. Si bien el propósito y la densidad del muestreo son diferentes en las fases mencionadas, la rigurosidad en cuanto a la calidad y protocolos de muestreo debe ser una constante, independientemente de la fase de trabajo.

Como se menciona en el numeral 3.1, es importante establecer protocolos para todos los procesos y actividades desarrollados en las diferentes fases de trabajo. En particular, el proceso de muestreo requiere un seguimiento estricto de los protocolos establecidos para ello, para garantizar consistencia, calidad, materialidad y confiabilidad de los datos.

Previo a la toma de las muestras, es recomendable diseñar la base de datos en la cual se han de almacenar los datos de muestreo. Esta debe considerar todos los parámetros relacionados con la muestra, tales como coordenadas, cota, identificación de la muestra, descripción de campo, análisis a realizar y resultados analíticos, entre otros.

Algunas tareas sencillas, como el diseño de etiquetas para la marcación de las muestras, la selección del empaque, el diseño de fichas para toma de datos en campo y el establecimiento de las medidas de Aseguramiento y Control de Calidad (QA/QC, ver numeral 4.11), facilitan la labor de muestreo y registro de los datos.

4.7.1

Muestreo en la fase de exploración

El muestreo para caracterización de un depósito de materiales de arrastre en la fase de exploración requiere del diseño de una malla que garantice la representatividad del depósito y de la selección adecuada del tipo de muestra que debe tomarse.

La malla de muestreo se define a partir del análisis de los productos y los resultados de los estudios previamente mencionados, que permiten la selección de las áreas con mayor potencial para pasar a la fase de producción. Dicha malla debe garantizar un cubrimiento de todas las áreas de interés y tener la densidad requerida para la estimación de recursos. Con el mapa topográfico base, se proyecta la ubicación de los sitios de muestreo, señalando en campo el sitio con una marca visible, con su respectivo rótulo descriptivo. Esta localización debe validarse en campo para evitar inconvenientes durante las labores de muestreo con los elementos del entorno.

Generalmente, los muestreos en la fase de exploración de materiales de arrastre se realizan en trincheras y apiques ubicados en las áreas de interés. La localización topográfica de estas obras es necesaria para realizar el amarre de la información, el cual debe ser lo más preciso posible, pues dicha información se usa para los modelos, interpretaciones y estimaciones posteriores. El número y la profundidad de estos apiques dependen de la cantidad de material necesario, de la topografía de la zona, de la naturaleza del depósito, de las características del material y de la calidad del producto (Norma ASTM D 75).

Si la inspección visual indica que hay variaciones considerables del material, se deben seleccionar muestras individuales representativas de cada estrato. De ser necesario, debe realizarse un cuarteo de las muestras de mayor tamaño para hacer una reducción a una muestra representativa.

4.7.2

Localización de las muestras

El primer insumo para la correcta localización de las muestras es la topografía del área de interés, levantada a la escala adecuada. Dicha topografía debe tener un sistema de coordenadas definido y debe estar amarrada a puntos de referencia conocidos. La información geográfica presentada a las autoridades estatales de Colombia debe estar amarrada a los puntos de la red de vértices geodésicos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y debe ajustarse a un sistema de coordenadas de referencia. El IGAC es la entidad oficial que soporta la información geográfica del país, por lo tanto, se recomienda reconocer los sistemas vigentes dados por esta autoridad al momento de georreferenciar el proyecto. Es recomendable que la información se maneje bajo un solo sistema; sin embargo, el líder del proyecto debe evaluar la conveniencia de usar para su proyecto los puntos de amarre y sistemas de referencia exigidos por las autoridades estatales.

Actualmente existen diversas técnicas, terrestres o remotas, para el levantamiento topográfico, las cuales varían en costos, tiempo de levantamiento de la información y precisión. Independientemente de la técnica seleccionada, es importante que el líder del proyecto verifique la calidad de dicha información, especialmente la precisión del amarre vertical (cota).

Con la topografía debidamente levantada, la georreferenciación de los sitios de muestreo puede hacerse con mayor precisión. En primer lugar, se localizan las obras realizadas para el muestreo, tales como trincheras, apiques y calicatas, entre otras. Luego se ubica la muestra en la posición en la que fue tomada dentro de dicha obra, especificando profundad, intervalo de la muestra, estrato o capa donde se ubica (si los hubiere).

4.7.3

Registro de datos de muestreo

Los sitios de toma de muestras —como apiques, trincheras, afloramientos— ofrecen información respecto a las condiciones de deposición de los materiales. El objetivo del registro de los datos de muestreo en la etapa de exploración es construir un modelo geológico que incluya las características, la distribución espacial y las relaciones temporales de los distintos eventos que dieron lugar a deposición de los materiales de arrastre.

En este registro se describen características tales como composición de los depósitos, su distribución, las capas o estratos presentes (si los hay), la litología de los clastos, tamaños, color, esfericidad y redondez, entre otras. El líder del proyecto es responsable de verificar los formatos, códigos numéricos o abreviaciones para la litología, al igual que los parámetros físicos y mecánicos, entre otros, que han de registrarse en cada sitio de muestreo. También es recomendable tener un registro fotográfico de las muestras y los sitios de muestreo. Las fotografías deben ser debidamente marcadas y almacenadas.

Recomendaciones

» Establecer desde un principio el sistema de coordenadas más apropiado a utilizar para el proyecto.

» Asegurarse que el método utilizado para el levantamiento topográfico ofrece la precisión necesaria para el amarre de los datos.

» Para los apiques y trincheras, se recomienda contar con puntos de amarre en superficie debidamente georreferenciados, para definir la base y el tope de la excavación.

» Para el caso de las trincheras, debe contarse con la información de cota en superficie, la profundidad y longitud con la georreferenciación de los puntos extremos.

» La ubicación de las muestras tomadas en apiques y trincheras debe incluir su posición en la excavación.

» Como las áreas seleccionadas en el depósito aluvial para el muestreo pueden ser cubiertas por la corriente de agua, según las variaciones de caudal, se recomienda dejar una marca de referencia sobre la margen más cercana para retomar la exploración, en caso de que sea necesario volver a recolectar o verificar dicha información.

» Llevar de manera estandarizada el registro de datos, incluyendo la libreta de campo en formato análogo y digital y el registro fotográfico.

Más información

» Fuentes, L., Troncoso, J. Másmela, O., Páez, N., Quintero, L. & Terraza, R. (2020). *Protocolo para prospección de materiales de construcción. Sistema Geológico Colombiano [SGC].*

4.7.4

Muestreo en la fase de producción

Durante la fase de extracción, es importante establecer protocolos para el muestreo de control de la producción, con el fin de verificar que el producto cumple con las exigencias del mercado. Para ello es necesario diseñar protocolos de muestreo que indiquen, entre otros, frecuencia de muestreo, procedimiento de toma de la muestra, tamaño, análisis de laboratorio requeridos, manipulación, almacenamiento, instrumentos para el muestreo, etc.

La actividad de muestreo del material de arrastre se planea y se desarrolla en el frente de explotación y en el área de beneficio. Se recomienda que el muestreo y análisis de calidad siga las normas y procedimientos nacionales o internacionales (Normas ICONTEC, ASTM D 75/D 75M-14 u otras establecidas para cada caso). En los siguientes párrafos se describen algunos de los muestreos más conocidos.

4.7.4.1 Muestreo de un flujo de descarga de agregados

Se obtienen por lo menos tres incrementos aproximadamente iguales, elegidos al azar, de las unidades que se estén muestreando. Luego se combinan para formar muestras de campo con masas iguales o mayores a los valores mínimos que se recomiendan dentro de la norma ASTM D 75, en las secciones destinadas a cada tipo de material (Norma ASTM D 75).

Cada porción se toma directamente de toda la sección del flujo de material que se está descargando. Es necesario contar con un aparato especialmente fabricado, que consiste en una bandeja de tamaño suficiente para interceptar toda la sección del flujo de descarga y recoger la cantidad requerida de material sin desbordarse. Puede ser necesario tener un conjunto de rieles para soportar la bandeja cuando esta se pase por debajo del flujo de descarga. Hasta donde sea posible, se deben mantener las tolvas permanentemente llenas para disminuir la segregación (Norma ASTM D 75).

4.7.4.2 Muestreo tomado de una banda transportadora

La selección de las unidades que se vayan a ensayar se hace según lo indicado en el primer párrafo del literal anterior. Primero se detiene la banda transportadora mientras se recogen las porciones de material. Hecho esto, se insertan en el material sobre la banda dos elementos con forma apropiada, separándolos de forma tal que se obtenga la porción del peso requerido. Todo el material seleccionado se recoge de forma cuidadosa en un recipiente apropiado, los finos que queden se integran a la muestra utilizando una brocha para pasarlos (Norma ASTM D 75).

4.7.4.3 Muestreo de apilamientos

En el muestreo de material desde apilamientos es muy difícil asegurar muestras imparciales debido a la segregación, que ocurre frecuentemente cuando el material es apilado con partículas gruesas rodando a la base exterior de la pila. Para agregado grueso o mezcla de agregado grueso y fino, se deben emplear equipos mecanizados para hacer una separación en apilamientos pequeños compuestos de materiales tomados de varios niveles y localizaciones en el apilamiento principal, después de lo cual algunas porciones pueden ser combinadas para formar la muestra de campo. Si es necesario indicar el grado de variabilidad existente en la pila principal, muestras separadas deben ser tomadas en áreas separadas de la pila (Norma ASTM D 75).

En donde no es posible emplear equipo mecanizado, las muestras del apilamiento deben ser hechas arriba de al menos tres porciones tomadas del tercio superior, de la zona media y del tercio inferior del volumen de la pila. Una tabla empujada verticalmente en la pila, justamente por arriba del punto de muestreo, ayuda a prevenir la segregación. En el muestreo de agregado fino apilado, la capa externa —la cual puede tener o llegar a ser segregación— debe ser removida, al igual que la muestra tomada por debajo

del material. Tubos muestreadores de aproximadamente 30 mm (1 ¼ pulg.) mínimo por 2 m (6 pies) de longitud pueden ser insertados en la pila en localizaciones aleatorias para extraer un mínimo de cinco porciones de material, para así formar la muestra de campo (Norma ASTM D 75).

En la toma de muestras de arena apilada se deben eliminar las capas superficiales, que por haberse secado pueden presentar segregaciones, y se elige una muestra representativa de la arena húmeda.

4.7.4.4 Muestreo en unidades de transporte

En el muestreo de agregados gruesos desde vagones o cargadores, se debe emplear equipo mecanizado capaz de exponer el material a varios niveles y localizaciones aleatorias. En donde no es posible emplear equipo mecanizado, un procedimiento común es la excavación de tres o más zanjas a través de la unidad en los puntos que, desde una apariencia visual, den un estimado razonable de las características de la carga. El fondo de la zanja estará aproximadamente nivelado, con al menos 0,30 m (1 pie) de ancho y de profundidad bajo la superficie. Con una pala se toman un mínimo de tres porciones a lo largo de puntos con separaciones aproximadamente iguales. Los agregados gruesos en camiones se muestrean esencialmente de la misma manera que se hace para vagones o barcazas, excepto por el ajuste del número de porciones de acuerdo con el tamaño del camión. Para agregado fino en unidades de transporte, pueden usarse tubos muestreadores para extraer un número apropiado de porciones para formar la muestra (Norma ASTM D 75).

4.7.4.5 Muestreo de gravas y arenas de producción

Se entiende por producción en la obra la que se realiza con trituradoras, clasificadoras e instalaciones de lavado portátiles, que se instalan cerca del lugar de trabajo para una obra determinada y con el propósito de suministrar los materiales necesarios. Las muestras se escogen de forma que representen los diferentes materiales perceptibles del depósito (Norma ASTM D 75).

Si el depósito se explota a cielo abierto, se toma la muestra acanalando la superficie verticalmente, de abajo hacia arriba, de forma que muestre la representatividad del material. No debe incluirse en la muestra el material alterado y de capote (Norma ASTM D 75).

4.8

Número y tamaño de las muestras

El intervalo, el tamaño y la cantidad de muestras dependen de las características de los depósitos, su extensión, espesor y distribución dentro del área de interés. Por lo tanto, la cantidad de muestras y su tamaño se definen por el líder del proyecto para su depósito particular, dependiendo de las necesidades de este.

Al determinar la cantidad de muestras que han de tomarse, hay que tener en cuenta la extensión del área que se pretende caracterizar y la homogeneidad del material, pues depósitos con poca variabilidad en la distribución de los materiales pueden requerir menor cantidad de muestras. En cualquier caso, es importante garantizar una densidad de muestreo que genere confianza en la estimación de recursos.

Los tamaños de las muestras para control de la producción sugeridos en la Tabla 2 proporcionan material suficiente para graduaciones rutinarias y análisis de calidad (Norma Invias E-201).

Máximo tamaño nominal de agregados [A]	Masa mínima aproximada de muestras de campo en kg (lb) [B]
Agregado fino	
2,36 mm (n.°8)	10 (25)
4,75 mm (n.°4)	10 (25)
Agregado grueso	
9,5 mm (3/8”)	10 (25)
12,5 mm (1/2”)	15 (35)
19,0 mm (3/4”)	25(55)
25,0 mm (1”)	50 (110)
37,5 mm (1 1/2”)	75 (165)
50,0 mm (2”)	100 (250)
63,0 mm (2 1/2”)	125 (275)
75,0 mm (3”)	150 (330)
90,0 mm (3 1/2”)	175 (385)

[A] Para agregados procesados, el máximo tamaño nominal de las partículas es el del mayor tamiz sobre el cual se permite que se retenga algo de material.

[B] Para combinaciones de agregados finos y gruesos (por ejemplo, materiales de subbase o base), el mínimo peso será el peso que aparece en la tabla para el agregado grueso de más 10 kg (25 lb).

Tabla 2. Tamaño sugerido de las muestras. Fuente: Norma Invias E-201, Norma ASTM D 75

Estos tamaños dependerán del tipo de material, de su tamaño máximo y de los ensayos a los cuales será sometida la muestra. Los estándares de aceptación y pruebas de control están cubiertos por los estándares ASTM, donde se especifica la porción de la muestra de campo requerida para cada ensayo.

La masa puede estar basada en el tipo y número de ensayos a los que el material será sometido (Norma ASTM D 75). Las muestras pueden ser simples, es decir, que se toman en un solo sitio y de una vez; o pueden ser compuestas, cuando de diferentes puntos se toman incrementos para conformar una sola muestra de masa mayor. Estas muestras es posible analizarlas independientemente, para conocer la variabilidad de la fuente, o en su conjunto, para obtener la calidad media del material. Cuando se pretenda obtener la calidad media, las muestras individuales pueden unirse total o parcialmente para formar una muestra compuesta, de la cual, por reducción de tamaño mediante cuarteo, se obtiene la muestra para su envío al laboratorio.

Recomendaciones

» Tomar la muestra en puntos diferentes al de descarga, inicial o final, de tolvas o bandas transportadoras, pues en estos puntos se aumentan las posibilidades de obtener material segregado.

» Las condiciones de la muestra deben evaluarse de acuerdo con el destino que tenga el material de arrastre (Norma Invias E-201 13).

Más información

» Instituto Nacional de Vías [INVIAS] (2012). Normas y especificaciones INVIAS. Sección 200 - Agregados Pétreos.

» Instituto Nacional de Vías [INVIAS] (2012). Norma INVIAS E-201 13. Muestreo de agregados para construcción de carreteras.

» American Society of Testing Materials [ASTM] (s.f.). Norma ASTM D 75. Práctica Normativa para el Muestreo de Agregados.

4.9

Cadena de custodia

La cadena de custodia de una muestra se define como el conjunto de procedimientos controlados que permiten la trazabilidad de la muestra, desde el sitio de muestreo hasta el laboratorio analítico. Esta cadena incluye las medidas de seguridad tomadas para garantizar que no se genere pérdida de información o contaminación del material en el trayecto señalado.

La cadena de custodia se plasma en protocolos que incluyen, entre otros, los formatos para el registro de los responsables de la muestra en cada tramo, las condiciones que debe cumplir el empaque para asegurar la integridad de la muestra, el formato de requerimiento al laboratorio analítico y —en caso de que sean necesarios— los sellos de seguridad que deben llevar las muestras individuales o los lotes.

Se recomienda que cada responsable de recibir y entregar las muestras verifique la cantidad de unidades recibidas y entregadas, la integridad de los empaques y de los sellos de seguridad (si los hay), la coherencia entre los datos de los formatos de transporte y el requerimiento de laboratorio, y la legibilidad de las etiquetas de cada empaque.

Recomendaciones

» Seleccionar un empaque de calidad suficiente, de acuerdo con el tipo de muestra, que resista las condiciones del envío sin que haya pérdidas o contaminación.

» Los empaques deben estar debidamente marcados, con una etiqueta única y legible.

» Hacer un requerimiento claro al laboratorio de los ensayos solicitados.

4.10

Análisis de laboratorio

La caracterización de los materiales de arrastre incluye los análisis de laboratorio, cuyos resultados permiten definir la calidad del material. Los ensayos de laboratorio pueden ser químicos o físicos. Los materiales de arrastre son principalmente usados como insumos en la construcción de infraestructura, ya sea como material crudo o como material beneficiado en forma de agregado en la fabricación de concretos hidráulicos o asfálticos. Por lo tanto, las pruebas de laboratorio y la calidad de los datos están sujetos a las normas y procesos que reglamentan cada uso del material.

El manejo y presentación de los resultados puede depender tanto de procedimientos internos (laboratorios propios) como de procedimientos externos (laboratorios externos). En ambos casos se recomienda la especificación de los procedimientos, desde la preparación de las muestras hasta los estándares, acreditaciones y certificaciones a que haya lugar.

Una buena práctica consiste en seleccionar el laboratorio más conveniente para los análisis. Algunas de las características que debe tener un buen laboratorio son: que cuente con acreditaciones de sus procesos y/o ensayos, que los tiempos para la entrega de resultados sean adecuados, que tenga protocolos para el control de calidad, que se observe orden y limpieza en las instalaciones y que entreguen certificados analíticos protegidos. Es importante mantener una comunicación constante con el laboratorio, ya que la calidad de los análisis queda en sus manos una vez entregada la muestra.

Las distintas técnicas analíticas pueden ser agrupadas en análisis petrográficos y físico-mecánicos, los cuales permiten definir la calidad y uso del material pétreo. Algunos de los ensayos más comunes se resumen a continuación:

4.10.1

Ensayos físicos

Consisten en determinar porcentajes de partículas fracturadas en un agregado grueso; densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso; análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos; índice de aplanamiento y de alargamiento; densidad BULK (peso unitario); porcentaje de vacíos en estado suelto y compacto; determinación de terrones de arcillas y partículas deleznables; curva de granulometría; y partículas livianas.

4.10.2

Ensayos mecánicos

Son análisis de laboratorio relacionados con la solidez (sanidad) de los agregados para el uso de sulfato de sodio o sulfato de magnesio, la dureza y resistencia al desgaste por abrasión e impacto, y la determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión.

4.10.3

Ensayos petrográficos

A partir de la observación macroscópica, se describen las características en muestra de mano, como tamaño de grano, mineralogía principal (cuando sea identificable), color y textura. Con base en secciones petrográficas, se realizan descripciones mineralógicas detalladas —que incluyen la evaluación cualitativa de las formas, redondez y esfericidad de las partículas— y se determinan cuantitativamente la composición mineralógica, el contenido de sílice amorfa y partículas livianas, los compuestos de azufre en agregados, la reactividad potencial álcali agregado (método de barras de mortero) y los cloruros solubles en agua presentes en mezclas de agregado.

Recomendaciones

» Analizar las propiedades físico-mecánicas teniendo en cuenta las normas NTC e INVIAS en cuanto a las especificaciones de agregados finos (límite para sustancia dañinas) y gruesos (requisitos de gradación) para el concreto.

» Analizar las propiedades físico-mecánicas teniendo en cuenta la norma INVIAS en cuanto a las especificaciones de los agregados para afirmados, bases y subbases granulares. Además, chequear las franjas granulométricas de los materiales desarrolladas en la norma.

» Realizar el análisis petrográfico teniendo en cuenta los procedimientos propuestos en la norma ASTM C-95 para la inspección petrográfica de muestras de agregados.

» Mantener una comunicación constante con el laboratorio analítico y exigir los certificados de los análisis en formatos protegidos.

Con base en secciones petrográficas, se realizan descripciones mineralógicas detalladas

Más información

» Guías para elaboración de ensayos de Clasificación de suelo (ASTM D 2487), Granulometría (ASTM C 422), Límites de Atterberg (ASTM D 4318), Compactación de suelos (ASTM D 1557), Densidad In Situ – Cono y Plato (ASTM D 1556), Densidad In Situ - Densímetro Nuclear (ASTM D 2922).

» Normas para los agregados gruesos: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC]. Norma Técnica Colombia 93 (NTC 93). Determinación de la resistencia al desgaste de los agregados gruesos mayores de 19 mm, utilizando la máquina de los ángeles; Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC]. Norma Técnica Colombia 98 (NTC 98). Método de ensayo para determinar la resistencia al desgaste de agregados gruesos hasta de 37,5 mm, utilizando la máquina de los ángeles.

» American Society of Testing Materials [ASTM] (s.f.). Norma ASTM D 75-87.

4.11

Aseguramiento y Control de Calidad (QA/QC)

También conocido por sus siglas en inglés como QA/QC *(Quality Assurance/Quality Control)*, corresponde a los protocolos establecidos en torno a los procedimientos involucrados en el muestreo, análisis y almacenamiento de datos en las operaciones mineras que buscan garantizar la veracidad de la información recolectada. El Aseguramiento de la Calidad (QA) comprende las actividades prestablecidas y sistemáticas que garantizan que un proceso alcance un grado de calidad aceptable, y se establece con el fin de prevenir posibles problemas que puedan ocurrir en un proceso. El Control de la Calidad (QC) tiene como objetivo la detección de problemas que ocurren aun con protocolos de QA, por tanto, el QC permite evaluar la calidad realmente alcanzada con las actividades de aseguramiento de calidad (Simón, 2013).

La práctica más conveniente es tener una persona responsable del QA/QC de toda la empresa, quien coordina el trabajo de QA/QC en geología, mina, planta y laboratorios (interno y/o externos), y prepara reportes mensuales sobre el cumplimiento con los protocolos de QA/QC de la empresa y las acciones correctivas tomadas en caso de detección de problemas.

Normalmente, un programa de QA/QC para muestreo en exploración incluye la utilización de blancos, estándares y duplicados para controlar la contaminación, exactitud y precisión del laboratorio, respectivamente. Sin embargo, en el caso de los materiales de arrastre las muestras de control más significativas son los duplicados, que permiten evaluar la repetibilidad de los análisis y la precisión del laboratorio. Se entiende por precisión la habilidad de repetir consistentemente los resultados de una medición en condiciones similares (Simón, 2013).

Para la elaboración de un duplicado se parte de la muestra original, la cual debe tener un volumen suficiente para suministrar material para ambas muestras (original y duplicado), esta se cuartea de manera que se garantice la distribución homogénea de las partículas en ambas muestras. La muestra duplicada debe tener la anotación en la base de datos, pero al laboratorio se envía como una muestra normal dentro del lote.

Recomendaciones

» Elaborar los protocolos de QA/QC desde la planeación del proyecto y ajustarlos en la medida que se avanza en las fases de trabajo.

» Seleccionar un método de cuarteo que garantice la distribución homogénea del material.

» Tener un registro interno de los duplicados y evaluar el comportamiento del laboratorio periódicamente.

Más información

» Abzalov, M. (2011). Sampling Errors and Control of Assays Data Quality in Exploration and Mining Geology. En Ivanov, O. (ed.), *Applications and Experiences of Quality Control*. IntechOpen.

» Instituto Nacional de Vías [INVIAS] (2012). Normas y especificaciones INVIAS. Sección 200 - Agregados Pétreos.

» Instituto Nacional de Vías [INVIAS] (2012). Norma INVIAS E-202. Reducción de muestras de agregados por cuarteo.

Seleccionar la herramienta más conveniente para el almacenamiento de datos desde el inicio del proyecto **facilita la administración de los datos.**

4.12

Bases de datos

La base de datos es una herramienta —tanto de almacenamiento como de análisis de información— que permite compilar en un solo lugar la mayoría de datos que serán considerados para el análisis de resultados de exploración y para las estimaciones de recursos y reservas, así como en la reconciliación de resultados durante la operación.

Las bases de datos deben estar diseñadas de manera que la información se presente en una secuencia lógica desde el momento de su captura en campo, para luego llevarla al registro digital, de manera que se faciliten su entendimiento y posterior manejo y administración. Se deben hacer todos los esfuerzos necesarios para obtener datos precisos y confiables desde el comienzo.

Seleccionar la herramienta más conveniente para el almacenamiento de datos desde el inicio del proyecto facilita la administración de los datos. Para este propósito, existen en el mercado programas muy sofisticados con posibilidades de diseñar de perfiles de usuario, gran capacidad de almacenamiento, opción de trabajo remoto y otras herramientas que facilitan el uso, seguridad y disponibilidad de los datos. Además, algunos *software* de uso libre también ofrecen muchas posibilidades para la administración de los datos.

La selección de la herramienta más conveniente estará determinada por las necesidades y recursos del proyecto, pero, sea cual sea la opción escogida para la administración de los datos, debe procurarse un manejo cómodo, ágil y con la menor manipulación posible de la información. Igualmente, hay que establecer protocolos para almacenamiento, revisión, actualización, validación y corrección de los datos, así como de respaldo de la información. Dichos protocolos deben estar al día y disponibles para todos los usuarios de la base de datos.

La estandarización en el registro de la información asegura que todos los profesionales almacenen información con la misma estructura durante el desarrollo del proyecto. Los datos deben ser lo suficientemente detallados para lograr el nivel de comprensión deseado en cada fase operativa. La variedad y el alcance de los formularios individuales debe proporcionar colectivamente una imagen actualizada de la perspectiva en cada etapa de su desarrollo. Tenga en cuenta que si bien es ventajoso utilizar las mismas hojas de datos sin cambios en un programa, es posible que se necesiten algunos ajustes. La etapa de muestreo también es una etapa de aprendizaje, y es posible que sea necesario realizar alguna revisión para garantizar que los métodos seleccionados funcionarán y proporcionarán toda la información requerida (MacDonald, 2007).

Recomendaciones

» Seleccionar herramientas para gestionar la información, sistemas operativos y lenguajes de programación con los que se pueda migrar la información con facilidad a nuevos sistemas y aplicaciones a medida que avanzan los requerimientos técnicos del proyecto.

» Establecer un sistema de nomenclatura para la toma de información que permita realizar el seguimiento y la correlación de la información a lo largo del proyecto, y que permita que todo el equipo de trabajo use los mismos parámetros en la recolección y almacenamiento de datos.

» Definir el perfil de los usuarios que tendrán acceso y los correspondientes niveles de autorización para la manipulación de la base de datos.

» Diseñar la base de datos de manera que soporte diferentes tipos de archivos.

» Elaborar protocolos de manejo de la base de datos (ingreso de datos, modificaciones).

» Incluir anotaciones acerca de los supuestos en los campos sin información.

» La información en las bases de datos debe estar completa y ser transparente.

» Establecer las relaciones entre los diferentes datos.

» Diferenciar datos crudos de datos interpretados.

» Cargar los datos con la menor manipulación posible.

» Realizar chequeos periódicos y validación de los datos.

» Realizar las debidas correcciones en caso de errores en los datos, y documentar los cambios realizados.

» Respaldar periódicamente la base de datos en un lugar seguro y con accesos restringidos solo para los usuarios autorizados.

» Verificar y dejar muy claras las unidades que se manejan para los diferentes datos numéricos.

» Documentar los cambios realizados a la base de datos, estableciendo año, responsable del cambio, modificaciones aplicadas a la base de datos e implicaciones que tienen sobre los datos existentes.

» Registrar los datos de producción y realizar reconciliación de estimado vs. producido.

Más información

» Comité de Información Geocientífica del Gobierno Australiano (GWG, 2017)

» Bases de datos relacionales (British Geological Survey)

4.13

Almacenamiento de la información

El almacenamiento y seguridad de la información hace referencia a la conservación ordenada y sistemática de todos los datos generados en las diferentes fases del proyecto, ya sean físicos o digitales, de manera que estén disponibles para cualquier necesidad que se pueda tener. La información puede ser de dos tipos: datos observados y medidos o datos interpretados (CIM Mineral Resource & Mineral Reserve Committee, 2019). La información tomada en cualquier etapa del proyecto es valiosa para la empresa, por lo tanto, deben hacerse todos los esfuerzos posibles para su conservación.

Una de las mayores dificultades en las empresas con el cambio de personal es la pérdida en la trazabilidad de la información, debido a la ausencia de procedimientos claros y documentados acerca del almacenamiento y la seguridad de la información. Un sistema de archivo organizado y documentado permite que, independientemente de la rotación de personal, la información esté inalterada y disponible.

La información física comprende principalmente las muestras originales y/o testigos, así como los rechazos de los análisis de laboratorio. El proyecto debe destinar un lugar dentro de sus instalaciones para el almacenamiento de estos materiales, y debe considerar como parte del planeamiento toda la infraestructura y logística requeridas para su adecuada administración. Se recomienda proyectar el tiempo durante el cual deben preservarse estos materiales y planificar cómo debe ser su disposición final.

La información análoga consiste en libretas de campo, fichas de muestreo, mapas de campo y, en general, toda la información que inicialmente se captura en papel. Después de transferir los datos de estos documentos a las bases de datos, la recomendación es escanearlos en PDF para conservar un respaldo tanto físico como digital. El proyecto debe destinar un lugar para el adecuado almacenamiento de los archivos análogos y establecer los protocolos para su manejo y preservación.

La información digital es uno de los insumos que debe guardarse con más cuidado, ya que generalmente compila todos los demás datos. Alguno estándares internacionales recomiendan a los usuarios guardar copias de certificados analíticos de laboratorio, registros geológicos y toda aquella información referenciada en el reporte técnico, o aquella usada como como base para el reporte técnico, por un periodo de 7 años. Sin embargo, el periodo más conveniente para almacenamiento de la información debe ser determinado según la conveniencia para el proyecto.

Para el almacenamiento de la información digital deben considerarse aspectos como: sistema y estándares de almacenamiento, administración de los datos, custodia de los datos, respaldos periódicos y accesibilidad, entre otros.

La información física comprende principalmente las muestras originales y/o testigos, así como los rechazos de los análisis de laboratorio.

4.14

Seguridad de la información

Los datos generados en el desarrollo de las fases previas se convierten en la información base para las estimaciones, supuestos y conclusiones que se hagan en las fases que siguen de aquí en adelante. Por esta razón, es importante garantizar que dichos datos sean manejados de manera segura.

De acuerdo con la Norma Técnica Colombiana NTC-ISO/IEC 27001 de 2013, las condiciones para garantizar la seguridad de la información tienen como base tres principios básicos: confidencialidad, integridad y disponibilidad. Estos principios son fundamentales para mantener su fiabilidad y calidad.

» La confidencialidad se refiere a que la información está disponible y es divulgada únicamente a individuos, entidades o procesos autorizados.

» La disponibilidad se refiere a la accesibilidad hacia un grupo de individuos, una entidad o un proceso autorizados.

» La integridad de la información se refiere a que ella está libre de modificaciones o alteraciones por terceros, sea por accidente o de forma intencionada.

Recomendaciones

» Conservar los archivos de soporte como libretas de campo, formatos, reportes escritos, mapas de campo y fotografías, y digitalizar dichos archivos.

» Definir una estructura de almacenamiento de la información de soporte.

» Realizar auditorías al almacenamiento de la información.

» Establecer protocolos, manuales o procedimientos de seguridad y almacenamiento, y auditarlos periódicamente con el fin de verificar el cumplimiento por parte de las personas y entidades involucradas.

Más información

» Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC] (2013). Norma Técnica Colombiana NTC-ISO/IEC 27001. Técnicas de seguridad. Sistemas de gestión de la seguridad de la información (SGSI). Requisitos.

4.15

Densidad de la información

La densidad de la información hace referencia a la cantidad y calidad de los datos disponibles al final de la fase de exploración, para proceder con la estimación de recursos.

Es importante realizar una revisión de los datos disponibles y de su calidad para verificar que las áreas de interés han sido caracterizadas, que los datos son satisfactorios y suficientes para realizar las estimaciones con la menor incertidumbre posible, y que se han aplicado los criterios más acertados para la selección de las áreas de interés.

La densidad de la información es uno de los parámetros a tener en cuenta para la categorización de recursos minerales, pues las zonas donde haya datos de control suficientes ofrecen mayor confianza que aquellas con pocos datos. Por lo tanto, en el primer caso se podría llegar a las categorías de recursos indicados o medidos; y en el segundo caso, a recursos inferidos. Esto, por supuesto, depende de las particularidades del área, de la continuidad del depósito y de la distribución de calidades.

5

Estimación de recursos minerales

Para llegar a una estimación de recursos de materiales de arrastre confiable, la presente guía sugiere considerar una serie de pasos, los cuales se describen a continuación:

De acuerdo con el *Estándar Colombiano para el reporte público de resultados de exploración, recursos y reservas minerales - ECRR* (Comisión Colombiana de Recursos y Reservas [CCRR], 2018), un recurso mineral se define como

> Una concentración u ocurrencia de un material sólido con interés económico, en o sobre la corteza terrestre, de tal forma, cantidad, tenor o calidad, que hay perspectivas razonables para una eventual extracción económica. La ubicación, cantidad, calidad, continuidad y otras características geológicas de un Recurso Mineral son conocidas, estimadas o interpretadas a partir de evidencias y conocimientos específicos, incluyendo el muestreo (CCRR, 2018, pág. 18).

Tomando como punto de partida esta definición, la fase de estimación de recursos consiste en interpretar la ubicación, geometría, cantidad y distribución de calidad del depósito. Como se menciona en el numeral 3.1, los materiales de arrastre se ubican en cauces activos y orillas de las corrientes, los cuales constituyen ambientes particularmente sensibles en términos ambientales y sociales. La disponibilidad de material es dinámica, ya que depende de factores climáticos, fisiográficos e hidrográficos, y este tipo de proyectos requiere una ubicación estratégica respecto a los centros de consumo. Por lo tanto, la estimación de recursos debe considerar de manera preliminar los factores de tipo ambiental, social, técnico, económico y de infraestructura que influyen en el proyecto.

Para llegar a una estimación de recursos de materiales de arrastre confiable, la presente guía sugiere considerar una serie de pasos, los cuales se describen a continuación:

5.1

Modelo geológico

Los modelos geológicos son representaciones gráficas en tres dimensiones de los cuerpos geológicos *in situ*; es decir, es la envolvente que se traza alrededor del área de interés dentro de la cual se definen los volúmenes de material, distribución de calidad y geometría del depósito. Generalmente, los modelos geológicos se componen de dominios geológicos, que se definen como zonas de características geométricas y/o de calidad similares.

Para la construcción del modelo geológico, se requiere que la base de datos haya sido validada y aprobada para su uso en la interpretación geológica. Además, la información que va a ser interpretada en el modelo geológico debe ser suficiente, pertinente y actual con el fin de reducir al máximo la incertidumbre.

El modelo geológico puede construirse manualmente o utilizando *software* de modelamiento. Esto depende de la complejidad del depósito, de la suficiencia de los datos y del acceso a herramientas digitales, algunos *software* de modelamiento son de uso libre.

En las áreas con presencia de los materiales de arrastre, los depósitos ubicados en el cauce activo tienen parámetros diferentes a los que se encuentran en las vegas o llanuras de inundación, ya que en el primer caso se presentan condiciones dinámicas, mientras que en el segundo las condiciones son más estáticas. Por esto, es posible considerar un modelamiento por separado para cada zona.

En el caso específico de los depósitos ubicados en el cauce activo —que implican una dinámica de recarga de material—, es importante actualizar periódicamente el modelo geológico, considerando las condiciones de transporte, sedimentación y degradación del cauce; topografía; batimetrías; y aforos líquidos y sólidos.

Recomendaciones

» Alimentar el modelo geológico con datos suficientes y de calidad para reducir el grado de incertidumbre.
» Definir los dominios geológicos, cuando los hay, que conforman el depósito.

» Seleccionar la herramienta más adecuada para el modelamiento, teniendo en cuenta la complejidad del depósito, los datos disponibles y los resultados que se espera alcanzar.

5.2

Técnicas de estimación

La estimación del recurso implica la determinación más aproximada posible de la cantidad, calidad, ubicación, continuidad y otras características del material de interés. Dado que la estimación se realiza a partir de datos puntuales, que se consideran representativos de zonas más amplias, la interpolación y extrapolación de datos siempre hace parte de la estimación. Sin embargo, estas deben hacerse con base en criterios sólidos que garanticen la menor incertidumbre posible. Por esta razón, es necesario evaluar el método más apropiado para dicha interpolación. Algunos de los métodos más conocidos se resumen a continuación.

5.2.1

Métodos clásicos

Los métodos clásicos consisten en la construcción de bloques, áreas, polígonos, triángulos o secciones geométricas a los que se le asignan las variables de calidad medias para la estimación de recursos. Los parámetros de calidad se estiman a partir de la media aritmética o ponderada, y se realiza una interpolación de las variables entre dos puntos contiguos de muestreo. Estos métodos generalmente son manuales y empíricos, y no son adecuados para depósitos con alta variabilidad de los parámetros de calidad o con complejidad estructural.

Los principios de interpretación de estos métodos ,según Popoff (1966), son los siguientes:

» Principio de los cambios graduales (función lineal) entre dos puntos de muestreo: presupone que los valores de una variable (espesor, ley, etc.) varían gradual y continuamente a lo largo de la línea recta que une dos puntos de muestreo contiguos.

» Principio de los vecinos más cercanos o zonas de influencia: el valor de la variable de interés en un punto no muestreado es igual al valor de la variable en el punto más próximo.

» Principio de generalización (analogía) o inferencia geológica: permite la extrapolación de los valores conocidos en los puntos de muestreo a puntos o zonas alejadas, sobre la base del conocimiento geológico o por analogía con yacimientos similares.

Todos estos principios de interpretación son utilizados para la subdivisión del yacimiento mineral en bloques o sectores, los cuales son evaluados por separado y posteriormente integrados para determinar los recursos totales del yacimiento (Popoff, 1966).

Entre los métodos clásicos más conocidos se encuentran: media aritmética, método de los perfiles, método de bloques geológicos, método de los polígonos, método de bloques de explotación, método de los triángulos y método de isolíneas. El profesional líder tiene la responsabilidad de seleccionar el método más conveniente según las características del depósito.

5.2.2

Métodos asistidos por computador

Los *software* de modelamiento permiten procesar gran cantidad de información en poco tiempo, con la aplicación de estadística o geoestadística para estimar las variables. En comparación con los métodos clásicos, ofrecen menor posibilidad de errores en los cálculos. Además, también permiten realizar la estimación en bloques pequeños, posibilitando un análisis más detallado del depósito.

Los programas de modelamiento y estimación incluyen métodos de interpolación, tales como krigeaje, inverso de la distancia y vecino más cercano, entre otros. La selección del método más apropiado depende de la complejidad del depósito, de la variabilidad de los parámetros de calidad y de la disponibilidad de datos. Para el caso de materiales de arrastre, donde la distribución de las calidades tiende a ser homogénea, el vecino más cercano y el inverso de la distancia son adecuados para realizar interpolaciones.

Es necesario comprender que el uso de un software de modelamiento no garantiza la calidad del resultado; el programa facilita los cálculos, la visualización y el manejo de los datos, pero los parámetros de estimación, la calidad de los datos y las restricciones de la estimación son determinadas por el profesional responsable del modelamiento. Por esto, para la ejecución de estimaciones usando métodos asistidos por computador, se recomiendan los siguientes pasos:

» Base de datos: esta debe haber sido verificada y aprobada para su uso en la estimación.

» Análisis exploratorio de datos: es necesario analizar los datos de las diferentes variables a estimar para determinar poblaciones de datos, sesgos, valores medios, valores anómalos, entre otros, y definir los tratamientos a los que haya lugar.

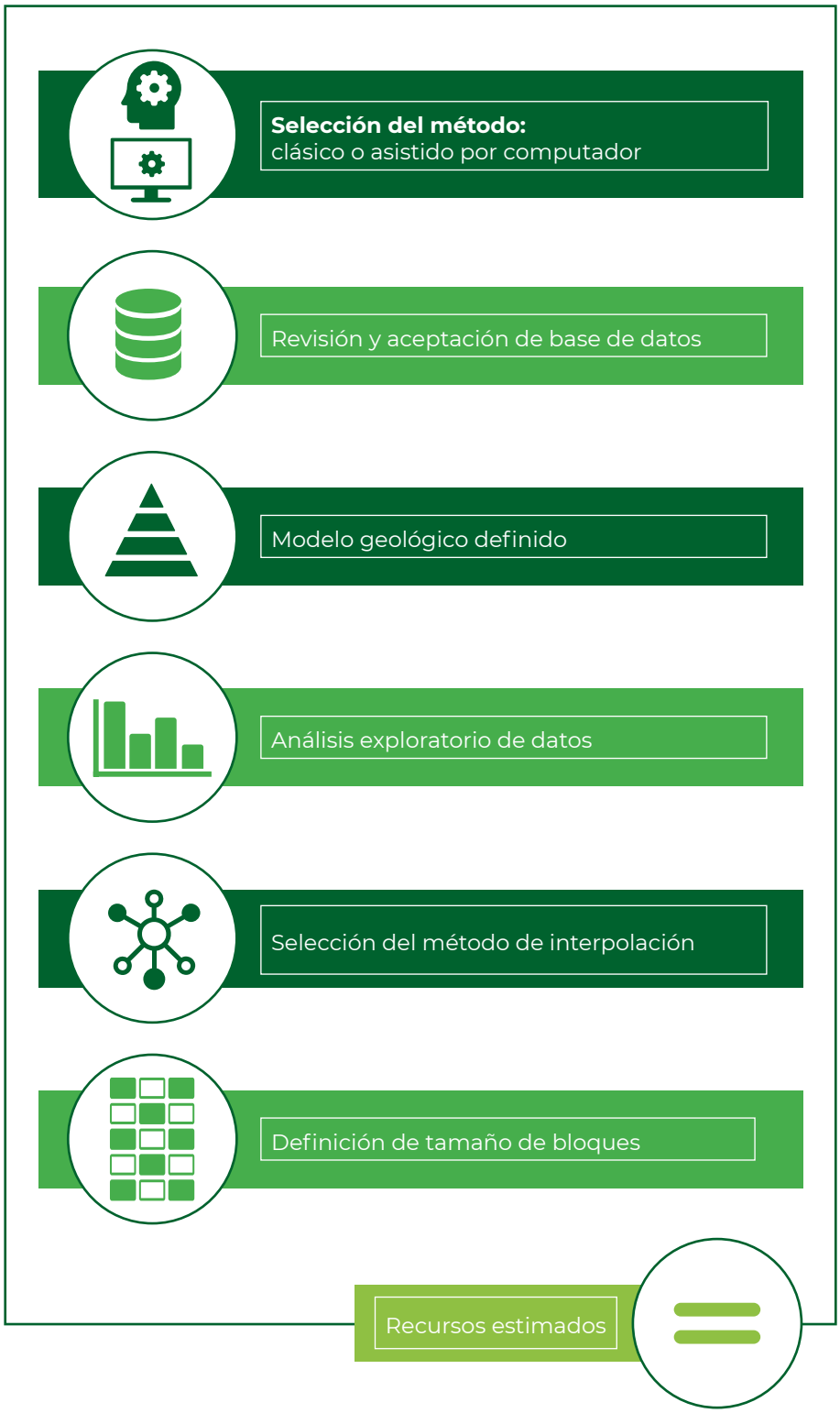
» Modelo geológico: debe haber sido validado y aceptado, y debe tener claros los dominios geológicos en los cuales se hará la estimación.

» En caso de utilizar el método de estimación por modelo de bloques, el tamaño del bloque está en función del método de explotación proyectado.

Generalmente, los depósitos de materiales de arrastre no tienen una alta complejidad geológica o estructural; sin embargo, una sola área puede tener diferentes sectores, cada uno con características particulares. Por ejemplo, en un área puede haber material depositado en llanuras aluviales, con condiciones estáticas, pero también se pueden encuentran depósitos en el lecho del río, que cambian según la dinámica hidrológica. Los métodos aplicados a la estimación de cada zona deben estar adaptados a sus particularidades.

En la Figura 25 se presenta un resumen de los elementos que se recomienda tener en cuenta para la estimación de recursos.

Figura 25. Elementos de análisis para estimación de recursos.
Fuente: autores



Recomendaciones

» Evaluar antes de la selección del método de interpolación la homogeneidad o heterogeneidad de las variables de calidad del depósito y su continuidad.

» Tener en cuenta la posible variabilidad vertical o lateral de los depósitos para la selección del método de interpolación.

» Definir los dominios geológicos, cuando los hay, y seleccionar el método de estimación más apropiado para la configuración del depósito.

» De ser necesario, realizar un modelo específico para las zonas de régimen dinámico y otro para las de régimen estático.

» Validar los modelos y estimaciones realizados.

Más información

» Sinclair, A.J. & Blackwell, G.H. (2002). *Applied Mineral Inventory Estimation*. Cambridge University Press.

» Rossi, M. & Deutsch, C.V. (2014). *Mineral Resource Estimation*. Springer.

5.3

Categorización de recursos minerales

Una vez realizada la estimación de los recursos en un depósito de material de arrastre, se procede con la categorización de acuerdo con el grado de confiabilidad de la información. Los recursos minerales se clasifican, de acuerdo con el incremento en la confianza geológica del depósito, en inferidos, indicados y medidos. Los recursos minerales inferidos tienen un menor nivel de confianza que los recursos indicados, y estos, a su vez, tienen un menor nivel de confianza que los recursos minerales medidos (modificado de CCRR, 2018). Las categorías de recursos y reservas se muestran en la Figura 26.

Una vez realizada la estimación de los recursos en **un depósito de material de arrastre**, se procede con la categorización de acuerdo con el grado de confiabilidad de la información.

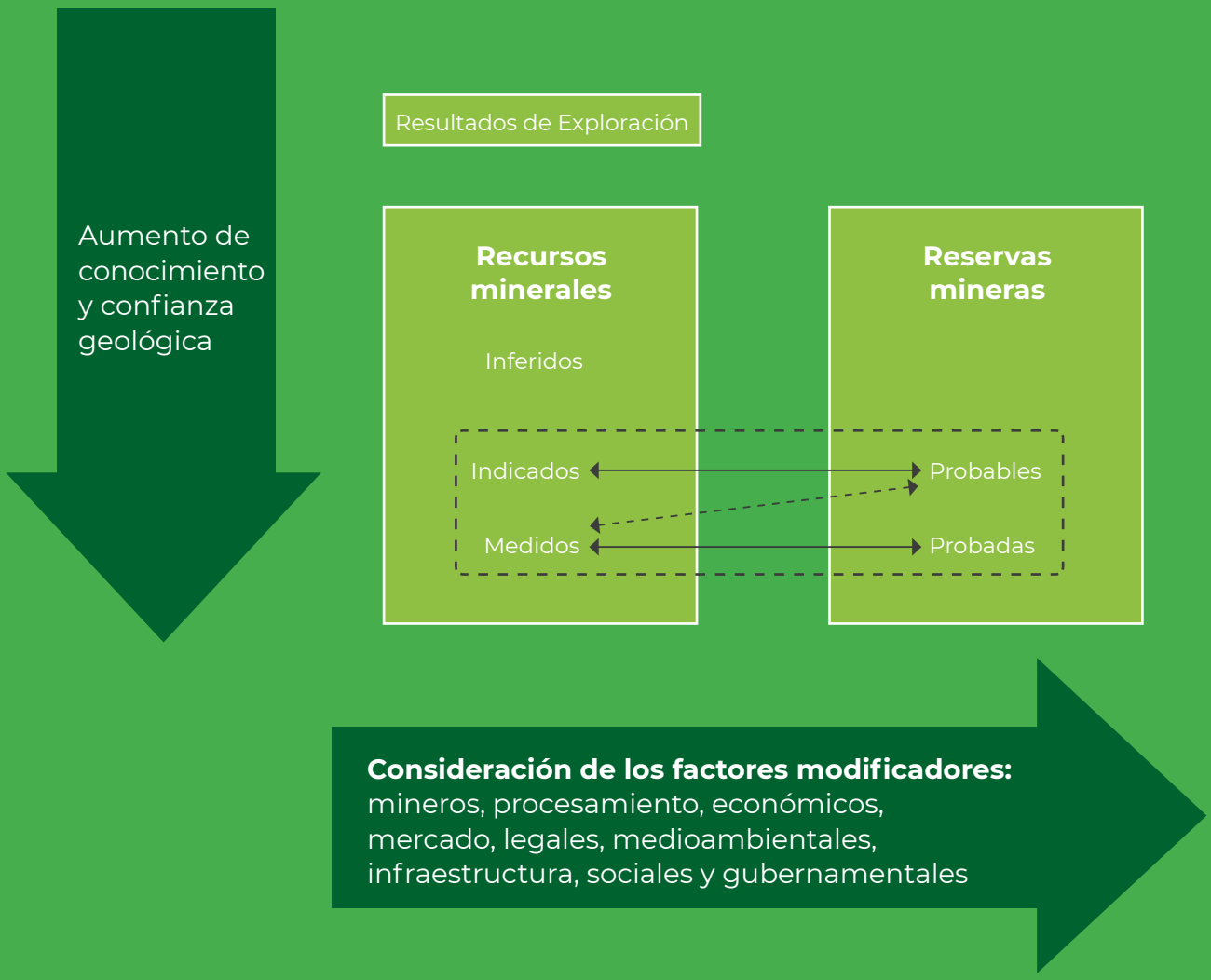


Figura 26. Categorías de Recursos Minerales y Reservas Mineras. Fuente: modificado de CCRR, 2018

La categorización de recursos de materiales de arrastre debe considerar los dos casos mencionados en el numeral 5.2.2, es decir, las zonas de régimen estático y las zonas de régimen dinámico.

En el caso del dominio estático, la categorización dependerá de la densidad de muestreo —y/o de los datos de control disponibles— y de la confianza o incertidumbre en la geometría, continuidad, extensión y distribución de las variables de calidad del depósito. En aquellos sectores en los cuales la información permite definir con mayor aproximación dichos parámetros, se puede llegar a categorizar recursos medidos y/o indicados. En las zonas en las cuales la densidad de información es limitada y se presenta un mayor nivel de incertidumbre, los recursos pueden categorizarse como inferidos.

Para el dominio dinámico (cauce del río), existe una condición particular en los depósitos de material de arrastre, la fuente que acarrea el material es variable según el periodo climático durante el año hidrológico. Así pues, la corriente está sometida a variaciones en su caudal y velocidad acorde con las condiciones climáticas extremas (Niño, Niña) o normales. Por lo tanto, además de la caracterización del material del depósito, es necesario estimar la recarga de sedimentos.

La recarga puede ser estimada con mayor o menor exactitud de acuerdo con la consecución de información hidrológica en cada cuenca (ver parámetros definidos en los numerales 4.4, 4.5 y 4.6). Cuando no es posible aplicar las metodologías y parámetros relacionados con la estimación de la recarga de material porque solo se cuenta con información parcial, es posible categorizar esos volúmenes como recursos inferidos.

En el caso de que se puedan aplicar las metodologías y definir con seguridad las condiciones relacionadas con la estimación de los volúmenes y calidad de la recarga, es posible lograr un grado de certeza tal que permite categorizar los recursos provenientes de la recarga de sedimentos como indicados. Adicionalmente, los estudios hidráulicos arrojan resultados de socavación de fondo que tienden a establecer la línea de Thalweg, sobre la cual se define la profundidad máxima de aprovechamiento del material depositado. Con estas condiciones se presenta una aproximación a la geometría del depósito y a las características físicas y mecánicas del material que permiten categorizar los recursos indicados.

Como la estimación de la recarga depende de variables de alta incertidumbre, los volúmenes estimados no pueden ser categorizados como recursos medidos. Los recursos medidos se limitan a las barras aflorantes, sin embargo, la dinámica del cauce es variable, por lo que las barras tienden a cambiar su forma y ubicación con cada temporada climática. Por ende, los recursos medidos están sujetos a la fecha efectiva de la estimación. En consecuencia, es recomendable actualizar la estimación de estos recursos periódicamente.

Recomendaciones

» Considerar la condición estática o dinámica del depósito para definir los criterios de categorización de recursos.

» Evaluar la calidad de la estimación de la recarga de sedimentos para definir si los datos obtenidos permiten categorizar recursos indicados o inferidos.

» Actualizar o reconciliar periódicamente los parámetros de estimación de recursos medidos, teniendo en cuenta los cambios en la geometría y ubicación de las barras y zonas de deposición.

Más información

» CIM Mineral Resource & Mineral Reserve Committee (2019). *CIM Estimation of Mineral Resources & Mineral Reserves Best Practice Guidelines*. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum [CIM].

» Gandhi, S. M., & Sarkar, B. C. (2016). Mineral Resources Classification. En *Essentials of mineral exploration and evaluation* (pp. 309-320). Elsevier.

» Godoy, M. (2009, 11 de mayo). *Estimación de Recursos*. Seminario "Competencias en Recursos y Reservas Mineras", Santiago de Chile, Chile.

6

Factores Modificadores

"Los factores modificadores son consideraciones usadas para convertir Recursos Minerales a Reservas Minerales. Estos incluyen, pero no se limitan a, factores de minería, procesamiento, metalúrgicos, infraestructura, económicos, de mercado, legales, ambientales, sociales y gubernamentales" (CCRR,2018). El análisis de cada factor es relevante para determinar qué parte de los recursos indicados y medidos puede convertirse en reservas probables y/o probadas. En esta fase del proyecto, los factores modificadores se evalúan a nivel de factibilidad.

En la Figura 27 se resumen los factores modificadores más comunes en proyectos de materiales de arrastre. De todas formas, cada proyecto debe evaluar sus particularidades y definir si existen otros factores que impactan su desarrollo.

Figura 27. Factores Modificadores comunes en proyectos de materiales de arrastre
Fuente: autores

6.1

Factores técnicos

Los factores modificadores de orden técnico incluyen las condiciones a considerar para el diseño de la explotación, tales como el método más adecuado, los equipos requeridos, el tratamiento de los limitantes de orden técnico que afectan el área a explotar y la determinación de la cantidad racional de material a extraer, entre otros. En el caso de los proyectos de materiales de arrastre, es importante evaluar, entre otras, algunas condiciones especiales, tales como:

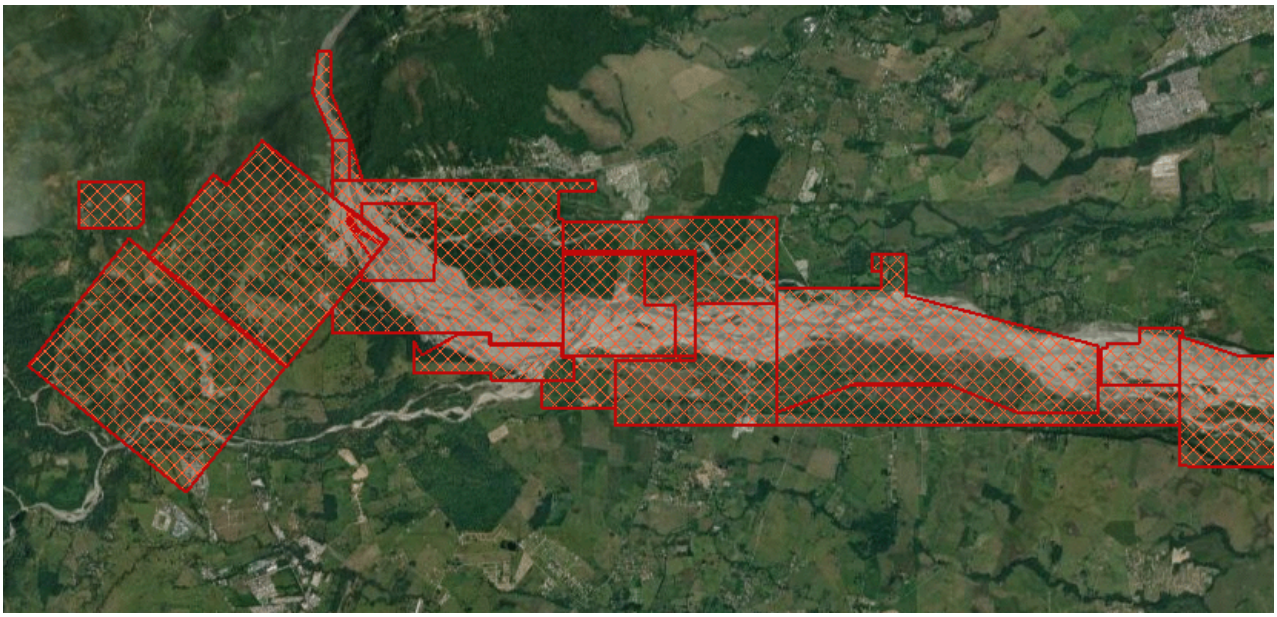
Los factores modificadores de orden técnico incluyen las condiciones a considerar para el diseño de la explotación

6.1.1

Operaciones aguas arriba y aguas abajo

La posición de un título minero en el río impacta la posible recarga de sedimentos que pueda recibir y dejar pasar hacia aguas abajo, por lo tanto, es necesario verificar si aguas arriba del área de estudio hay presencia de operaciones mineras que puedan afectar la recarga de sedimentos o, en el caso de operaciones aguas abajo, cómo estas se verían afectadas al iniciar producción en el área (Figura 28). Una buena práctica consiste en realizar anualmente —aguas arriba, abajo y en el título— batimetrías que permitan verificar los estimativos de recarga hallados inicialmente para cada tramo del río, así como verificar la geometría del cauce aguas arriba y abajo.

Figura 28. Ejemplo de títulos consecutivos en el cauce del río Guayuriba (Meta)
Fuente: Visor geográfico AnnA Minería



6.1.2

Hidráulica fluvial

A partir de la recarga promedio de sedimentos, se establecen diferentes escenarios de posibles volúmenes de explotación. Para cada uno de estos, se debe correr un modelo hidráulico que permita definir los impactos a lo largo del cauce del río (orilla y fondo del lecho). Con estos resultados se puede estimar, por tramos representativos escogidos por el criterio de pendiente, el volumen sostenible de material a extraer.

6.1.3

Dinámica del material

Como se mencionó anteriormente, los materiales de arrastre que se ubican en el cauce activo están sometidos al régimen hídrico de la cuenca, por lo tanto, la granulometría y el volumen del material son dinámicos y dependen de las condiciones climatológicas mencionadas en el numeral 4.5. Por esta razón, se recomienda entender y tener caracterizado este factor para planear la producción de acuerdo con los cambios identificados. Una buena práctica es actualizar permanentemente los insumos de los estudios de recargas de sedimentos e hidráulica fluvial haciendo monitoreos anuales sobre cada tramo de explotación minera a lo largo del cauce.

6.1.4

Técnicas de extracción

Existen diferentes métodos de minería (mecánicos o manuales) para la extracción de arenas y gravas en condiciones secas (por encima del nivel freático) y/o húmedas (por debajo del nivel freático). La selección de un método u otro depende de la ubicación del área de interés, si es en el canal activo o en la llanura de inundación. En cualquier caso, es necesario tener en cuenta las restricciones e impactos que han de generarse en el cauce o el terreno, pues esto afecta la estimación de las reservas.

Los métodos de explotación más conocidos para materiales de arrastre son minería húmeda, también conocida como minería en *instream*, minería en seco y minería manual y/o mecánica.

6.1.4.1 Minería húmeda *(instream)*

Este tipo de minería agrupa los métodos en los que la extracción se realiza directamente del lecho del río, y puede ocurrir dentro del canal activo o en sus márgenes. Algunas consideraciones que se recomienda tener en cuenta para ejecutar explotaciones en el cauce activo son:

» Identificar las partes del tramo del río donde se llevan a cabo los procesos de deposición o agradación, con el fin de disminuir el problema de la degradación de aguas abajo debido a la sobreexplotación del depósito.

» La geometría de explotación en cualquier tramo del río depende de la tasa de recarga anual de sedimentos arrastrados por el río en diferentes épocas del año. En este sentido, se debe confrontar la recarga de sedimentos para las zonas de interés mineras contra los volúmenes de explotación.

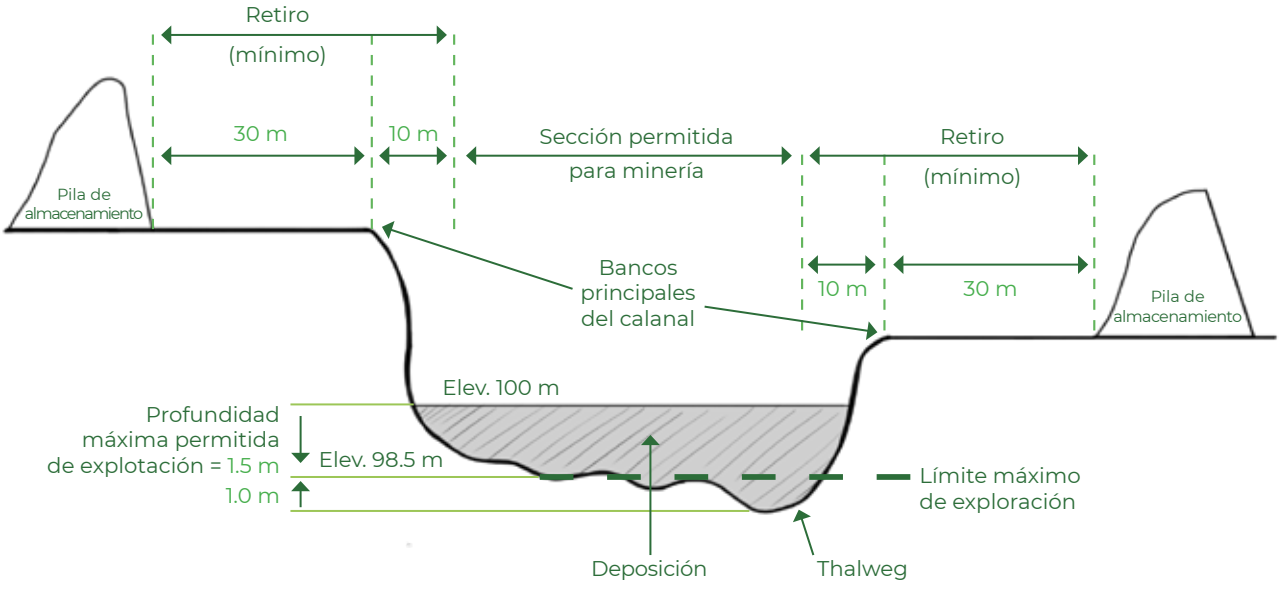
» El ancho del canal es un factor a tener en cuenta en la planeación de la extracción del lecho del río.

» En un banco cóncavo no se permite adelantar extracción minera, ya que a menudo son zonas de fuerte erosión que generan un aumento en la presión de agua en el fondo del río.

» En los casos en los cuales una barra se ubique aguas abajo de una curva, la estabilidad de la curva puede asegurarse conservando el primer tercio de la longitud de la barra. Es decir, la extracción puede llevarse a cabo en los dos segundos tercios de la barra aguas abajo.

En la Figura 29 se muestra la representación gráfica de un modelo de explotación en minería húmeda. Allí se resalta que la profundidad mínima del corte minero debe estar a 1 metro por encima de la elevación del canal de Thalweg y a una profundidad máxima de extracción de 1,5 m. La excavación de los materiales sobre el lecho del río debe ubicarse a una distancia mínima definida por los estudios hidráulicos y fluviales, además hay que tener en cuenta los efectos que puede tener la explotación minera en la estabilidad del cauce. El acopio de los materiales se debe ubicar a una distancia definida por los caudales máximos del periodo de retorno más conveniente, tanto al margen izquierdo como derecho del banco del canal principal (Figura 30).

Figura 29. Modelo que simplifica la categoría de minería húmeda *(instream)*
Fuente: Department of Irrigation and Drainage [DID], 2009



Un factor que no debe dejarse de lado cuando se opta por el uso de una técnica de minería húmeda es el corte de cabeza. Los efectos de corte de cabeza realizados en lecho de río se presentan debido a que se profundiza la explotación por debajo de la línea de Thalweg, generando un ensanchamiento del canal.

Un factor que no debe dejarse de lado cuando se opta por el uso de una técnica de minería húmeda es **el corte de cabeza.**

Figura 30. Acopio de materiales en área segura
Fuente: autores

Entre los métodos de minería húmeda más conocidos se encuentran los siguientes:

Raspado o desnatado de barras *(scalping)*:

este método implica quitar la parte superior de las barras de arenas y gravas que se encuentran expuestas sobre el lecho de río (Figura 31). Generalmente, requiere suavizar las irregularidades de la superficie y limitar el material extraído por encima de la línea del Thalweg. La desventaja de este método es que produce pérdida en el confinamiento del canal, ampliación de canales poco profundos, potencial degradación del canal, disminución del nivel freático y pérdida de la vegetación ribereña.

Figura 31. Explotación por el método de raspado de barra
Fuente: ANM, 2021

Excavación de barras:

en este método se excava un pozo en el extremo de la corriente, debajo de la barra, como fuente de material y como sitio para atrapar arena y grava. Este método implica dejar intactos los márgenes de las barras y excavar desde el interior de la parte de aguas debajo de la barra, pero por encima de la elevación de la superficie de agua, lo que se denomina una variante intermedia entre el corte de la barra y la barra de excavación. Después de completar su extracción, el pozo se puede conectar al canal en su extremo aguas abajo para proporcionar un hábitat de canal lateral.

La decisión de optar por esta técnica debe tomarse cuidadosamente, pues hay que tener en cuenta que la remoción de la barra puede conducir a procesos de erosión aguas abajo y ensanchamiento del canal sobre el tramo que es objeto de explotación del río. La eliminación de las barras expone el sedimento de grano más fino subyacente a los procesos de erosión, debido a los altos flujos del río, provocando ensanchamiento del canal y, por consiguiente, aumentando la velocidad del caudal, lo que produce que el punto de corte se aumente. Con el tiempo, el aumento de la capacidad del canal puede reducir las velocidades del agua (gradiente) y aumentar la tasa de sedimentación, lo que provoca la erosión aguas debajo del lecho del río, debido a la reducción del transporte de sedimentos.

Minería de canal de pozo seco:

en este caso se realiza la excavación dentro del canal activo en lechos de corrientes intermitentes o efímeras del río, para lo cual se realiza un arranque mecánico o manual. Los pozos secos a menudo quedan con márgenes abruptos aguas arriba, los cuales actúan como punto de corte sobre el lecho de río, que durante las temporadas de invierno (alto flujo) aguas arriba generan daños a las estructuras naturales y artificiales de los canales de los ríos. En la Figura 32 se presenta un ejemplo de explotación mecanizada de un pozo seco.

En este caso se realiza la excavación dentro **del canal activo** en lechos de corrientes intermitentes o efímeras del río, para lo cual se realiza un **arranque mecánico o manual.**

Figura 32. Excavación de pozo seco
Fuente: autores

Minería de canal de pozo húmedo:

este método implica la excavación de un pozo profundo sobre el cauce activo del río. Se requiere de la disponibilidad de una draga, excavadora hidráulica o equipos similares para la extracción de arenas y gravas por debajo del nivel freático. En algunos casos, en las operaciones mineras se hace uso de motobombas para drenar el piso del pozo, para continuar con la extracción a una profundidad mayor, lo cual genera una sobreexplotación de los materiales pétreos. En la Figura 33 se presenta una draga utilizada para elevar material ubicado por debajo del nivel del agua a superficie.

Figura 33. Draga para levantar arena y grava del lecho del río
Fuente: ANM, 2021

Trampas de arena y grava en el canal activo:

se han utilizado trampas de carga de lecho para reducir la arena en movimiento en canales aguas abajo para mejorar el hábitat. Estas trampas pueden ser fuentes potenciales de arena y grava, siempre que las cantidades recolectadas sean económicamente viables. Una ventaja de la trampa es la concentración de impactos mineros en un solo sitio, ya que los equipos pesados pueden extraer los materiales sin afectar mucho a la vegetación ribereña u otras características del canal natural. Las trampas no generan impacto hidráulico aguas arriba por causa de la extracción, porque los diques están diseñados para el control hidráulico durante caudales altos. Una vez instaladas las trampas de grava, la extracción se puede realizar anualmente.

En la Figura 34 se muestra un esquema de trampa de arena y grava sobre lecho de río, en la cual se resaltan los diques cortos que permiten contener el transporte de los sedimentos aguas abajo y el extremo de la trampa que evita el corte de cabeza aguas arriba de la extracción minera.

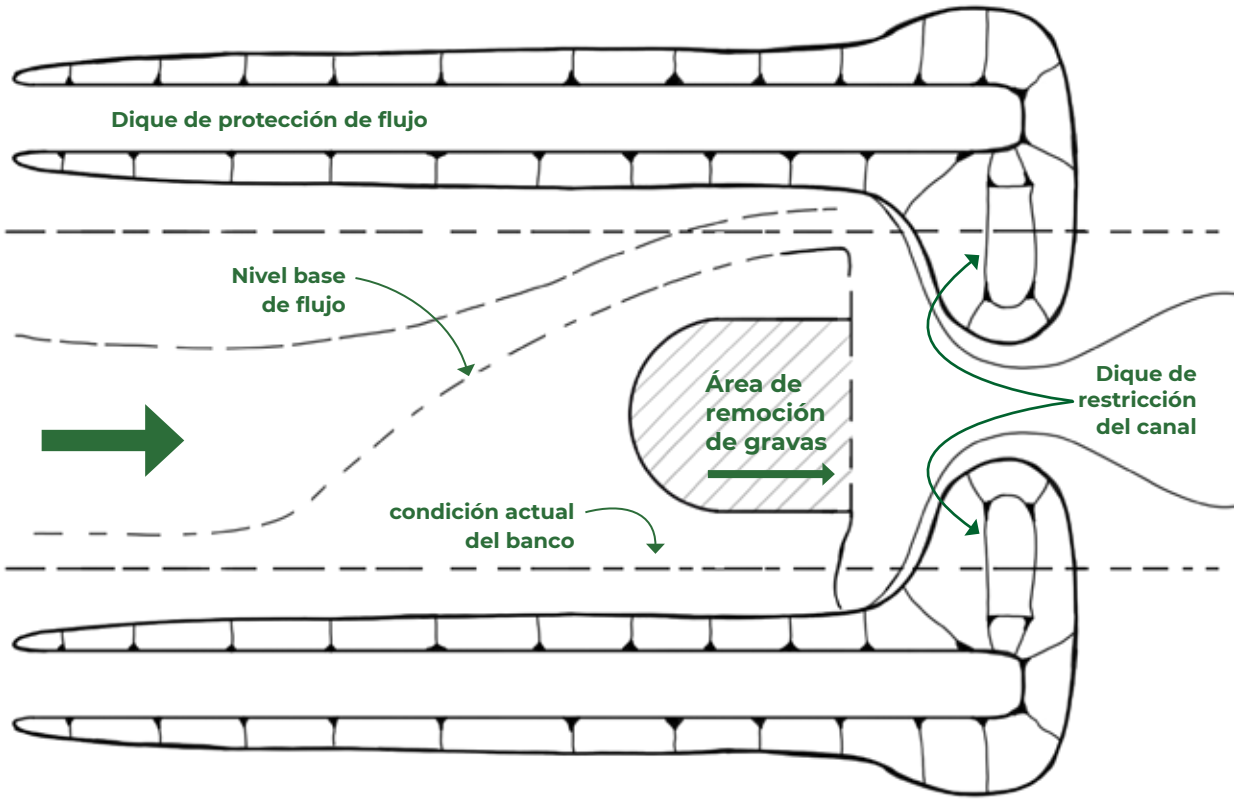


Figura 34. Esquema de una trampa de arena y grava. Fuente: Kondolf *et al.*, 2001

Recomendaciones

» Permitir un volumen de extracción sobre un tramo del río basado en la tasa de estimación anual de la recarga de sedimentos, tal como se presenta en los capítulos anteriores.

» Establecer una cota mínima de explotación por debajo de la cual no se pueden realizar actividades de extracción minera. Generalmente, se sugiere que sea la cota de Thalweg.

» La extracción en las barras se debe iniciar aguas abajo, sobre cada sección del tramo a explotar del río.

» Concentrar las actividades de extracción minera en la corriente para minimizar el área de perturbación.

» Revisar los efectos acumulativos de la extracción de gravas y arenas para evitar una mayor capacidad erosiva aguas arriba.

» Establecer un programa de seguimiento a corto, mediano y largo plazo del tramo explotado del río.

» Realizar un informe anual del estado y las tendencias de la recarga de sedimentos del río, y relacionarla con los volúmenes de producción explotados en cada tramo del río.

Una ventaja de la trampa es la concentración de impactos mineros en un solo sitio, ya que los equipos pesados pueden extraer los materiales sin afectar mucho a la vegetación ribereña

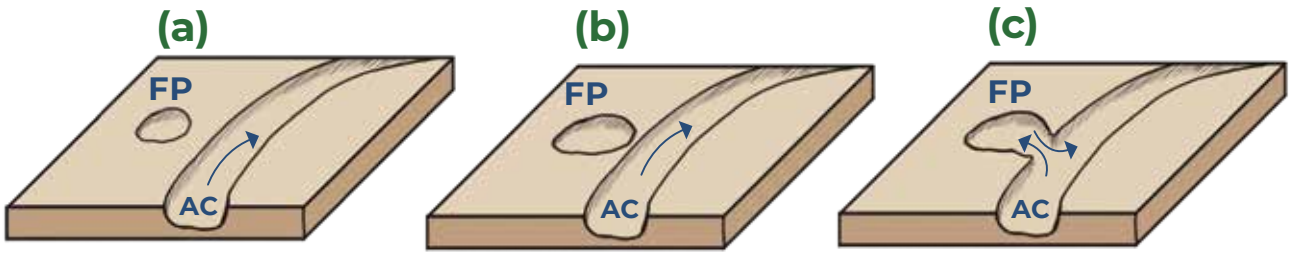
6.1.4.2 Minería en seco

Este tipo de minería se desarrolla en llanuras de inundación y/o terrazas. La llanura aluvial es el área que se localiza inmediatamente detrás del dique, y periódicamente se inunda según la intensidad de las lluvias. Las terrazas son las áreas más elevadas y antiguas de depósito del río, y se localizan detrás de las llanuras aluviales.

La extracción de la llanura aluvial y/o terraza debe conservar un retiro adecuado del canal principal, pues en un sistema aluvial dinámico es muy común que la corriente migre a través de la llanura aluvial y, por lo tanto, hay un potencial para que el canal del río llegue al pozo. Si el río se erosiona a través del área que queda entre el pozo excavado y el río, hay un potencial de captura, una situación en la que el canal del flujo bajo se desvía a través del pozo. La captura de varios pozos en una zona determinada de la llanura conduce al ensanchamiento del canal y la desfiguración del curso natural del río. Para evitar la captura del río, los pozos de excavaciones deben alejarse del río para proporcionar un amortiguador y estar diseñados para resistir inundaciones periódicas.

La Figura 35 muestra un esquema de cómo ocurre la captura de pozos de una llanura y/o terraza aluvial. En el punto (a) se muestra la ubicación del pozo para la extracción de arena y grava, en el punto (b) se observa una reducción del área de amortiguamiento entre el pozo de la llanura aluvial (FP) y el canal (AC) debido a la extracción irracional de los tajos húmedos y, por último, el punto (c) representa la captura de tajos en régimen de alto caudal. La flecha indica la dirección del flujo del río.

Figura 35. Representación esquemática de las etapas de captura del pozo
Fuente: DID, 2009



El diseño de la explotación se realiza con base en los parámetros técnicos definidos para el área del proyecto, de acuerdo con las características propias de la llanura y/o terraza aluvial donde se planea adelantar las actividades extractivas. Para la selección de los sitios más adecuados, se tiene en cuenta el conocimiento de la tasa local de degradación y/o socavación específica del tramo del río a explotar; se debe realizar una evaluación específica de la sección del río en su fase de operación minera, con el fin de maximizar la estabilidad del canal y minimizar su perturbación; y deben ubicarse las zonas de explotación minera donde el canal presente velocidades menores (gradientes bajos) o aumente de ancho, para mejorar la deposición de los sedimentos.

Los dos tipos de minería más utilizados para la extracción de arenas y gravas en llanuras aluviales y terrazas son:

Minería en pozo seco:

la extracción de arena está limitada al lecho seco superior.

Minería en pozo húmedo:

el pozo de excavación cruza el nivel freático. La acumulación de agua en los pozos que quedan después de la minería crea muchos efectos adversos, tales como colapso de estructuras adyacentes a los sitios de la mina, cambios marcados en el uso de la tierra y caída final de la productividad neta del área de influencia del proyecto minero.

Recomendaciones

» Conservar un área de amortiguamiento adecuada entre el canal activo y los pozos de explotación, así como mantener una extracción racional con los límites técnicos bien definidos.

» La profundidad máxima de extracción de la llanura aluvial debe permanecer por encima de la línea de Thalweg. Esto minimiza los impactos de la posible captura de ríos, al limitar el potencial de corte de cabezas y el potencial del pozo para atrapar sedimentos.

» Mantener la cota mínima de diseño de la explotación por encima del nivel freático.

» Los pozos de terrazas deben estar diseñados con un alto porcentaje de hábitat de borde y con un gradiente bajo, que sustenten naturalmente la vegetación en una variedad de niveles de agua.

» Colocar la capa superior del suelo almacenado por encima a un periodo de retorno calculado para cada proyecto en particular. La capa superior del suelo almacenada introduce una gran cantidad de finos al río durante los periodos de inundación.

» Restaurar los pozos de las llanuras y terrazas como hábitat de humedales.

Más información

» Kondolf, G.M., Smeltzer, M. & Kimball, L. (2001). Freshwater Gravel Mining and Dredging Issues. Washington Department of Fish and Wildlife, Washington Department of Ecology, Washington Department of Transportation.

» Department of Irrigation and Drainage [DID] (2009). River Sand Mining Management Guideline. Ministry of Natural Resources and Environment Department of Irrigation and Drainage Malaysia.

6.1.4.3 Minería manual y mecánica

La extracción de arena y grava del río se lleva a cabo tanto manual como mecánicamente. Este método se practica en pequeños ríos con recursos limitados, empleando barcos y palas diseñadas para la extracción. En minería mecánica, bombas de chorro de alta potencia y pesadas se utilizan para la extracción del material en canales fluviales activos y en su llanura aluvial.

Este método se practica en pequeños ríos con recursos limitados, **empleando barcos y palas diseñadas para la extracción.**

6.2

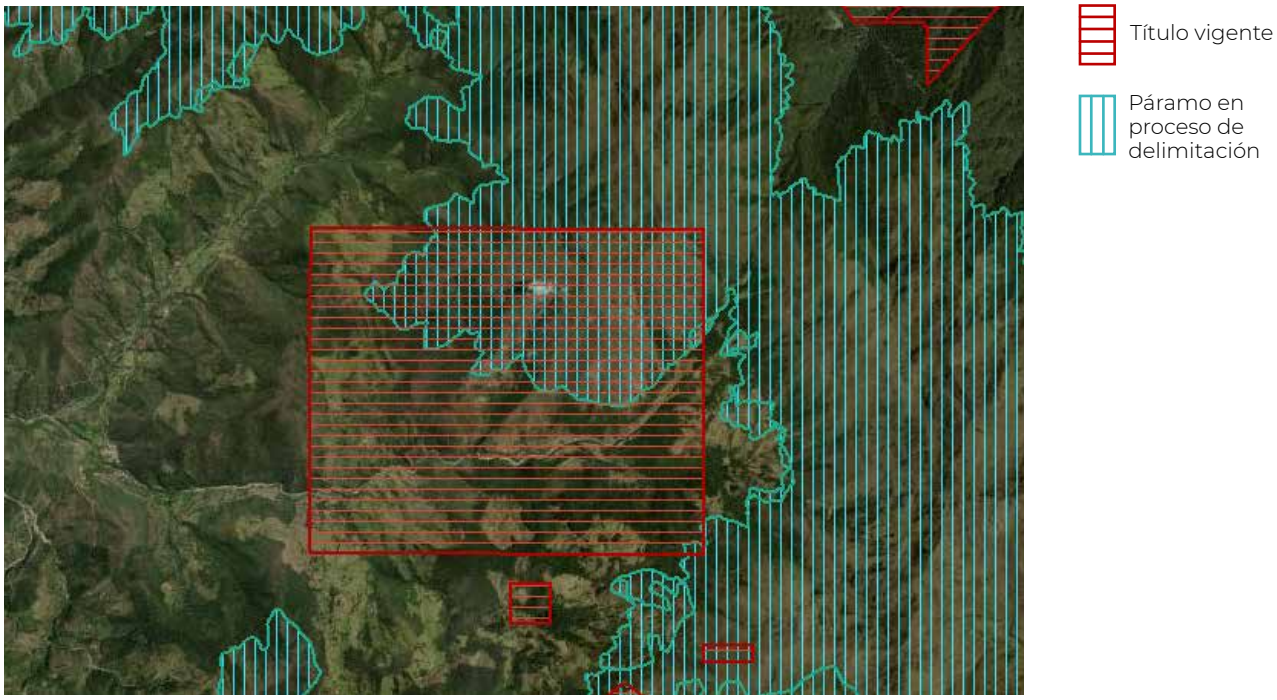
Factores ambientales

Las condicionantes en materia ambiental que tienen influencia en el proyecto pueden constituir una limitante para convertir recursos minerales a reservas mineras. Por lo tanto, es necesario evaluar tanto las restricciones y exigencias de la Autoridad Ambiental como las medidas a tomar para garantizar una operación responsable con el medio ambiente.

Las corporaciones establecen las determinantes ambientales en el área de su jurisdicción y además definen las zonas de importancia ambiental y el componente de gestión del riesgo. Estas determinantes se incorporan en los planes de ordenamiento territorial, que establece el uso del suelo y las áreas de actividad con los usos condicionados, restringidos o prohibidos. El profesional líder debe asegurar que se realice la revisión de los diferentes instrumentos de planeación ambiental y territorial —tales como POMCAS, POMIAS, PMAA, entre otros (ver numeral 3.2)— para identificar las áreas factibles de explotación minera.

Los instrumentos de planificación territorial fijan las condiciones y las zonas dentro de los municipios en las que se pueden desarrollar los proyectos mineros. Conocer estas áreas y traslaparlas sobre el polígono de la concesión minera (Figura 36) es parte del proceso de vinculación de los factores modificadores ambientales en la estimación y categorización de reservas.

Figura 36. Superposición de título minero con área de páramo en proceso de delimitación.
Fuente: visor geográfico AnnA Minería



Adicionalmente, la reglamentación de los usos del suelo y las determinantes ambientales fijan las condiciones en las que se deben restaurar las áreas durante el plan de cierre y abandono del proyecto minero, lo que se traslada directamente a los costos y la evaluación financiera como factor modificador.

Los instrumentos de planificación territorial fijan las condiciones y las zonas dentro de los municipios en las que se pueden desarrollar los proyectos mineros.

6.3

Factores sociales

El factor modificador social debe abordarse desde las fases tempranas de exploración, pero el impacto económico sobre el proyecto es más relevante cuando se realiza la conversión de recursos a reservas, ya que los costos en los que debe incurrir el proyecto para cubrir las labores sociales afectan directamente las reservas.

Herramientas como la consulta previa (cuando sea pertinente) con las comunidades étnicas o afrodescendientes, el plan de gestión social y un detallado estudio para conocer las características y dinámicas sociales de las comunidades asentadas en el área de influencia del proyecto (Figura 37) deben implementarse para garantizar la aceptación de las obras en el área, la participación de la comunidad y la generación de beneficios para la zona de influencia del proyecto. Todas las actividades sociales tienen costos asociados, estos deben tenerse en cuenta ya que su inclusión en el del flujo de caja del proyecto impacta las reservas.

Figura 37. Ejemplo de títulos mineros con influencia en perímetros urbanos
Fuente: Visor geográfico AnnA Minería

Recomendaciones

» Para hallar las áreas definitivas de explotación minera, se recomienda utilizar la superposición de capas de información con referencia a cada factor modificador socioambiental.

» Revisar las actualizaciones de los diferentes instrumentos de planeación ambiental y territorial, y, de esta manera, verificar en qué grado impactan las áreas posibles para el desarrollo del proyecto.

» Monitorear permanentemente la actualización de los instrumentos ambientales y territoriales con referencia al título minero objeto de estudio. Por ejemplo, los POMCAS y POT son actualizados por cada ente ambiental y territorial.

Más información

» AnnA Minería. https://www.anm.gov.co/?q=anna-mineria

» Oficinas de Planeación Municipal y Corporaciones Autónomas Regionales

6.4

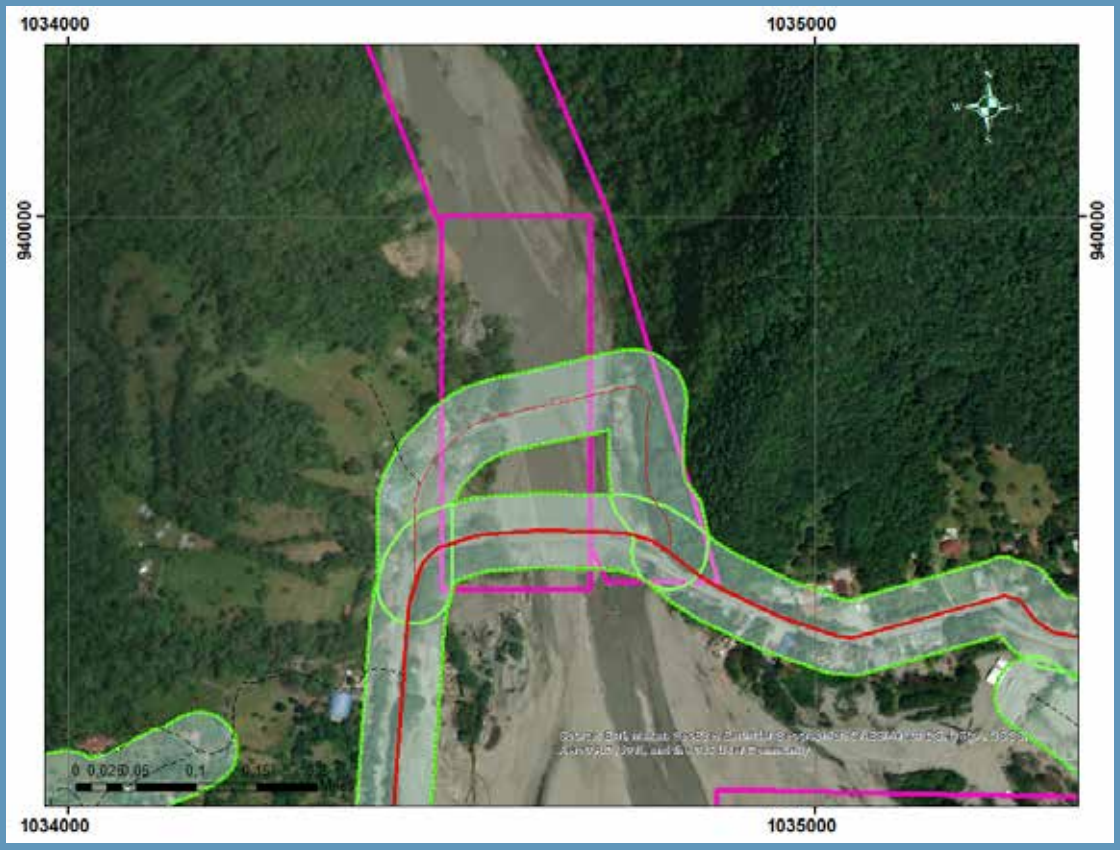
Técnicas de extracción

La infraestructura disponible o necesaria para desarrollar una explotación de materiales de arrastre se evalúa desde dos puntos de vista. Por un lado, es conveniente identificar la infraestructura cercana al área del proyecto que pueda restringir las operaciones mineras en algunos sectores, para no causar daños en dicha infraestructura. Por el otro, es conveniente conocer la infraestructura existente que facilita las labores de explotación —como vías de acceso, redes eléctricas, campamentos, centros de consumo, entre otros— para identificar las obras que hacen falta para la puesta en marcha de la producción y destinar los recursos requeridos para su consecución.

Se deben revisar las áreas establecidas de retiros a la infraestructura existente y futura, tales como vías, bocatomas de acueductos, puentes (Figura 38), alcantarillas, redes eléctricas, entre otros. Esto se hace a través del estudio de los planes de desarrollo municipal, departamental y nacional, y por levantamiento de información propia, con énfasis en los tramos seleccionados para posible explotación minera. Es fundamental adecuar las vías de acceso existentes que comunican los sectores de explotación de cada tramo del río con las zonas de infraestructura, para facilitar el transporte del material pétreo.

Dadas las condiciones de cada proyecto minero en particular, se debe evaluar detenidamente ciertos factores, como: distancia del proyecto minero hacia los sitios de consumos, tiempos de viaje e identificación de las redes de transporte existentes y futuras hacia los frentes de explotación y zonas de producto terminado.

Figura 38. Ejemplo de infraestructura con restricción de 50 m a cada lado del puente
Fuente: Cormacarena



Recomendaciones

» Evaluar si existe infraestructura vial de acceso a los títulos mineros, con el fin de verificar los costos asociados de transporte y comercialización de los agregados pétreos. Muchas veces es necesario destinar recursos al mantenimiento de vías veredales que no cuentan con la infraestructura necesaria para la circulación de tránsito pesado.

» Identificar las obras preexistentes a lo largo de la zona de influencia del proyecto para determinar los correspondientes retiros, con el fin de proteger la infraestructura.

6.5

Factores jurídicos

Las obligaciones legales adquiridas con motivo del contrato de concesión, el cumplimiento de la normatividad vigente en materia de seguridad e higiene en el trabajo y de contratación, y los compromisos con los propietarios de los predios necesarios para llevar a cabo el proyecto deben ser consideradas como parte de los factores modificadores para conversión de recursos a reservas.

Es necesario realizar un estudio de predios relacionados con títulos mineros, con referencia a los tramos viables de explotación y de acceso al proyecto, con el fin de tramitar la respectiva servidumbre minera. También, deben tenerse en cuenta las contraprestaciones económicas que el proyecto debe pagar a la autoridad minera por el derecho a explotar el material de arrastre. Además, se recomienda verificar las posibles reclamaciones que haya sobre el o los terrenos necesarios para el desarrollo del proyecto.

6.6

Factores económicos

Lograr una operación exitosa desde el punto de vista económico requiere de un análisis riguroso y realista de los gastos e inversiones que requiere el proyecto y de la rentabilidad esperada. Aunque son muchas las aristas las que implica el análisis económico, hay dos principales áreas a cubrir:

Aunque son muchas las aristas las que implica el **análisis económico**, hay dos principales áreas a cubrir:

6.6.1

Estudio de mercado

Es necesario evaluar la demanda para los volúmenes de explotación anual proyectados a extraer del material pétreo, para así determinar el precio de venta del material a futuro.

El mercado es el área en la cual convergen las fuerzas de la oferta y la demanda para establecer un precio definitivo y la cantidad de las transacciones necesarias a realizar. Existen cinco elementos que componen el mercado: compradores, vendedores, oferta, retribución lógica de la oferta y un ambiente que brinde comodidad y tranquilidad a todos. El objeto del estudio de mercado es estimar la cuantía de los bienes o servicios provenientes de una nueva unidad de producción o de servicios que la industria estaría dispuesta a adquirir por determinado precio. Hay que tener en cuenta como componentes: el producto, la demanda, la oferta, el precio, la comercialización y la publicidad.

6.6.1.1 Producto

La caracterización del mineral del depósito debe identificar las propiedades físicas y químicas del material pétreo para determinar el uso comercial. En este sentido, el producto final corresponde a gravas lavadas y trituradas (grava 67, 57, 38, 37, 8, 7; base granular; subbase granular; entre otros) y a arena de concreto lavada y triturada (granulometría de 1 a 4.7 mm, entre otros). Lo anterior se obtiene del proceso de extracción minera y de trituración y/o beneficio de los materiales pétreos.

6.6.1.2 Demanda

La demanda es la cantidad de un bien que los consumidores están dispuestos a comprar. El análisis de la demanda se debe realizar de forma independiente para cada una de las ciudades donde se pretenda adelantar el proyecto minero. En este sentido, no solo se debe calcular el tamaño de la demanda actual, sino también la estimación de los consumos futuros de los insumos. Además del precio, algunos de los aspectos más importantes para determinar la demanda de un bien son los siguientes:

» Capacidad de compra de los demandantes del producto pétreo, para entender cuál es la potencialidad de compra de los consumidores.

» Preferencias de los consumidores por los bienes que se encuentran en el mercado.

» Productos que puedan sustituir el bien a ser comercializado.

En el estudio de la demanda se debe realizar el análisis de la elasticidad de la demanda de los materiales pétreos frente al precio; del comportamiento de la demanda frente a crisis, el cual es útil para determinar si hay efectos cíclicos o contra cíclicos; y, por último, de las tendencias y proyecciones del mercado interno (local, regional) y externo (nacional, internacional).

6.6.1.3 Oferta

Los productos pétreos obtenidos después de haber pasado por los procesos de explotación, trituración y/o beneficio cuentan con especificaciones técnicas que son solicitadas por diversos clientes de acuerdo con el uso y tipo de obra, lo que permite obtener un beneficio económico. Una de las formas de comercialización de los agregados es por venta directa en bocamina, en donde los clientes retiran el producto con su flota de transporte. La cadena de distribución de los agregados puede definirse como la gestión del transporte, las instalaciones empleadas para el cargue y descargue, y los materiales que son distribuidos para satisfacer la demanda de los clientes, en donde también interfieren variables de calidad, lugar y costos. El estudio de la oferta debe contener los siguientes elementos:

» El número y el tamaño relativo de las empresas competidoras.

» La diferenciación del producto frente a otros productos iguales.

» El poder de venta frente a las decisiones de precios; en otras palabras, qué tanto puede cambiar la oferta de los bienes comercializables ante cambios en los precios.

» El grado de competencia no relacionada al precio; en otras palabras, cuánto cambia la oferta sin que el precio sea un factor determinante.

6.6.1.4 Precios

Los precios de los agregados sufren grandes variaciones y se ven fuertemente condicionados por los altos costos de transporte. Dichos precios están en función de la calidad y el volumen, aunque en determinadas situaciones se encuentran otros factores, como tipo de cliente, el momento o coyuntura que atraviese el mercado y la escasez de los materiales. Se debe analizar la forma de cálculo del precio y las fuentes de información usadas. Además, hay que evidenciar por qué el precio es el ideal y cómo cubre el riesgo de mercado, entendiendo riesgo de mercado como los cambios de precios que surgen en un periodo de tiempo dado. El cálculo debe guardar coherencia con el estudio de la demanda y de la oferta.

6.6.1.5 Comercialización

En la industria de los materiales de construcción es determinante el costo de transporte, ya que impacta el valor de venta de los agregados y la estructura general de los costos de la operación minera, afectando la rentabilidad del negocio. El valor de los fletes del material es muy dinámico porque se calcula con base en la distancia (tonelada/kilometro). La estrategia comercial se refiere a la forma en que se vende el producto y cómo se comercializa con un alto grado de confiabilidad. También debe realizarse un análisis de riesgo comercial con su respectiva estrategia de mitigación del riesgo. Lo anterior debe estar acorde a lo que se analiza en el estudio de la demanda y de la oferta.

Recomendaciones

» Tener en cuenta el gran número de empresas informales existentes en el país, lo que genera una competencia desleal.

» Usar fuentes de información que respalden los datos presentados.

» Tomar datos de referencia actualizados.

Más información

» Guzmán, J. I. (2019). El problema de determinar la inversión óptima. En *Fundamentos de economía minera* (pp. 345-388). Editorial Reverté.

6.6.2

Costos y rentabilidad

Como parte del análisis de los factores económicos, se debe revisar los escenarios de volúmenes extraíbles de producción anual en cada tramo del lecho del río, con referencia a los precios de venta del material pétreo, con el fin de estructurar costos fijos, ingresos operacionales y flujos de caja.

Un proyecto minero presenta una dimensión económica que debe analizarse antes de asignar los recursos necesarios para su puesta en marcha. Las inversiones se deben realizar según criterios de efectividad, estudiando las diversas alternativas para intentar acercarse a la solución óptima, tanto en el plano técnico como en el económico.

La evaluación financiera es la herramienta que permite tomar la decisión de continuar o abandonar una operación minera, ya que de esta dependen los beneficios de los interesados en el proyecto minero. Esta evaluación incluye un análisis de sensibilidad y riesgo y una descripción de los procedimientos utilizados en las decisiones de inversión. A continuación, se destacan los criterios que se deben tener en cuenta:

6.6.2.1 Fecha de corte y moneda de referencia

La evaluación financiera debe tener una fecha de corte de la información levantada del proyecto, en la cual se dará inicio al cálculo de los flujos de caja. Debe establecerse claramente la moneda utilizada para la evaluación.

6.6.2.2 Supuestos y limitaciones

La evaluación financiera incluye supuestos realizados al momento de calcular la información de ingresos, costos y su evolución en el tiempo. En cuanto a las limitaciones, están relacionadas a las restricciones a la información encontradas al momento de elaborar el flujo de caja.

6.6.2.3 Riesgos

Es importante conocer los escenarios de riesgos asociados al proyecto minero para modelarlos dentro del flujo de caja. El riesgo se define como la posibilidad de pérdida que puede ocurrir en las reservas minerales. Esto ocurre debido a que la extracción de materiales aluviales es muy dinámica, lo que genera cierta incertidumbre, además, la rentabilidad no se conoce con certeza.

6.6.2.4 Fuentes de información

Las fuentes de información para el análisis financiero deben seleccionarse cuidadosamente, para no incurrir en errores que puedan significar una proyección equivocada.

6.6.2.5 Inversiones

Incluir dentro del flujo de caja todas las inversiones (capex, activos, infraestructura, entre otros) a realizar para el proyecto minero, con su respectivo valor y con el mayor grado de detalle posible.

6.6.2.6 Ingresos

Desagregar con el mayor grado de detalle posible la producción, precios y cálculo de los ingresos para cada uno de los periodos del flujo de caja.

6.6.2.7 Costos

Desarrollar con el mayor grado de detalle posible los costos en la moneda de referencia (costos/toneladas o metro cúbico y costos unitarios). Esto incluye el pago de regalías y contraprestaciones económicas al Estado.

6.6.2.8 Financiación

En caso de existir financiación, la evaluación financiera debe considerar en detalle todo lo relacionado con esta fuente de capital (créditos, tasas, entidad prestante, plazo, etc.). Es necesario determinar el flujo de pago esta financiación.

6.6.2.9 Costos

Realizar el flujo de caja con el mayor grado de detalle posible, incluyendo inversiones, ingresos, costos y periodo, entre otros. Además, mostrar el flujo de caja antes y después de la financiación, al igual que antes y después de impuestos.

6.6.2.10 Costo de capital

Conocido como "tasa de descuento", el análisis financiero debe incluir el cálculo y justificación de esta tasa.

6.6.2.11 Rentabilidad

Es la relación existente entre los beneficios que genera la extracción del material pétreo y la inversión realizada para la puesta en marcha de la operación minera, teniendo en cuenta sus costos.

6.6.2.12 Período de recuperación del capital

Se refiere al tiempo necesario para recuperar el capital invertido y, por tanto, a partir de qué momento los ingresos derivados del proyecto minero representan rentabilidad.

6.6.2.13 Valor Actual Neto (VAN) o Valor Presente Neto (VPN)

Está definido como la suma de los distintos flujos de caja generados por el proyecto minero, descontados a una determinada tasa de descuento. Es importante considerar los supuestos del VAN o VPN.

6.6.2.14 Tasa Interna de Retorno (TIR)

Está definida como la tasa de descuento para la cual el VPN será igual a cero, es decir, no se genera beneficio, los ingresos son iguales que los costos.

6.6.2.15 Análisis de sensibilidad

Al término de cada año, se debe medir la variación de los volúmenes de producción sostenibles extraídos, en referencia a los precios de venta de cada producto terminado, para revisar la estructura de los costos fijos de producción de la materia prima. Estos análisis ayudan al titular minero a tomar decisiones asertivas de cómo proyectar su estructura organizacional y cómo predecir los ingresos operacionales. El análisis de sensibilidad del VPN se debe realizar antes de variaciones de precios.

Recomendaciones

» Actualizar el flujo de caja con frecuencia anual, teniendo en cuenta el estado de las tendencias de la tasa anual de descarga contra los volúmenes de explotación sostenible del río.

» Cuantificar los costos adicionales y los costos ocultos que se generen por la ejecución de los proyectos de origen aluvial para el cálculo de los flujos de caja y su proyección.

» Tener en cuenta el promedio de los precios históricos de venta del agregado.

» Contemplar en el flujo de caja los costos asociados a las fases de cierre y postcierre minero.

7

Estimación de reservas

Esta sección considera factores importantes para estimar una **Reserva Mineral y documentar el proceso de estimación.**

De acuerdo con el *Estándar Colombiano para el reporte público de resultados de exploración, recursos y reservas minerales - ECRR* (CCRR, 2018), una reserva mineral se define como

> una Reserva Mineral es la parte económicamente explotable de un Recurso Mineral Medido y/o Indicado. Esto incluye el material de dilución y pérdidas que pueden ocurrir cuando el material es explotado o extraído, y está definido apropiadamente por estudios de Pre-Factibilidad [sic] o Factibilidad, que incluyen la aplicación de Factores Modificadores. Tales estudios demuestran que, en el momento del reporte, la extracción podría estar justificada razonablemente (CCRR, 2018, pág. 25).

En esta fase, los estudios han sido definidos, como mínimo, a nivel de prefactibilidad y se tiene un plan de explotación propuesto. Los recursos indicados pueden pasar a ser reservas probables, esto quiere decir que la certidumbre no es total y que aún deben evaluarse algunos parámetros para llevar dichos recursos a la categoría de medidos, para que eventualmente puedan pasar a reservas probadas. Los recursos medidos pueden pasar a reservas probables o probadas dependiendo de la confianza en los parámetros avaluados. Para convertir recursos a reservas deben considerarse entre los factores modificadores de orden técnico la dilución y pérdidas que puedan ocurrir en los procesos de explotación.

Esta sección considera factores importantes para estimar una Reserva Mineral y documentar el proceso de estimación. Como una estimación de la Reserva Mineral representa la recopilación del trabajo realizado por numerosas disciplinas profesionales, el profesional líder de la estimación debe comprender la importancia del trabajo de cada disciplina para evaluar la viabilidad económica (modificado de CIM Mineral Resource & Mineral Reserve Committee, 2019).

7.1

Preparación

El profesional líder debe documentar y utilizar una metodología para estimar las reservas minerales, para garantizar que no se ignore ningún factor significativo. La planificación previa es importante para identificar los factores que afectan la estimación de la Reserva Mineral. Utilizar una lista de verificación para garantizar que se consideren todos los aspectos es una buena práctica.

Es importante tener en cuenta el requisito de que el material forme la base de un proyecto económicamente viable. La prueba de viabilidad económica debe estar bien documentada como parte del proceso de estimación de la Reserva Mineral (ver numeral 6.6). El requisito de viabilidad económica implica la determinación de los flujos de efectivo anuales y la inclusión de todos los parámetros que tienen un impacto económico (modificado de CIM Mineral Resource & Mineral Reserve Committee, 2019).

7.2

Categorización

El ECRR proporciona dos categorías para la definición de Reserva Mineral: Reserva Mineral Probada y Reserva Mineral Probable. El profesional líder debe garantizar que se cumplan los criterios mínimos antes de asignar estas categorías y debe ser consciente de todos los insumos utilizados para establecer la Reserva Mineral que afectan la confianza en las categorías. La metodología para establecer la clasificación debe estar bien documentada y entenderse fácilmente. La buena práctica incluye proporcionar una descripción narrativa de las razones cualitativas detrás de la selección de la categoría. Cuando sea práctico, se debe usar evidencia empírica (por ejemplo, datos de producción) para calibrar y justificar la categorización (modificado de CIM Mineral Resource & Mineral Reserve Committee, 2019).

7.3

Verificación de entradas

Es responsabilidad del profesional líder garantizar la verificación de todos los aportes a la estimación de la Reserva Mineral. Como dicha estimación se basa en muchas entradas de datos, incluido el modelo de Recursos Minerales, es importante que las entradas y la consistencia de las entradas sean validadas como parte del proceso de estimación de la Reserva Mineral. La identificación de los aspectos críticos de la estimación de la Reserva Mineral es una parte importante de la verificación de entradas (modificado de CIM Mineral Resource & Mineral Reserve Committee, 2019).

7.4

Practicidad de la minería

Los aspectos prácticos de las tasas y métodos de extracción para un depósito son consideraciones importantes en la estimación de una Reserva Mineral. El profesional líder debe evaluar las diversas propuestas al estimar una Reserva Mineral. También se debe tener cuidado para asegurar que el equipo de minería seleccionado es apropiado para el depósito. El profesional líder debe tener un alto nivel de confianza en la viabilidad de los métodos de extracción y procesamiento considerados al determinar las Reservas Minerales (modificado de CIM Mineral Resource & Mineral Reserve Committee, 2019).

El profesional líder, cuando sea apropiado, debe considerar configuraciones alternativas de mina/planta. La selección de los métodos y tasas de minería y los procesamiento apropiados pueden implicar varias iteraciones e involucrar el aporte de miembros de otras disciplinas (modificado de CIM Mineral Resource & Mineral Reserve Committee, 2019).

7.5

Evaluación de riesgos del proyecto

Si bien la clasificación de la Reserva Mineral permite al profesional líder identificar el riesgo técnico en términos generales, la mejor práctica incluye el establecimiento de una metodología para identificar y clasificar los riesgos asociados con cada entrada de la estimación de la Reserva Mineral. Esto ayudará a establecer la categorización de la Reserva Mineral, proporcionando así una comprensión del riesgo técnico asociado con la estimación de la Reserva Mineral. Estas metodología, clasificación y análisis deben estar bien documentadas (modificado de CIM Mineral Resource & Mineral Reserve Committee, 2019).

7.6

Revisiones hechas por pares

Una buena práctica incluye el uso de una revisión interna por pares de la estimación de la Reserva Mineral. Esta debe tener en cuenta insumos, metodología, supuestos subyacentes, resultados de la estimación en sí misma y una prueba de viabilidad económica (CIM Mineral Resource & Mineral Reserve Committee, 2019).

7.7

Auditorías

Al completar un Estudio de Prefactibilidad, o en el caso de cambios significativos en una estimación de Reserva mineral, la buena práctica incluye la finalización de una auditoría de alcance adecuado realizada por un profesional imparcial. La auditoría debe considerar la metodología utilizada, probar la razonabilidad de los supuestos subyacentes y revisar la conformidad con las definiciones y clasificación de la Reserva Mineral. La metodología para la identificación, evaluación y gestión del riesgo de la Reserva Mineral también debe incluirse en la auditoría de la Reserva Mineral. Dicha auditoría debe documentarse, distribuirse y responderse de manera que reconozca el buen gobierno corporativo (CIM Mineral Resource & Mineral Reserve Committee, 2019).

Al completar un Estudio de Prefactibilidad, o en el caso de cambios significativos en una estimación de Reserva mineral, **la buena práctica incluye la finalización de una auditoría de alcance adecuado realizada por un profesional imparcial.**

7.8

Documentación

A menudo hay varias iteraciones de evaluaciones realizadas durante un período prolongado de tiempo antes de completar un Estudio de Prefactibilidad. La mejor práctica incluye la documentación apropiada de los insumos, metodología, riesgos y supuestos utilizados en estas valoraciones, para que estén disponibles para futuras estimaciones de la Reserva Mineral.

La información debe ser fácilmente recuperable, estar fácilmente disponible y estar catalogada de manera que permita una evaluación del historial de las evaluaciones realizadas y que registre la ubicación de toda la información, informes relevantes, etc. Es importante asegurarse de que la información utilizada en una evaluación y la comprensión obtenida de un depósito mineral estén disponibles para trabajos futuros. Se debe tener cuidado en el almacenamiento y considerar la evolución continua de los formatos de archivos de computador, y el impacto que esto puede tener en el trabajo anterior (modificado de CIM Mineral Resource & Mineral Reserve Committee, 2019).

7.9

Declaraciones de Reserva Mineral

Las declaraciones de la Reserva Mineral deben ser inequívocas y suficientemente detalladas para que una persona con conocimientos comprenda la importancia de cada parámetro tenido en cuenta. En el caso de las estimaciones de la Reserva Mineral de materiales de arrastre, la relación de descapote, si la hay, debe establecerse sin ambigüedades. Debería haber un vínculo obvio entre la estimación de la Reserva Mineral y la estimación del Recurso Mineral. La buena práctica incluye la documentación de esos vínculos (por ejemplo, dilución y recuperación minera) que se usaron para preparar la estimación de la Reserva Mineral (modificado de CIM Mineral Resource & Mineral Reserve Committee, 2019).

Más información

» Ortiz J. M. & Emery, X. (2004). Categorización de recursos y reservas mineras. *Mining Innovation International Conference MININ 2004,* Santiago de Chile, Chile.

» Rossi, M. & Deutsch, C. V. (2014). *Mineral resource estimation.* Springer.

» CIM Mineral Resource & Mineral Reserve Committee (2019). CIM Estimation of Mineral Resources & Mineral Reserves Best Practice Guidelines. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum [CIM].

7.10

Discusión de la confianza relativa

En la evaluación de la viabilidad de un proyecto minero —ya sea para decidir la inversión y financiamiento de este o discutir el plan de operación minera y el diseño de mina— un factor determinante radica en evaluar y analizar los valores de los resultados de la precisión y la incertidumbre de las calidades encontradas para cada bloque; y determinar, con base en la experiencia, qué grado de confianza arrojan las estimaciones realizadas (modificado de Bonilla Osorio *et al*., 2021).

Al momento de analizar y discutir la confianza relativa que reflejan los datos recolectados en la exploración, el modelo geológico y la categorización de los recursos y reservas, se recomienda tener en cuenta que el nivel de confianza de las estimaciones se basa en el grado del conocimiento geológico del depósito, en los muestreos realizados y los resultados de los análisis de laboratorio, en los controles de calidad implementados en los diferentes procesos, en el tratamiento de los datos y en la precisión del método de estimación aplicado.

Más información

» Comisión Colombiana de Recursos y Reservas [CCRR] (2018). *Estándar Colombiano para el reporte público de resultados de exploración, recursos y reservas minerales- ECRR*. Tabla 1.

8

Preparación de reportes

Antes de redactar un reporte o documento, es necesario comprender a quiénes está dirigido, cuál es la información más relevante que buscará el lector en el documento y cuál es la manera más adecuada de estructurarlo para que se garantice su total comprensión.

En la preparación de reportes públicos, comunicados de prensa, reportes internos o documentos técnicos para las entidades gubernamentales debe incluirse información general que permita al lector entender el objetivo, el alcance y el contenido del documento, así como contextualizarse del estado técnico, legal, ambiental, social y económico del proyecto.

Antes de redactar un reporte o documento, es necesario comprender a quiénes está dirigido, cuál es la información más relevante que buscará el lector en el documento y cuál es la manera más adecuada de estructurarlo para que se garantice su total comprensión. El profesional líder es responsable de determinar el contenido que debe tener cada informe y de consultar los términos de referencia, guías o requerimientos de cada entidad a la cual se dirigirá el informe (Autoridad Minera, Bolsa de Valores, Autoridad Ambiental, reportes internos, entre otras).

Una buena práctica consiste en definir claramente los siguientes parámetros antes de la elaboración de cualquier documento:

» **Público objetivo:** definir claramente a quién va dirigido el documento facilita la tarea de precisar el contenido, el lenguaje requerido y la posible longitud aceptable.

» **Estructura del documento:** la estructura del documento debe estar acorde con el público objetivo al que está dirigido. Es recomendable revisar manuales, guías metodológicas, estándares o normas disponibles para seleccionar la estructura más conveniente al documento, garantizando que lo consignado en el reporte es comprensible, está completo y ordenado.

» **Fuentes de información:** toda información adquirida de fuentes secundarias debe ser evaluada para decidir si aporta o no al documento. Cuando se usa información de fuentes secundarias, esta debe citarse dentro del texto y todos los documentos citados deben aparecer en la bibliografía del documento.

8.1

Objetivo del reporte

El objetivo del reporte debe establecerse claramente, ya que es la base para el desarrollo del contenido. El objetivo del reporte permite al lector hacer un balance respecto a si este fue efectivamente alcanzado.

La descripción del proyecto es la presentación inicial de los resultados de la recolección de información y de la exploración o estimación de recursos y reservas.

8.2

Descripción del proyecto

La descripción del proyecto es la presentación inicial de los resultados de la recolección de información y de la exploración o estimación de recursos y reservas. Es la que permite a los usuarios del reporte obtener información preliminar para identificar con claridad el estado de la situación legal y técnica del título minero.

Entre los datos más relevantes debe incluirse la información del título minero, el propietario, la etapa actual del proyecto, las características del depósito (cuando este ha sido caracterizado) o sus proyecciones (cuando el reporte comprenda solo fases tempranas de exploración), las características del material y la unidad geológica. Hay que incluir un resumen de las labores de cartografía y muestreo que se han llevado a cabo, tamaño del depósito, estimación de recursos del proyecto y restricciones o avances de carácter ambiental, social, político, jurídico. Las conclusiones de la integración de toda la información adquirida deben tener énfasis en el potencial o viabilidad económica del proyecto, las recomendaciones a que haya lugar y una síntesis de la siguiente etapa a ejecutar en el proceso de estimación de recursos y reservas.

La estimación de recursos y reservas en un proyecto minero permite identificar claramente su alcance, y entre ello la ubicación, extensión y características de los materiales pétreos que son objeto de interés económico. Además, permite entender las características técnicas que sustentan los diseños de infraestructura a construir, las formas de extracción y la estructura organizacional que debe tener la operación minera. Cada una de las características se deberá dimensionar y ubicar en planos o mapas conceptuales, cuando haya lugar, con el fin de contextualizar el proyecto dentro del desarrollo minero.

En síntesis, la descripción permitirá definir los aspectos más relevantes, entre los que se cuentan: antecedentes, infraestructura existente, resultados de exploración, fases y actividades del proyecto, aspectos geológicos, estructura del proyecto minero, recursos minerales, factores modificadores y reservas minerales.

Cuando se trata de reportes de proyectos en producción, se recomienda incluir datos del método de explotación, tiempo durante el cual ha estado activa la operación, capacidad instalada y datos de producción. En caso de que haya exploración adicional, también es conveniente mencionarla.

8.3

Localización

La localización del proyecto es fundamental para la comprensión de la información que hace parte del reporte. Esta debe ser suficientemente clara para ubicar espacialmente el título e identificar la infraestructura disponible, como vías de acceso, centros poblados cercanos y centros con condiciones especiales (resguardos indígenas, comunidades campesinas, zonas de restricciones ambientales, entre otros), pues los aspectos geográficos y administrativos repercuten en las necesidades logísticas y técnicas del proyecto minero.

Es recomendable presentar la localización del proyecto de manera tanto escrita como gráfica. Se recomienda ubicar al lector primero desde lo regional (país, departamento) hasta lo local (municipio, vereda). Las descripciones textuales deben ser lo suficientemente claras para garantizar que el usuario pueda ubicar exactamente el lugar donde se localiza el proyecto y los diferentes medios de transporte para su acceso (terrestre, aéreo, fluvial).

La información gráfica puede consistir en figuras y mapas que contengan datos suficientes para entender la ubicación del proyecto. Es recomendable generar ayudas gráficas de acuerdo con el diseño del documento; estas deben ser legibles, estar organizadas y brindar la información que pretenden transmitir.

Recomendaciones

» Elaborar los mapas y figuras de localización con coordenadas, según convenciones actuales y escalas convenientes. Se sugiere el uso de escalas convencionales para facilitar el entendimiento de mapas y su uso en papel.

» Verificar el amarre a la Red Geodésica Nacional (IGAC) exigido por las entidades gubernamentales, y utilizarlo en los productos gráficos internos de la compañía, si se considera conveniente.

» Garantizar que todos los elementos cartográficos necesarios para indicar correctamente la localización queden incluidos en mapas y figuras.

» Para el caso de reportes públicos, el profesional que firma el reporte debe hacer una declaración respecto a la confianza relativa en las estimaciones. En dicha declaración se recomienda incluir las limitantes y los alcances de la estimación, al igual que los factores modificadores adicionales que afectan el proyecto.

8.4

Salidas gráficas

Los mapas, diagramas, columnas estratigráficas, figuras, modelos 2D o 3D y, en general, las representaciones gráficas son un material de soporte imprescindible en todo proyecto minero. Estos funcionan no solo como parte de los reportes y documentos, sino como material guía para la toma de decisiones en cualquier etapa o actividad de los procesos de exploración y explotación.

Cuando se trata de representar el terreno en una proyección plana, los detalles de escala, sistema de proyección, datos que se incluirán en el plano, colores, textos y convenciones, entre

otros, deben ser atendidos con la mayor diligencia para garantizar su calidad y el cumplimiento de su propósito.

La información gráfica puede dividirse en dos categorías: interna, cuando se usa para documentos y procesos al interior de la compañía, o externa, cuando dicha información será compartida con usuarios externos a la compañía (posibles inversionistas, autoridades estatales, academia, entre otros). Ya sean internas o externas, lo más recomendable es unificar los parámetros para las salidas gráficas, de manera tal que no sea necesario generar productos específicos para un caso u otro.

Como ejemplo, si los requisitos técnicos de representaciones gráficas de alguna autoridad estatal se consideran adecuados para los reportes y procesos internos, lo mejor es utilizar esos requisitos técnicos también para las salidas gráficas internas. Si es necesario establecer diferencias entre productos para uso interno o externo, la recomendación es que estos se generen de manera organizada para evitar confusiones en la información o salidas gráficas inadecuadas.

Para el caso de los mapas, se recomienda generar plantillas estandarizadas que garanticen la inclusión de los elementos necesarios para que el lector pueda comprender la información. Cuando los mapas se elaboran para las entidades gubernamentales, es recomendable consultar la normatividad vigente de cada entidad respecto al tema para garantizar que se cumplen todos los requerimientos exigidos.

Las figuras que se generan para documentos tienen un menor tamaño que un mapa, por lo tanto, se deben conservar los elementos esenciales a la escala adecuada para garantizar su comprensión. La resolución de las imágenes es clave para su entendimiento; frecuentemente se utilizan capturas de pantalla de documentos externos que carecen de la calidad que debe contener cualquier figura en un reporte, lo ideal es garantizar la calidad de la imagen, bien sea digitalizándola o usando solo las que son legibles y claras. Cuando las figuras se copian o se adaptan de fuentes externas, dicha fuente debe referenciarse en el texto descriptivo, de tal manera que el lector pueda conocer el origen de la información.

Recomendaciones

» Generar plantillas para la presentación de mapas y figuras, y revisarlas periódicamente para verificar su vigencia.

» Garantizar que los mapas tengan todos los datos básicos para su entendimiento y que dichos datos sean presentados ordenadamente en el mapa.

» Consultar periódicamente con las autoridades estatales la información gráfica que debe entregarse, y ajustar los productos de acuerdo con los requisitos de dichas autoridades. Para el caso de la ANM, actualmente se cuenta con el Modelo de Datos Geográfico para entrega de la información compilada en sistemas de información geográfica.

» Revisar la resolución y la calidad de las imágenes que han de ser incluidas en los reportes, y determinar estándares de presentación.

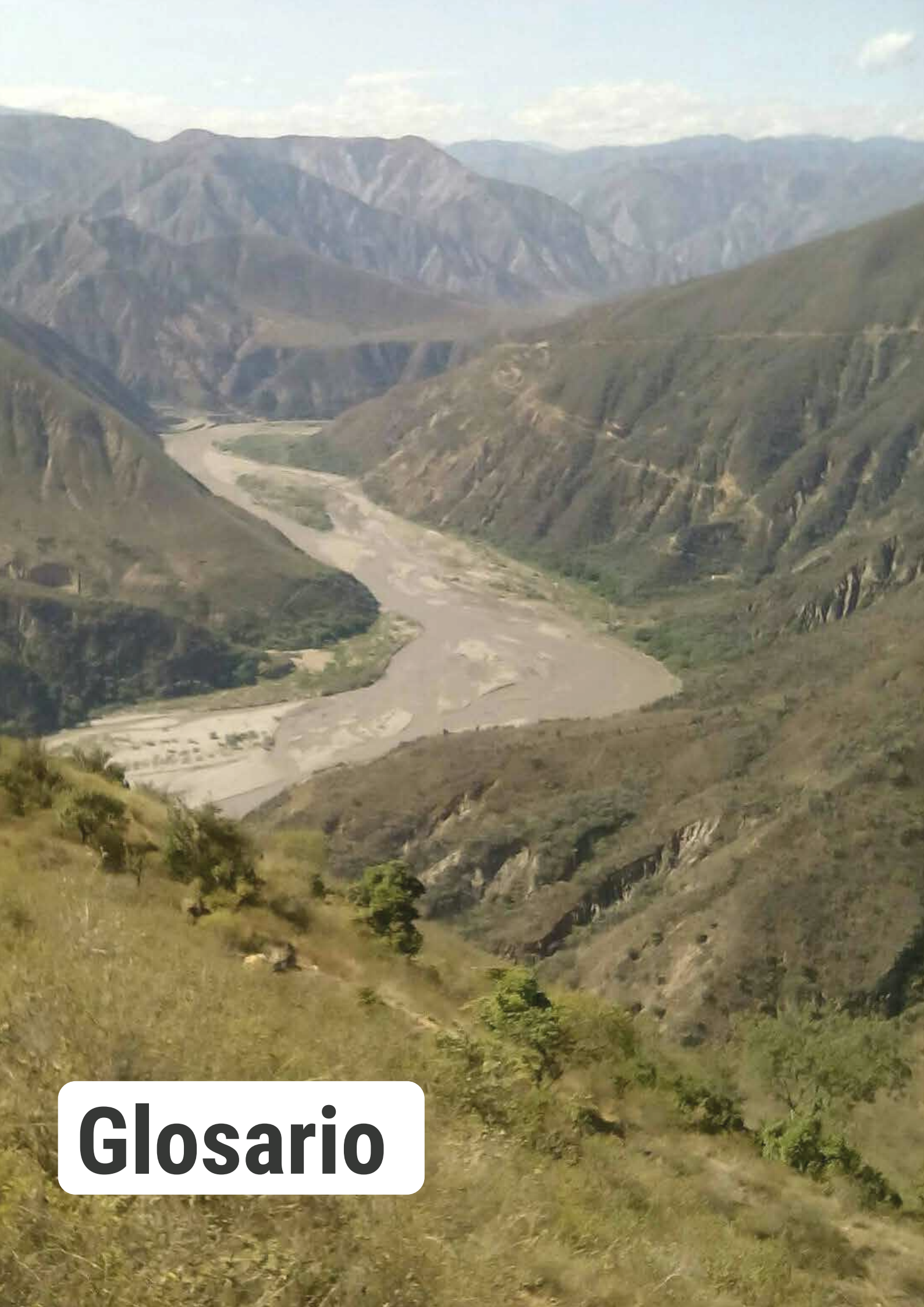
Más información

» Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (2018). Especificaciones para la presentación de la información geográfica y cartográfica. En *Metodología para la Elaboración y Presentación de Estudios Ambientales*.

» Agencia Nacional de Minería (27 de mayo de 2015). Resolución 40600. Por medio de la cual se establecen requisitos y especificaciones de orden técnico minero para la presentación de planos y mapas aplicados a la minería.

» Servicio Geológico Colombiano [SGC]. (2012) Estándares de cartografía geológica digital para planchas a escala 1:100.000 y mapas departamentales - versión 2.

» US. Geological Survey (2006). *FGDC Digital Cartographic Standard for Geologic Map Symbolization*.



Glosario

A continuación se presentan algunas definiciones de uso frecuente en la presente guía.

Aforo líquido: determinación del caudal de una corriente.

Aforo sólido: medida de los sedimentos en suspensión de una corriente.

Agregados: son todos aquellos materiales líticos que, debidamente fragmentados y clasificados, sirven para incorporarse a un hormigón (llámese asfáltico o hidráulico) para usos ingenieriles. Hacen parte de los agregados las arenas y gravas (Ministerio de Minas y Energía, 2015).

Año hidrológico: período de 12 meses consecutivos durante el cual se produce un ciclo climatico anual completo.

Batimetría: levantamiento topográfico en una corriente de una sección transversal, perpendicular a ella.

Banco cóncavo: corresponde a zonas donde la fuerza erosiva del río se desplaza al lado cóncavo del cauce, arrastrando sedimentos de mayor consistencia.

Buena práctica: acción que ha tenido éxito en su aplicación en proyectos de diferente connotación. Se espera, entonces, que en situaciones similares generen resultados al mismo nivel.

Cauce activo: representa la unidad espacial donde se generan los procesos geomorfológicos, hidrológicos e hidráulicos asociados al río objeto de estudio, definido en al menos dos ventanas de tiempo. Se habla de cauce activo principalmente en ríos trenzados, donde el canal principal varia, fundamentalmente, por los procesos hidrológicos.

Corte de cabeza: es el punto localizado aguas arriba de la extracción minera que define la profundidad de excavación sobre el lecho del río.

Curvas granulométricas: curva que permite una mejor visualización de la distribución de los agregados, en la cual aparecen sobre las ordenadas —en escala aritmética— el porcentaje que pasa a través de los tamices y sobre las abscisas —en escala logarítmica— la abertura de los tamices. Esta curva permite obtener el tamaño máximo nominal, el módulo de finura y el porcentaje de finos.

Factores Modificadores: son consideraciones usadas para convertir Recursos Minerales a Reservas Minerales (CCRR,2018).

Fecha efectiva: es la fecha de la información técnica o científica más reciente incluida en el Reporte Público (CCRR, 2018).

Granulometría: es la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado, tal como se determina por análisis de tamices. Es la medición de los granos de una formación sedimentaria y el cálculo de la abundancia correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica.

Hidráulica fluvial: rama de la hidráulica que estudia el flujo de agua en ríos y la acción de las fuerzas ejercidas sobre los materiales del lecho.

Hidráulica: rama de la mecánica de fluidos que estudia el flujo de agua (u otros líquidos) en tuberías y canales abiertos.

Hidrograma: gráfico que representa la variación temporal de variables hidrológicas, como la precipitación, el nivel de agua, el caudal, la velocidad y la carga de sedimentos.

Llanura de inundación: terreno adyacente a una corriente de agua que se inunda en eventos de creciente que superan los niveles de banca llena. Área plana que está ocasional o periódicamente inundada por desborde —debido a incrementos excesivos del caudal por lluvia— y asociada generalmente con grandes sistemas fluviales, en medio de la cual divaga el cauce de un río que, además, acumula en ella una capa de sedimentos finos (la llanura de inundación extraordinaria es un concepto hidrológico y no una forma de terreno) (Ministerio de Minas y Energía, 2015).

Minería en Seco: tipo de minería que se lleva a cabo en terrazas, llanuras aluviales, márgenes de ríos expuestos estacionalmente o en ríos efímeros que están secos durante algunas temporadas del año.

Minería Húmeda *(instream):* extracción minera que se realiza directamente del lecho del río y puede ocurrir dentro del canal principal o en las márgenes de un río.

Persona competente: es un profesional de la industria minera (geólogos, geocientíficos, ingenieros geólogos, ingenieros de minas y/o metalurgia extractiva) registrado en la Comisión Calificadora Colombiana de Recursos Minerales y Reservas Mineras. Está sujeto a su código de ética.

Profesional idóneo: profesional que refrenda los documentos y estudios. La presentación de documentos y estudios correspondientes a las actividades de exploración, construcción y montaje y explotación deberá ser refrendada por profesionales geólogos, ingenieros de minas o ingenieros geólogos con matrícula profesional.

Profesional líder: para el propósito de la presente guía, se usa esta denominación para hacer referencia al profesional responsable de coordinar las actividades de exploración, la estimación de recursos y reservas, y la elaboración de reportes.

Punto de corte: punto inicial de trabajo de la excavación.

Raspado o desnatado de barra: extracción de la parte superior de la capas de barras (arenas y gravas) expuestas a diferentes profundidades.

Recurso Mineral: un Recurso Mineral es una concentración u ocurrencia de un material sólido con interés económico —en o sobre la corteza terrestre— de tal forma, cantidad, tenor o calidad, que hay perspectivas razonables para una eventual extracción económica (CCRR, 2018).

Recurso Mineral Inferido: un Recurso Mineral Inferido es aquella parte de un Recurso Mineral para la cual la cantidad y el tenor o calidad son estimadas sobre muestreos y evidencias geológicas limitadas (CCRR, 2018).

Recurso Mineral Indicado: es aquella parte de un Recurso Mineral para la cual la cantidad, tenor o calidad, densidad, forma y características físicas son estimadas con suficiente confianza para permitir la aplicación de los Factores Modificadores, para soportar la planeación minera y la evaluación de la viabilidad económica del depósito (CCRR, 2018).

Recurso Mineral Medido: un Recurso Mineral Medido es aquella parte de un Recurso Mineral para la cual la cantidad, tenor o calidad, densidad, forma y características físicas son estimadas con suficiente confianza para permitir la aplicación de los Factores Modificadores, para soportar la planeación minera detallada y la evaluación final de la viabilidad económica del depósito (CCRR, 2018).

Reserva Mineral: una Reserva Mineral es la parte económicamente explotable de un Recurso Mineral Medido y/o Indicado. Esto incluye el material de dilución y perdidas que pueden ocurrir cuando el material es explotado o extraído, y está definido apropiadamente por estudios de prefactibilidad o factibilidad, que incluyen la aplicación de Factores Modificadores (CCRR, 2018).

Reserva Mineral Probable: una Reserva Mineral Probable es la parte económicamente explotable de un Recurso Mineral Indicado y, en algunas circunstancias, de un Recurso Mineral Medido.

Reserva Mineral Probada: una Reserva Mineral Probada es la parte económicamente explotable de un Recurso Mineral Medido. Esta Reserva implica un alto grado de confianza en los Factores Modificadores (CCRR, 2018).

Thalweg: línea imaginaria que une el punto más alto con el más bajo de un tramo de río.

Bibliografía

American Society for Testing and Materials [ASTM] (1992). ASTM D75 Standard Method of Test for Sampling of Aggregates.

Bonilla Osorio, G. E., Castaño López, A., Nieto Patarroyo, M. A. & Parra Bastidas, S. D. (2021). *Guía de Buenas Prácticas de la Esmeralda Colombiana. CCRR, Fedesmeraldas, ANM.*

Carvajal Perico, J. H. (2012). *Propuesta de Estandarización de la Cartografía Geomorfológica en Colombia*. Servicio Geológico Colombiano [SGC].

Chow, V. T., Maidment, D. R. & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.

CIM Mineral Resource & Mineral Reserve Committee (2018). CIM Mineral Exploration Best Practice Guideline. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum [CIM].

CIM Mineral Resource & Mineral Reserve Committee (2019). CIM Estimation of Mineral Resources & Mineral Reserves Best Practice Guidelines. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum [CIM].

Comisión Colombiana de Recursos y Reservas [CCRR] (2018). *Estándar Colombiano para el reporte público de resultados de exploración, recursos y reservas minerales* - ECRR. https://comisioncolombianarecursosyreservas.com/estandar-colombiano-reporte-publico-resultados-exploracion-recursos-minerales-reservas-ecrr/

Department of Irrigation and Drainage [DID] (2009). River and Mining Management Guide. Ministry of Natural Resources and Environment Department of Irrigation and Drainage Malaysia.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación [ICONTEC] (2013). Norma Técnica Colombiana NTC-ISO/IEC 27001. Técnicas de seguridad. Sistemas de gestión de la seguridad de la información (SGSI). Requisitos.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM] (2007). *Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua*. IDEAM, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Instituto Nacional de Vías [INVIAS] (2012). Norma INVIAS E-201 13 Muestreo de agregados para construcción de carreteras.

Kondolf, G. M., Smeltzer, M. & Kimball, L. (2001). Freshwater Gravel Mining and Dredging Issues. Washington Department of Fish and Wildlife, Washington Department of Ecology, Washington Department of Transportation.

Macdonald, E. (2007). *Handbook of gold exploration and evaluation*. Woodhead Publishing Limited.

Maidment, D. (ed.) (1994). *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill.

Ministerio de Minas y Energía (2015). Resolución 40599 de 2015. Glosario Técnico Minero. *Diario Oficial 49.524*.

Naciones Unidas (7 de Mayo de 2019). La explotación insostenible de arena destruye ríos y mares. *Noticias ONU*. https://news.un.org/es/story/2019/05/1455611

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2015). *Plantilla de buenas prácticas*. http://www.fao.org/3/a-as547s.pdf

Popoff, C. (1966). *Computing reserves of mineral deposits: principles and conventional methods*. United States Department of the Interior, Bureau of Mines.

Sherman, L.K. (1932). Stream Flow from Rainfall by the Unit Graph Method. *Engineering News Record, 108,* 501-505.

Simón, A. (2013). Taller de Aseguramiento y Control de la Calidad en la Exploración Geológica. AMEC International Ingeniería y Construcción Ltda.

Steinberger, J. K., Krausmann, F. & Eisenmenger, N. (2010). Global patterns of materials use: A socioeconomic and geophysical analysis. *Ecological Economics,* 69(5), 1148-1158.

Unidad de Planeación Minero Energética [UPME]. (26 de Agosto de 2021). UPME. https://www1.upme.gov.co

Unidad de Planeación Minero Energética [UPME] & Universidad Nacional de Colombia (2000). Atlas Hidrológico de Colombia.

Unidad de Planeación Minero Energética [UPME] & Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia [UPTC]. (2015). *Instrumento Técnico Ambiental Material de Arrastre*. UPME-UPTC.

Vélez Otálvaro, M. & Smith Quintero, R. (1994). Hidrología de Antioquia. Secretaría de Obras Públicas de Antioquia.

Wilches, S. (2001). *Estudio de las propiedades de invariancia de las precipitaciones máximas puntuales en el departamento de Antioquia*. [tesis de maestría]. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

AGENCIA NACIONAL DE
MINERÍA

Buenas prácticas para el desarrollo de una minería responsable, moderna y eficiente

ASOGRAVAS

CCRR® Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales

R&R Recursos y Reservas Mineras

MaPriC Materias primas y clima

Implementado por
giz Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Por encargo de:
Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear
de la República Federal de Alemania