



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**GUÍA PARA LA PLANEACIÓN DEL
CIERRE DE MINAS:
DE LA CONCEPTUALIZACIÓN A LA
ELABORACIÓN DE PLANES ESPECÍFICOS**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniera de Minas y Metalurgista

P R E S E N T A

Rosa Laura Molina Pérez

DIRECTOR DE TESIS

Dr. José Enrique Santos Jallath



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022

DEDICATORIA

*Dedico este trabajo a mi mamá Leti
Con tu apoyo incondicional, confianza y amor lo pude lograr
Gracias por todo mamá, este logro es de las dos, te amo muchísimo*

Siempre juntas

*A mis hermanos Alfredo y Valentina, sus palabras de aliento y
cariño me motivaron a seguir adelante*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la *Universidad Nacional Autónoma de México y Facultad de Ingeniería* por darme la oportunidad de ser parte de ella y formarme como profesionista y ser humano integral.

A mi director de tesis *Dr. José Enrique Santos Jallath*, por sus valiosas contribuciones no solo a la realización del presente trabajo, sino a mi vida. Gracias por su apoyo, por confiar en mí y por sus constantes consejos.

Gracias a mis sinodales, *Ing. Carl Anthony Servin Jungdorf, Dr. Francisco Martin Romero, M.I. Guadalupe Ochoa Pastor e Ing. Roque Luis Eduardo Chacon Wences*, sus aportaciones y comentarios ayudaron a mejorar el trabajo y el entendimiento de las temáticas abordadas.

Gracias a mi mamá *Lety*, mi hermano *Alfredo* y mi hermana *Valentina*. Poco a poco lo estamos logrando. Los amo muchísimo.

Agradezco a toda mi familia materna: *Mayi, Alfredo, Fabián, Tibu, Honorio, Ana Edith, Lucy, Norma, Anita y más*, por todas las contribuciones, el apoyo moral, económico y la confianza que depositaron en mí, gracias infinitas porque sin ustedes no hubiera podido concluir mis estudios.

A mi compañera, amiga y prima *Ilse*. Afrontar juntas todas las etapas académicas y de vida hizo más fácil y agradable todo. Gracias por todo tu apoyo y consejos, te amo.

A mis incondicionales y entrañables amigos de la facultad: *Araceli, Jesús, Damaris, Julio, Mayra, Jacque, Fernando, Cuevi, Manuel* y más... Gracias por todos sus aportes durante mi formación académica y personal; su apoyo y cariño fue determinante.

A todos mis profesores de la Facultad de Ingeniería por sus experiencias y conocimientos compartidos

ÍNDICE

| | |
|---|-------------|
| ÍNDICE DE FIGURAS | viii |
| ÍNDICE DE TABLAS | x |
| INTRODUCCIÓN | 11 |
| CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO | 14 |
| I.1 Cierre de minas | 14 |
| I.2 Plan de cierre de minas | 15 |
| I.2.1 Objetivos del plan de cierre | 16 |
| I.2.2 Etapas del plan de cierre | 17 |
| I.3 Lineamientos nacionales | 19 |
| I.3.1 Leyes | 19 |
| I.3.2 Reglamentos | 21 |
| I.3.3 Normas | 22 |
| I.4 Lineamientos internacionales | 24 |
| I.4.1 Australia | 24 |
| I.4.2 Canadá | 25 |
| I.4.3 Estados Unidos de Norte América | 25 |
| I.4.4 América Latina | 26 |
| I.4.5 Instituciones y Organizaciones | 27 |
| CAPÍTULO II. DIAGNÓSTICO GENERAL DEL SITIO | 28 |
| II.1 Identificación del tipo de proyecto | 28 |
| II.2 Antecedentes del proyecto | 29 |
| II.3 Condiciones iniciales | 31 |
| II.4 Identificación de grupos de interés | 34 |

| | |
|---|-----------|
| II.5 Descripción general y componentes del proyecto | 35 |
| II.6 Evaluación de impacto ambientales | 38 |
| II.7 Evaluación de riesgos | 41 |
| CAPÍTULO III. INTEGRACIÓN DEL PLAN DE CIERRE CONCEPTUAL | 46 |
| III.1 Plan de cierre conceptual | 46 |
| III.2 Estructura del plan | 47 |
| III.3 Objetivos generales | 48 |
| III.4 Construcción del plan | 48 |
| CAPÍTULO IV. LÍNEAS DE ACCIÓN | 51 |
| IV.1 Estabilización física y química de áreas operativas | 51 |
| IV.2 Residuos minero-metalúrgicos | 56 |
| IV.3 Manejo de residuos sólidos de tipo urbano, peligrosos y de manejo especial | 62 |
| IV.4 Gestión hídrica | 65 |
| IV.5 Drenaje ácido de minas (DAM) | 70 |
| IV.6 Rehabilitación | 74 |
| IV.6.1 Diseño y construcción de relieves | 76 |
| IV.6.2 Revegetación / Reforestación | 77 |
| IV.6.3 Recuperación de sistemas ambientales | 78 |
| IV.6.4 Recolonización de la fauna | 79 |
| IV.7 Remediación de sitios contaminados | 80 |
| IV.8 Infraestructura | 86 |
| IV.9 Responsabilidad social | 88 |
| IV.9.1 Análisis de los grupos de interés | 89 |
| IV.9.2 Comunicación e interacción | 90 |
| IV.9.3 Desarrollo de programas comunitarios | 92 |
| IV.10 Usos futuros del sitio | 95 |

| | |
|---|------------|
| CAPÍTULO V. PLANES ESPECÍFICOS | 97 |
| V.1 Implementación de las líneas de acción | 97 |
| V.1.1 Formulación | 97 |
| V.1.2 Planeación | 98 |
| V.1.3 Ejecución | 98 |
| V.1.4 Evaluación | 98 |
| V.1.5 Ajuste | 100 |
| V.1.6 Finalización | 100 |
| V.2 Planeación de actividades | 100 |
| V.3 Cierre progresivo | 102 |
| V.3.1 Importancia | 102 |
| V.3.2 Proceso de preparación y ejecución | 102 |
| V.3.3 Análisis de las líneas de acción | 103 |
| V.4 Recursos necesarios | 107 |
| V.5 Indicadores de desempeño | 108 |
| V.6 Financiamiento del plan | 110 |
| V.6.1 Proyectos que inician con el plan de cierre | 111 |
| V.6.2 Proyectos que inician sin el plan de cierre | 112 |
| V.7 Cierre temporal y cierre repentino | 114 |
| CAPÍTULO VI. POSCIERRE | 117 |
| VI.1 Monitoreo y mantenimiento | 117 |
| VI.2 Finalización | 122 |
| VI.3 Renuncia | 123 |
| CONCLUSIONES | 125 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 127 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. El cierre de minas en el ciclo de vida de una mina (Adaptado de Morales y Hantke, 2020). | 14 |
| Figura 2. Aplicación de planes a lo largo del ciclo minero..... | 19 |
| Figura 3. Componentes del diagnóstico general de sitio de acuerdo con el caso de estudio..... | 28 |
| Figura 4. Posibles escenarios presentes en un proyecto minero..... | 29 |
| Figura 5. Aspectos que se deben cubrir en los antecedentes del proyecto. | 30 |
| Figura 6. Estudio integral que abarca el diagnóstico general del sitio. | 31 |
| Figura 7. Posibles elementos del sitio de estudio clasificados de acuerdo con el medio. | 32 |
| Figura 8. Indicadores para los elementos del medio biológico..... | 33 |
| Figura 9. Algunos integrantes de los grupos internos y externos..... | 34 |
| Figura 10. Componentes del proyecto que deben ser considerados..... | 36 |
| Figura 11. En la Figura superior se presenta el mapeo de los componentes del proyecto La Herradura. En la Figura inferior se presenta el mapeo específicamente de los componentes del Tajo principal. | 37 |
| Figura 12. Etapas por cubrir en la evaluación de impacto ambiental..... | 39 |
| Figura 13. Ejemplo de la Evaluación de Impacto Ambiental para proyectos clasificados en el Caso 2..... | 40 |
| Figura 14. Etapas que considerar en el desarrollo de la evaluación de riesgos..... | 42 |
| Figura 15. Etapa 2 - Identificación de riesgos..... | 43 |
| Figura 16. Ejemplo de una evaluación de riesgos aplicado a una presa de jales (Adaptado de Julca, 2021)..... | 45 |
| Figura 17. Incorporación del plan de cierre en la vida del proyecto minero (EPA, DMP, 2015).. | 46 |
| Figura 18. Objetivos generales..... | 48 |
| Figura 19. Proceso de construcción del plan de cierre. | 49 |
| Figura 20. Clasificación de los residuos minero-metalúrgicos. | 56 |
| Figura 21. Elementos y procedimientos para considerar al formular planes de manejo de los residuos mineros establecidos en la NOM-157-SEMARNAT-2009..... | 59 |
| Figura 22. Clasificación de los residuos | 63 |
| Figura 23. Directrices para el manejo integral de los residuos | 64 |
| Figura 24. Ejemplo tradicional del uso de agua en la minería (Adaptado de Kauppila et al. 2011) | 65 |
| Figura 25. Diagrama que ejemplifica la generación de drenaje ácido en una operación minera (Younger et al., 2002)..... | 71 |
| Figura 26. Metodología para el manejo de drenaje ácido en un proyecto minero..... | 72 |

| | |
|---|-----|
| Figura 27. Estructura para la generación de plan de rehabilitación. | 75 |
| Figura 28. Etapas de rehabilitación..... | 76 |
| Figura 29. Diseño y construcción de relieves. | 77 |
| Figura 30. Consideraciones de las mejoras físicas, químicas y biológicas. | 78 |
| Figura 31. Etapas para la determinación del plan de remediación. | 82 |
| Figura 32. Elementos que se integran a un modelo conceptual de afectación. | 83 |
| Figura 33. Clasificación de las metodologías aplicadas para la remediación de suelos y agua de acuerdo con 3 criterios (Adaptado de Fundación Chile, 2015). | 85 |
| Figura 34. Pautas de la responsabilidad social a lo largo del proyecto minero. | 89 |
| Figura 35. Elementos por considerar para realizar el análisis de los grupos de interés. | 90 |
| Figura 36. Identificar intereses y participación de los grupos de interés. | 91 |
| Figura 37. Estrategias para el involucramiento de los grupos de interés en el plan de cierre | 92 |
| Figura 38. Ejemplo de la interacción de la empresa, gobierno y comunidad | 93 |
| Figura 39. Desarrollo de programas comunitarios. | 94 |
| Figura 40. Metodología para evaluar los usos futuros del sitio minero. | 95 |
| Figura 41. Implementación de las líneas de acción mediante la elaboración de planes a detalle. | 99 |
| Figura 42. Componentes de la estrategia general, evaluación y ajuste de actividades. | 101 |
| Figura 43. Proceso del cierre progresivo | 102 |
| Figura 44. Se ilustra el cierre progresivo en un depósito de residuos mineros, específicamente un terrero. | 104 |
| Figura 45. Cierre progresivo en una operación a cielo abierto mediante el relleno secuencial de los tajos..... | 105 |
| Figura 46. Actualización de las líneas de acción por el cambio de condiciones en el taller. | 106 |
| Figura 47. Recursos empleados en las actividades de cierre..... | 107 |
| Figura 48. Desarrollo y uso de los indicadores durante las etapas del proyecto minero. | 108 |
| Figura 49. Ejemplo del uso de indicadores para monitorear aguas superficiales en una presa de jales. | 110 |
| Figura 50. Caso 1 - Financiamiento del plan de cierre en proyectos que inician con un plan..... | 111 |
| Figura 51. Caso 2 - Financiamiento del plan de cierre en proyectos que inician sin un plan..... | 113 |
| Figura 52. Elementos que deben integrarse al plan de contingencia para el caso del cierre temporal. | 115 |
| Figura 53. Elementos que deben integrarse al plan de contingencia para el caso del cierre repentino..... | 116 |
| Figura 54. Relación entre los objetivos, criterios de éxito e indicadores de desempeño..... | 122 |
| Figura 55. Consideraciones para la renuncia. | 123 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----------|
| Tabla 1. Reglamentos que desempeñan como reguladores en las actividades de cierre de minas. | 21 |
| Tabla 2. Normas Oficiales Mexicanas consideradas para el cierre de minas..... | 22 |
| Tabla 3. Elementos que conforman el plan de cierre conceptual..... | 47casocas |
| Tabla 4. Áreas operativas que se deben integrar en el cierre de minas..... | 51 |
| Tabla 5. Planteamiento de objetivos y actividades de cierre generales para una operación subterránea..... | 53 |
| Tabla 6. Depósitos de residuos mineros considerados en el plan de cierre. | 57 |
| Tabla 7. Planteamiento de objetivos y actividades de cierre generales para una operación subterránea..... | 60 |
| Tabla 8. Clasificación de los tipos de agua en la actividad minera..... | 67 |
| Tabla 9. Planteamiento de objetivos y actividades de cierre generales para la gestión de agua y manejo de agua en una operación subterránea y a cielo abierto. | 69 |
| Tabla 10. Instrumentos aplicables para realizar el plan de muestreo. | 84 |
| Tabla 11. Obras civiles que se deben integrar en el cierre de minas..... | 86 |
| Tabla 12. Planteamiento de objetivos y actividades de cierre generales talleres de mantenimiento y servicios..... | 87 |
| Tabla 13. Ejemplos de los costos que deben ser considerados en la primera estimación..... | 112 |
| Tabla 14. Objetivos y áreas por considerar en el monitoreo..... | 118 |
| Tabla 15. Ejemplo de los posibles elementos a monitorear en las áreas cerradas de un proyecto minero..... | 120 |
| Tabla 16. Continuación y descripción de los elementos a monitorear en los grupos de interés..... | 121 |

INTRODUCCIÓN

El proceso de extracción de los recursos minerales comprende una serie de fases que comienzan desde la prospección y continúan con la exploración, estudio de factibilidad, diseño y planeación, construcción, operación, y finalmente el cierre y poscierre de la mina. Todas estas etapas son esenciales de la minería, por lo que en cada fase debe existir un seguimiento y regulación particular, incluyendo la preparación de la finalización del proyecto. Aunque el cierre se encuentra como la etapa última, este forma parte de todo el proceso, ya que, su ejecución se lleva a cabo desde el inicio hasta el final de la extracción (Silva & Sánchez, 2022).

El tema de cierre de minas a nivel mundial empieza a considerarse por la necesidad de políticas públicas que brinden atención a las áreas que fueron abandonadas y que tienen fuertes pasivos ambientales (Silva & Sánchez, 2022). Este concepto se convierte en un tema controversial a finales del siglo XIX y a principios del siglo XX, época donde los impactos de la minería comenzaron a amenazar otros usos de la tierra y el agua, lo que causó la necesidad de considerar una legislación que involucrará temas desde la recuperación de superficies y el uso del agua hasta la protección y remediación ambiental (Hockley, 2015).

Fue hasta la década de 1990 y principios del 2000 cuando el cierre experimentó un auge con la creación de literatura técnica más madura y el desarrollo de pautas, procedimientos y procesos de gestión como reglamentos o algún tipo de legislación (Hockley, 2015); así, el término de cierre de minas ha tenido diversas interpretaciones y aplicaciones con base en la particularidad de cada país. Para el caso del presente trabajo, se toma la definición de Heikkinen *et al.*, (2008) que lo describe como el proceso que cubre una variedad de actividades y procedimientos relacionados con la etapa en la cual la producción finalmente cesa de forma permanente, abarca desde el desmantelamiento de la infraestructura, hasta la implementación, el monitoreo y mantenimiento continuo de los programas de rehabilitación del sitio.

Dicho concepto sigue en evolución hasta la fecha y en las prácticas modernas se pone en marcha como un proceso de planeación, que consiste en realizar un documento dinámico que describa las actividades de cierre actualizando el contenido conforme al avance y a los cambios que surjan en la mina durante todas las etapas del proyecto. Planear el cierre se ha convertido en una herramienta fundamental que se integra desde el inicio, puesto que, es un mecanismo que forma parte del núcleo de una minería responsable y sostenible.

La planeación responsable se trata acerca de tomar las decisiones e inversiones apropiadas durante la vida de la mina, para garantizar que un sitio donde se ha desarrollado la minería sea un lugar donde la ecología y las comunidades puedan florecer décadas después del cierre (Kelleher & Thurber, 2021). Por ende, comenzar anticipadamente a crear un plan que conceptualice las actividades, permite la ejecución progresiva y así, evita o minimiza los impactos medioambientales, físicos, sociales y económicos negativos a largo plazo. También, contribuye a demostrar el compromiso continuo con los grupos de interés generando confianza y una participación activa durante la vida útil del proyecto (Australian Government, 2016).

En la actualidad diferentes minas han desarrollado actividades que promueven el desarrollo de una planeación progresiva integrada durante la operación, un caso es Mina Marlín ubicada en Guatemala que inició el proceso de cierre, rellenando el tajo con tepetate y colas filtradas para realizar una revegetación del sitio e integrar el área a la configuración original del terreno (Newmont, 2017). También, otro caso es en Honduras en mina San Martín, donde se realizó un relleno parcial a la tepetatera para hacer una renivelación a los taludes y cubierta y posteriormente, se revegetó el sitio (Instituto de Derecho Ambiental de Honduras [IDAMHO], 2012).

Actualmente, países como Australia, Canadá, Chile y Perú cuentan con lineamientos que regulan el cierre de minas mediante la implementación de instrumentos como guías o metodologías que conducen a las empresas hacia la formulación de los planes de cierre. También, existen organismos internacionales como el Consejo Internacional de Minería y Metales (ICMM, por sus siglas en inglés), que cuenta con instrumentos para desarrollar políticas durante el proceso de planeación.

En el caso de México se cuenta con limitados instrumentos legales que son aplicables a algunas actividades de cierre, donde se definen los objetivos y se proporciona un marco operativo. Algunos de ellos son las normas oficiales mexicanas (NOM) que abordan temas relacionados con el manejo y disposición de los depósitos de residuos mineros: NOM-141-SEMARNAT-2003 para presas de jales, NOM-155-SEMARNAT-2007 para pilas de lixiviación de oro y plata y la NOM-159-SEMARNAT-2011 para pilas de lixiviación de cobre; las cuales especifican los requisitos para el cierre y monitoreo de las zonas donde se encuentren ubicados los depósitos. Por lo tanto, a nivel nacional se carece de una regulación sólida para la planeación del cierre de minas.

En este sentido, la presente tesis tiene por objeto proponer una guía con pautas y principios generales para la elaboración de un plan del cierre, mediante el análisis de los elementos que se integran al proceso de planeación y partir de un nivel conceptual hasta llegar a un nivel más específico. En esta guía se brindarán herramientas para realizar un plan general desde la etapa de factibilidad y posteriormente, se plantea la estructura de planes específicos en los que se describen actividades que se pueden ejecutar durante

la operación minera (cierre progresivo), y que involucran un mayor detalle de información ambiental, social y económica.

En algunas circunstancias se pueden presentar escenarios donde la operación ha iniciado sin un plan de cierre o factores externos obligan a cerrar temporalmente. La presente guía se ajusta a dichos casos, mencionando las consideraciones que serán tomadas en cuenta.

En la propuesta se exponen sugerencias de procedimientos y metodologías sobre cómo realizar el cierre de los elementos que incorporan el proyecto minero y que se ajustan a partir de las características ambientales y sociales del sitio. Su creación se basa en la legislación nacional y de los instrumentos utilizados internacionalmente.

Esta guía está estructurada de tal manera que el *Capítulo I. Marco teórico* brinda antecedentes sobre el cierre de minas, incluida su integración al ciclo de vida de la mina, junto con una breve revisión de la diversidad de instrumentos regulatorios nacionales e internacionales existentes. Después se continúa con el *Capítulo II. Diagnóstico general del sitio*, que describe la información ambiental y social para conocer las condiciones del entorno, ajustando el contenido de acuerdo con los diversos escenarios de cierre. Además, se exponen todos los componentes del complejo minero que serán integrados, así como, la evaluación ambiental para establecer las estrategias de cierre. Posteriormente, en el *Capítulo III. Integración del plan de cierre conceptual*, se analiza el término de plan de cierre a nivel conceptual, su estructura y la secuencia de construcción con base en la investigación realizada para elaborar el anterior capítulo.

En el *Capítulo IV. Líneas de acción*, se describen todas las estrategias de cierre que son implementadas de acuerdo con los componentes del proyecto, estudia el nivel de información y menciona algunas técnicas utilizadas. Luego, en el *Capítulo V. Planes específicos* se presenta la estructura para ejecutar cada línea de acción, examinando su contenido y su aplicabilidad. Finalmente, en el *Capítulo VI. Post-cierre*, se hace una descripción de los requisitos de monitoreo y mantenimiento necesarios que continúan después de que ha culminado la ejecución de las actividades de cierre, asimismo, las consideraciones para la finalización y renuncia.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

I.1 Cierre de minas

El ciclo de vida que comprende el aprovechamiento de los recursos minerales consta de etapas consecutivas: prospección, exploración, estudio de factibilidad, diseño, construcción, operación, cierre y post-cierre y monitoreo (figura 1).

Considerando a la etapa final parte fundamental en el desarrollo del proceso minero, ya que, el cierre es el proceso donde la producción ha cesado y el propietario comienza a desmantelar y estabilizar las obras e infraestructura del sitio (Heikkinen *et al.*, 2008). En dicha etapa se definen las actividades y procedimientos que se llevarán a cabo para la rehabilitación del sitio. Sin embargo, la planificación de todas las estrategias de cierre deben ser parte integral de todo el proceso minero, comenzando desde etapas tempranas del proyecto e implementando progresivamente acciones particulares de acuerdo con las consideraciones del terreno (figura 1).

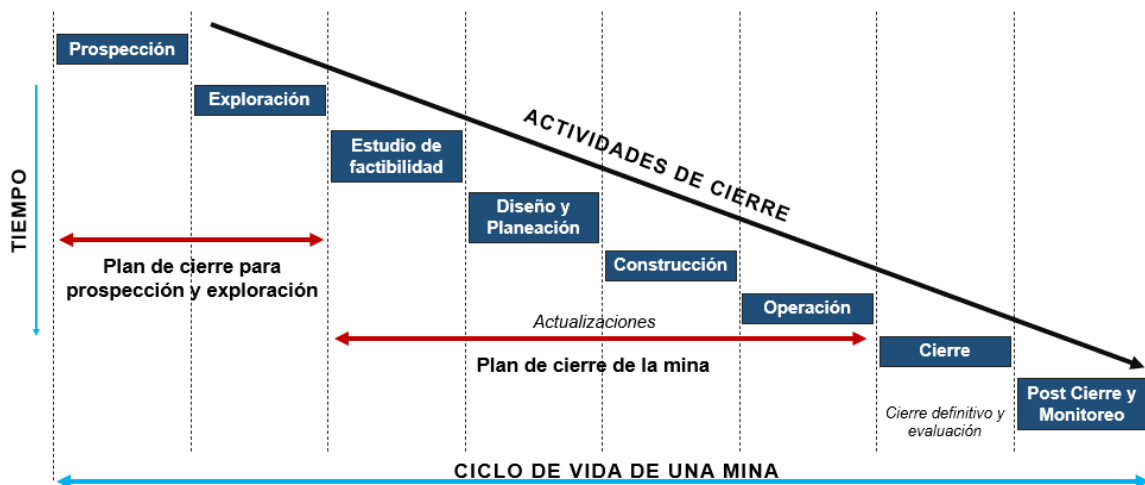


Figura 1. El cierre de minas en el ciclo de vida de una mina (Adaptado de Morales y Hantke, 2020).

En condiciones ideales, las minas cierran cuando se agotan sus reservas, no obstante, una mina puede verse obligada a cerrar por diferentes factores, tales como una variación abrupta en el precio de los metales, presiones sociales o comunitarias, fenómenos naturales que impidan continuar con las operaciones, disminución anticipada en la ley o tamaño del cuerpo mineral, o en ocasiones, cambios en las políticas gubernamentales (Laurence, 2006). Dichos acontecimientos traen como consecuencia los siguientes escenarios:

- **Abandono:** Acto en el cual la empresa minera cesa alguna o todas las operaciones, sin realizar actividades de cierre que garanticen la seguridad y estabilidad del sitio. Dicho escenario trae consigo la generación de pasivos ambientales a medio y largo plazo, afectando principalmente a las comunidades aledañas y el medio ambiente (Ministerio de Producción y Trabajo de la Nación, 2019).
- **Cierre temporal:** Ocurre cuando las circunstancias económicas, sociales, geológicas u operacionales ya no permitan continuar con la actividad minera, realizando una suspensión temporal de la operación. Por ejemplo, el caso del complejo minero Naica, ubicado en Chihuahua, México, operación que en 2015 tuvo un cierre indefinido tras una inundación que no se pudo controlar (Alba *et al.*, 2014). Un cierre de esta naturaleza debe ser planificado, asumiendo que la operación posiblemente se reiniciará en un futuro.
- **Cierre progresivo:** Los cierres progresivos ocurren de manera simultánea a la etapa de operación de una mina, se efectúan cuando áreas operativas y/o instalaciones terminan su vida útil (Morales *et al.*, 2020). Los cierres de esta naturaleza son el resultado de las actualizaciones que se realizan en el plan inicial de cierre.
- **Cierre final:** Ocurren en consecuencia al agotamiento de los recursos minerales económicos, terminando las operaciones de minado y de procesamiento (Franco *et al.*, 2011). En un cierre final se deben de cumplir los objetivos ambientales y sociales que fueron especificados en el plan inicial.

I.2 Plan de cierre de minas

El cierre de minas se debe integrar en todo el proceso minero, debido a que, realizar planes a corto, mediano y largo plazo va a permitir tener las herramientas necesarias para diagnosticar, evaluar y cuantificar los impactos ambientales negativos generados por el proyecto minero y conocer las condiciones sociales y económicas de comunidades adyacentes. Con esta información, se establecerán las medidas de cierre, así como, estrategias que minimicen y prevengan los posibles efectos negativos de la explotación minera (Heikkinen *et al.*, 2008).

El plan de cierre es un instrumento con diversas herramientas de gestión ambiental donde estarán comprendidas todas las medidas y acciones a aplicar en sitios mineros (Franco *et al.*, 2011). Será fundamental que el plan de cierre sea definido y orientado por el contexto social, económico, físico y biológico del sitio (Anglo American, 2013). Para su éxito se debe comenzar con una planificación anticipada desde la etapa de factibilidad, ya que, se determinan las actividades para una rehabilitación progresiva durante la operación del proyecto (Australian Government, 2016), así como, los periodos en los cuales se

realizarán las actualizaciones del documento con el fin de realizar los cambios necesarios y modificar las actividades y presupuestos designados para su ejecución.

La elaboración de dicho documento se llevará a cabo por personas con el suficiente nivel de conocimientos y experiencia, debido a que, se abordan tópicos de diversas ramas y a las decisiones que serán tomadas antes, durante y al término de la elaboración y ejecución del plan.

Se deben de incorporar normas y estándares que permitan evaluar las estrategias que se aplican, así como la participación de los grupos de interés internos y externos, descritos en la sección II.4. También, es indispensable realizar una evaluación financiera a detalle en donde se estimen los costos reales del cierre, incluyendo las garantías que brinda la empresa para cubrir los gastos.

La planificación también debe considerar escenarios para la etapa del post cierre. En esta etapa se realizan acciones como monitoreo, inspección de sitio, mantenimiento, vigilancia, evaluación de las medidas implementadas y programas sociales orientados a lograr los objetivos de cierre (Sánchez *et al.*, 2015).

1.2.1 Objetivos del plan de cierre

Los objetivos de la elaboración de los planes de cierre se establecen de acuerdo con las características particulares de la operación y entorno del complejo minero, sin embargo, en su mayoría se busca regresar a las condiciones iniciales del sitio asegurando el empoderamiento e independencia de las comunidades. A continuación, se describen algunos de los objetivos esenciales mencionados por Heikkinen *et al.*, (2008):

Objetivos enfocados al medio ambiente

- Predecir y prevenir los posibles impactos ambientales negativos que generen los complejos mineros.
- Asegurar la estabilidad química y física de las áreas operativas, diseñando las obras y aplicando las metodologías de acuerdo con el caso.
- Asegurar que la rehabilitación ambiental sea adecuada para permitir el establecimiento de un ecosistema diverso y funcional en el área.
- Garantizar los usos futuros de la tierra planificados para el sitio.
- Asegurar la calidad de aguas superficiales y subterráneas de la mina.

Objetivos enfocados a las comunidades y rubros económicos

- Minimizar los posibles impactos adversos en la economía local y la consideración de los requisitos a largo plazo de las comunidades circundantes.

- Generar de programas que establezcan la estabilidad económica de las comunidades.
- Realizar una valoración económica de las actividades de cierre que serán implementadas.
- Reducir los posibles riesgos financieros.

1.2.2 Etapas del plan de cierre

Como se planteó en el apartado anterior, en la actividad minería se presentan diversos escenarios que obligan a las empresas a realizar el cierre temporal, parcial o final del proyecto. Por ende, la principal labor de la empresa es realizar la planeación de todas las actividades que van a permitir tener un cierre exitoso. La elaboración de esta planeación se realiza por etapas explicadas a continuación:

Etapas Inicial – Plan de cierre conceptual:

El plan de cierre conceptual se considera como el plan que da comienzo a la planificación del cierre de minas (International Council on Mining and Metals [ICMM], 2019), por lo cual, el nivel de información será bajo (figura 2). El plan se conforma por todos los estudios que permitan conocer las condiciones ambientales y sociales del entorno con el fin de realizar el planteamiento de los objetivos de cierre para la totalidad de instalaciones y operaciones de la mina, estableciendo las estrategias que serán aplicadas, garantías, una estimación de los tiempos, recursos, cronograma de actividades y programas de post-cierre (Morales *et al.*, 2020).

El plan conceptual es la base que va a dirigir las actividades de cierre a lo largo del ciclo minero, por ende, su elaboración se debe realizar durante el estudio de factibilidad del proyecto, etapa en la cual la naturaleza precisa y los requisitos de operación minera están bien definidos. También, en esta etapa será posible realizar una primera estimación de los costos que deben asignarse a los programas de cierre para ser incorporados a la evaluación de viabilidad (Heikkinen *et al.*, 2008).

En el próximo capítulo se profundizará con más detalle todas las consideraciones para la elaboración de un plan conceptual.

Etapas de Seguimiento – Planes de cierre a detalle:

En la etapa de seguimiento se consideran todas las etapas siguientes al estudio de factibilidad, realizando actualizaciones al plan conceptual a medida que la mina se aproxima al cierre definitivo (figura 2). Es fundamental contemplar todos los parámetros sociales, económicos y ambientales cambiantes del proyecto (ICMM, 2019). Estos

parámetros serán dictados de acuerdo a las regulaciones aplicables, criterios ingenieriles y estándares internacionales.

El documento generado por dichas actualizaciones se denomina plan de cierre a detalle y se caracteriza por definir objetivos específicos orientados a las actividades de cierre que se llevarán a cabo de manera progresiva, desarrollando la planeación a detalle, construcción, diseño y costos de las obras y metodologías que serán utilizadas. En los planes específicos se deben considerar los diferentes escenarios de cierre descritos anteriormente, con el propósito de cumplir los objetivos de cierre inicialmente fijados.

La diferencia de los planes conceptuales y los planes a detalle es que los objetivos deberán ser más detallados y específicos, es decir, se van a orientar a procesos o instalaciones específicas definiendo con precisión las actividades, metodologías, los recursos, los tiempos e indicadores para la evaluación de los resultados.

Etapa final – Desmantelamiento y cierre final:

La etapa de desmantelamiento se inicia cuando las operaciones de extracción han concluido en su totalidad, en este periodo se realiza el desmantelamiento final de las instalaciones, tales como las edificaciones infraestructura y cierre de accesos temporales. Se evaluarán las instalaciones que serán removidas en su totalidad, así como los procedimientos para evitar las alteraciones en el sitio.

También, se van a llevar a cabo las actividades de cierre que se planearon en esta etapa final. De igual modo, durante este periodo se evalúan algunas de las medidas desarrolladas durante el cierre progresivo en la etapa de operación.

Etapa de Evaluación – Plan de monitoreo:

La etapa de evaluación es donde se realiza las acciones de cierre aplicadas durante la etapa de seguimiento y desmantelamiento (figura 2), mediante la aplicación de regulaciones y estándares nacionales e internacionales.

Se deben de realizar planes de monitoreo que contenga los programas de monitoreo que serán implementados en cada una de las actividades de cierre, de igual modo, los recursos que serán destinados, encargados, estimación de tiempos del seguimiento y periodicidad de las inspecciones.

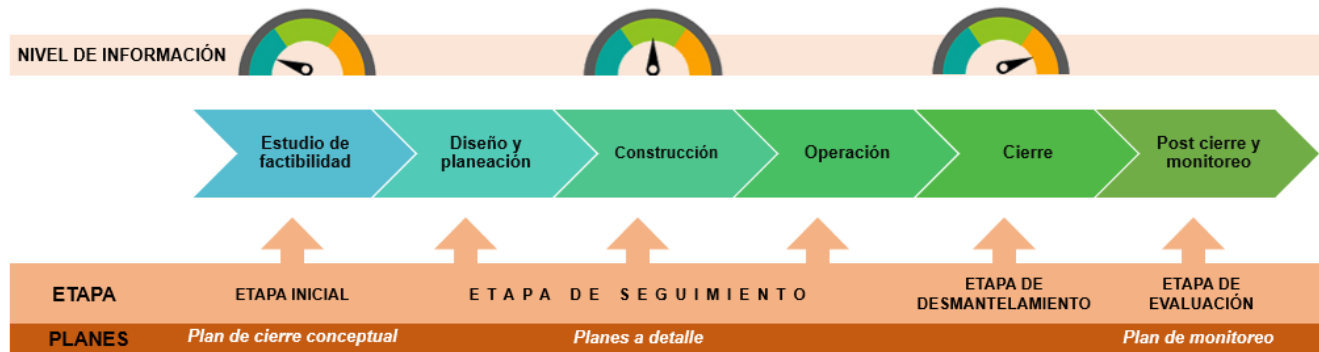


Figura 2. Aplicación de planes a lo largo del ciclo minero.

I.3 Lineamientos nacionales

En México la regulación ambiental de la minería está establecida en la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) y sus reglamentos. A partir de estas se establecen los reglamentos y normas oficiales mexicanas que regulan los impactos ambientales (Jiménez *et al*, 2006). Sin embargo, las fases de cierre y abandono de la mina no están definidas, la LGEEPA menciona que las empresas solo otorgarán seguros y garantías en las etapas del proyecto, pero no en el abandono y cierre (Witker, 2019).

A pesar de ello, el empleo de instrumentos de política ambiental como reglamentos, auditorías, Normas Oficiales Mexicanas (NOM's) y Evaluaciones de Impacto Ambiental (EIA), permiten regular algunas actividades que se realizan durante el cierre de minas. En los próximos apartados se exponen brevemente los lineamientos aplicables.

I.3.1 Leyes

Ley Minera: Dentro de las obligaciones que establece la Ley Minera se expone en el artículo 27 que todos los proyectos deben sujetar a las disposiciones generales y a las NOM aplicables en materia de seguridad en las minas, de equilibrio ecológico y protección al ambiente. Pauta que estipula el compromiso de las empresas con el cumplimiento de los lineamientos en materia de seguridad y medio ambiente, por lo cual, las empresas deben establecer instrumentos como los planes de cierre para garantizar el cumplimiento de dichas disposiciones.

Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA): En el caso de la minería se menciona que la Federación elaborará las NOM para prevenir y controlar los efectos de la exploración y la explotación minera, y algunas disposiciones en materia de conservación de suelos que pueden ser aplicables a la fase de cierre.

Aunque no existan normas específicas que regulen los efectos de la minería, en el artículo 15 se menciona la formulación y conducción de la política en materia ambiental, en la

cual se expone la responsabilidad que tiene el particular, entiéndase como persona física o moral, de prevenir, minimizar o reparar los daños que cause en el ambiente por realizar cualquier obra o actividad, asumiendo los costos que implique la afectación, dicha responsabilidad es presente y futura. Otro señalamiento importante es la responsabilidad de conservar los ecosistemas y el aprovechamiento racional de los recursos.

Se observa que específicamente en materia de cierre de minas no se hace mención ni hay algún referente que gestione las actividades, sin embargo, al señalar que el particular tiene una responsabilidad futura sobre el sitio obliga a las empresas a integrar la planeación del cierre con el objetivo de conservar los ecosistemas y garantizar la seguridad y desarrollo de las comunidades.

Dentro de la Ley, se establecen algunos instrumentos aplicables al cierre, tales como la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), recurso que evalúa los impactos del proyecto para tomar las medidas de prevención, mitigación y restauración, describiendo como instrumento a la Manifestación de Impacto Ambiental (MIA), herramienta que establece un fundamento para el comienzo del planteamiento de las actividades de cierre ya que, en su contenido se integra la investigación técnica de las condiciones ambientales del sitio, evaluando el impacto del proyecto en el sitio.

Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR): En el caso de la minería se estipulan que las empresas tienen la obligación de realizar planes de manejo para la gestión integral de los residuos provenientes del minado y tratamiento de minerales como jales, residuos de los patios de lixiviación abandonados y residuos provenientes del proceso metalúrgico, así como, el establecimiento de las bases para prevenir la contaminación de sitios por residuos peligrosos.

Su aplicabilidad en el cierre de minas radica en tomar las consideraciones para el manejo integral de los residuos con el objetivo de evitar la contaminación de los sitios que almacenan los residuos. Para el caso de los residuos peligrosos, se estipula en el artículo 45 los requerimientos al cierre de la instalación, los cuales son: aviso del cierre, fecha prevista del cierre, programa de limpieza y desmantelamiento de las instalaciones.

Ley de Aguas Nacionales: Ley que tiene por objeto regular la explotación uso o aprovechamiento de las aguas nacionales, así como la preservación de su cantidad y calidad. Dicho documento es aplicable a las actividades de cierre debido a que, el consumo de agua en la industria minera es sumamente importante para el desarrollo de las operaciones diarias, por lo cual la extracción y uso de aguas subterráneas y superficiales debe gestionarse, y las actividades encaminadas al cierre van a considerar salvaguardar la calidad del recurso.

Ley General de Vida Silvestre: Ley que tiene como objetivo conservar mediante la protección y la exigencia de niveles óptimos de la vida silvestre, logrando mantener y promover la restauración de la diversidad e integridad. Su aplicabilidad a las acciones de cierre reside en la importancia de conservar y proteger las especies que se encuentren en el sitio donde se desarrolla el proyecto minero, generando planes con métodos y técnicas que garanticen la sustentabilidad de la vida silvestre y su hábitat durante y al cierre de las operaciones mineras.

Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable: Ley que regula y fomenta la conservación, protección, restauración, producción, el cultivo, manejo y aprovechamiento de los ecosistemas forestales del país y sus recursos (FAO, 2003). Su aplicación en el proceso de cierre se debe a la importancia de generar planes que regulen la transformación que sufren las áreas forestales, así como, planes de recuperación y desarrollo de bosques en terrenos forestales utilizados por la actividad minera, dinamizando el desarrollo rural.

1.3.2 Reglamentos

Como parte de los instrumentos nacionales existentes aplicables de carácter jurídico al cierre de minas, se encuentran los reglamentos, los cuales tienen como objetivo establecer procedimientos para cumplir con los lineamientos generales en la ley. En la tabla 1, se describen a los reglamentos aplicables al tópico de estudio.

Tabla 1. Reglamentos que desempeñan como reguladores en las actividades de cierre de minas.

| LEYES | REGLAMENTO | APLICABILIDAD |
|---|---|---|
| Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) | Reglamento de Evaluación del Impacto Ambiental | Se establece el procedimiento para realizar y presentar la Manifestación de Impacto Ambiental. Documentos que van a permitir establecer las condiciones iniciales del sitio y señalar las medidas ambientales que se llevarán a cabo para garantizar la seguridad. |
| | Reglamento en materia Autorregulación y Auditoría Ambiental | Se expone el procedimiento y los parámetros que se evalúan para determinar los niveles de Desempeño Ambiental y los planes de acción que garantizan las buenas prácticas ambientales de una empresa. |
| Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR) | Reglamento de la LGPGIR | Se deben realizar planes de manejo para los residuos minero-metalúrgicos. La disposición final de dichos residuos se hará conforme a las normas oficiales mexicanas, incluyendo las actividades durante el cierre minero. Se deben establecer metodológicas para el tratamiento y remediación de los sitios contaminados. |
| Ley de Aguas Nacionales | Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales | En virtud de que la actividad minera requiere del aprovechamiento de los recursos hídricos, es de suma importancia considerar los procedimientos descritos para la |

| | | |
|--|--|--|
| | | obtención de los permisos de la descarga de aguas residuales, la realización de las obras que se requieran para el uso del agua y la obtención de las concesiones para la explotación. |
|--|--|--|

La aplicabilidad de cada uno de los reglamentos se centra en tener principios para el planteamiento de los objetivos de cierre y tomar las consideraciones establecidas. Para el caso del reglamento en materia de Evaluación del Impacto Ambiental, se establece el procedimiento para realizar la evaluación de impacto ambiental, instrumento que brinda la información de las condiciones ambientales para comenzar a delimitar las actividades del cierre, y el reglamento en materia Autorregulación y Auditoría Ambiental, para tomar como referencia los parámetros estipulados para evaluar los niveles de desempeño ambiental al momento de determinar los indicadores que se utilizarán para evaluar la eficiencia de las actividades de cierre.

Por otra parte, el reglamento de la LGPGIR establece los criterios para el manejo de los residuos peligrosos, aspecto que debe ser tomado en cuenta para las medidas que se tomen en materia de almacenamiento y disposición final de los residuos peligrosos.

Y finalmente, se encuentra el reglamento de la Ley de Aguas Nacionales, que establece las obligaciones que tiene el titular de la concesión minera sobre el aprovechamiento de agua, su empleo en el cierre es en considerar lo establecido para determinar la disposición final de los recursos hídricos utilizados en las actividades mineras.

1.3.3 Normas

De igual forma, como parte de los instrumentos aplicables al cierre de minas se encuentran las normas, que apoyan para dar control y seguimiento al desempeño ambiental mediante la regulación de actividades y condiciones específicas estableciendo lineamientos permisibles, procedimientos a seguir, medidas de protección ambiental, etc. En la tabla 2, se describen las Normas Oficiales Mexicanas aplicables para el plan de cierre:

Tabla 2. Normas Oficiales Mexicanas consideradas para el cierre de minas.

| NORMA | DESCRIPCIÓN |
|-----------------------|--|
| NOM-001-SEMARNAT-1996 | <i>Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.</i> |
| NOM-052-SEMARNAT-2005 | <i>Establece las características, clasificación, procedimientos de identificación y el listado de los residuos peligrosos.</i> |

| | |
|----------------------------|---|
| NOM-059-SEMARNAT-2001 | <i>Determina las especies de flora y fauna silvestres terrestres y acuáticas en peligro de extinción, y establece especificaciones para su protección.</i> |
| NOM-120-SEMARNAT-2011 | <i>Establece las especificaciones de protección ambiental para las actividades de exploración minera directa.</i> |
| NOM-004-CNA-1996 | <i>Requisitos para la protección de acuíferos durante el mantenimiento y rehabilitación de pozos de extracción de agua y para el cierre de pozos en general.</i> |
| NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 | <i>Establece los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos, lineamientos para el muestreo y las especificaciones para la remediación</i> |
| NOM-120-SEMARNAT-2011 | <i>Establece las especificaciones de protección ambiental para las actividades de exploración minera indirecta.</i> |
| NOM-141-SEMARNAT-2003 | <i>Establece los procedimientos para la caracterización de los jales y especificaciones en las etapas mineras, incluyendo el cierre.</i> |
| NOM-157-SEMARNAT-2009 | <i>Establece los procedimientos para la instrumentación de planes de manejo de residuos mineros.</i> |
| NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 | <i>Establece los criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio</i> |
| NOM-127-SSA1-1994 | <i>Establece los límites permisibles de calidad que debe cumplir el agua para uso y consumo humano.</i> |
| NOM-161-SEMARNAT-2011 | <i>Establece los criterios para clasificar a los Residuos de Manejo Especial y determinar cuáles están sujetos a Plan de Manejo; el listado de los mismos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo.</i> |

La aplicabilidad de las normas radica en emplear los criterios establecidos para la delimitación de los objetivos y actividades de cierre, por ejemplo, en el caso del cierre de depósitos de residuos mineros, tales como, presas de jales, terreros y pilas de lixiviación, se atenderá la NOM-141-SEMARNAT-2003 para presas de jales; la NOM-155-SEMARNAT-2007 para pilas de lixiviación de oro y plata; y la NOM-159-SEMARNAT-2011 para pilas de lixiviación de cobre; las cuales especifican los requerimientos para el cierre y monitoreo de las zonas donde se encuentren. En el caso de los terreros se aplicarán las consideraciones de almacenamiento y disposición final de la NOM-157-SEMARNAT-2009, que describen la orientación hacia el final de la vida útil del depósito en cuestión. Para el caso del manejo de residuos peligrosos, se aplicará la NOM-052-SEMARNAT-2005 y la NOM-161-SEMARNAT-2011 para el manejo de los residuos especiales.

Para la gestión hídrica se va a considerar la NOM-001-SEMARNAT-1996 para conocer los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales

y la NOM-127-SSA1-1994 que establece los límites permisibles de calidad que debe cumplir el agua para uso y consumo humano, las especificaciones estipuladas se utilizarán para evaluar la calidad de agua ubicada cerca del proyecto que sea distribuida a las comunidades aledañas al proyecto. También, la NOM-004-CNA-1996 cobra relevancia en las actividades de cierre, en los casos que se decida hacer la extracción de agua mediante pozos, ya que, se deben tomar los lineamientos para el mantenimiento, rehabilitación y cierre de estas obras.

Para el caso de la rehabilitación y remediación del sitio, se aplicará la descripción del procedimiento de muestreo estipulado en la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, así como los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para la remediación, y NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 que establece los criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio, para determinar las medidas de cierre que se van a considerar para rehabilitar los sitios mineros.

Finalmente, se encuentran las Normas Mexicanas (NMX), documentos técnicos que describen procedimiento, pero que su aplicación es voluntaria, un ejemplo aplicable al tópico de estudio es la NMX-AA-132-SCFI-2016, que establece las especificaciones generales para el muestreo de suelos con el objetivo de determinar el contenido de metales y metaloides. Dicho instrumento es utilizado para el caso de los suelos con sospecha de posible contaminación de metales.

I.4 Lineamientos internacionales

A nivel internacional existen lineamientos y guías que permiten regular las etapas de la actividad minera, entre esos documentos se encuentran instrumentos aplicables a los cierres de operaciones mineras e impactos ambientales asociados. Algunos países que han estructurado dichos instrumentos son Australia, Canadá, Estados Unidos de Norte América, Chile, Perú, Brasil y Colombia, considerados pioneros en materia de regulación de un cierre de operaciones de una mina (Cobos & Tarango, 2020). A continuación, se presenta una breve descripción de los principales instrumentos desarrollados por los países mencionados:

I.4.1 Australia

Cada estado posee su propia legislación sobre cierre de minas (Morales *et al.*, 2020). Igualmente, el gobierno a través del Departamento de Industria, Ciencia, Energía y Recursos genero El Programa de Desarrollo Sostenible de Prácticas Líder (LPSPD), programa para la Industria Minera que cuenta con una serie de manuales que brinda a las empresas, comunidades y regulaciones mineras una guía para la implementación de

buenas prácticas en la gestión minera (Department of Industry, Science, Energy and Resources [DISER], 2011). Entre los manuales se encuentran instrumentos y herramientas que son aplicables a todas las actividades que se involucran en un cierre de minas incluyendo la participación y el desarrollo de las comunidades.

También, la Autoridad de Protección Ambiental (EPA), organismo que protege, previene y controla la contaminación y los daños al ambiente, en conjunto con el Departamento de Minas y Petróleo (DMP), publicaron en conjunto la *Guidelines for Preparing Mine Closure Plans*, guía que describe los elementos que se integrarán al plan de cierre.

Diversos países han basado sus instrumentos regulatorios en las herramientas desarrolladas por Australia.

I.4.2 Canadá

Tanto las provincias como el gobierno federal tienen la facultad para regular la actividad minera (Morales *et al.*, 2020). Por ende, cada provincia cuenta con su normativa sobre el cierre estableciendo diversas guías para la entrega de los planes. Adicionalmente, el gobierno federal a través de la Ley de Aguas y las Juntas de Agua tiene la facultad de exigir, de ser necesario, un 10% de garantía del valor total del proyecto (Ospina *et al.*, 2013).

Igualmente, el gobierno canadiense desarrollo la iniciativa llamada *National Orphaned/Abandoned Mines Initiative* con el objetivo de evaluar y remediar los problemas de las minas abandonadas existentes y así, prevenir/minimizar la acumulación de más pasivos relacionados con las minas abandonadas (Cowan *et al.*, 2010).

Como aspecto relevante de las prácticas canadienses, se destaca el involucramiento de las comunidades aledañas en el proceso de cierre, estableciendo normativas que cubran el potencial de los impactos sociales, así como, el rescate de las prácticas tradicionales de la comunidad al término de la operación (Morales *et al.*, 2020).

I.4.3 Estados Unidos de Norte América

Estados Unidos de Norte América cuenta con una gran similitud a la estructura planteada por Canadá, ya que, cada estado se encarga de regular el cierre. Para la regulación de minas carboníferas está la Ley de Control y Recuperación en Minería Superficial de Carbón (Surface Mining Control and Reclamation Act), SMCRA por sus siglas en inglés (Cowan *et al.*, 2010), instrumento creado con el objetivo de generar planes de recuperación y requerimientos constructivos para explotación de carbón. En el título IV de la SMCRA se aprecia el programa de Abandoned Mine Land (AML) el cual promueve la recuperación de las minas abandonadas (U.S. Government, 2021).

Respecto a las garantías financieras, Estados Unidos creó un instrumento económico para asegurar el cumplimiento de los planes de cierre y abandono; tiene como principal característica que además de contar con la garantía, se realiza un acompañamiento de permisos, inspecciones y presiones legales (Cowan *et al.*, 2010).

I.4.4 América Latina

Para América Latina, hasta la fecha, solamente Chile y Perú han establecido una legislación nacional en materia de cierre de minas, que obliga principalmente a las empresas a otorgar garantías financieras que cubran las obligaciones derivadas (Intergovernmental Forum [IGF], 2021).

En el caso de Chile, la legislación formal se empezó a introducir por etapas a partir de mediados de la década de los noventa, y la ley más reciente (IGF, 2021), *Ley de Cierre de Faenas e instalaciones Mineras*, entró en vigor en 2015 (20.551, 2011); estableciendo al plan de cierre de minas como parte del ciclo de vida útil del proyecto (Morales *et al.*, 2020), garantías financieras, auditorías a los planes establecidos y el desarrollo de un fondo de poscierre a fin de cubrir los gastos de la labor persistente de monitoreo y mantenimiento (IGF, 2021). Además, Chile cuenta con guías para la elaboración y actualización de los planes, así como, herramientas metodológicas específicas en ciertas actividades del cierre, por ejemplo, el *Catastro de Medidas y Tecnologías para la Prevención, Control y Tratamiento del Drenaje Minero*.

Por otra parte, se encuentra Perú con la *Ley de Cierre de Minas* (Ley N.º 28.090), la cual establece como obligación presentar un plan de cierre de minas, y asegurar su cumplimiento mediante una garantía ambiental (Morales *et al.*, 2020); dicho plan es revisado cada 5 años (IGF, 2021), con el objeto de actualizarlo y realizar las modificaciones pertinentes, según sea el caso. También, se desarrolló el reglamento para del tópico en cuestión, el cual establece la presentación y aprobación de los planes, sus garantías y sanciones.

En países como Brasil, Argentina y Colombia no se cuenta con leyes dirigidas al cierre de minas, sin embargo, tienen instrumentos, tales como guías para la elaboración de planes e implementación de buenas prácticas.

Un aspecto que guardan en común los instrumentos usados internacionalmente es la importancia de tener garantías financieras en todo el proceso de cierre, es decir, el uso de abonos o documentos comprobables que demuestren el financiamiento de todas las actividades propuestas en el cierre de operaciones, esto con el objetivo de garantizar el cumplimiento de estas.

I.4.5 Instituciones y Organizaciones

Globalmente, se han adoptado diversos acuerdos en materia de protección del medio ambiente, uno de ellos es la International Council on Mining & Metals, organización internacional dedicada a mejorar el desempeño social y ambiental de la industria minera y metalúrgica (ICMM, 2021) y que ha realizado diversas publicaciones enfocadas a la planificación del cierre de operaciones mineras, tales como:

- *Community Development Toolkit, (2012)*: guía que describe herramientas para el desarrollo de comunitario.
- *Integrated Mine Closure: Good practice guide (2nd edition, 2019)*: guía dinámica e interactiva que muestra el proceso de planificación e implementación del cierre de minas considerando los factores ambientales, sociales y económicos (ICMM, 2021).
- *Financial Concepts for Mine Closure (2019)*: documento que describe conceptos para la estimación de costos en el cierre de minas (ICMM, 2021).
- *Closure Maturity Framework (2020)*: documento que permite medir el estado de los activos en su camino hacia el cierre, con el objetivo de realizar un el seguimiento de su desempeño (ICMM, 2021).
- *Key Performance Indicators: Tool for closure (2020)*: herramienta que proporciona indicadores clave de rendimiento para respaldar la implementación de las actividades de cierre consideradas (ICMM, 2021).

Igualmente, la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) publicó en el año 2020 una *Guía metodológica de cierre de minas*, la cual brinda una orientación de los requisitos mínimos que los titulares mineros deben cumplir en el proceso de cierre y poscierre de minas (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2020).

Por otra parte, un *Subcomité de la Organización Internacional de Normalización (ISO)* se encuentra desarrollando un estándar para la gestión de recuperación de la mina considerando la planificación del cierre en cada etapa del proyecto, con el objetivo de lograr un proyecto sostenible gestionando los riesgos (ISO, 2013).

También, existe el APEC, Cooperación Económica Asia-Pacífico, conformada por 21 países de cuatro continentes. Desarrolló el *Mine Closure Checklist for Governments*, documento que establece los elementos esenciales para definir un marco legal en materia de cierre de minas basado en directrices y estándares internacionales, permitiendo encontrar y abordar las brechas de acuerdo con la experiencia internacional (Asia-Pacific Economic Cooperation [APEC], 2018).

CAPÍTULO II. DIAGNÓSTICO GENERAL DEL SITIO

El diagnóstico general del sitio permite conocer las condiciones del entorno en el cual el proyecto minero se efectuará. En la figura 3 se aprecian las directrices y el orden recomendable para abordar cada uno los elementos que integran el análisis de acuerdo con el caso de estudio. Algunos de estos puntos pueden ajustarse de acuerdo con las necesidades de la empresa.

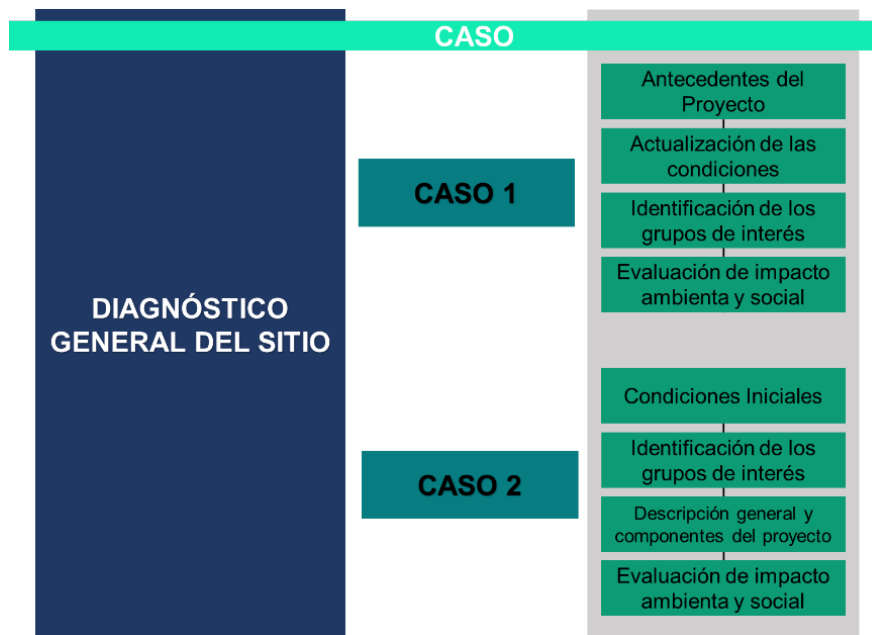


Figura 3. Componentes del diagnóstico general de sitio de acuerdo con el caso de estudio.

II.1 Identificación del tipo de proyecto

La aplicación del presente documento se estructura de acuerdo con dos casos de estudio los cuales involucran una serie de posibles escenarios. En el **caso 1 – Proyectos que inician sin un plan**, se hace referencia a los proyectos que comienzan sin un documento que guía la planeación del cierre de minas. Se involucran los escenarios: *abandono de la mina*, *cierre repentino* y *cierre temporal* (figura 4). En los tres panoramas se considera que la empresa no ha realizado ninguna actividad de cierre, por lo cual, la planeación se debe enfocar en evaluar las condiciones iniciales de la operación mediante un diagnóstico general con el fin de dictar medidas de rehabilitación o remediación del sitio.

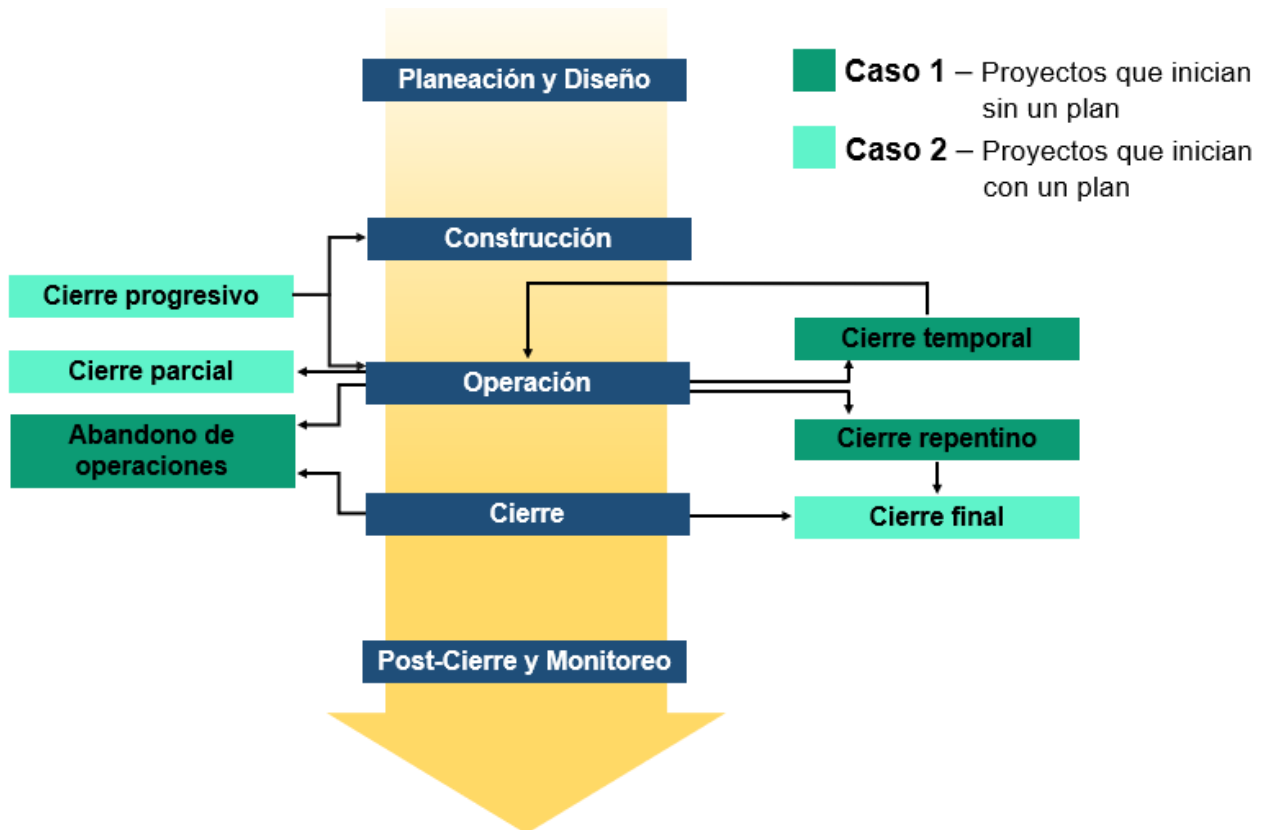


Figura 4. Posibles escenarios presentes en un proyecto minero.

Para el **Caso 2 – Proyectos que inician con un plan de cierre**, se agrupan los proyectos que desde la fase de factibilidad cuentan con un documento guía que establece la planeación de actividades. Los escenarios involucrados son: *cierre final*, *cierre parcial* y *cierre progresivo*. El cierre progresivo es la serie de actividades que se realizan durante la operación y en algunos casos desde la construcción. Aunque en la figura 4 se aprecia que el cierre final se lleva a cabo hasta la última etapa, durante la operación se realizan cierres parciales de las instalaciones y operaciones del con el objetivo de avanzar con las actividades planteadas en el plan conceptual.

II.2 Antecedentes del proyecto

Los antecedentes del proyecto permiten describir todos y cada uno de los aspectos del proyecto minero propuesto con el suficiente detalle para entender cuáles podrían ser los impactos ambientales y sociales potenciales (Environmental Law Alliance Worldwide [ELAW], 2010).

Para proyectos que han iniciado sin un plan de cierre, también se deben incluir los impactos ambientales y sociales causados, integrando una evaluación de éstos. Cuanto más se conozca del proyecto, el planteamiento de las medidas de prevención, control, remediación y cierre serán más efectivas y rápidas.

En la figura 5 se describen algunos de los componentes que deben ser cubiertos en la investigación, la estructura comienza por describir la naturaleza del proyecto, describiendo específicamente la explotación minera y las condiciones en las que se encuentra, es decir, que tipo de proyecto es de acuerdo con la clasificación descrita en la *Sección II.1*. Posteriormente, se menciona al responsable de la unidad minera y al encargado o encargados de realizar el plan colocando el contacto de ambos responsables; para la ubicación del sitio, se recomiendan agregar las coordenadas de la concesión y mencionar a las comunidades adyacentes al sitio; la historia del sitio, comprende a los estudios medioambientales realizados en el entorno, para los proyectos del caso 2 se agregarán los datos relevantes de los estudios previos al inicio de la explotación, es decir, los estudios de línea base realizados; la geología y mineralogía, va a permitir tener un conocimiento base sobre las condiciones químicas y geoquímicas del yacimiento. Finalmente, se adjuntan las autorizaciones, certificados y permisos existentes.

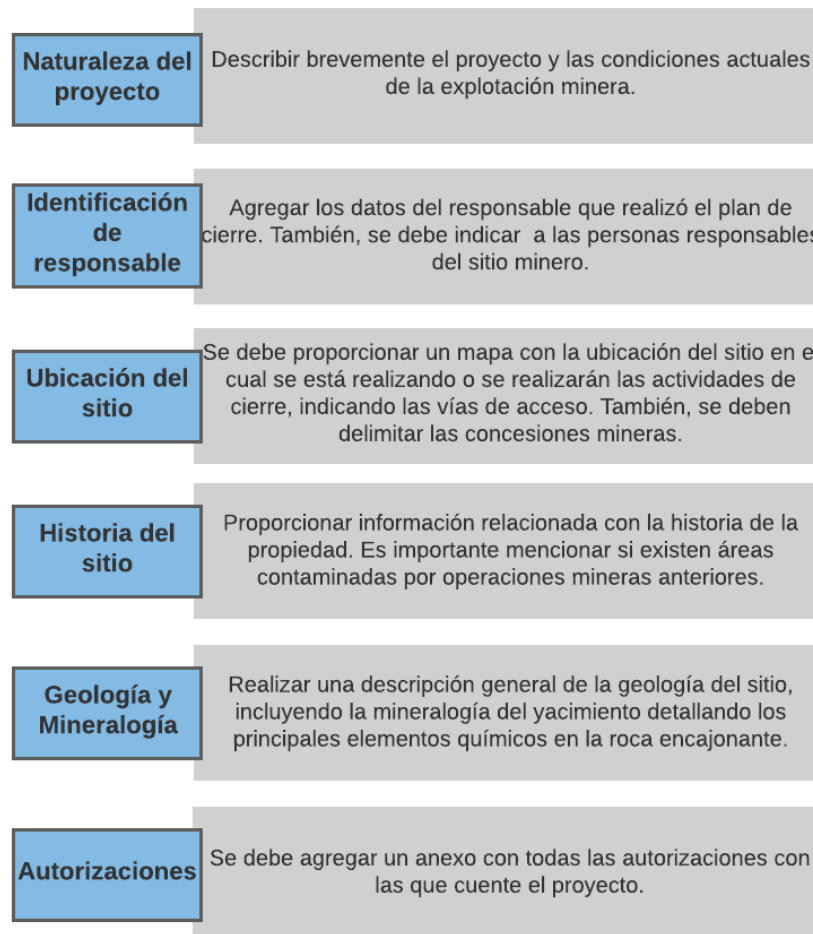


Figura 5. Aspectos que se deben cubrir en los antecedentes del proyecto.

II.3 Condiciones iniciales

Conocer las condiciones iniciales del entorno va a permitir valorar los posibles efectos e impactos ambientales y sociales asociadas al proyecto (Garmedia *et al.*, 2005) y así, precisar las acciones que se llevarán a cabo para el cierre de la operación. Para comenzar el estudio integral que abarcará todos los elementos ambientales y sociales, es conveniente establecer una metodología que permita realizar la investigación documental del sitio, considerando estrategias que logren mantener en constante actualización e incorporación la información y los cambios en las condiciones del entorno. Las principales pautas que debe cubrir el estudio integral se observan en la figura 6 y son explicadas a continuación.

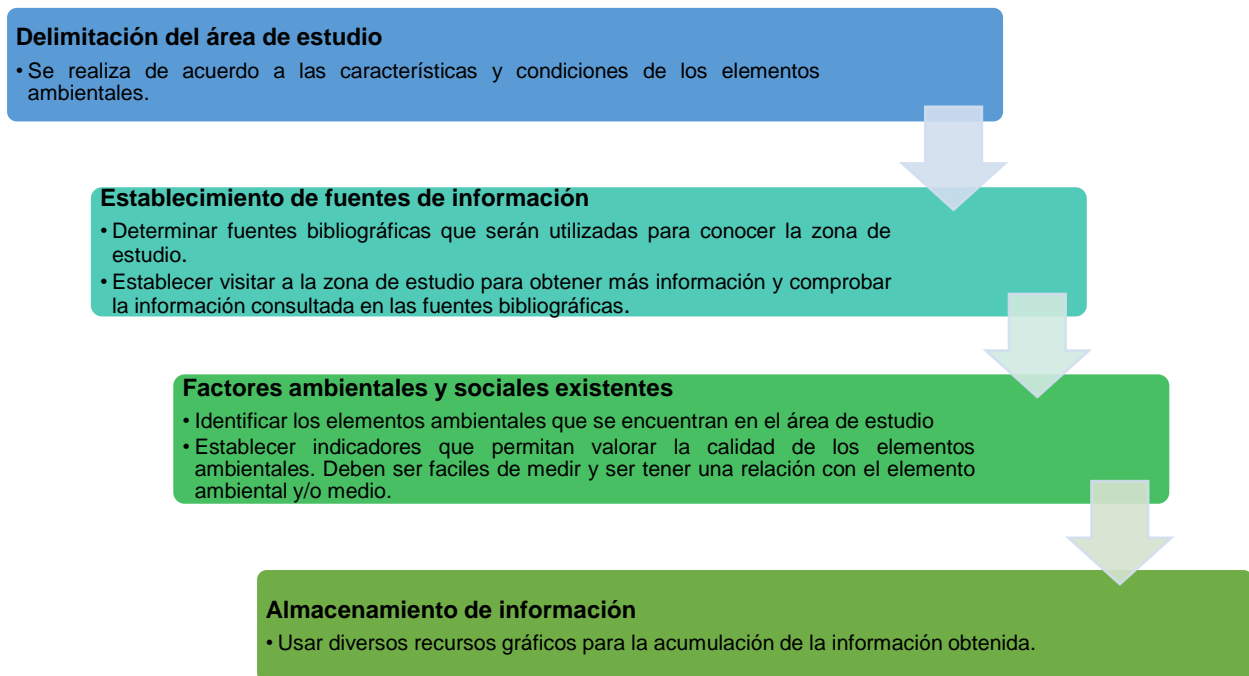


Figura 6. Estudio integral que abarca el diagnóstico general del sitio.

En primer lugar, se debe **delimitar el área de estudio** con base en los elementos ambientales, ya que de acuerdo con las condiciones y características se proyectarán los límites y objetivos para cada caso. En muchas ocasiones los límites establecidos para los elementos ambientales no se obtienen del área delimitada de estudio, debido a que los efectos que se causan abarcan mayores extensiones; por ejemplo, la vegetación es un elemento que va a respetar el área delimitada, puesto que, es fija y sufre posibles afectación por los acontecimientos que se presenten en su entorno, caso contrario se encuentran elementos como el clima, elemento que no se puede restringir, ya que puede

causar efectos al área de estudio, aunque ocurra en zonas lejanas (Garmedia *et al.*, 2005).

Después, se continúa con el **establecimiento de fuentes de información**, es decir, se definen las consultas bibliográficas y cartográficas, así como, las posibles salidas a la zona de estudio para el levantamiento y comprobación de la información examinada en los diferentes documentos consultados. De igual manera, se buscará información en trabajos técnicos realizados que arrojen información sobre los elementos ambientales del sitio (Garmedia *et al.*, 2005).

Una vez realizada la investigación y levantamiento de información del sitio se continúa identificando los elementos que se encuentran en el ambiente, en la Figura 7 se enlistan algunos de los posibles elementos que suelen considerarse en la investigación, clasificados de acuerdo con el medio físico, medio biológico y medio socioeconómico.

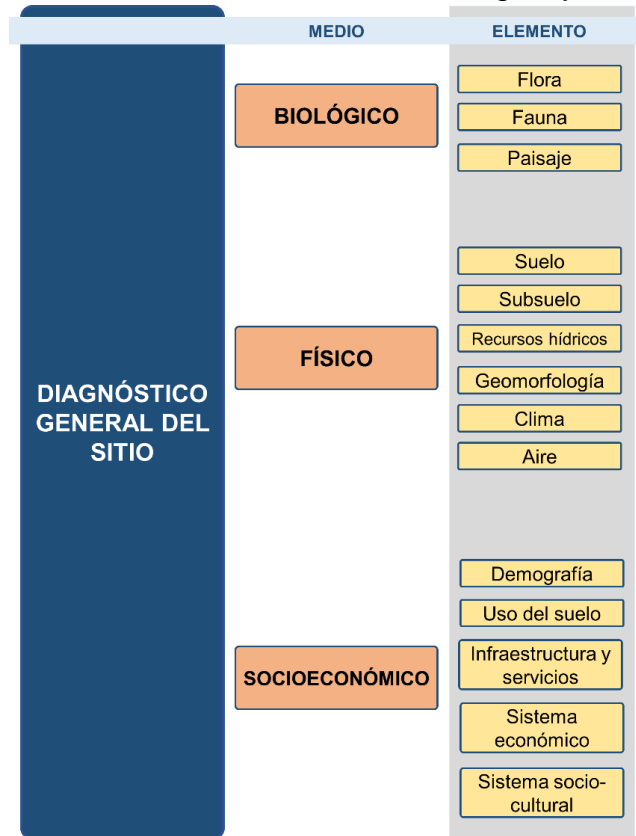


Figura 7. Posibles elementos del sitio de estudio clasificados de acuerdo con el medio.

Todos los elementos que se traten deben ser estudiados a profundidad, estableciendo indicadores que ayuden a determinar la calidad del ambiente y a conocer el cambio que sufrirá de acuerdo con las actividades que se desarrollen en el proyecto minero (Garmedia *et al.*, 2005). Así mismo, estos indicadores deben de cumplir dos características importantes: 1) facilidad de medición y 2) relación que tenga con el elemento y/o medio (Garmedia *et al.*, 2005). En la figura 8 se presenta un ejemplo de los

posibles indicadores que pueden ser considerados en los elementos del medio biológico, físico y socioeconómico.

Se observa que para flora y fauna pueden ser utilizados los mismos indicadores al comienzo de la investigación, sin embargo, conforme avanza el proyecto y se actualiza la información dichos indicadores se ajustan a las necesidades y al nivel de información existente. Lo mismo ocurre con los indicadores de los elementos ambientales del medio físico y medio social, se realiza el ajuste acorde al avance del proyecto.

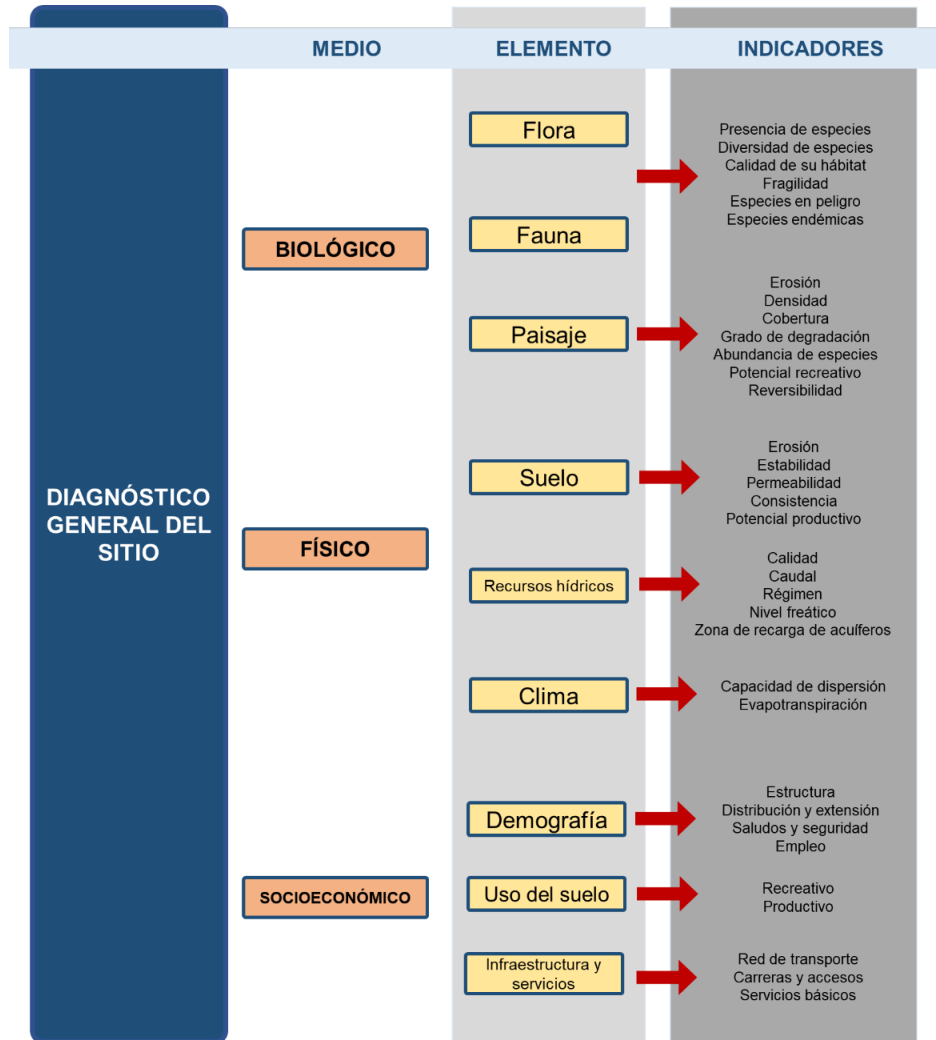


Figura 8. Indicadores para los elementos del medio biológico.

Finalmente, se **almacenará toda la información** recabada haciendo uso de gráficos, mapas, etc. (Garmedia *et al.*, 2005). Dichos recursos permitirán visualizar de una manera más sencillo los cambios que sufrirán los indicadores de los elementos ambientales conforme avanza el proyecto minero.

II.4 Identificación de grupos de interés

Se define a los grupos de interés como aquellos que tienen un interés justificable, o preocupación, en el proyecto y en sus impactos positivos o negativos (Australian Government, 2016). Su proximidad geográfica no siempre es un indicador de la importancia, por ende, se debe de establecer una estrategia que permita conocer todos los grupos potencialmente relevantes. Su identificación es un proceso dinámico que implica el mapeo y análisis de las condiciones de todos los grupos para permitir tomar decisiones en la planeación del cierre (Sánchez *et al.*, 2015). La actualización del estado de los grupos será vital para la correcta proyección de las actividades de cierre al llevar a la etapa final.

Los grupos de interés se pueden clasificar en dos grandes grupos: externos e internos (figura 9). Los grupos externos comprenden a las comunidades que se encuentran dentro de la zona de influencia de la mina (ICMM, 2012), en esta clasificación se identifican a los ejidatarios, pueblos indígenas, comunidades locales ONG's, medios de comunicación, instituciones educativas y turismo, en conjunto aportarán puntos de vista diferentes para enriquecer el plan de cierre. También, en esta clasificación se encuentran el gobierno, que tiene el papel de vigilar y regular que las empresas mineras cumplan con las regulaciones existentes en material ambiental, esto mediante las instituciones regulatorias y autoridades locales.

En los grupos internos destacan los empleados, proveedores locales, incluyendo los trabajadores que participan directa e indirectamente como la compañía, los accionistas, personal administrativo y contratistas. Es fundamental integral a los grupos de internos en cada una de las etapas, ya que, asegura que la operación de la mina está diseñada teniendo presente el cierre (ICMM, 2012).

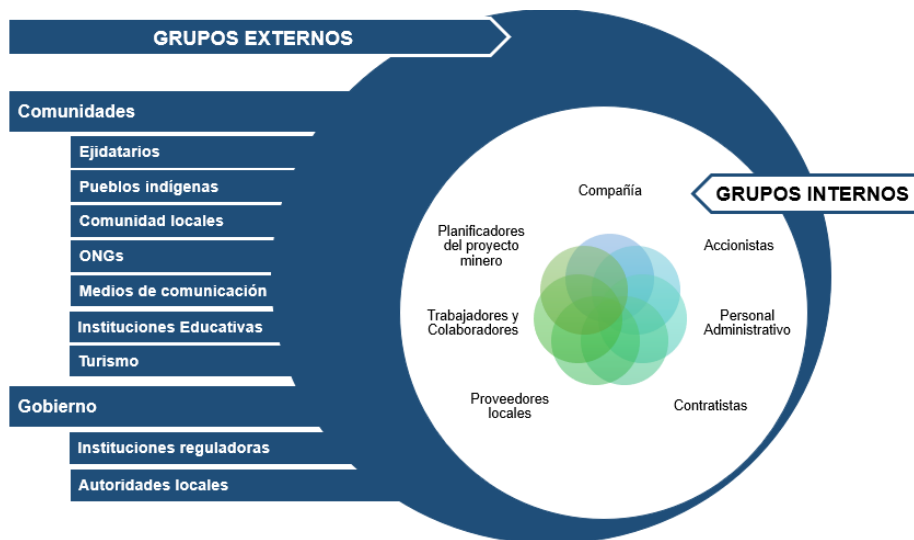


Figura 9. Algunos integrantes de los grupos internos y externos (*Elaboración propia*).

II.5 Descripción general y componentes del proyecto

Para facilitar la planeación eficaz de los componentes que serán considerados en los rubros del cierre, se debe conocer todos los procesos del proyecto. La información debe proporcionar una visión general de las actividades relacionadas con la extracción, procesamiento del mineral y, en su caso, con el tratamiento de los residuos mineros, además de describir los accesos, caminos e infraestructura complementaria contemplada en la unidad.

En la figura 10 se presentan los 5 principales componentes que deben integrarse a la descripción general del proyecto: operaciones mineras; planta de procesamiento; obras civiles; infraestructura eléctrica, de transporte, apoyo y acceso; y la gestión de agua. La estructura propuesta se aplica para explotaciones subterráneas y a cielo abierto, sin embargo, cuando se trata de proyectos que implican aplicar métodos subterráneos se recomienda incluir específicamente si se utiliza como relleno alguna roca estéril o jales, y se debe indicar la ubicación de los accesos superficiales y los pilares coronas (geometría de los pilares, largo, ancho y alto); para minería a cielo abierto, se deben proporcionar planos que muestren los bancos en el tajo, caminos de acceso, y una sección transversal del tajo. También, se deben incluir estudios de estabilidad de taludes (Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles [MERN], 2017).

Todas las descripciones de las instalaciones integrarán planos con las especificaciones de todas las obras, incluyendo un mapa topográfico del sitio que muestre su ubicación, la geometría detallada de cada componente, así como la superficie ocupada por cada uno. Para las áreas en las que se dispondrán las obras de almacenamiento de residuos mineros como presas de jales, terreros y patios de lixiviación se deben describir las características físicas de los suelos subyacentes, la descripción debe reunir propiedades geotécnicas, hidrológicas e hidrogeológicas del sitio (MERN, 2017). Por ende, es de suma importancia tener una buena base de conocimientos sobre los antecedentes del proyecto, o bien, sobre las condiciones iniciales del sitio.

Para proyectos que se han clasificado en el caso 1, se agregarán todas las actualizaciones de la explotación minera, incluyendo las ampliaciones que se han realizado durante la vida del proyecto. Para proyectos austeros que no cuenten con planos actualizados de las obras e instalaciones, se recomienda tener un primer acercamiento mediante la realización de mapeos haciendo uso de herramientas digitales como: Google Earth, Qgis, INEGI, Big y USGS, las cuales permiten obtener imágenes satelitales del complejo. En la figura 11 se aprecia el mapeo realizado en Google Earth de la unidad *La Herradura* ubicada en Sonora; se observa la delimitación de las áreas operativas, instalaciones, infraestructura y caminos de acceso.

| COMPONENTE | DESCRIPCIÓN | INFORMACIÓN REQUERIDA | INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA | |
|--|--|--|--|---|
| Operaciones Mineras | Descripción general del proceso de extracción | Método(s) de extracción aplicados al yacimiento y descripción del ciclo operativo. | <ul style="list-style-type: none"> Realizar estimación del agua utilizada en cada una de las actividades del ciclo operativo. Agregar planos del método de explotación, en los cuales se visualice la ubicación de las obras e infraestructura complementaria. | |
| | | Vida útil esperada de la mina con base en las reservas probadas y probables. | | |
| | | Tasa de extracción promedio diaria de mineral y roca estéril. | | |
| | Operaciones auxiliares | Obras e infraestructura en mina, así como su ubicación. | | |
| | | Número de equipos utilizados incluyendo fichas técnicas. | | |
| | Depósitos de residuos mineros | Tonelaje y volumen de material que serán almacenados. | | <ul style="list-style-type: none"> Principales criterios de diseño. Estudios de estabilidad y planos de diseño. Si la roca tiene potencial a generación de drenaje ácido, se debe integrar una descripción de las obras para el manejo de agua Para las presas de jales, se debe describir los materiales utilizados para la construcción |
| Características geoquímicas del material. | | | | |
| Diseño y especificaciones de las presas de jales y terreros. | | | | |
| Descripción general del proceso metalúrgico | Métodos de preparación y concentración del mineral. | <ul style="list-style-type: none"> Realizar estimación del volumen de agua utilizada en los procesos Agregar diagramas de flujo de los procesos Agregar principales datos operativos sobre los equipos utilizados | | |
| | Métodos para la recuperación y beneficio del mineral. | | | |
| | Tasa de procesamiento promedio diario. | | | |
| Edificaciones auxiliares | Describir cimientos, estructuras, cubiertas, revestimientos y dimensiones. | | <ul style="list-style-type: none"> Realizar un plano de la superficie que muestra la ubicación de todas las instalaciones Especificar el material que será utilizado para la construcción de todas las edificaciones e infraestructura. | |
| | Describir instalaciones y edificaciones levantadas en el sitio del proyecto | | | |
| Instalaciones, infraestructura y edificios | Descripción de las carreteras, líneas de transmisión eléctrica, vías férreas, tuberías de gas y agua, acueductos y alcantarillados, cables eléctricos y telefónicos, etc | | | <ul style="list-style-type: none"> Agregar un mapa hidrogeológico que ilustre las direcciones del flujo de aguas, así como ubicar el punto de demarcación. Agregar un plano con la ubicación de las estructuras existentes para la gestión del agua. Realizar un balance hídrico en el cual se incluyan todas las instalaciones y operaciones que requieren del recurso. |
| | Especificar especificación de la infraestructura como: dimensiones, ubicación y composición (materiales). | | | |
| Descripción de todas las infraestructuras que son parte del proyecto | Describir las estructuras existentes para la captación de agua y cómo se realiza el suministro a las operaciones mineras, operaciones metalúrgicas y al resto del sitio. | <ul style="list-style-type: none"> Agregar diagramas de flujo del circuito de tratamiento. Volumen de lodos generados, así como sus características físicas y químicas. Describir cuentas de sedimentación. | | |
| | Descripción del abastecimiento de agua al proyecto | | | |
| Descripción del sitio de tratamiento de aguas residuales | Especificar los sistemas de tratamiento existentes o propuestos para el agua residual. | | <ul style="list-style-type: none"> Agregar diagramas de flujo del circuito de tratamiento. Volumen de lodos generados, así como sus características físicas y químicas. Describir cuentas de sedimentación. | |
| | Capacidad diaria y anual de la planta de tratamiento de aguas residuales y el periodo de uso | | | |
| | | | | |

Figura 10. Componentes del proyecto que deben ser considerados.

También, en la figura inferior se aprecia específicamente el mapeo del tajo principal, marcando con un código de colores los elementos que componen las áreas operativas y caminos. Este análisis permite al tomador de decisiones tener una base de conocimientos de los componentes del proyecto y así, poder comenzar a proponer los rubros que serán consideramos para el plan de cierre.

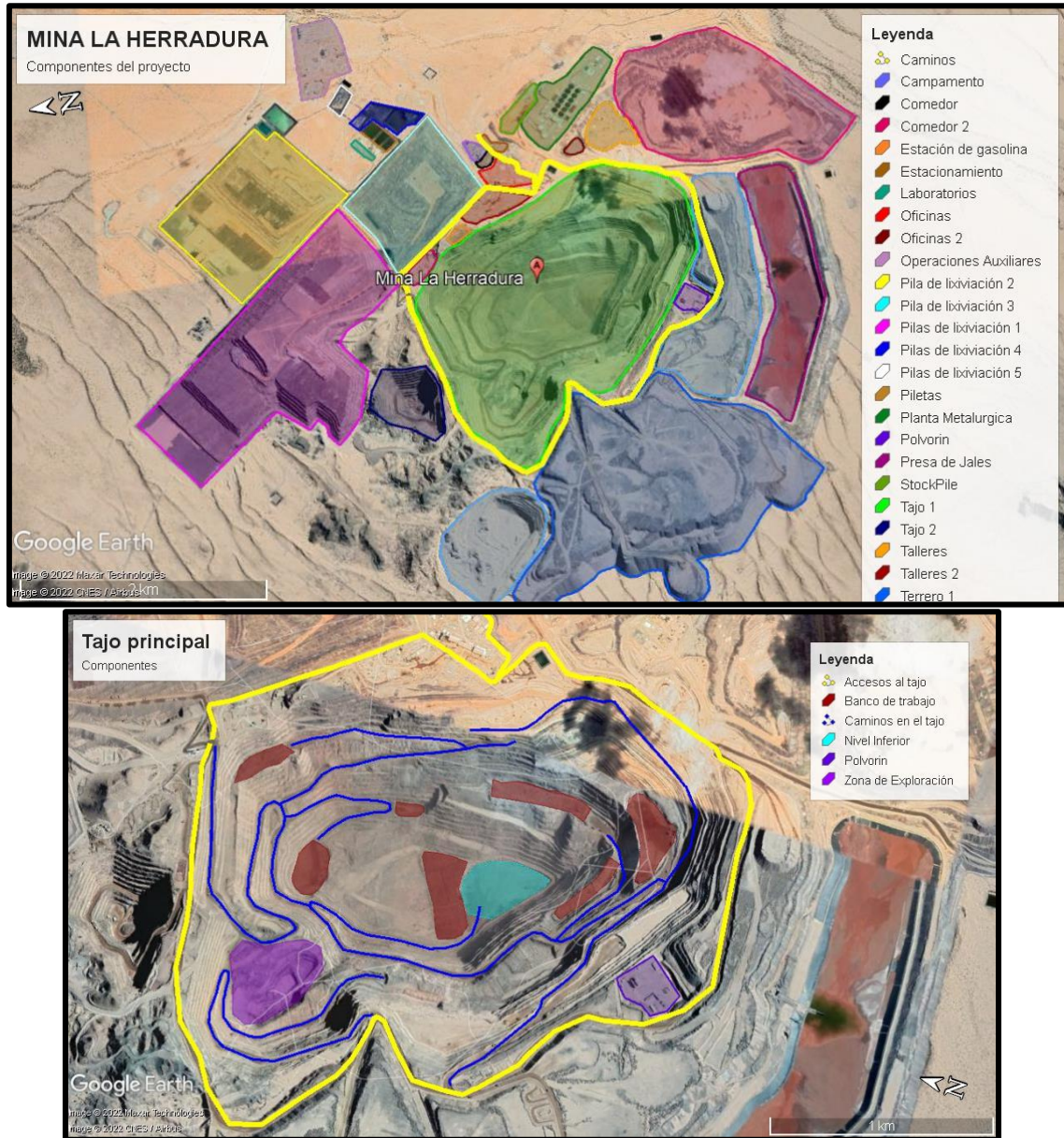


Figura 11. En la figura superior se presenta el mapeo de los componentes del proyecto La Herradura. En la Figura inferior se presenta el mapeo específicamente de los componentes del Tajo principal.

Para el caso de los proyectos clasificados en el caso 2, se debe integrar un cronograma de los trabajos de preparación del sitio y el inicio de las operaciones.

II.6 Evaluación de impacto ambientales

La Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) es un procedimiento aplicable para valorar los impactos ambientales de las alternativas del proyecto, con el objetivo de seleccionar la metodología que se adapte al nivel de información y características del sitio (Garmedia *et al.*, 2005), o bien, definir medidas de prevención y mitigación ante los posibles efectos negativos que provoque las actividades realizadas por la empresa. En materia de cierre de minas la EIA constituye parte esencial del proceso de cierre y el ciclo de vida de la operación, debido a que, la información ambiental generada en las etapas del proyecto, incluidos los estudios realizados antes de la apertura de la mina van a permitir generar nuevas alternativas al acercarse al cierre definitivo (Heikkinen, *et al.*, 2008), por ende, es recomendable actualizar la información inicial realizando evaluaciones en diferentes tiempos de la operación. En la figura 12 se presenta una metodología propuesta para realizar la evaluación de impacto ambiental de acuerdo con las características del proyecto.

En la **etapa 1**, los proyectos que se encuentran en la clasificación del caso 2, se deben realizar estudios de línea base con el objetivo de tener datos de referencia del área al momento de planificar las operaciones mineras. Cuando se trata de proyectos agrupados en el caso 1 en donde en diversas ocasiones no se cuenta con estudios previos del sitio, se realizará una caracterización de los elementos ambientales y los datos de referencia utilizados serán los estipulados por las Normas Oficiales Mexicanas o criterios de referencia internacionales.

Posteriormente, con la información obtenida se continua con la **etapa 2**, en la cual se conjunta la documentación y se definen los elementos ambientales con los indicadores a evaluar. Es importante analizar con detalle todos los elementos para evaluar las características más representativas del sitio.

Después, en la **etapa 3** se delimitan todos los componentes que se consideraron para la evaluación, la delimitación incluye: áreas operativas de la mina, instalaciones de procesamiento, almacenamiento, oficinas, tratamiento de agua, áreas de disposición y caminos. Se recomienda analizar componente por componente, es decir, conocer bien los procesos que se realizan y los elementos que lo componen.

Para la **etapa 4**, en el caso de los proyectos que inician sin un plan de cierre se debe realizar un análisis para determinar cuáles son las condiciones actuales del sitio el cual consiste en determinar qué alteraciones ambientales y sociales ha implicado el proyecto, así como inspeccionar las posibles áreas que han sufrido contaminación de alguno de los elementos ambientales. Es recomendable realizar visitas de campo y entrevistas en el sitio para obtener más información.

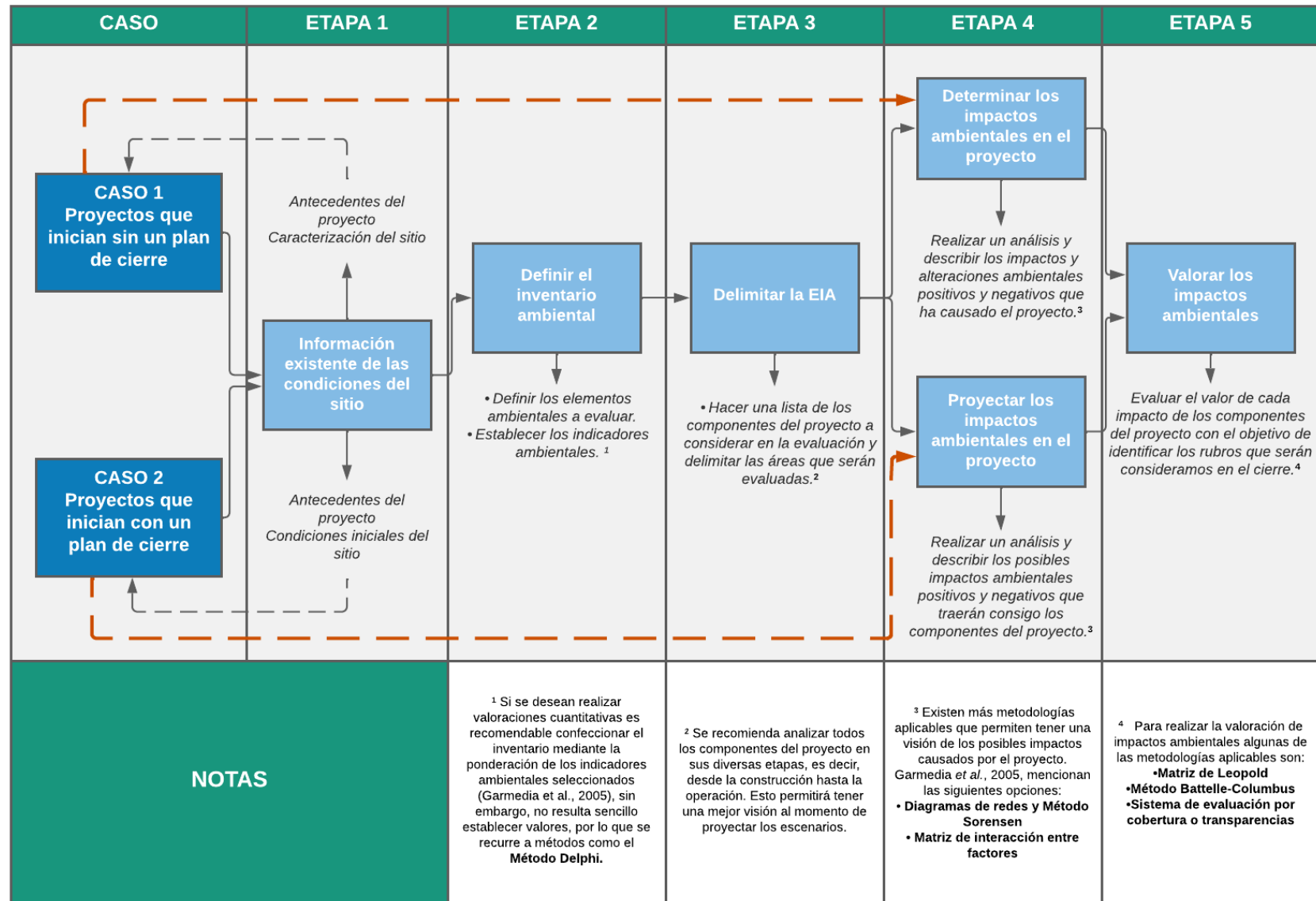


Figura 12. Etapas por cubrir en la evaluación de impacto ambiental.

Para el caso de los proyectos clasificados en el caso 2, se propone comenzar con dividir los posibles impactos, es decir, de acuerdo con el medio y la peculiaridad del proyecto se pueden agrupar en: impactos fisicoquímicos, impactos ecológicos, impactos socioeconómicos, impactos en el uso de suelo y la infraestructura. Una vez divididos los impactos se proyectan posibles escenarios del comportamiento del componente, describiendo afectaciones positivas y negativas. Los escenarios se proyectarán con base en posibles variaciones que tendrán las condiciones iniciales del proyecto.

Finalmente, en la **etapa 5** se hace la valoración de los impactos ambientales, el objetivo es conocer el nivel de la afectación y definir el elemento ambiental con mayor vulnerabilidad. Heikkinen, *et al.*, (2008) mencionan que los impactos en el entorno natural se evalúan según su magnitud, tiempo y duración, y los impactos sociales de acuerdo en el tamaño del área afectada, el tamaño de la población afecta, la acumulación y duración del impacto. Conforme a las metodologías seleccionadas para la evaluación se elegirán los parámetros a considerar para valorar el impacto.

En la figura 13, se presenta un ejemplo sobre la evaluación de impacto ambiental de las condiciones de los recursos hídricos en una presa de jales. En dicho ejemplo se observa que se proyectan posibles escenarios de los que pueden ocurrir con el objetivo de determinar los impactos en los elementos ambientales aplicando la Matriz de Leopold.

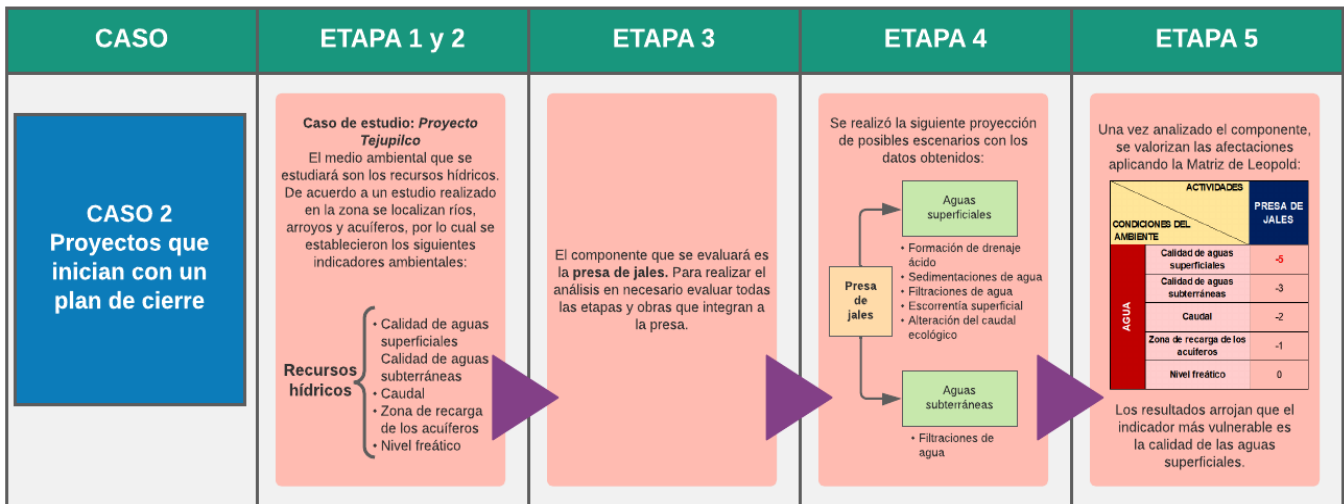


Figura 13. Ejemplo de la Evaluación de Impacto Ambiental para proyectos clasificados en el Caso 2.

II.7 Evaluación de riesgos

La evaluación de riesgos se define como un proceso que permite identificar un determinado peligro y la probabilidad de que se produzca. La gravedad de los impactos negativos ilustra la magnitud del peligro (Kauppila *et al.* 2011). La industria minera enfrenta diversos tipos de riesgos que incluyen la salud y seguridad, ambiente, aspectos socioeconómicos, legales, etc. (Ministerio de Producción y Trabajo de la Nación, 2019), sin embargo, en esta sección se enfocará en analizar la aplicabilidad de realizar análisis de riesgos para la elaboración del plan de cierre.

En materia de cierre de minas su aplicación radica para identificar la necesidad de los objetivos de cierre y priorizar cada uno de los riesgos, con el fin de focalizar las medidas a los riesgos más significativos (Heikkinen *et al.* 2008). De igual forma, se utiliza para comparar los efectos y probabilidades de sucesos imprevistos de las actividades planeadas, opciones de diseño o el valor ambiental y de salud a proteger realizado durante toda la vida útil del proyecto (Kauppila *et al.* 2011). Los riesgos serán diferentes para cada mina de acuerdo con sus condiciones, sin embargo, es indispensable evaluar todas las áreas para identificar los peligros y obtener un análisis preliminar (Heikkinen *et al.* 2008). Dicho análisis es recomendable realizarlo cuando se está planeando la operación minera, pero para los proyectos del caso 1 en los cuales no se ha realizado un previo estudio de riesgos, esto se debe hacer a más tardar cuando se elabore el plan de cierre final.

Al elaborar la evaluación de riesgos, es recomendable establecer etapas, como se muestra en la figura 14 adaptada de la AS/NZS 4360:2004, abarcando las siguientes directrices: información existente de las condiciones del sitio, identificación de riesgos, análisis de riesgos, evaluación de riesgos y finalmente, la gestión de riesgos. Las etapas se aplicarán de lo particular a lo general, es decir, los resultados de la evaluación pueden arrojar que es necesario realizar más estudios específicos y esto ayude a reorientar las medidas de cierre. A continuación, se explican cada uno de los puntos expuestos para abordar la evaluación de riesgos.

La **etapa 1 – Información existente de las condiciones del sitio**, consiste en analizar el contexto del proyecto con el objetivo de establecer las metas perseguidas en la evaluación de riesgos. Los puntos clave que debe abarcar el análisis comienzan definiendo la relación de la empresa con su entorno, en este rubro es importante comprender los grupos de interés involucrados directa e indirectamente para considerar su influencia y nivel de participación en la delimitación de la evaluación. Igualmente, se establecen los parámetros y criterios dentro de los cuales se deben gestionar los riesgos, es decir, aspectos operativos, técnicos, normativos, financieros, sociales, o de otro tipo.

Cada criterio va a corresponder a los posibles tipos y niveles de riesgos que sean analizados en las siguientes etapas.

Finalmente, se define la extensión de estudio, separando por elementos las partes del proyecto que se someterán a la evaluación de riesgos, tales como las instalaciones y áreas operativas.

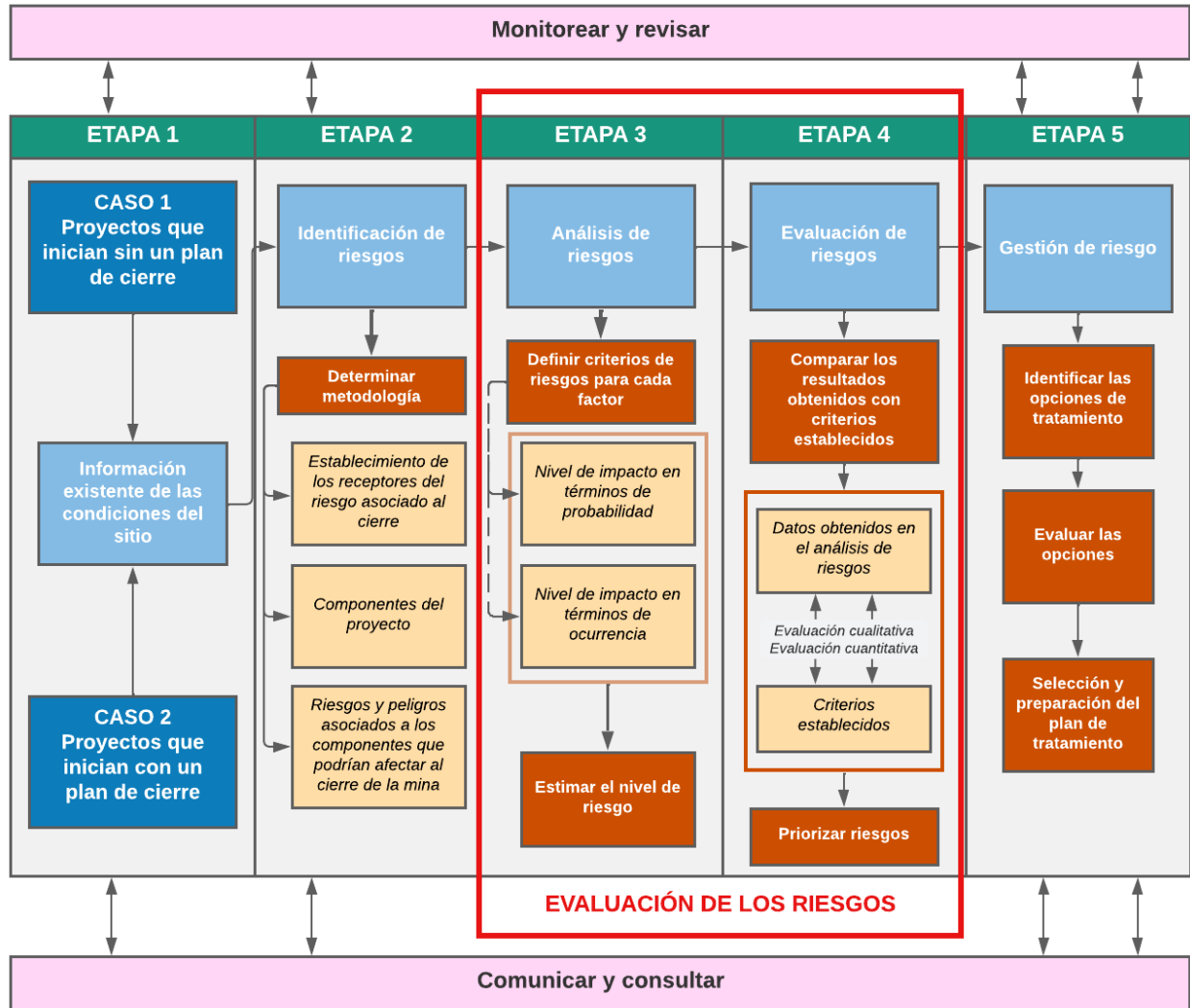


Figura 14. Etapas que considerar en el desarrollo de la evaluación de riesgos.

En la **etapa 2 – Identificación de riesgos** se busca identificar los posibles riesgos asociados al cierre, para del caso 2, este proceso debe incluir los riesgos ambientales causados por cambios en el medio ambiente y que tienen la necesidad de gestionarse (Heikkinen *et al.* 2008).

El proceso de identificación consiste en encontrar y registrar todos los riesgos que van a influir para la generación de los objetivos de cierre (Julca, 2021), es decir, identificar los

elementos del proyecto que por sus características y exposición implicarán un riesgo en el sitio. Este primer análisis puede comenzar aplicando los dos cuestionamientos expuestos en la figura 15, ¿Qué puede pasar? y ¿Cómo o por qué sucede? Cada pregunta se aplica a todos los elementos enlistados en la etapa anterior. Para el manejo y análisis de la información son aplicadas diversas metodologías. En la figura 15, son mencionadas algunas otras herramientas y técnicas aplicadas para el análisis.

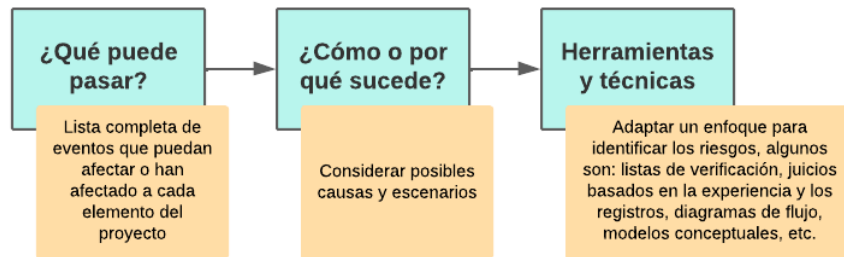


Figura 15. Etapa 2 - Identificación de riesgos.

La **etapa 3 – Análisis de riesgos** y **etapa 4 – Evaluación de riesgos** en conjunto corresponde a la evaluación de la información obtenida en las etapas anteriores.

El análisis de riesgos implica considerar las fuentes de riesgo, sus consecuencias y la probabilidad de que puedan ocurrir. Los riesgos analizados se enfocan al medioambiente y sociales. Se deben establecer los criterios de riesgos asociados al cierre con el fin de establecer una referencia sobre la cual se evaluarán los riesgos. Cada criterio se basará en los lineamientos legales y en considerar las preocupaciones de las partes interesadas (Julca, 2021). Se evalúa la magnitud en términos de la probabilidad y consecuencia de que ocurra un evento, estos dos parámetros se combinan para producir un nivel de riesgos. Para los efectos del cierre de minas, se entiende por **probabilidad de ocurrencia de un evento**, a la combinación de circunstancias y elementos que provocan un evento no deseado, y que este trae consigo consecuencias para la población y el medioambiente (Servicio Nacional de Geología y Minería [SERNAGEOMIN], 2014). Los elementos de probabilidad considerados son las instalaciones de la actividad minera, particularmente los factores técnicos de diseño y construcción, así como, los eventos naturales propios de un sitio, como las condiciones climáticas. Para el caso de las **consecuencias del evento**, su aplicación en el cierre radica en determinar al grado de impacto o daño que pueda generarse como resultado de la ocurrencia del evento sobre las personas y los elementos del ambientales (SERNAGEOMIN, 2014).

Las consecuencias y probabilidad se determinan mediante la aplicación de análisis y cálculos con una base de datos disponibles del sitio, en el caso de no contar con información disponible es posible realizar estimaciones donde se proyecten escenarios potenciales de eventos. Posterior al análisis, se realiza una evaluación, la cual implica

comparar el nivel de riesgo encontrado durante el análisis con criterios de riesgo previamente establecidos.

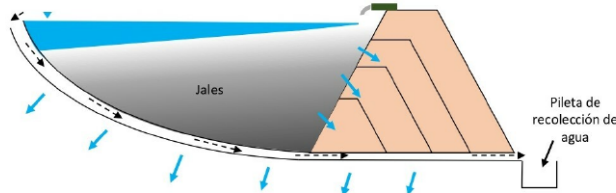
Con la evaluación se prioriza cada uno de los riesgos categorizando si el riesgo es extremo, alto, medio o bajo. Si los riesgos no caen dentro bajo o aceptable, se establecen las medidas de cierre que serán consideradas de acuerdo con cada caso. En este paso también es posible hacer la evaluación de los riesgos una vez que han sido aplicadas las medidas de cierre consideradas con el fin de evaluar su eficiencia. Los riesgos bajos y aceptados serán monitoreados y revisados periódicamente para garantizar que sean aceptables.

En la **etapa 5 – Gestión de Riesgos** se establecen las opciones para controlar los riesgos inherentes con el objetivo de lograr que el riesgo residual sea lo más bajo posible, es decir, al establecer las obras, medidas y actividades de control el riesgo resultante disminuye, o bien, se identifica un posible rediseño de las directrices consideradas en el plan de cierre hasta tener un riesgo aceptable, incluyendo una evaluación del nivel a lo largo del tiempo. Cada empresa define el nivel aceptable de acuerdo con los criterios y requerimientos legales.

Los controles establecidos serán sometidos a revisión para medir su efectividad, con el objetivo de que periódicamente se evalúen y actualicen las estrategias tomadas y así, disminuir al nivel más bajo el nivel de riesgo.

En la figura 16 se presenta un ejemplo de cómo aplicar las etapas de identificación, análisis y evaluación de los riesgos con base en un caso hipotético de una falla en la presa de Jales por un sismo. En el ejemplo se muestra que de acuerdo con las características el nivel de riesgo es alto, sin embargo, al aplicar las medidas de cierre el riesgo disminuye a un nivel medio, pero dicho valor aún representa un peligro para el ambiente y comunidades, por lo cual, se hace un rediseño de las medidas hasta lograr que el nivel sea aceptable.

FALLA EN LA PRESA DE JALES POR UN SISMO - ANÁLISIS DE RIESGOS



Descripción
La presa de jales se ubica en una zona de alta sismicidad, por lo cual existe el riesgo de que se presente una falla en la presa. Así que, se realizará una evaluación de los riesgos para determinar si la presa puede soportar un sismo

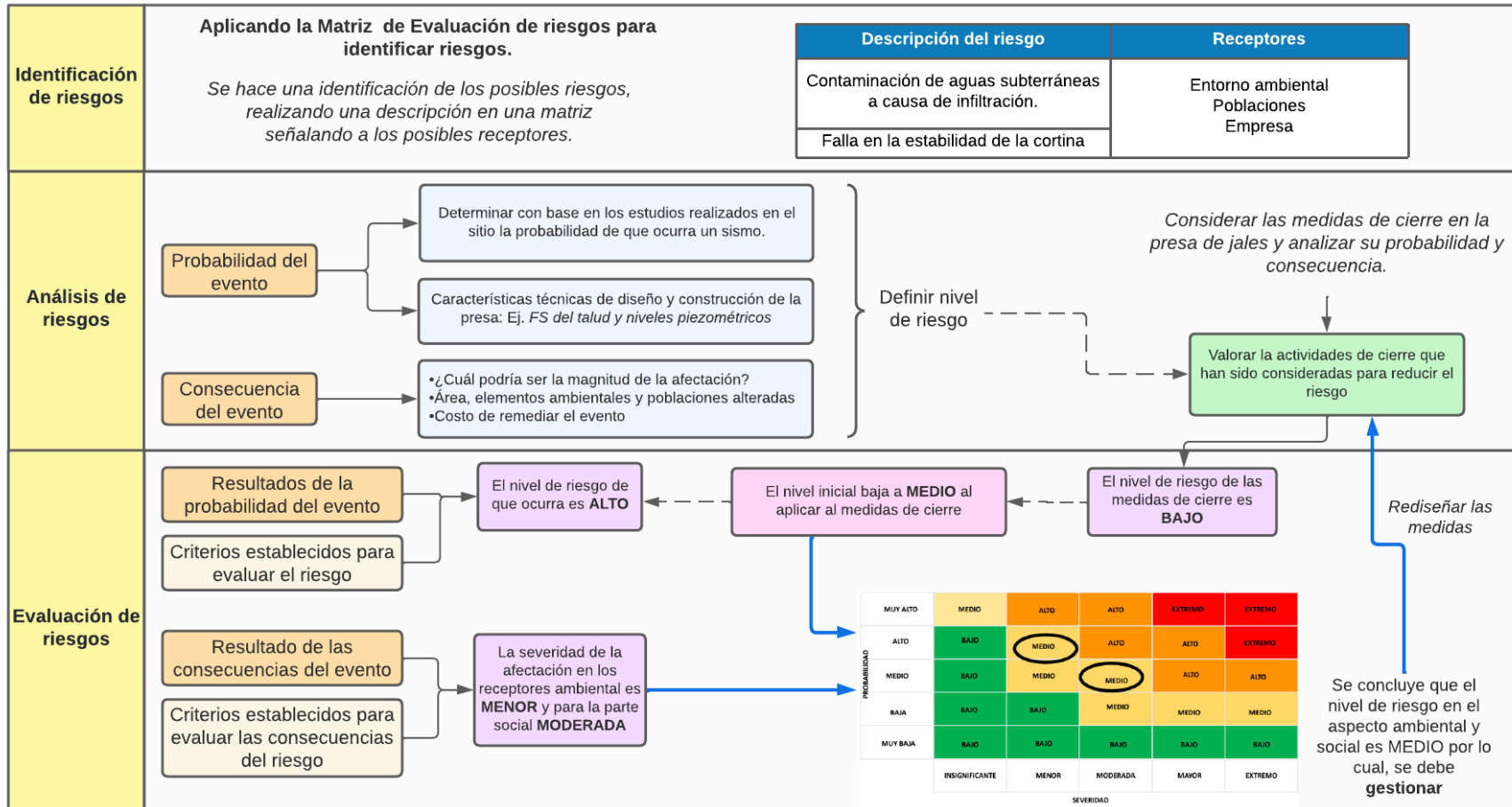


Figura 16. Ejemplo de una evaluación de riesgos aplicado a una presa de jales (Adaptado de Julca, 2021).

CAPÍTULO III. INTEGRACIÓN DEL PLAN DE CIERRE CONCEPTUAL

III.1 Plan de cierre conceptual

Como se mencionó en el capítulo anterior, el plan de cierre conceptual es el documento base que permite dirigir las actividades de cierre durante las etapas de la vida de la mina. Como se muestra en la Figura 17 la planificación del cierre comienza en la fase de factibilidad del proyecto con el objetivo de minimizar las limitaciones futuras y los costos del cierre de la mina, así como, maximizar el uso de la tierra después de la explotación de recursos e implementar estrategias innovadoras (Australian and New Zealand Minerals and Energy Council [ANZMEC] & Minerals Council of Australia, 2000).

Se realiza la planeación de actividades para conducir a mejores resultados con un enfoque equilibrado en aspectos como salud, seguridad, social, ambiental, legal, gobierno y recursos humanos (ICMM, 2019). Por ende, la participación de grupos de interés y regulaciones a nivel nacional e internacional será de vital importancia para el desarrollo del plan conceptual de cierre de minas.

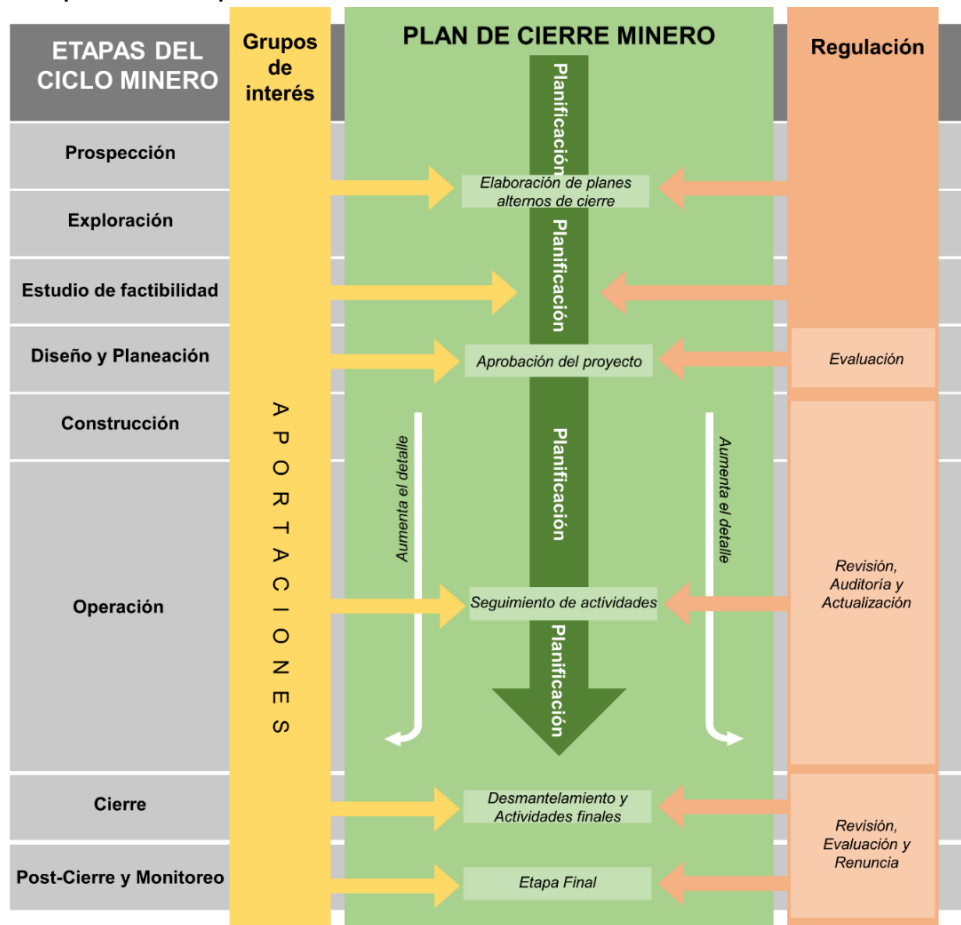


Figura 17. Incorporación del plan de cierre en la vida del proyecto minero (EPA, DMP, 2015)

En el presente capítulo se presenta una metodología para la elaboración de un plan conceptual de cierre de minas, tomando como base las regulaciones nacionales y los instrumentos utilizados a nivel internacional. El objetivo principal es guiar al lector a conocer los componentes, la estructura y el proceso que conlleva la preparación de un plan conceptual.

III.2 Estructura del plan

El plan de cierre conceptual es un documento dinámico que se integra al plan de la vida operativa de la mina. Este primer documento permite estudiar las condiciones del sitio y establecer los objetivos y actividades para el cierre. En la Tabla 3, se presentan los elementos que conforman la estructura de acuerdo con los dos casos de estudio: caso 1, proyectos que inician sin un plan de cierre y el caso 2, proyectos que inician con un plan de cierre.

Tabla 3. Elementos que conforman el plan de cierre conceptual

| PLAN CONCEPTUAL DE CIERRE | | |
|---------------------------|------------------------------------|--|
| <i>Estructura</i> | | |
| ETAPA 1 | IDENTIFICACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO | |
| ETAPA 2 | DIAGNÓSTICO GENERAL DEL SITIO | Antecedentes del proyecto |
| | | Condiciones iniciales |
| | | Identificación de grupos de interés |
| | | Descripción general y componentes del proyecto |
| | | Evaluación de impactos ambientales |
| | | Evaluación de riesgos |
| ETAPA 3 | LÍNEAS DE ACCIÓN | Estabilización física y química de áreas operativas |
| | | Depósitos de residuos mineros |
| | | Manejo de residuos sólidos de tipo urbano, peligros y de manejo especial |
| | | Gestión hídrica |
| | | Drenaje ácido de minas (AMD) |
| | | Rehabilitación |
| | | Remediación de sitios contaminados |
| | | Infraestructura |
| | | Responsabilidad social |
| | | Usos futuros del sitio |
| | | Cierre temporal |
| ETAPA 4 | POSCIERRE | Mantenimiento |
| | | Monitoreo |
| | | Evaluación |

Posteriormente, se observa la integración del diagnóstico general del sitio, análisis que cumple la función de evaluar las condiciones del proyecto para determinar los impactos ambientales, sociales y económicos con base en las características propias de cada unidad minera. Con dicha información se definirán las líneas de acciones y actividades de poscierre que cubrirá el plan.

III.3 Objetivos generales

La planeación efectiva y la delimitación de los objetivos y medidas de cierre deben determinarse con base en las circunstancias específicas del sitio. En la figura 18 se presentan una serie de objetivos generales ampliamente utilizados en todos los proyectos que permiten definir las directrices propias de acuerdo con las características de la unidad. Estos cambiarán y se priorizarán con base en las metas del proyecto.

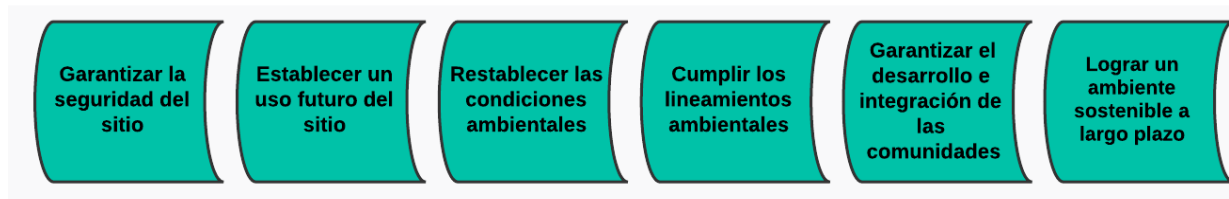


Figura 18. Objetivos generales.

III.4 Construcción del plan

El desarrollo del plan de cierre forma parte de la planeación del proceso general de la mina, por ende, comprender su construcción y evaluación a la largo de la operación facilitará su manejo y la integración de las partes interesadas. En la figura 19 se presenta una metodología para la formulación del plan a partir del empleo de la información presentada en la tabla 3.

Primeramente, con los resultados obtenidos en el diagnóstico general del sitio se delimitarán las áreas operativas e instalaciones que conforman todo el proyecto minero. Después, serán expuestas las líneas de acción con base en los objetivos generales de la figura 18. Aunque dichos objetivos pueden ser aplicados a todas las minas, las líneas de acción se establecerán de acuerdo con las características de cada proyecto y la modificación que ocurra durante la operación.

Por consiguiente, se indicarán los objetivos específicos para cada una de las líneas, dichos objetivos brindan declaraciones más completas basandose en especificaciones del sitio y que comúnmente son medibles (ICMM, 2019). Algunos de estos objetivos pueden ser planteados por la empresa en conjunto con las partes interesadas para lograr

un propósito. Por ejemplo, un objetivo específico del sitio puede ser garantizar a las comunidades que el uso futuro del sitio será la construcción de un espacio recreativo. También, el cumplir con regulaciones ambientales, por ejemplo, cumplir con el límite máximo permisible para las descargas de aguas residuales vertidas a aguas y bienes nacionales.

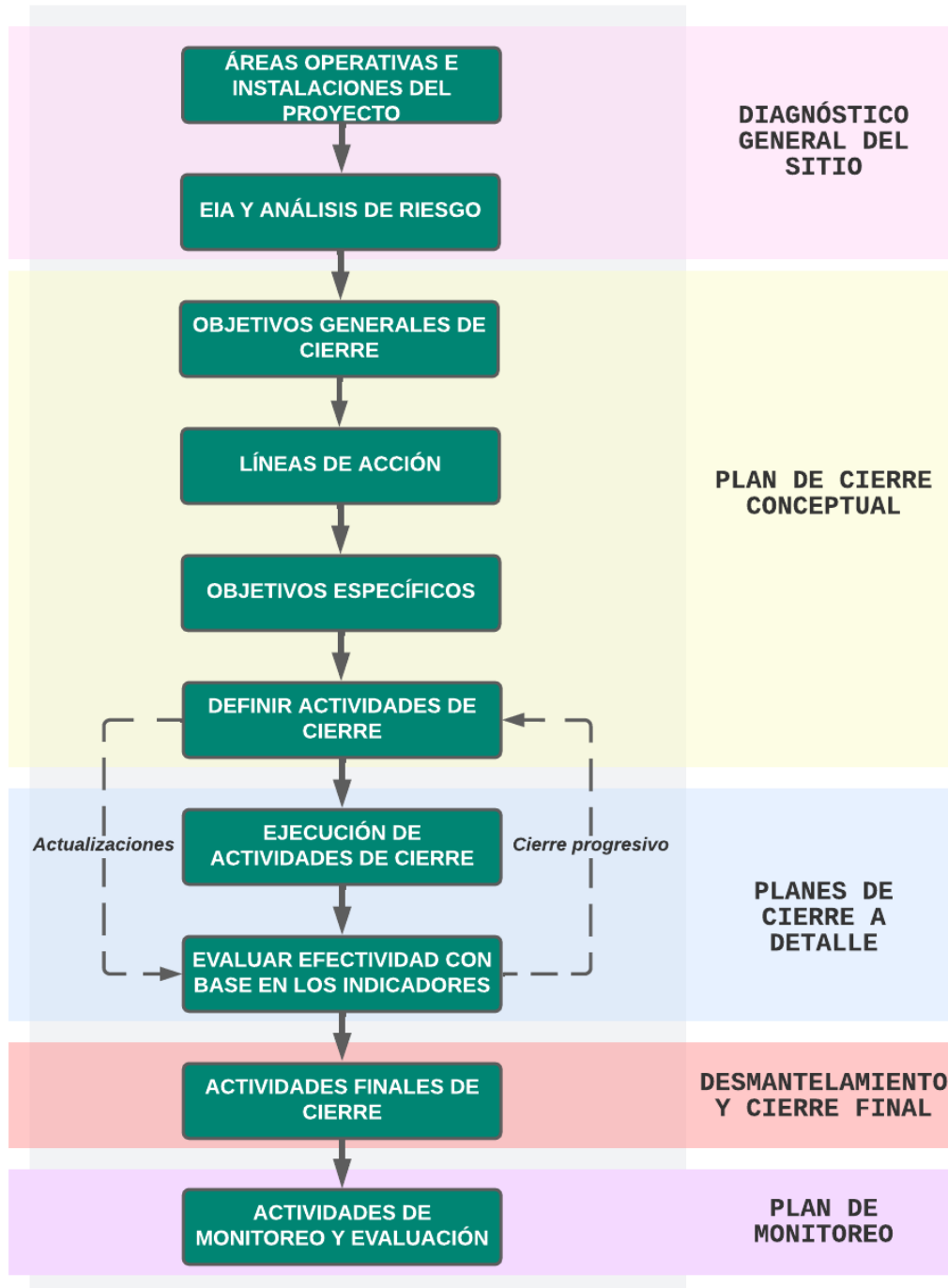


Figura 19. Proceso de construcción del plan de cierre.

Posteriormente, se describirán cada una de las actividades que permitirán cumplir con las especificaciones establecidas. Todas las actividades integrarán la serie de alternativas de las posibles metodologías, estrategias y técnicas aplicables para el cierre identificando las acciones que pueden efectuarse mediante progresivamente o en al concluir la operación minera.

Como se ha mencionado anteriormente, es difícil anticipar y definir todas las medidas requeridas, ya que, la naturaleza y la escala de las operaciones pueden apartarse del plan original (Heikkinen *et al.* 2008). Por lo tanto, se recurre al proceso del cierre progresivo que consiste en realizar planes específicos que incorporen las actividades de cierre por cada línea de acción, acompañados de una programación preliminar de los tiempos de ejecución. Éstos serán evaluados mediante el uso de indicadores que proporcionen información ambiental, social, económica y técnica sobre el rendimiento de las actividades, con la finalidad de actualizar periódicamente el plan inicial evitando los posibles impactos proyectados en el diagnóstico y lograr la efectividad de las líneas de acción.

Este proceso se lleva a cabo simultáneamente a la operación minera en cada una de las instalaciones, operaciones y actividades que concluyan su vida útil, de tal manera que al llegar a la etapa final del proyecto las acciones por realizar para cada caso sean las mínimas. En el Capítulo V, se profundizará en el procedimiento para la definición de los planes específicos y su aplicación durante el cierre progresivo.

Finalmente, se acotarán las actividades que se realizarán al concluir con el proyecto, incluyendo el plan de monitoreo y evaluación final en la etapa de poscierre.

CAPÍTULO IV. LÍNEAS DE ACCIÓN

IV.1 Estabilización física y química de áreas operativas

La estabilización de áreas operativas tiene dos componentes, la estabilidad física y la estabilidad química. La primera busca crear un paisaje físicamente estable que limite el potencial de la erosión y degradación ambiental a largo plazo, minimizando el riesgo para la seguridad del sitio. La segunda pretende prevenir los efectos adversos sobre la calidad de los elementos ambientales por la posible contaminación química por las características específicas de cada mina (ICMM, 2019).

Si bien, se pueden definir algunos estándares para la planificación de las actividades de cierre, estos van a variar de acuerdo con la naturaleza del proyecto, escala de las operaciones y consideraciones individuales (Heikkinen, *et al.*, 2008). De acuerdo con los diversos lineamientos internacionales consultados, las áreas operativas que requieren integrar acciones para la estabilización física y química son descritas en la tabla 4.

Tabla 4. Áreas operativas que se deben integrar en el cierre de minas

| ÁREAS OPERATIVAS | COMPONENTE DEL ÁREA OPERATIVA | CIERRE PROGRESIVO / CIERRE FINAL |
|--------------------------------|---|----------------------------------|
| Minería subterránea | Rebajes | Cierre progresivo |
| | Obras de acceso (Rampas y tiros) y conductos de ventilación | Cierre final |
| | Obras temporales (Rampa de un rebaje, cruceros del rebaje y todas las obras asociadas para la explotación de los rebajes) | Cierre progresivo |
| | Obras de servicios (Talleres, almacenes, etc.) | Cierre progresivo |
| | Equipos y materiales | Cierre progresivo /Cierre final |
| | Infraestructura (electricidad, sistemas de comunicación, suministro de agua y ventilación, aire comprimido y bombas) | Cierre final |
| Minería a cielo abierto | Tajos y canteras | Cierre progresivo |
| | Equipos y materiales | Cierre progresivo /Cierre final |
| | Infraestructura (electricidad, sistemas de comunicación, suministro de agua y bombas) | Cierre final |
| | Caminos | Cierre final |
| Planta metalúrgica | Plantas de trituración | Cierre final |
| | Plantas concentradoras | Cierre final |
| | Estanques de sedimentación | Cierre final |
| | Infraestructura auxiliar | Cierre final |

En la tabla 4 se agrupan los componentes conforme a las áreas operativas que caracterizan un proyecto. En la columna 3, se sugiere el período en el cual se comiencen con las actividades de cierre, como se ha mencionado anteriormente, el cierre progresivo se lleva a cabo durante la operación minera, mientras que el cierre final hasta cesar operaciones.

Las principales premisas específicas que se deben considerar al momento de plantear las actividades de cierre dirigidas a la estabilización son:

- ✓ Asegurar la estabilidad física del sitio.
- ✓ Asegurar la estabilidad química del sitio.
- ✓ Prevenir la subsidencia y sus efectos en el entorno
- ✓ Garantizar la seguridad de las comunidades aledañas al proyecto minero, así como de la flora y fauna.
- ✓ Garantizar el uso futuro del sitio.
- ✓ Asegurar la calidad de aguas superficiales y subterráneas de la mina
- ✓ Evitar la alteración de los patrones naturales de escurrimiento del agua
- ✓ Minimizar efectos adversos a las comunidades

Para cada objetivo se deben formular actividades de cierre considerando los aspectos técnicos de la unidad minera, las condiciones geotécnicas, los criterios ambientales y de uso potencial del suelo. En la tabla 5 se presenta un ejemplo que aborda el planteamiento de los objetivos específicos para todos los componentes de una mina subterránea, así como, las actividades que se realizarán para cumplir con cada objetivo, en el ejemplo se describen de manera general algunas de las posibles acciones de cierre realizadas para cada caso.

En diversas ocasiones, los proyectos que se encuentran clasificados en el caso 1 sufren contaminación en los suelos y aguas superficiales y subterráneas debido a que, son proyectos que han iniciado sin un plan de cierre sin aplicar medidas de prevención y mitigación, por ende, las medidas de cierre que deben de ser consideradas para estos casos son actividades de remediación de las áreas afectadas mediante la aplicación de técnicas de suelos y aguas, en la sección IV.7 se expone el procedimiento para tratar el caso.

Tabla 5. Planteamiento de objetivos y actividades de cierre generales para una operación subterránea.

| ÁREAS OPERATIVAS | COMPONENTE DEL ÁREA OP. | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | ACTIVIDADES |
|----------------------------|-------------------------|---|--|
| MINERÍA SUBTERRÁNEA | Rebajes | Asegurar la estabilidad física de las obras | <ol style="list-style-type: none"> 1. Rellenar las obras para garantizar la estabilidad del rebaje. 2. Sellar accesos. 3. Los pilares corona deben ser estable a largo plazo, por lo tanto, en caso de ser necesario se deben reforzar. 4. Reforzar estructuralmente la superficie. |
| | | Asegurar la estabilidad química del sitio | <ol style="list-style-type: none"> 1. Asegurar que el material utilizado para el relleno no sea potencial generador de drenaje ácido. 2. Una alternativa para el cierre de rebajes es acelerar la inundación de la mina para disminuir la oxidación del sulfuro y evitar la generación de drenaje ácido. 3. Utilizar geomembranas en los accesos al rebaje para evitar infiltraciones de agua y posibles alteraciones en la estabilidad química. 4. Si el riesgo de contaminación de las aguas superficiales o subterráneas circundantes parece probable, entonces se deben considerar opciones para el tratamiento y la gestión del agua como parte de la estrategia de cierre. 5. Generar planes para el seguimiento del tratamiento del drenaje ácido. 6. Todos los desechos y materiales que tengan el potencial de contaminar las aguas subterráneas serán retirados. 7. En caso de existir contaminación en los suelos por el derrame de aceites de los equipos se evaluará para aplicar alguna alternativa de remediación. |
| | | Garantizar la seguridad del sitio | <ol style="list-style-type: none"> 1. Colocar señales de advertencia en las áreas susceptibles al hundimiento o derrumbe. 2. Elaborar un mapa que ilustre las obras de cierre que se realizarán, señalando la ubicación de las estas. |

| | | | |
|--|--|---|---|
| | Obras de acceso (Rampas y tiros) y conductos de ventilación | Asegurar la estabilidad física de las obras | <ol style="list-style-type: none"> 1. Sellar permanente los tiros y rampas con recubrimiento de hormigón o relleno de tepetate. 2. Los conductos de ventilación se pueden tapar con hormigón armado. |
| | | Asegurar la estabilidad química del sitio | <ol style="list-style-type: none"> 1. Todos los desechos y todos los materiales que tengan el potencial de contaminar las aguas subterráneas deben ser retirados. |
| | | Garantizar la seguridad | <ol style="list-style-type: none"> 1. Colocar señales de advertencia. 2. Una alternativa es cerrar las carreteras que dirijan a los accesos de la mina. 3. Realizar inspecciones periódicas del sitio. |
| | | Usos futuros del sitio | <ol style="list-style-type: none"> 1. Realizar programas de revegetación en los accesos sellados. |
| | Obras temporales (Rampa de un rebaje, cruceros del rebaje y todas las obras asociadas para la explotación de los rebajes) | Asegurar la estabilidad física de las obras | <ol style="list-style-type: none"> 1. Sellar permanentemente los accesos con recubrimiento de hormigón o relleno de tepetate. 2. Definir el método de relleno que será utilizado. |
| | | Asegurar la estabilidad química del sitio | <ol style="list-style-type: none"> 1. Impermeabilizar las obras en caso de que existan infiltraciones de agua. |
| | | Garantizar la seguridad del personal | <ol style="list-style-type: none"> 1. Colocar señales de advertencia. 2. Realizar inspecciones periódicas del sitio. |
| | Obras de servicios (Talleres, almacenes, etc.) | Asegurar la estabilidad física de las obras | <ol style="list-style-type: none"> 1. Desmantelar todas las instalaciones, materiales y sustancias peligrosas y de manejo especial. 2. Sellar los accesos de forma permanente. 3. Definir el método de relleno que será utilizado. |



| | | | |
|--|---|---|--|
| | | Asegurar la estabilidad química del sitio | 1. Impermeabilizar las obras en caso de que existan infiltraciones de agua. |
| | | Garantizar la seguridad | 1. Colocar señales de advertencia. 2. Realizar inspecciones periódicas del sitio. |
| | Equipos y materiales | Asegurar la estabilidad del entorno natural | 1. Hacer mantenimientos periódicos de los equipos para evitar la fuga de aceites. 2. Retirar todos los equipos y materiales. |
| | | Usos futuros | 1. Durante la fase de clausura y desmantelamiento se debería realizar la clasificación del material a retirar del emplazamiento, para facilitar su posterior reutilización, venta o reciclaje. |
| | Infraestructura (electricidad, sistemas de comunicación, suministro de agua y ventilación, aire comprimido y bombas) | Asegurar la estabilidad física del sitio | 1. Se desmantelará la infraestructura. 2. La infraestructura existente que contribuya a la seguridad de la mina no se retirará del sitio 3. Las tuberías, cables y equipos eléctricos deben desmantelarse. |
| | | Usos futuros del sitio | 1. Durante la fase de clausura y desmantelamiento se debería realizar la clasificación del material a retirar del emplazamiento, para facilitar su posterior reutilización, venta o reciclaje. |

IV.2 Residuos minero-metalúrgicos

En la minería inevitablemente se generan grandes cantidades de residuos propios de los procesos que se llevan a cabo en la extracción y beneficio de los minerales, estos desechos tienen origen en las diferentes etapas de la minería, por ende, se agruparán con base en la NOM-157-SEMARNAT-2009, que establece su clasificación en función del proceso que los genera (figura 20).

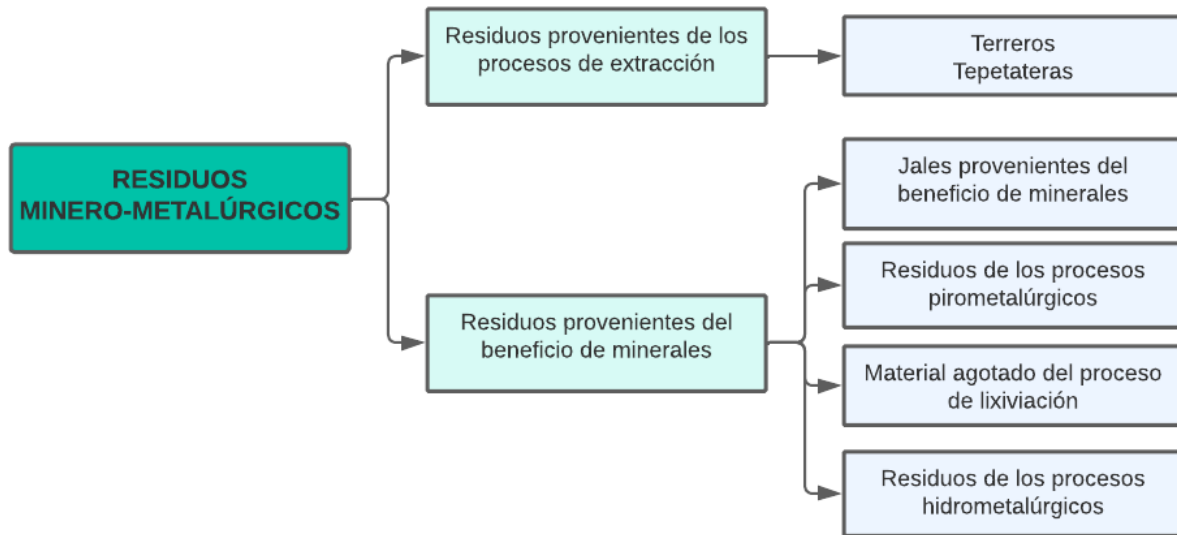


Figura 20. Clasificación de los residuos minero-metalúrgicos.

Los objetivos de cierre delimitados para cada caso son específicos según las características, la cantidad y el potencial de reutilización, su técnica de eliminación y la estructura de los depósitos de residuos, así como de las condiciones ambientales, climáticas y sociales locales.

De manera general los objetivos específicos de cierre que son considerados para el manejo de residuos y los depósitos de residuos mineros se definen de la siguiente manera:

- Para el caso de los depósitos de residuos mineros, se buscará garantizar la estabilidad física y química de los sitios de almacenamiento
- Minimizar la cantidad de material de desecho antes del cierre
- Restaurar el área a una condición ambientalmente segura
- Minimizar los impactos ambientales a largo plazo
- Garantizar el uso potencial de la tierra después del cierre

Por otra parte, es fundamental cumplir con los lineamientos normativos nacionales e internacionales, por lo cual, se deben considerar las especificaciones estipuladas en la

NOM-157-SEMARNAT-2009 para el desarrollo y ejecución de planes de manejo; NOM-141-SEMARNAT-2003, para el cierre de presa de jales; NOM-155-SEMARNAT-2007, para el cierre de pilas de lixiviación de oro y plata; y NOM-159-SEMARNAT-2011, para el cierre de pilas de lixiviación de cobre. En la figura 21, se observan los elementos y procedimientos considerados al formular planes de manejo, abarcando lo siguiente:

1. *Contenido del plan de manejo:* estructura y puntos que abarca el plan de manejo.
2. *Manejo integral de residuos:* estrategias para el manejo integral de los residuos que deben describirse en el plan de manejo.
3. *Determinar la peligrosidad:* procedimiento a seguir para determinar la peligrosidad del residuo.
4. *Evaluación, mejora y actualización:* dentro del plan, se van a incluir los indicadores de desempeño para determinar la efectividad de las estrategias, también, las mejoras que se realicen y las posibles actualizaciones efectuadas.

Para el cumplimiento de cada directriz se examinarán las tecnologías de diseño, construcción, gestión y cierre aplicables a cada caso. Por ejemplo, si los jales no son químicamente reactivos y no existe un riesgo demostrable para el medio ambiente o la salud, entonces el énfasis principal de la estrategia de cierre es garantizar la estabilidad física a largo plazo, como la prevención del hundimiento, el control de la erosión y la rehabilitación del paisaje y revegetación.

En la tabla 6 se enlistan los residuos descritos anteriormente, en la columna 2, se sugiere el periodo para el comienzo de las actividades de cierre, para todos los depósitos es posible realizar un cierre progresivo y dejando para el cierre final las instalaciones auxiliares de cada área operativa.

Tabla 6. Depósitos de residuos mineros considerados en el plan de cierre.

| RESIDUO | CIERRE PROGRESIVO / CIERRE FINAL |
|---|----------------------------------|
| Presa de jales | Cierre progresivo |
| Pilas de lixiviación | Cierre progresivo |
| Terreros | Cierre progresivo |
| Residuos de los procesos piro e hidrometalúrgicos | Cierre progresivo |
| Infraestructura auxiliar | Cierre final |



En la tabla 7 se presenta un ejemplo que aborda el planteamiento de los objetivos específicos para una presa de jales, así como, las actividades que se realizarán para cumplir con cada objetivo, en el ejemplo se describen de manera general algunas de las posibles acciones de cierre realizadas para cada caso.

Particularmente, serán consideradas las especificaciones establecidas en las NOM de acuerdo con cada caso. Algunos requisitos mencionados se realizarán previo a la proyección de los objetivos y actividades de cierre, ya que, con base en las condiciones químicas de cada depósito se cumplirán lineamientos. Para las pilas de lixiviación de oro y plata una vez terminada la recuperación de valores se eliminará la toxicidad mediante el lavado y tratamiento. Para las pilas de recuperación de cobre, se deberán considerar los resultados de la evaluación del potencial de generación de lixiviados, tomando en cuenta las características de peligrosidad del mineral gastado conforme la información climática estipulada en la NOM. En el caso de las presas de jales se analizará la presencia de minerales generadores potenciales de agua ácida.

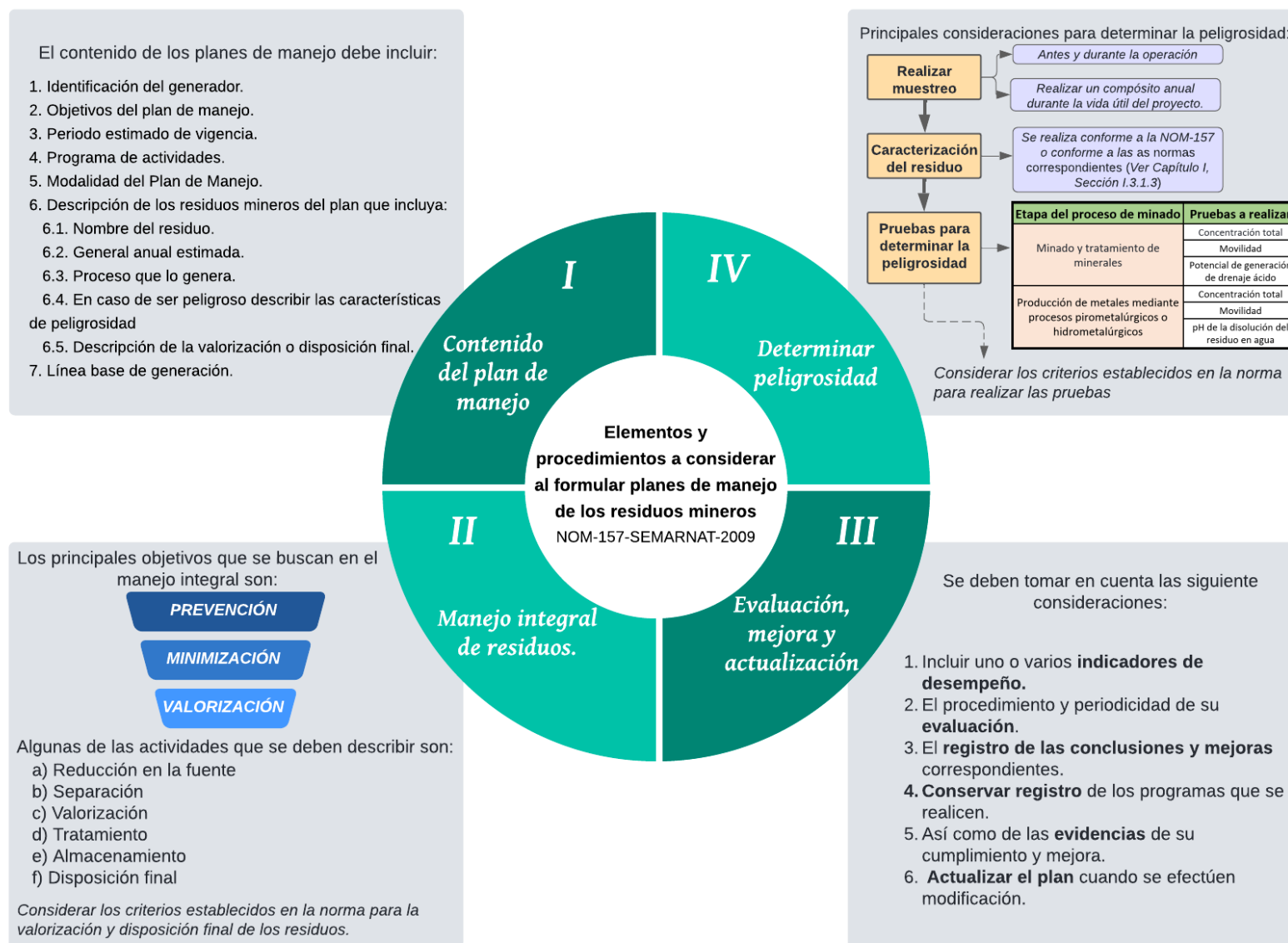


Figura 21. Elementos y procedimientos para considerar al formular planes de manejo de los residuos mineros establecidos en la NOM-157-SEMARNAT-2009.

Tabla 7. Planteamiento de objetivos y actividades de cierre generales para una operación subterránea.

| ÁREAS OPERATIVAS | COMPONENTE DEL ÁREA OP. | OBJETIVOS DE CIERRE | ACTIVIDADES |
|---|-------------------------------|--|---|
| <p>Depósitos de residuos mineros</p> | <p>Presas de jales</p> | <p>Asegurar la estabilidad física de las obras</p> | <ol style="list-style-type: none"> 1. Diseñar y construir la presa de jales considerando eventos extremos como inundaciones, terremotos y fuerzas disruptivas perpetuas, incluida la erosión del viento y agua. 2. Mejorar la estabilidad disminuyendo las pendientes y refuerzos de los taludes, también, la presión intersticial del agua en la presa ya sea bombeando el agua o disminuyendo la infiltración de agua superficial con una capa de cobertura. 3. En caso de ser necesario, diseñar bermas sobre el talud para las actividades de monitoreo. 4. Establecer las obras para el manejo y drenaje de agua, incluyendo los canales en el vaso de la presa, contorno y talud, así como, el sitio para la descarga hídrica final. 5. Realizar el recubrimiento del vaso y taludes de la presa. 6. Realizar obras para el control de erosión, como surcos superficiales paralelos entre sí y continuos, orientados a favor de la máxima pendiente del talud. 7. Establecer si es conveniente el drenaje de los estanques de sedimentación y la eliminación de cualquier estructura de retención que ya no se necesite 8. Definir una estrategia de utilización del material remanente después de la demolición de terraplenes y otros movimientos de tierra. 9. Si la posibilidad de derrumbe o hundimiento de taludes persiste en el sitio, a pesar de los esfuerzos debidos para mejorar la estabilidad, o si ocurren otros peligros potenciales, entonces el área debe cercarse y marcarse claramente con señales de advertencia que prohíben la entrada. |
| | | <p>Asegurar la estabilidad química del sitio</p> | <ol style="list-style-type: none"> 5. Realizar una caracterización mineralógica, química y geotécnica de las propiedades de los jales. 6. Realizar estudios para determinar el comportamiento a largo plazo de los relaves evaluando sus propiedades mineralógicas y químicas. Estos estudios deben actualizarse para definir el cierre final de la presa de jales y los posibles usos futuros del sitio. 7. Planificar cuidadosamente la colocación y el almacenamiento de jales químicamente reactivos; esto requiere una comprensión adicional de la |



| | | | |
|--|--|-----------------------------------|--|
| | | | <p>estructura, la composición y la hidrología del suelo en el sitio de almacenamiento propuesto.</p> <ol style="list-style-type: none"> 8. En caso de que los jales sean generadores potenciales de drenaje ácido, se deben establecer medidas preventivas y técnicas de tratamiento de acuerdo con las condiciones del sitio. 9. Evitar la migración de contaminantes a las aguas superficiales o subterráneas. 10. Evaluar la necesidad de cubrir los jales e iniciar los programas de cobertura mientras la extracción está en curso o tan pronto como sea posible después del cierre. 11. Para el monitoreo de aguas considerar los lineamientos establecidos en la NOM-141-SEMARNAT-2003. |
| | | Garantizar la seguridad del sitio | <ol style="list-style-type: none"> 1. Garantizar que el área de jales no sea una fuente de contaminación y riesgo para el medio ambiente o la salud pública, mediante el control de la erosión a las áreas circundantes. 2. Es posible que sea necesario cubrir los jales si el área es susceptible de levantar polvo debido a la ablación del viento, o si el establecimiento de la vegetación deseada exige paisajismo y mejora de la calidad del suelo. Al igual que en el caso de la gestión de desmonte, lo más conveniente es hacer uso del material almacenado en el sitio, en particular, la capa superior y la tierra vegetal. |
| | | Usos futuros del sitio | <ol style="list-style-type: none"> 1. Restaurar el área a través de paisajismo y otras medidas apropiadas a una condición en la que se permitan una variedad de actividades alternativas de uso de la tierra. 2. Buscar alternativas para el uso de los jales, siempre que no sean químicamente reactivos. |

IV.3 Manejo de residuos sólidos de tipo urbano, peligrosos y de manejo especial

Antes, durante y al concluir los procesos minero-metalúrgicos son generados diversos residuos sólidos que son manejados de acuerdo con su peculiaridad y volumen, por ende, conocer las actividades y procesos que originan todos los desechos va a permitir establecer un plan de manejo y la disposición final a la que estarán sujetos.

De acuerdo con la *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos* (LGRGIR) un plan de manejo se define como un instrumento cuyo objetivo es minimizar la generación y maximizar la valorización de residuos bajo criterios de eficiencia ambiental, tecnológica, económica y social. Dicha Ley obliga a la industria minera a generar planes de manejo aplicando las disposiciones establecidas de los lineamientos legales.

En la figura 22, se aprecia la clasificación de los residuos conforme lo establece la LGPGIR, su reglamento y las normas oficiales mexicanas. También, se describen algunos ejemplos de los residuos que se encuentran en un proyecto minero de acuerdo con la clasificación. En el caso de los residuos sólidos urbanos se clasifican como orgánicos e inorgánicos, estos son generados en los campamentos, oficinas y comedores ubicados en algunos complejos.

Igualmente, están los residuos de manejo especial (RME) que son aquellos generados en los procesos productivos y no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o residuos sólidos urbanos (SEMARNAT, 2017). Algunos considerados en la mina son los desechos de la construcción, mantenimiento y demolición, generados durante la construcción de las obras e instalaciones mineras. De igual forma, se encuentran los residuos peligrosos biológico-infecciosos (RPBI), generados durante los servicios de atención médica que contengan agentes biológico-infecciosos; en el proyecto son originados en las clínicas *médicas* que se encuentran dentro de la unidad.

Finalmente, se encuentran los residuos peligrosos que se distinguen por tener alguna característica corrosiva, reactiva, explosiva, tóxica, inflamable o biológico-infecciosa (CRETIB) para el equilibrio ecológico o el ambiente (SEMARNAT, 2008) y que serán caracterizados y manejados conforme lo estipula la NOM-052-SEMARNAT-2005. Algunos de los residuos peligrosos generados en un proyecto minero son los desechos de las pruebas realizadas en los laboratorios metalúrgicos tales como, copelar, escorias de soluciones químicas, derrames de sustancias químicas, aceites residuales, las estopas impregnadas con grasas, las baterías de vehículos, los balastos de sistemas de iluminación, entre otros.

Cabe resaltar que para cada tipo de residuo existen normas aplicables que deben ser consideradas en las medidas de cierre que sean implementadas.

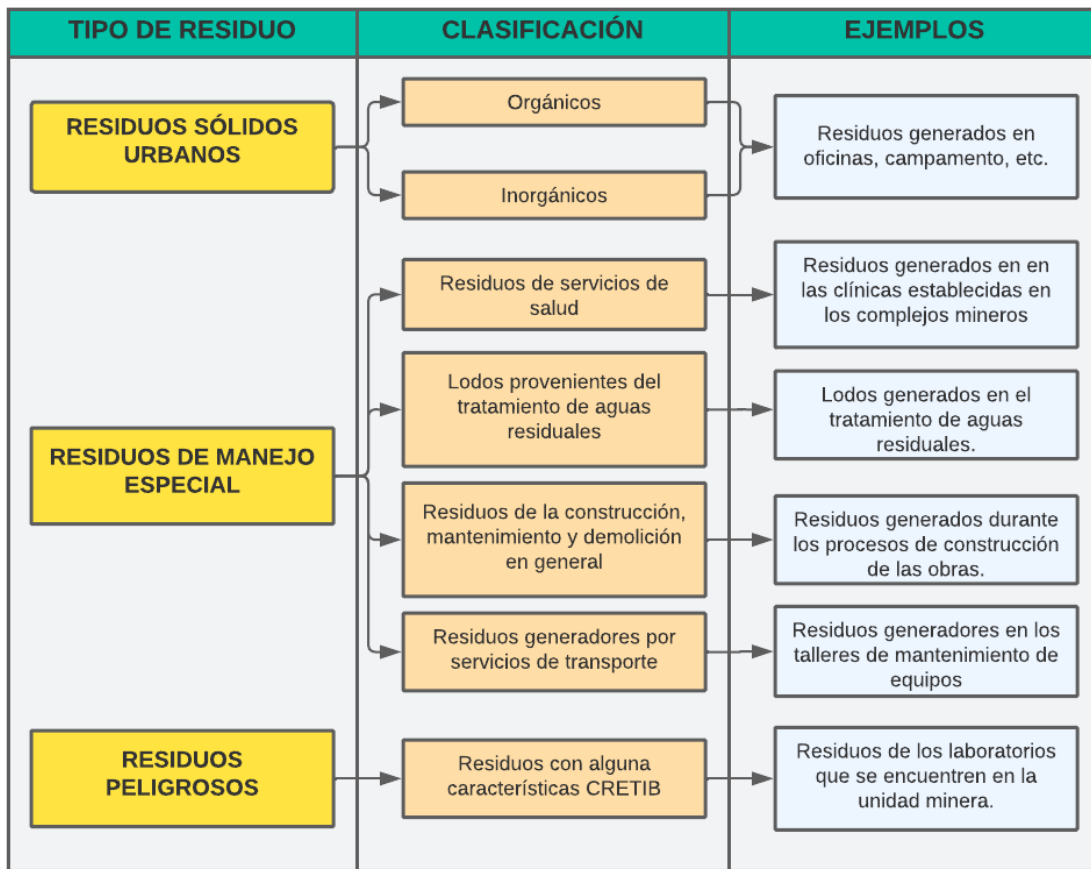


Figura 22. Clasificación de los residuos.

Con base en los principios de la política de la LGPGIR, que establece:

- Generar instrumentos de prevención y gestión integral residuos;
- Establecer planes de manejo de acuerdo con las peculiaridades del residuo;
- Garantizar un medio ambiente saludable para la sociedad;
- Fomentar y apoyar la participación social;

Se sentará el fundamento para plantear los objetivos de cierre del manejo de los residuos los cuales son:

- Asegurar la estabilidad física y química de los sitios de almacenamiento
- Establecer medidas de control para la disposición final de los residuos.
- Garantizar el uso futuro del sitio.

Cabe resaltar que dichos objetivos no son aplicables a todos los casos, ya que, no en todos los proyectos mineros se almacenan los residuos en las instalaciones, por lo cual, estos pueden cambiar con base en las condiciones existentes.

Cada uno de los objetivos será adaptado conforme a las condiciones del sitio y al tipo de residuo. En la figura 23 se presentan las directrices tomadas para el manejo integral de los residuos. La primera directriz aborda la caracterización del residuo, que tiene como objetivo identificar y conocer todas las características específicas. Después se encuentra la minimización de su generación, valorización aprovechamiento y prevención del residuo, directrices que plantean una serie de estrategias para el manejo de los residuos. Para cada caso se recomienda establecer metas por cumplir con indicadores que permitan medir el rendimiento de las medidas planeadas.



Figura 23. Directrices para el manejo integral de los residuos.

Igualmente, es necesario definir la disposición final que tendrán los residuos, es decir, si serán enviados a una empresa certificada para su manejo.

Todas estas directrices presentadas serán consideradas durante el cierre progresivo del proyecto. En el Capítulo V, se discute y analiza la manera de implementar las actividades progresivas durante la operación del proyecto.

IV.4 Gestión hídrica

El agua es un recurso sumamente importante en la industria minera, siendo su disponibilidad una de las principales variables para la operación y el procesamiento de los minerales (Punkkinen, *et al.*, 2016). El agua asociada al proyecto puede clasificarse según su calidad y potencial de contaminación, además de alterar la zona de captación en el sistema de circulación del agua cambiando las condiciones hidrológicas y topográficas del sitio (Turunen & Hentinen, 2022).

De modo que, tener suficiente conocimiento de las condiciones actuales de funcionamiento, condiciones hidrológicas y panorama social y político permite identificar la magnitud de los riesgos hídricos, la demanda de agua y los cambios en las condiciones de captación a lo largo del ciclo de la vida de la mina (ICMM, 2015). Por otra parte, para entender cómo surgen los problemas en la gestión del agua, es importante analizar los procesos que requieren el recurso durante todas las etapas del proyecto. En la figura 24 se presenta un diagrama típico de la circulación de agua en las actividades mineras durante la etapa de operación, etapa que requiere una mayor demanda de agua.

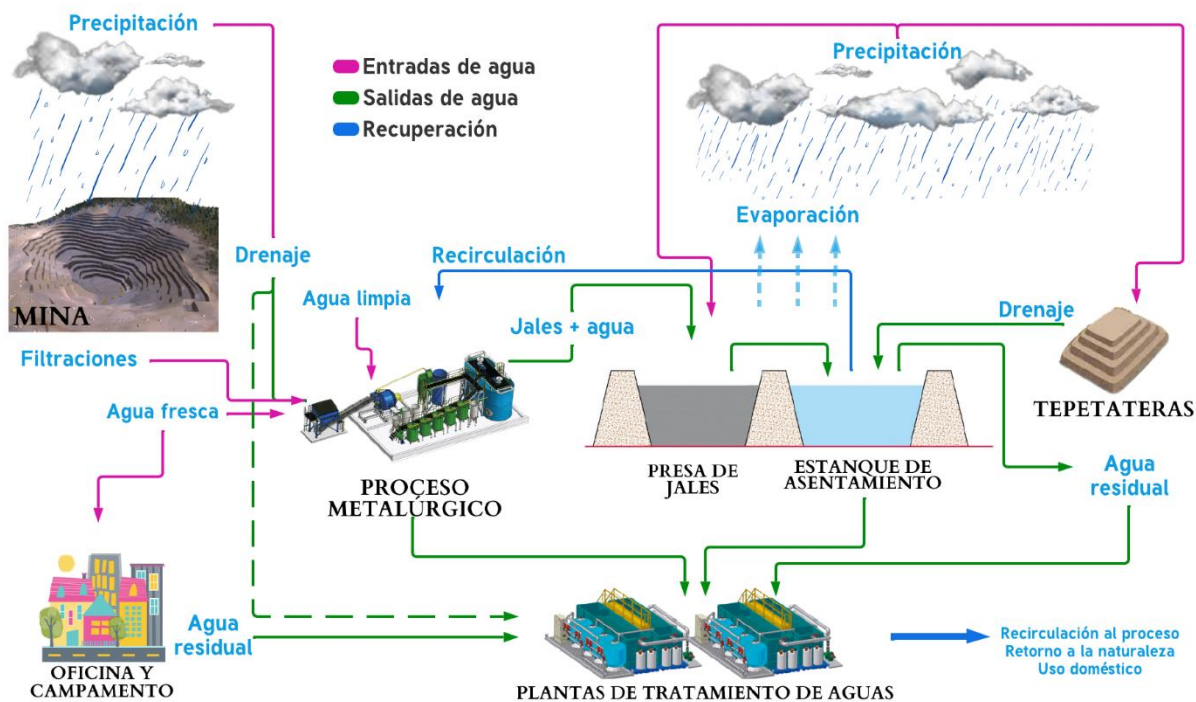


Figura 24. Ejemplo tradicional del uso de agua en la minería (Adaptado de Kauppi *et al.* 2011)

En la figura 24, se observa que existen entradas de agua por procesos naturales propios del sitio y por el abastecimiento con agua fresca. De igual forma, se presentan las salidas de agua, para este caso es importante determinar la disposición final que tendrá el líquido al concluir su curso en las actividades, ya que, de acuerdo con la calidad que posea se

podrá reutilizar en los procesos, almacenarse o pasar por un tratamiento y dirigir el flujo al cauce natural del lugar. Por ende, se define la presencia de dos tipos de agua: el agua que se involucra en los procesos y actividades que se realizan a diario y el agua que se encuentra en el entorno del proyecto, por ejemplo, los cuerpos hídricos subterráneos, agua pluvial y escorrentías superficiales.

Si se hace un balance de agua considerando la que se requiere suministrar en los diferentes procesos, el volumen de agua natural del entorno y la descarga de agua del proceso, se puede reducir el consumo de agua y preservar su calidad para la etapa de cierre.

En materia de cierre de minas, las empresas enfrentan nuevos retos para continuar con la gestión del agua ya que, los objetivos de cierre planteados deben adaptarse a las condiciones posteriores a la operación para garantizar su efectividad a largo plazo. De acuerdo, a los tipos de agua mencionados anteriormente, se definen las siguientes premisas que son consideradas para proyectar dichos objetivos:

Premisas para el agua utilizada durante la operación minera:

- ✓ Implementar un plan de manejo de agua en todas las etapas del proyecto.
- ✓ Realizar el balance hídrico de cada proceso en las operaciones de mina y planta metalúrgica para determinar las posibles oportunidades de recuperación de agua.
- ✓ De acuerdo con las propiedades de las aguas residuales, éstas se mantendrán separadas para definir el tratamiento específico, o bien, evitar la necesidad de tratamiento de agua.
- ✓ Uso de tecnologías que permitan un menor consumo de agua, por ejemplo, molinos SAG, columnas de flotación, espesadores de alta densidad, filtros prensa, etc.

Premisas para el agua en el entorno del proyecto:

- ✓ Realizar todos los estudios necesarios para conocer las características hidrológicas, hidrogeológicas y geoquímicas del agua, así como los químicos, biológicos, ecológicos y cuantitativos. También, es importante determinar las condiciones climáticas en el sitio, como las precipitaciones mínimas y máximas.
- ✓ Determinar las direcciones de los flujos superficiales permanentes y temporales que se encuentran dentro de la concesión minera y contiguos al proyecto, para evitar la contaminación mediante la construcción de obras que permitan canalizar el agua de lluvia fuera de las áreas de operación y conducir las hacia los cauces naturales.

- ✓ Definir los flujos subterráneos y sus propiedades hidráulicas, para evitar las filtraciones en las operaciones mineras y la posible contaminación de los cuerpos de agua subterráneos.
- ✓ Realizar un plan para prevenir la generación de drenaje ácido de minas (DAM) y en caso de ser necesario, estrategias para su tratamiento.
- ✓ Tener un mayor control de las filtraciones en las áreas donde se localicen los depósitos de residuos mineros.
- ✓ Desviar los excesos de escorrentía en las zonas de trabajo.
- ✓ Generar estrategias para controlar la erosión en la mina y limitar la escorrentía de sedimentos.

Todas las estrategias que sean seleccionadas para el manejo de agua deben ser duraderas, resistentes a la erosión y de bajo mantenimiento. Las premisas serán evaluadas y ajustadas a las condiciones del proyecto y los tipos de agua que corresponda, un claro ejemplo es con los distintos climas que existan en los sitios debido a que, en zonas secas la gestión del agua en las minas se centrará en reutilizar y reciclar la mayor cantidad de agua. En cambio, en zonas húmedas será esencial contar con sitios para el almacenamiento de agua a una escala adecuada.

Partiendo de la figura 24, es posible realizar una subclasificación de los tipos de aguas, con el objetivo de tener más claridad y mejorar la efectividad de las actividades de cierre que serán consideradas. En la tabla 8, se presenta una descripción de la subclasificación propuesta.

Tabla 8. Clasificación de los tipos de agua en la actividad minera.

| CLASIFICACIÓN | | DESCRIPCIÓN | ETAPA DEL PROYECTO |
|--|--|--|------------------------------------|
| AGUA UTILIZADA DURANTE LA OPERACIÓN | Agua de servicios mineros | Agua utilizada en los procesos que se realizan en las operaciones minera, por ejemplo, el agua utilizada en la barrenación. | OPERACIÓN |
| | Agua fresca <i>(Proviene de un cuerpo de agua natural)</i> | Agua utilizada en los procesos minero-metalúrgicos y también es abastecida a los campamentos, oficinas y comedor. | EXPLORACIÓN OPERACIÓN CIERRE |
| | Agua en la molienda y trituración | Agua utilizada en los procesos de trituración y molienda. | OPERACIÓN |
| | Agua de la concentración | Agua utilizada en la extracción química de metales como en la extracción química (hidrometalurgia) o concentración fisico-química (flotación o concentración magnética). | OPERACIÓN |
| | Agua tratada | Agua que ha pasado por un tratamiento para ser utilizada en la recirculación de | OPERACIÓN CIERRE |

| | | | | |
|--|--|--------------------------------|--|------------------------------------|
| | | | los procesos, uso doméstico o regresar al flujo natural del sitio. | |
| | Agua residual de servicios | | Resultado del agua utilizada en las oficinas, comedores y campamento de la mina. | EXPLORACIÓN OPERACIÓN CIERRE |
| | Agua en depósitos de residuos mineros | Agua en presas de jales | Porcentaje de agua que se encuentra presente en los jales. Puede disminuir por la evaporación o ser enviada a los estanques de asentamiento y finalmente, recirculada al proceso (generalmente en la etapa de molienda). | OPERACIÓN CIERRE |
| | | Agua en terreros | Agua que ha sido filtrada a través del material estéril. | OPERACIÓN CIERRE |
| AGUA EN EL ENTORNO DEL PROYECTO | Agua pluvial | | El agua que precipita cae en las áreas operativas y escurre hacia los puntos de descarga de la cuenca hidrológica. | OPERACIÓN |
| | Agua de cuerpos subterráneos | | Agua de los cuerpos subterránea que se filtra al tajo o a la mina subterránea y que se debe bombear a la superficie para desaguar la mina. | OPERACIÓN CIERRE |
| | Agua de cuerpos superficiales | | Aguas superficiales que corren cerca o a través del proyecto minero. | OPERACIÓN |

En la tabla 8 se observa que el uso de agua predomina en la operación, por lo cual, los trabajos de gestión del recurso hídrico comienzan desde las etapas tempranas del proyecto, obteniendo información valiosa para ayudar a generar las alternativas más eficientes al cierre del proyecto. De modo, que será importante establecer medidas progresivas para el manejo del agua utilizada en la operación de mina.

En el caso de los cuerpos de agua naturales en el entorno del proyecto, la subclasificación se centra en los cuerpos subterráneos, cuerpos superficiales y aguas pluviales, por ende, las principales medidas de cierre se centrarán en ubicar y monitorear la calidad y cantidad de los recursos hídricos, así como, en medidas para evitar su contaminación desde las obras o las instalaciones del complejo minero.

En la tabla 9, se expone un ejemplo de la delimitación de los objetivos y actividades de cierre para el caso de la gestión y manejo de las aguas subterráneas y superficiales en una operación subterránea y a cielo abierto, partiendo de las premisas mencionadas anteriormente.

En el Capítulo V, se discute y analiza la manera de implementar las actividades progresivas durante la operación del proyecto.

Tabla 9. Planteamiento de objetivos y actividades de cierre generales para la gestión de agua y manejo de agua en una operación subterránea y a cielo abierto.

| CLASIFICACIÓN | | OBJETIVOS DE CIERRE | ACTIVIDADES |
|---------------------------------|---|--|---|
| AGUA EN EL ENTORNO DEL PROYECTO | <p>Agua de cuerpos subterráneos</p> <p>y</p> <p>Aguas de cuerpo superficiales</p> | Asegurar la estabilidad química del agua | <ol style="list-style-type: none"> 1. Realizar un estudio de las propiedades hídricas del agua con el objetivo de contar con una referencia de las condiciones iniciales. 2. Para el caso de los sitios en los cuales el macizo rocoso tenga potencial a la generación de drenaje ácido, se deberán realizar planes para la prevención de su desarrollo, minimización y tratamiento. |
| | | Asegurar el manejo del agua | <ol style="list-style-type: none"> 1. Generar obras para el manejo de agua como canales de desvío y estanques de almacenamiento. 2. La desviación de las aguas superficiales es una alternativa que va a permitir controlar los volúmenes y minimizar el contacto del agua limpia con las operaciones minera, para ello se pueden aplicar técnica como barreras físicas, presas, acequias de desviación y pozos. 3. En el caso de las aguas subterráneas, el sistema de desviación consiste, en barreras de cemento, grandes muros de hormigón subterráneos y bombeo desde pozos. Estos sistemas se utilizan para proteger los cursos de agua naturales cercanos. 4. Para minas a cielo abierto de gran magnitud no es recomendable ni práctica hacer un desvío de agua, se recomienda que funcione como un acuífero tras el cierre de las operaciones. 5. Todas las obras que se realicen para el manejo de agua serán consideradas también para el manejo de aguas contaminadas de acuerdo con el tratamiento que se aplique. 6. Las estructuras deben diseñarse resistentes a la erosión física y química para garantizar una larga vida útil y bajos costos de mantenimiento. |

IV.5 Drenaje ácido de minas (DAM)

La actividad minera inevitablemente expone al macizo rocoso del sitio en el cual se lleva a cabo el proyecto. Áreas operativas como los rebajes agotados en las explotaciones subterráneas, el tajo en las explotaciones a cielo abierto o instalaciones como los depósitos de residuos mineros están propensos a la intemperie donde se combinan fácilmente con el oxígeno y los cuerpos de agua circundantes (Jamieson *et al.*, 2015; Jonnsson *et al.*, 2005, como se citó en Ighalo *et al.* 2021). A partir de estos procesos se origina **drenaje ácido de minas (DAM)** (Suthersan *et al.* 2017) también conocido como **drenaje ácido de roca (DAR)** (Ighalo *et al.* 2021). Estas aguas se generan en minas activas y, en particular minas abandonadas y depósitos de residuos donde hay presencia de rocas que contienen sulfuros de hierro y tienen la característica de ser aguas ácidas por las altas concentraciones de iones hidrógeno (H⁺).

El DAM surge en minas metálicas y de carbón, debido a que, muchos metales se encuentran asociados principalmente con minerales sulfurados (siendo la pirita (FeS_2) el mineral de sulfuro más abundante en el planeta) (Johnson & Hallberg, 2005). Dichos minerales al estar en presencia tanto del oxígeno como del agua se someten a una oxidación acelerada (Spitz & Trudinger, 2009) lo que lleva a una lixiviación de metales y sulfatos. Los iones metálicos, los iones de sulfato y los ácidos sulfúricos son los principales productos de este proceso de oxidación (Ighalo *et al.* 2021).

ARD puede ocurrir en muchas partes de una operación, tales como:

- Drenajes o filtración de excavaciones subterráneas
- Escorrentía de minas a cielo abierto por la exposición de las paredes del tajo
- Filtraciones de aguas subterráneas contaminadas en minas superficiales o subterráneas
- Filtraciones y drenaje en depósitos de residuos mineros
- Percolación y drenaje de macizos rocosos fragmentados
- Escorrentía y drenaje de pilas de mineral en espera de procesamiento
- Infiltración o desbordamiento de las instalaciones de almacenamiento de jales
- Escorrentías de derrames o remanentes de concentrados minerales alrededor de acopios, tolvas, bandas transportadoras, etc.

En la figura 25 se presenta un esquema de una explotación minera que muestra el proceso de formación de DAM y en consecuencia los contaminantes se transportan a pozos de extracción, aguas subterráneas no contaminadas y cuerpos superficiales donde se realiza la descarga de agua.

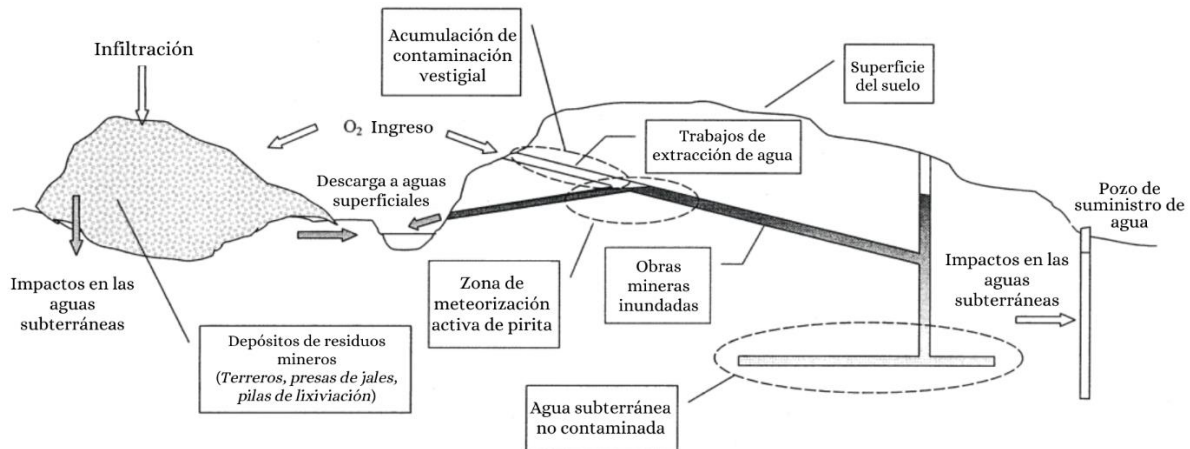


Figura 25. Diagrama que ejemplifica la generación de drenaje ácido en una operación minera (Younger *et al.*, 2002).

Este drenaje ácido cargado de metales puede afectar negativamente la salud acuática y humana cuando ingresa a los sistemas de aguas superficiales y subterráneas (Suthersan *et al.* 2017), por ende, es indispensable diseñar medidas que permitan prevenir, minimizar y tratar su formación. Debido a la diversidad de yacimientos minerales y características del sitio los objetivos de cierre para el control y manejo del DAM serán específicos para cada caso, a continuación, se presentan algunos objetivos aplicados:

- Recuperar la calidad del agua a un nivel que no presente ningún riesgo para el medio ambiente o la salud humana.
- Funcionamiento a largo plazo de las tecnologías implementadas para la prevención, o en su caso, el tratamiento de aguas ácidas.
- Estabilización de los productos/residuos de tratamiento.
- Integración con otras medidas de gestión del agua (incluida la gestión en áreas de residuos mineros).
- Capacidad suficiente a adaptación de las fluctuaciones estacionales.
- Cumplimiento de los requisitos reglamentarios (legislación, permisos ambientales y otros).

Para lograr el cumplimiento de los objetivos establecidos será importante generar un plan que garantice la gestión del DAM durante la operación y al cierre de esta. En la figura 26 se presenta una metodología que establece la integración del manejo de drenaje ácido en un proyecto minero, a continuación, se describen el proceso.

Se comienza analizando las características del proyecto, determinando sí por la composición del yacimiento y la roca encajonante existe la posibilidad de desarrollarse el DAM. Conocer las condiciones geológicas y mineralógicas del yacimiento y la roca huésped son los principales parámetros que se estudiarán. La principal característica considerada es la presencia de minerales de sulfuro y sus propiedades como el tamaño,

la forma y la textura de los granos de sulfuro, la humedad y la permeabilidad de las sustancias que los rodean (Spitz & Trudinger, 2009). De igual forma, resulta fundamental conocer el entorno examinando el clima del sitio y las características hidrológicas/hidrogeológicas (The International Network for Acid Prevention [INAP], 2012).

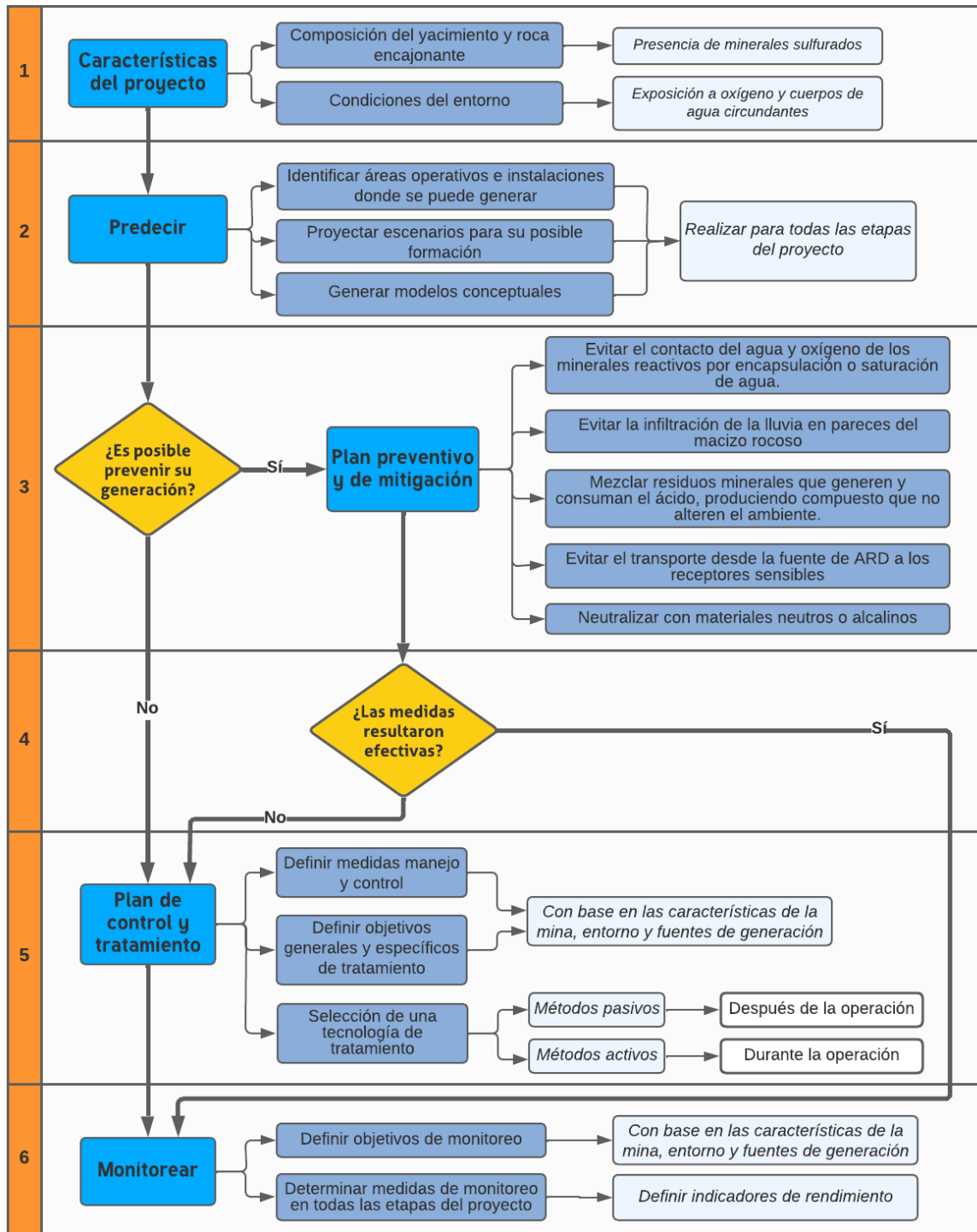


Figura 26. Metodología para el manejo de drenaje ácido en un proyecto minero.

Posteriormente, con la información obtenida se hace una predicción de la posible formación del DAM partiendo de identificar las áreas operativas e instalaciones que por su estado están expuestas a la oxidación activa de los sulfuros. Para ello, es recomendable hacer un modelo conceptual, así como, realizar diversas pruebas de tipo estáticas o dinámicas (durante periodos de seis a ocho meses para proyectar la cantidad y calidad del drenaje potencialmente generado por las diferentes fuentes, identificando las trayectorias superficiales y subterráneas que transportar el agua, los receptores que pueden ser afectados e impactos que sufrirán los elementos del ambiente y seres humanos del entorno. Para cada caso es fundamental proyectar los posibles escenarios de generación durante todas las etapas del proyecto, con el objetivo de optimizar las medidas diseñadas para su manejo.

Con la información obtenida se delimita si es posible prevenir o no su formación. Para el primer caso se realizará un plan preventivo y de mitigación, que tiene como principal objetivo aplicar un proceso y diseñar medidas que reduzcan al mínimo posible la meteorización del sitio. En la figura 26 se presentan algunos ejemplos de medidas aplicadas. Se puede requerir más de una o una combinación de ellas para lograr el objetivo deseado.

Para el caso de las zonas donde no se puede prevenir la formación de drenaje ácido, se requiere generar un programa de tratamiento (Heikkinen *et al.*, 2008). Dadas las dificultades prácticas que implica inhibir la formación de DAM en la fuente, a menudo, la única alternativa es minimizar el impacto del agua contaminada con los receptores ambientales y sociales (Johnson & Hallberg, 2005), por ende, el plan de tratamiento integrará medidas para el manejo y control de dichos impactos, así como, la especificación de los objetivos y selección de la tecnología de tratamiento que se aplicará: el tratamiento activo, adecuado aplicar durante la operación y el tratamiento pasivo, apropiado para ejecutar en las minas cuando llegan a la etapa de cierre. Cada plan será desarrollado con base en las características de la mina, su entorno y fuentes de generación, señalando las etapas en las cuales se llevará a cabo.

En la planificación del cierre, también se presta atención a los patrones de drenaje y la hidrología del sitio de rehabilitación, de modo que las aguas contaminadas puedan contenerse y dirigirse a las áreas de tratamiento, y definiendo las zonas para la descarga del agua tratada (Heikkinen *et al.*, 2008).

Finalmente, se incluirán medidas de monitoreo que evalúen los planes preventivos y de tratamiento elegidos. El monitoreo se lleva a cabo en todas las etapas del desarrollo del proyecto, desde la operación hasta el postcierre, sin embargo, las medidas cambiarán conforme a los resultados obtenidos y características del proyecto (INAP, 2012).

IV.6 Rehabilitación

La rehabilitación de los sitios mineros también llamada recuperación, saneamiento o restauración se define como el proceso de retornar la tierra a condiciones productivas estables y autosustentables (ICMM, 2019), así como el establecimiento de ecosistemas sostenibles o vegetación alternativa de acuerdo con el uso de la tierra deseado después de la operación. Al rehabilitar se busca restablecer la funcionalidad de los ecosistemas y la productividad de la tierra, aunque probablemente adoptará un uso diferente del terreno y de la composición de especies del ecosistema original (Australian Government, 2016).

Las actividades de rehabilitación serán diseñadas a nivel conceptual, sin embargo, conforme se avanza en el proyecto y se realiza la incorporación de nuevas características de este, es posible comenzar a implementar planes parciales que tendrán consideraciones particulares acorde a las particularidades técnicas de las áreas operativas, instalaciones, uso futuro y participación de los grupos de interés. Por ende, es de suma importante establecer desde el comienzo alternativas que permitan guiar a lo largo del proceso de cierre progresivo la investigación del sitio definiendo metas y objetivos, lineamientos legales aplicables, consulta comunitaria y actualizaciones.

De manera general, la United Nations Environment Programme [UNEP], (1998) y Australian Government, (2016) mencionan los siguientes objetivos considerados para la generación un plan de rehabilitación:

1. Garantizar que el sitio sea seguro para las comunidades.
2. Minimizar el impacto visual a largo plazo mediante la creación de formas terreno que sean compatibles con el paisaje adyacente.
3. Garantizar la estabilidad y sostenibilidad a largo plazo de la orografía, los terrenos y la hidrología del sitio.
4. Prevenir la contaminación del medioambiente adyacente.
5. Garantizar que la erosión por el viento y el agua se minimice durante y después de las operaciones y la rehabilitación.
6. Garantizar que las áreas rehabilitadas sean autosuficientes o se encuentren en condiciones satisfactorias y aceptables.
7. Restaurar total o parcial la capacidad del ecosistema para proveer hábitats adecuados para los elementos ambientales y comunidades.

Con el fin de cumplir con los objetivos descritos, en la Figura 27 se plantean los pasos a seguir para la generación de un plan de rehabilitación. El paso 1 consiste en establecer las metas y objetivos para las obras que se busca rehabilitar. Dichos objetivos permiten tener un fundamento para comenzar a desarrollar las siguientes etapas, así como consultar a las partes interesadas con la finalidad determinar el uso futuro del sitio, por

ejemplo, puede existir la opción de regresar el sitio a las condiciones antes del inicio del proyecto, mejorar esas condiciones o definir un nuevo uso para el terreno como usos recreativos o económicos para las comunidades. Todas las metas trazadas son diferentes para cada proyecto conforme a la zona que se someterá a rehabilitar.

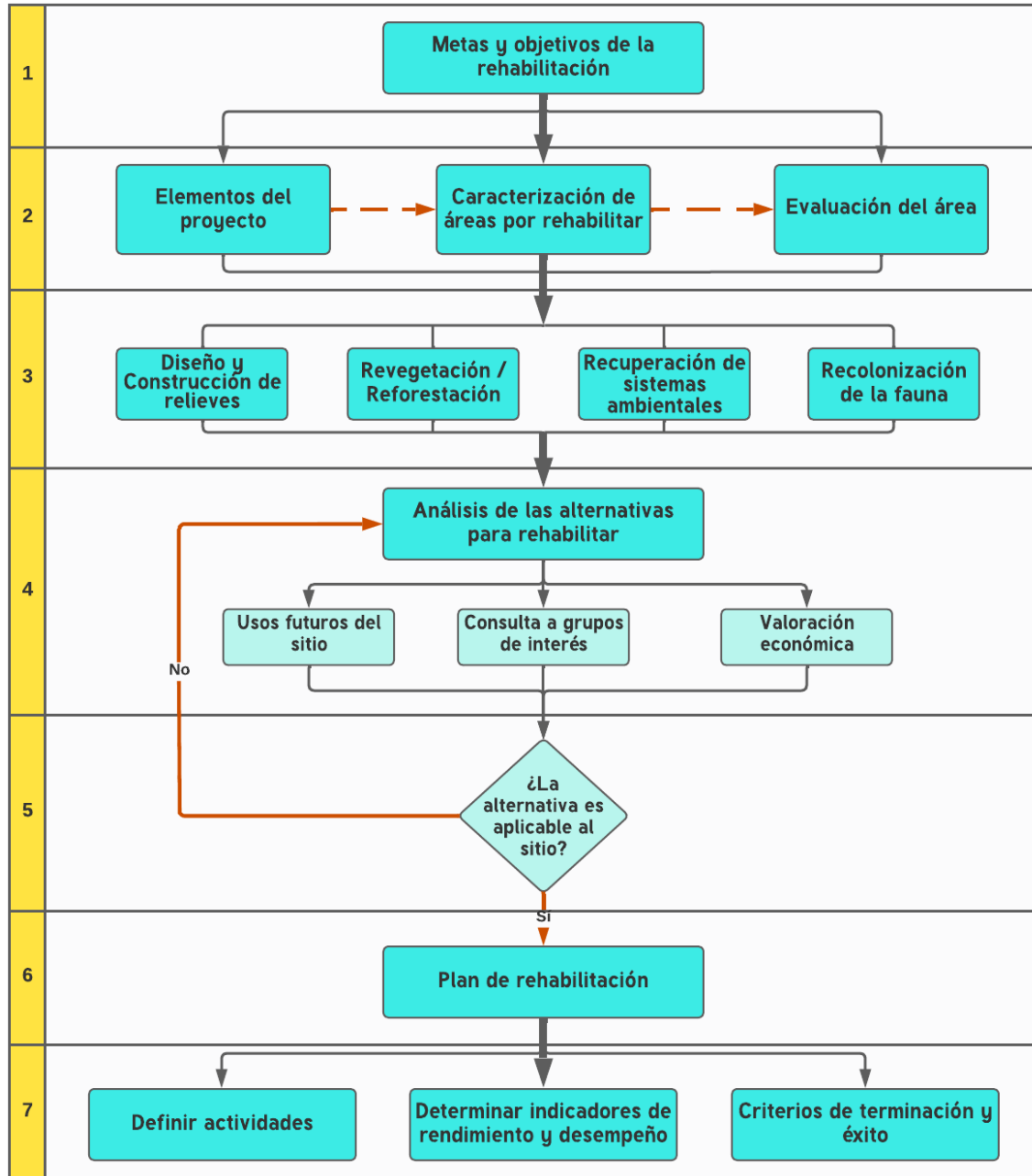


Figura 27. Estructura para la generación de plan de rehabilitación.

Posteriormente, se definen los elementos del proyecto incluidos en el plan, caracterizando las áreas de cada elemento, los datos recolectados permitirán tener una base para orientar las alternativas de rehabilitación y determinar hasta qué punto la rehabilitación puede abordar y mitigar los impactos de la operación (Australian

Government, 2016). Algunos de los datos ambientales más importantes que se consideran en el análisis son: condiciones climáticas, calidad de los suelos, cuerpos de agua que interactúan con los ecosistemas, vegetación, ecosistemas propios del lugar y poblaciones de fauna.

Con toda la información obtenida, la EIA y el Análisis de Riesgos elaborados en el proyecto es posible determinar el nivel de degradación existente y el tipo de alteraciones que han existido (*Proyectos del Caso 1*) o pueden existir (*Proyectos del Caso 2*).

Después, se continúa con el proceso de proyectar las alternativas que resultan viables para comenzar el proceso de rehabilitación, el cual se compone de las etapas presentadas en la figura 28: diseño y construcción de relieves, revegetación y reforestación, recuperación de sistemas ambientales y recolonización de la fauna. Cada una de las proyecciones estimadas en cada paso se definirá de con base en los objetivos de cierre establecidos.



Figura 28. Etapas de rehabilitación.

A continuación, se describen cada una de las etapas:

IV.6.1 Diseño y construcción de relieves

El diseño y construcción de relieves consiste en establecer la geomorfología meta que se buscará llegar al término de las actividades de cierre, garantizando la seguridad del sitio y rehabilitando su integridad original en términos de hidrología y patrones vegetativos. Para ello, es indispensable analizar las estructuras geológicas del terreno superficial en la región que lo conforman. En la figura 29 se presenta la estructura que conforma los pasos para realizar el diseño y construcción del relieve.

Se comienza delimitando la forma del relieve y los factores que contribuyen a definirlo como son los elementos climáticos, hidrográficos, geológicos, el tipo de suelo y las propiedades químicas, mineralógicas y físicas de los materiales que lo componen, para este caso se clasifican las zonas de estudio en dos tipos: las áreas donde se encuentren depósitos de residuos mineros, en ellas se definirán los materiales de alto riesgo que requieran manejo especial, tales como metales que tengan potencial a generar drenaje ácido; y las áreas donde se encuentran instalaciones, áreas operativas y caminos, en estos sitios principalmente se analizan los recursos que se encuentran disponibles en los suelos y la relación que existen con el ecosistema.

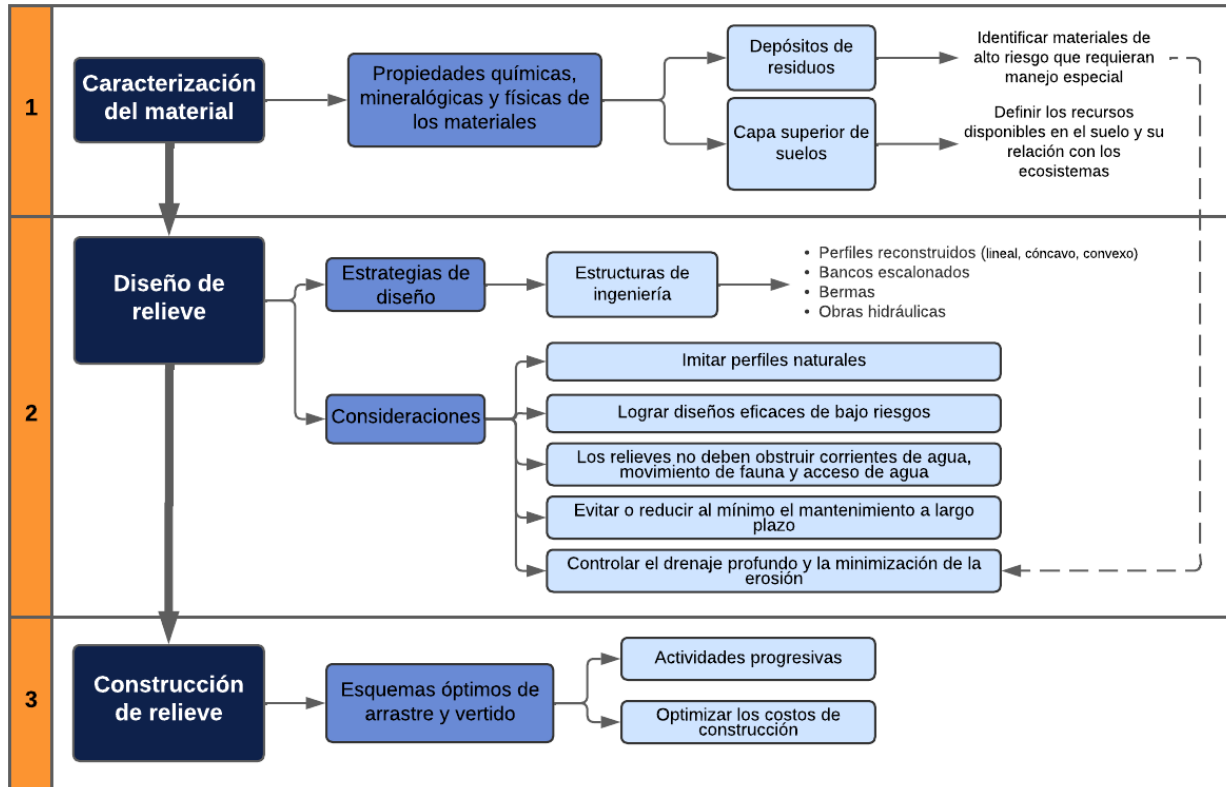


Figura 29. Diseño y construcción de relieves.

Después, se realiza el diseño del relieve esperado proyectando todas las estrategias posibles de acuerdo con las características del sitio. Algunas estructuras ingenieriles son la reconstrucción de los perfiles, bancos escalonados, bermas, construcción de embalse de sedimentación y obras hidráulicas. En la figura 29 se describen algunas consideraciones tomadas en cuenta para definir el diseño del relieve.

Finalmente, la construcción de los relieves varía considerablemente a menudo por los métodos utilizados para el arrastre y vertido, es indispensable analizar esquemas óptimos que aseguren bajos costos (Australian Government, 2016).

IV.6.2 Revegetación / Reforestación

Una vez que el relieve ha sido construido, el siguiente paso es plantar y sembrar vegetación, árboles, arbustos y coberturas de suelo autóctonas de los ecosistemas. Uno de los propósitos principales es proteger la superficie del suelo contra la erosión de la lluvia y escorrentía, restablecer las estructuras de las raíces y minimizar el impacto visual negativo (Schor & Gray, 2007). Para el comienzo de la rehabilitación es importante conocer aspectos funcionales como la vegetación, morfología, clima, condiciones del subsuelo, drenaje, cantidad y calidad del suelo (Gobierno de La Rioja, 2022).

El tipo de rehabilitación vegetal que sea planteado será establecido para lograr un sistema sostenible, de manera que los procesos sucesivos den como resultado un complejo a largo plazo y que cumpla los objetivos iniciales de rehabilitación (Australian Government, 2016). Por ende, la selección de especies y determinación del establecimiento de la fauna resulta una tarea importante que conlleva analizar todas las estrategias condiciones del sitio, como el agua disponible y calidad de los suelos.

IV.6.3 Recuperación de sistemas ambientales

La rehabilitación del ecosistema involucra una serie de procesos los cuales se componen por el restablecimiento de las cadenas tróficas, la interacción entre seres vivos y de éstos con el medio físico, la diversidad biológica y número de especies, el dinamismo del ecosistema y la recuperación del equilibrio. Para ellos, se abarca un proceso integral que analiza la mejora física, química y biológica. En la figura 30 se describen algunos puntos que son considerados para cada caso.

| MEJORA FÍSICA | MEJORA QUÍMICA | MEJORA BIOLÓGICA |
|--|---|--|
| <ul style="list-style-type: none">• Generar estrategias para reducir la erosión• Evitar la infiltración de agua a menos que la alternativa de revegetación obligue a mantener un flujo constante• Tener cuidado de mezclar cubiertas de suelo sin estudios previos, en especial en los depósitos de residuos mineros | <p>Las principales propiedades químicas en las cuales se debe poner atención a las capas superiores de suelo son:</p> <ul style="list-style-type: none">• pH• Salinidad• Conductividad eléctrica• Capacidad de intercambio catiónico• Macro y micronutrientes | <p>La forma más importante de mejora biológica en las zonas mineras rehabilitadas es el asentamiento de vegetación y resulta importante considerar:</p> <ul style="list-style-type: none">• Elegir una alternativa a bajo costo• Épocas del año• Aumentar disponibilidad de agua para plantas• Utilizar especies autóctonas |

Figura 30. Consideraciones de las mejoras físicas, químicas y biológicas.

Para el caso del medio físico, los principales puntos que se toman en cuenta es el control de la erosión, el control de infiltración de agua en las zonas rehabilitadas y el cuidado de la mezcla de cubierta de suelo. Los dos últimos argumentos son analizados especialmente en los depósitos de residuos mineros rehabilitados.

Para el caso de la mejora química, las principales propiedades que son estudiadas en las capas superiores de suelo se encuentran descritas en la figura 30. El objetivo es realizar las mejoras pertinentes para asegurar la revegetación de la zona (Australian Government, 2016), o bien, establecer para el manejo de los suelos de acuerdo con sus condiciones.

Finalmente, para la mejora biológica la estrategia más importante en las zonas rehabilitadas es el asentamiento, crecimiento y diversificación de la vegetación. Algunas alternativas para el asentamiento de especies de plantas son: la siembra de semillas,

trasplante de plantas individuales desde áreas naturales, transferencia de suelo inalterado con su respectiva vegetación intacta, etc. (Australian Government, 2016).

IV.6.4 Recolonización de la fauna

La recolonización de la fauna consiste en el proceso de regreso de la fauna a las zonas rehabilitadas, proporcionando un hábitat adecuado. Muchos factores influyen en la recolonización, sin embargo, las consideraciones más importantes engloban desarrollar los aspectos estructurales y florísticos correctos de la vegetación, similares a los que se encuentran en las áreas de referencia adyacentes no minadas (Brennan *et al.* 2005).

Una vez que se proyecten las posibles alternativas que se aplicarán para el sitio, será de suma importancia analizar cada directriz estudiando si los resultados finales cumplen con: 1) Presencia y desarrollo de fauna, 2) Aumento la diversidad, 3) Interacción entre especies, 4) Generación de cadenas tróficas, 5) Creación de un hábitat para las especies. Cada opción se someterá a dicha evaluación para garantizar que la elección maximizará el proceso de rehabilitación.

Si la alternativa resulta aplicable, se continuará con la elaboración del plan de rehabilitación, el cual describe la secuencia de ejecución de las actividades, el establecimiento de indicadores de rendimiento y desempeño y los criterios de terminación y éxito.

IV.7 Remediación de sitios contaminados

En las áreas mineras y sus alrededores, puede ser que las concentraciones de metales u otros minerales sean naturalmente más altas, o bien, que por las actividades que se realicen durante la operación se produzca un transporte de contaminantes hasta las aguas superficiales y subterráneas y suelos. Las partículas minerales, los complejos o los compuestos pueden liberarse de los materiales sólidos, como el mineral, la roca estéril, los depósitos de residuos mineros y las partículas volátiles durante la excavación y el transporte de material. Otros posibles contaminantes incluyen los aceites y combustibles, productos químicos utilizados en los procesos metalúrgicos, laboratorios y los recursos utilizados en la operación minera (Mroue *et al.* 2022).

Cada uno de los materiales descritos sufre el transporte y dispersión por medio del viento y agua, por ende, los elementos ambientales más vulnerables son los suelos, subsuelos, cuerpos de agua subterráneas y cuerpos de agua superficial. Por lo tanto, el conjunto de técnicas y procesos que son analizados y aplicados para la limpieza de las áreas contaminadas a niveles seguros se define como remediación (Vivoda y Fulcher, 2017). La remediación del sitio requiere una evaluación del alcance y la naturaleza de la contaminación y los impactos relacionados, la implementación de actividades de remediación (tanto para los suelos como para los recursos hídricos) y la verificación de que la remediación se ha llevado a cabo de acuerdo con los estándares aplicables (ICMM, 2018).

Los objetivos de la remediación de áreas mineras dependen de los resultados de la evaluación de riesgos, las condiciones locales y el uso futuro del área (Mroue *et al.* 2022). La necesidad de remediar debe ser proyectada desde la Evaluación de Impacto Ambiental y Evaluación de riesgos, o bien, debe integrarse en la fase de cierre de minas con base en las actualizaciones del proyecto (ICMM, 2019).

En la figura 31 se presenta una metodología de 5 etapas para la determinación de los sitios que requieren un plan de remediación. A continuación, son explicados cada uno de los puntos:

La **etapa 1 - Realizar estudios preliminares del sitio**, consiste en el proceso que se lleva a cabo para obtener información general del estado de las condiciones ambientales y los indicadores de desempeño del proyecto, junto con una revisión de las operaciones mineras, el proceso de planeación de la mina y la recopilación de toda la información más relevante, como mapas y resultados de estudios realizados anteriormente. En esta etapa se recomienda cubrir con 3 principales aspectos (figura 31), primero hacer una revisión histórica del sitio que abarque una revisión documental del sitio y un análisis de fotografías aéreas. Toda la información obtenida se someterá a una evaluación e

interpretación, con el objetivo de determinar las condiciones actuales de las zonas operativas e instalaciones.

La **etapa 2 - Evaluación de la zona**, se realiza para clasificar la información que consiste en definir los sitios que por sus condiciones se estima que hay indicios de una posible contaminación (*Proyectos del Caso 1*) y los sitios que por las características técnicas y ambientales requieren proyectar un plan de remediación que estará en constante actualización durante el progreso de la operación (*Proyectos del Caso 2*).

Los resultados de las investigaciones se comparan con los valores de referencia locales, los límites máximos permisibles y otras normas de calidad ambiental (Mroue *et al.* 2022). Para el caso que requiere continuar con el estudio de los contaminantes se continua en la Etapa 3 – Definir modelo de conceptual de afectación. En situaciones donde los análisis arrojen que la zona no tiene potencial a contaminación, se abordará la línea de acción que corresponda de acuerdo con el escenario.

La **etapa 3 – Definir modelo conceptual de afectación**, que consiste en entender la zona de contaminación mediante el desarrollo de un modelo de conceptual que consta de tres directrices, primero la identificación de la fuente de contaminación y el contaminante, para ello es indispensable utilizar la información obtenida en el estudio preliminar y definir las áreas, instalaciones y procesos posibles que causarán la alteración. También, serán definidos los contaminantes, con el fin de determinar las sustancias químicas asociadas a las actividades que se desarrollan o se desarrollaron en el sitio y que son susceptibles de causar efectos nocivos para la salud y alterar los elementos del sistema ambiental (Ministerio del Ambiente, 2021). Algunos de estos contaminantes pueden ser las sustancias orgánicas (por ejemplo, lubricantes y combustibles utilizados en los talleres de mantenimiento de equipos) y las sustancias inorgánicas (por ejemplo, los metales pesados presentes en las presas de jales o propios de las características geoquímicas del sitio).

Posteriormente, para cada fuente de contaminación identificar las potenciales rutas y vías de exposición, las cuales determinarán los mecanismos de liberación, transporte y migración de los contaminantes (Ministerio del Ambiente, 2021) a través de los patrones de dispersión de los flujos de agua superficiales y subterráneos y los patrones eólicos. En este paso es posible realizar la modelación de datos estadísticos obtenidos en la investigación, que permitan definir los flujos existentes.

Finalmente, determinar los receptores humanos y del sistema ambiental que se encuentran potencialmente expuestos a la contaminación del sitio. Los receptores incluyen los humanos y los elementos del ambiente que están en contacto directo con la fuente de contaminación, potencialmente presentes a lo largo de las rutas de migración, o se encuentran en proximidad al sitio contaminado.

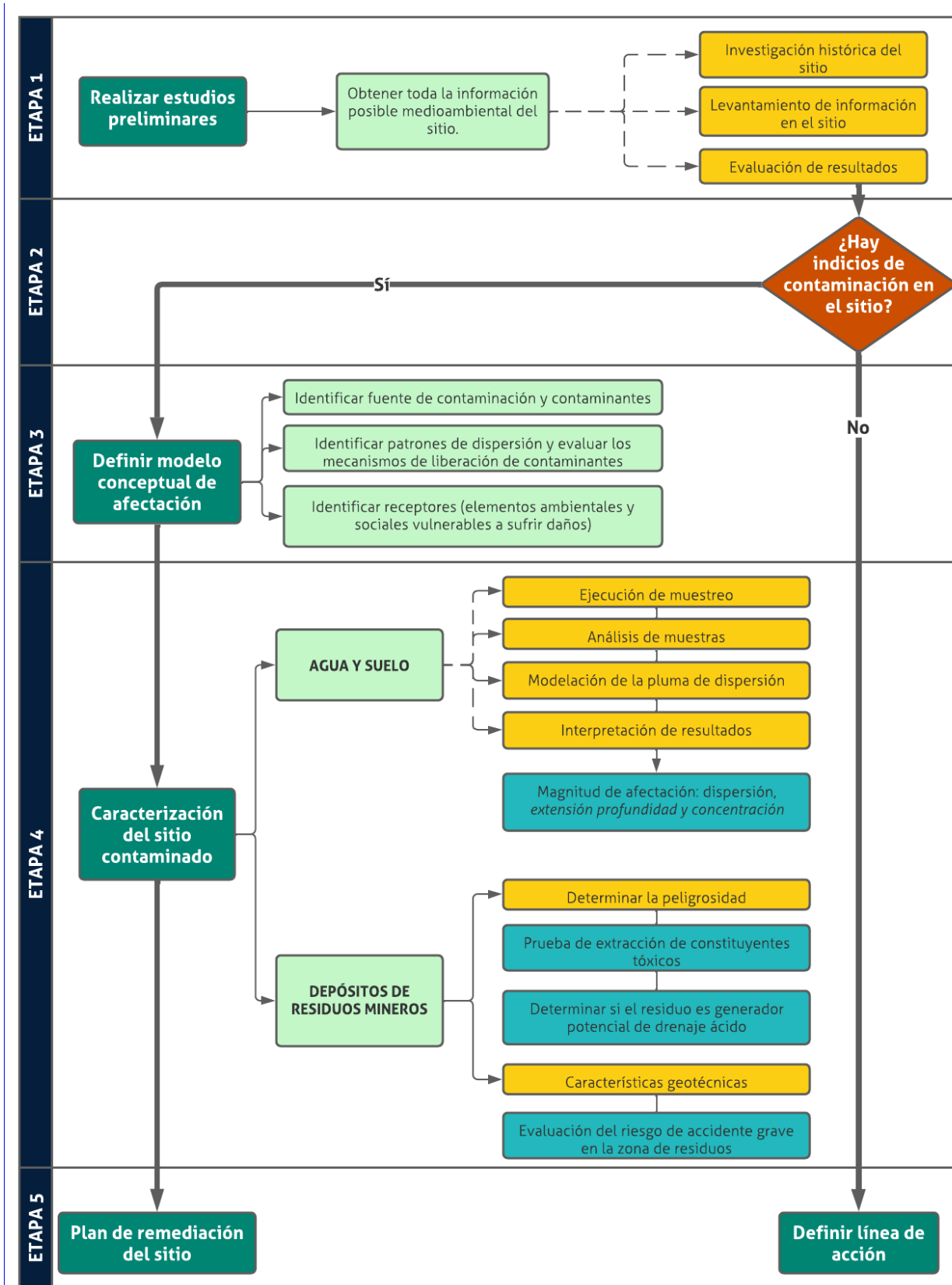


Figura 31. Etapas para la determinación del plan de remediación.

En la figura 32, se presenta un diagrama de los componentes que integran el modelo conceptual, incluyendo un ejemplo para el caso de una presa de jales, exponiendo la posible presencia de metales pesados que al estar en influencia por los patrones de dispersión hídricos y eólicos causan afectaciones de las comunidades cercanas al proyecto, los suelos, los cuerpos de agua subterráneos y superficiales y alteran a la flora y fauna presente en el sitio.

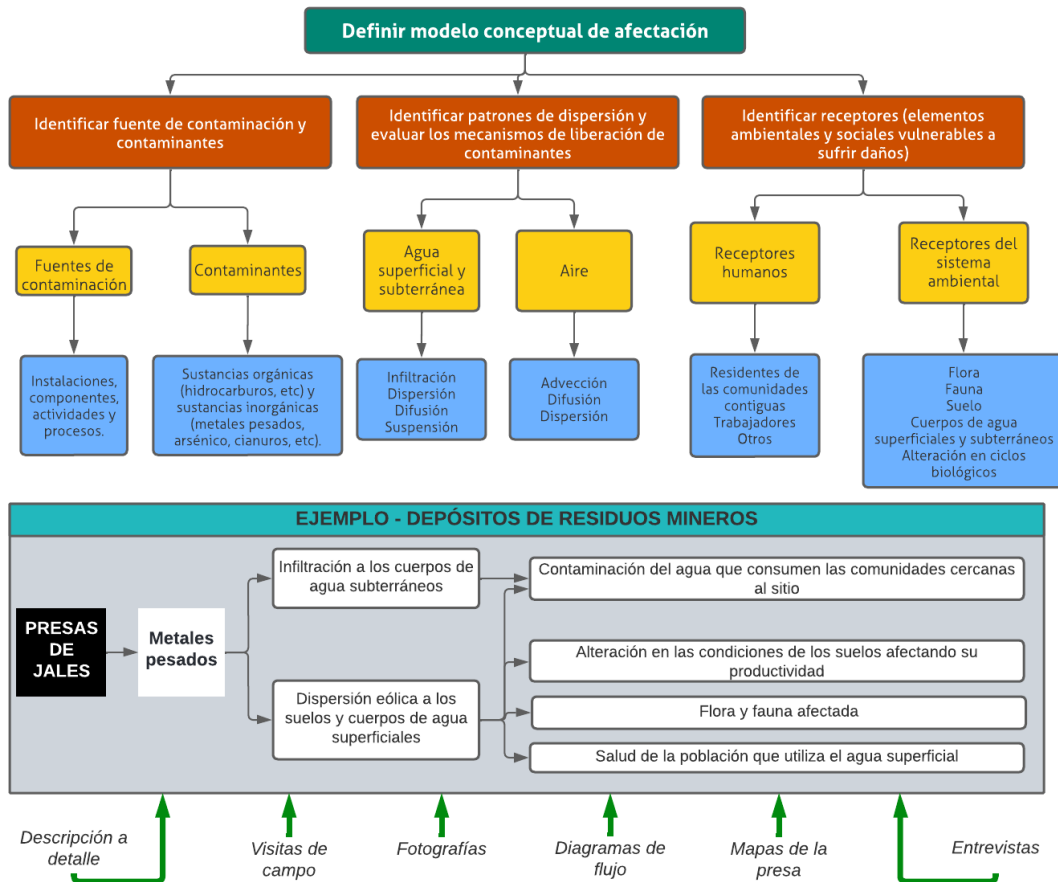


Figura 32. Elementos que se integran a un modelo conceptual de afectación.

Todo el modelo conceptual se debe apoyar con recursos técnicos como la descripción a detalle de todos los procesos que desencadenan la contaminación, visitas de campo, fotográficas, diagramas de flujo, entrevistas y mapas.

Después de realizar el modelo conceptual y tener un aproximado del sitio que requiere un plan de remediación, se continúa realizando la caracterización en la **etapa 4 – Caracterización del sitio contaminado**, proceso que define con una mayor precisión la información obtenida del modelo conceptual. Será necesario desarrollar un plan de muestreo considerando la normatividad aplicable tanto para suelos como para agua. En la tabla 10 se presente una descripción de los instrumentos que son utilizados para definir el plan de muestreo y los límites permisibles de concentración del contaminante.

Tabla 10. Instrumentos aplicables para realizar el plan de muestreo.

| CONTAMINANTE | INSTRUMENTO |
|--------------------------------------|---|
| SUELOS | |
| Metales y metaloides | NMX-AA-132-SCFI-2016 - Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 - Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. |
| Hidrocarburos | NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 - Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación. |
| AGUA | |
| Calidad | NOM-127-SSA1-2017 - Establece los límites permisibles de la calidad del agua para uso y consumo humano. |
| DEPÓSITOS DE RESIDUOS MINEROS | |
| Caracterización de Jales | NOM-141-SEMARNAT-2003 - Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales. |
| Residuos mineros | NOM-157-SEMARNAT-2009 - Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros. |

Una vez que se cuente con la información del análisis de las muestras, se realizará una interpretación de la información para determinar las zonas contaminadas mediante el modelo de las plumas de dispersión y diseñar el plan de remediación el cual integrará los métodos aplicables para la remediación de los sitios.

Posteriormente, se continua con la **etapa 5 – Plan de remediación del sitio**, que consiste en la preparación de un plan apropiado para la remediación que incluye un resumen de la necesidad de limpiar el suelo o las aguas, los objetivos del proyecto y la naturaleza de las tecnologías y métodos de tratamiento propuestos (Heikkinen *et al.*, 2008). La selección del método de remediación depende de los objetivos remediación, la idoneidad tecnológica para el tratamiento de los contaminantes en el sitio, los aspectos de costo y sostenibilidad y el tiempo disponible para la remediación, etc (Mroue *et al.* 2022).

En la figura 33 se expone la clasificación de las metodologías aplicadas para la remediación de suelos y recursos hídricos agrupándose en función de los siguientes criterios: (1) Lugar de aplicación del tratamiento, (2) Objetivo de la remediación y (3) Tipo de tratamiento.

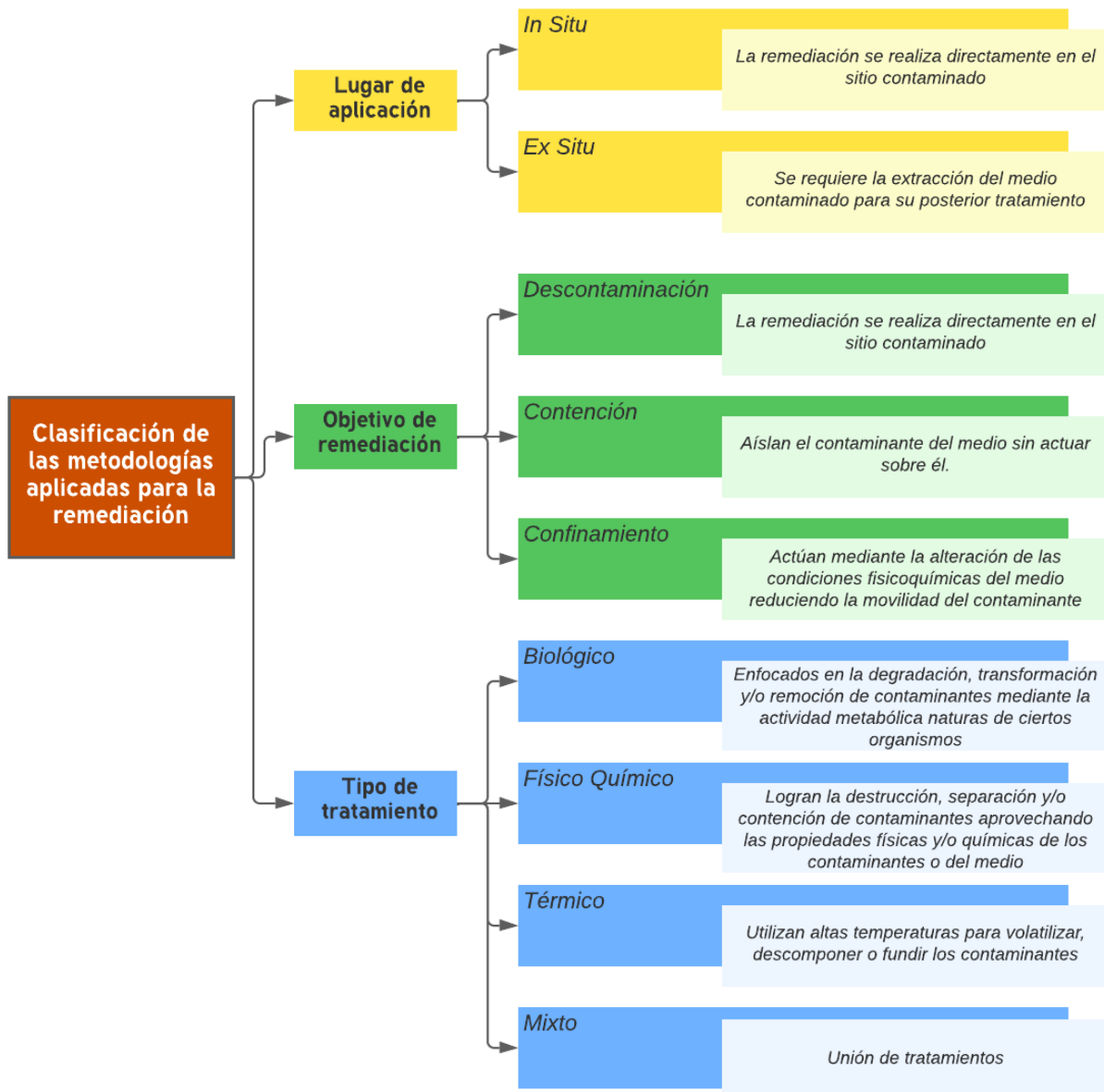


Figura 33. Clasificación de las metodologías aplicadas para la remediación de suelos y agua de acuerdo con 3 criterios (Adaptado de Fundación Chile, 2015).

IV.8 Infraestructura

Un proyecto minero contiene edificios e infraestructura directamente relacionados con la extracción y el procesamiento de minerales (Heikkinen, *et al.*, 2008), sin embargo, también se encuentran edificaciones auxiliares. En la tabla 11 se describen algunas obras civiles que deben ser consideradas en el plan de cierre. A diferencia de las áreas operativas, en las obras civiles generalmente no se pueden llevar a cabo actividades de cierre progresivas, ya que, las instalaciones e infraestructura son ocupadas por los trabajadores y contratistas que laboran en la mina, por lo tanto, el desmantelamiento se realiza hasta la etapa final. Solo en el caso de que las instalaciones se dejen de utilizar, entonces sí se podría pensar en un cierre progresivo para esas instalaciones.

Tabla 11. Obras civiles que se deben integrar en el cierre de minas

| COMPONENTE DEL ÁREA OPERATIVA | CIERRE PROGRESIVO / CIERRE FINAL |
|---|----------------------------------|
| Comedor | Cierre final |
| Talleres de mantenimiento y servicios | |
| Estación de agua | |
| Estación de gas | |
| Oficinas | |
| Polvorín | |
| Campamentos | |
| Estación eléctrica | |
| Laboratorios | |
| Bodegas para almacenamiento de materiales | |
| Cables eléctricos y transformadores | |
| Instalaciones sanitarias | |
| Caminos y carreteras | Cierre final/Cierre progresivo |

En la tabla 12 se presenta un ejemplo sobre el planteamiento de objetivos y actividades de cierre para los talleres de mantenimiento y servicio. Algunas de las medidas descritas

pueden aplicarse a más obras civiles considerando que cada instalación tendrá su particularidad de acuerdo con los resultados obtenidos en la EIA.

También hay ejemplos en los que los edificios y la infraestructura de la mina son de importancia cultural e histórica y se mantienen como museos mineros, por ejemplo, Mina de Acosta ubicada en Real del Monte, Pachuca, fue una mina con altas producciones de oro y plata y que, actualmente es un museo abierto a todo el público. Este ejemplo muestra una de las alternativas que son consideradas para planear los usos futuros de las obras civiles.

Tabla 12. Planteamiento de objetivos y actividades de cierre generales talleres de mantenimiento y servicios.

| COMPONENTE | OBJETIVOS DE CIERRE | ACTIVIDADES |
|--|---|---|
| Talleres de mantenimiento y servicios | Asegurar la estabilidad física del sitio | <ol style="list-style-type: none">1. Demolición y remoción de edificios que se consideren innecesarios o cuya condición se haya deteriorado sin posibilidad de reparación.2. Desmantelamiento de todas la edificaciones e infraestructura. |
| | Asegurar la estabilidad química del sitio | <ol style="list-style-type: none">1. Determinar las posibles contaminaciones en los suelos por productos químicos.2. Retiro y confinamiento de los residuos sólidos de tipo peligroso, o de manejo especial como las chatarras.3. Rehabilitar las áreas contaminadas, especialmente suelos. |
| | Usos futuros del sitio | <ol style="list-style-type: none">1. Evaluar las oportunidades de reutilización, venta y reciclaje de materiales.2. Determinar las posibles opciones para utilizar edificios y carreteras.3. Realizar programas de revegetación. |
| | Garantizar la seguridad | <ol style="list-style-type: none">1. Hacer inspecciones periódicas. |

Las principales premisas que se deben considerar al momento de plantear las actividades de cierre son de igual forma las explicadas previamente en el apartado de áreas operativas.

IV.9 Responsabilidad social

El concepto de responsabilidad social abarca más allá de los requisitos económicos, técnicos y legales que debe cubrir el proyecto (Yakovleva, 2016), se considera como la cooperación para resolver problemas sociales y ambientales. En materia de cierre de minas se visualiza como un mecanismo para maximizar los impactos sociales y ambientales positivos y minimizar los negativos que puede causar la actividad minera (Acutt *et al*, 2001, como se citó en Yakovleva, 2016), su principal objetivo es mejorar el desempeño social, fortalecer las estructuras y los liderazgos comunitarios (Bruns & Church, 2018). Por ello, internacionalmente se han adoptado una variedad de regulaciones, iniciativas y procedimientos que permiten guiar la planificación de todas las actividades en materia social.

Uno de los puntos centrales que se persiguen en la responsabilidad social es gestionar a los grupos de interés (Yakovleva, 2016), ya que, como se puede observar en la figura 9 de la Sección II.4 las partes interesadas abarcan una gran gama de comunidades e instituciones que tienen un vínculo con la actividad minera, por ende, integrar la participación y el trabajo en conjunto es pieza clave para el cumplimiento de los objetivos.

En la figura 34 se presenta una propuesta metodológica que expone cómo abordar la responsabilidad social desde etapas tempranas del proyecto hasta el post cierre y monitoreo, describiendo los principales objetivos que deben ser considerados para cada caso. Las pautas que se abordan comienzan por la identificación de los grupos de interés, después, la etapa de definir los impactos sociales que abarca el análisis de los grupos de interés y el conocimiento del proyecto y finalmente, la etapa de desarrollo comunitario que agrupa el involucramiento en el proyecto y plan de cierre, desarrollo de programas comunitarios y evaluación. Es de suma importancia mantener en constantes evaluaciones y actualizaciones el plan establecido, con el objetivo de adaptar las medidas a las necesidades del proyecto.

A continuación, se presenta una breve descripción sobre algunos aspectos que deben ser considerados en cada una de las etapas mencionadas anteriormente.

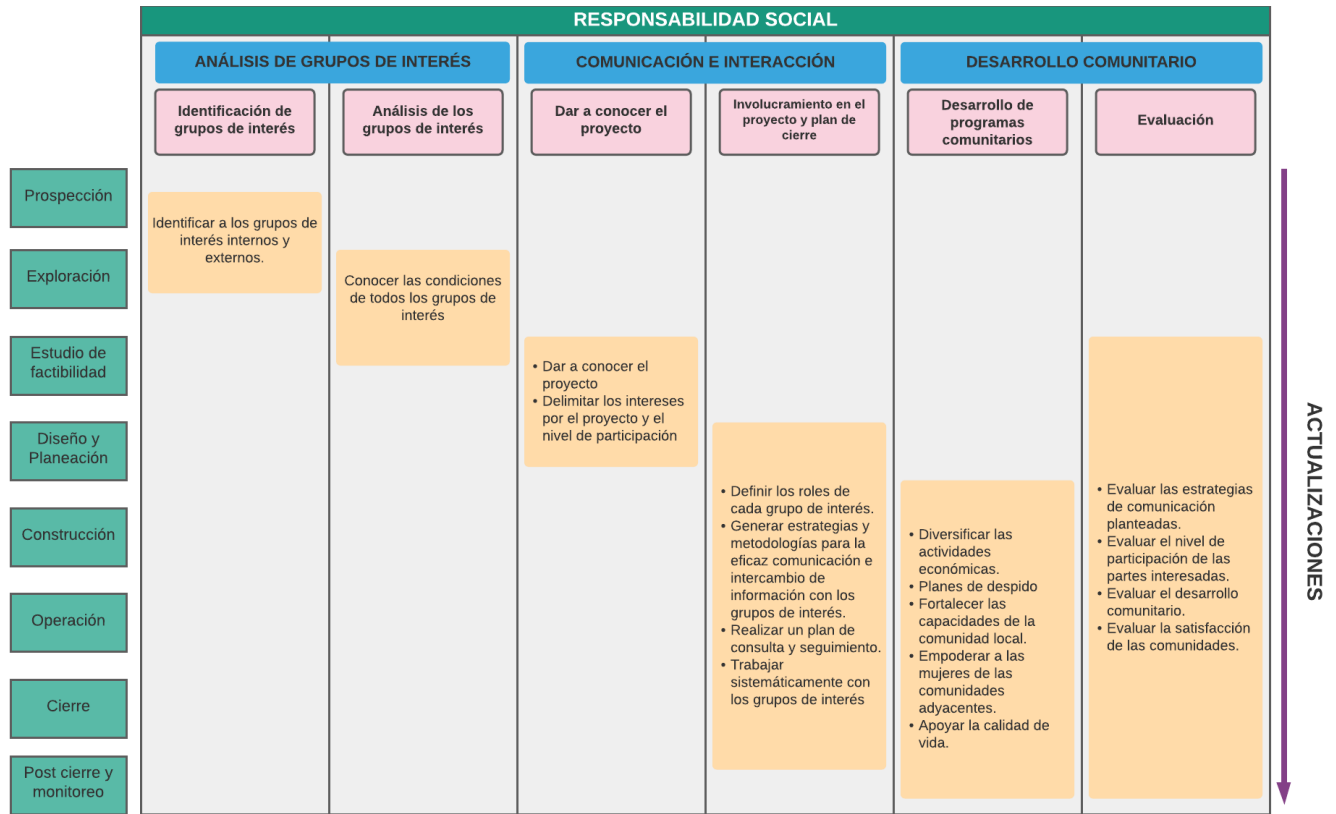


Figura 34. Pautas de la responsabilidad social a lo largo del proyecto minero.

IV.9.1 Análisis de los grupos de interés

El análisis de los grupos de interés contribuye a conocer los objetivos y roles de los distintos grupos, lo cual permite comprender el modo apropiado de relaciones con cada uno de ellos. Al contar con un contexto de las condiciones de las comunidades se podrá estimar los riesgos del proyecto e identificar las oportunidades para la generación de programas de desarrollo comunitario. De igual manera, la información obtenida va a proporcionar indicadores de rendimiento para evaluar las condiciones iniciales y condiciones posteriores (ICMM, 2012).

Los puntos que se abordan en el análisis son variados de acuerdo con las condiciones del proyecto y necesidades de las partes interesadas, por lo cual se debe considerar a todos los individuos o grupos por separado (ICMM, 2018). En la figura 35 se presentan algunos elementos que pueden ser considerados para comenzar con la investigación del sitio, esta información puede ser obtenida mediante entrevistas y reuniones directas con los integrantes de las comunidades.

| Análisis de los grupos de interés | | |
|-----------------------------------|------------------------|---|
| 1 | Mapeo de la comunidad | Realizar una identificación de los grupos de interés, lugares culturales, instituciones y otros lugares de importancia. |
| 2 | Factores demográficos | Identificar los principales factores demográficos de las comunidades como: localización, edad, salud, etnia, ingresos, etc. |
| 3 | Organización social | Identificar la organización a nivel de los hogares y comunas con el objetivo de definir la toma de decisiones. |
| 4 | Organización económica | Determinar las estructuras comerciales y empresariales locales y regionales. |
| 5 | Contexto histórico | Conocer los acontecimientos históricos destacados de cada grupo, así como los posibles problemas que existan. |
| 6 | Estructura política | Conocer la estructura política del sitio y los posibles proyectos de desarrollo planeados con las comunidades. |
| 7 | Requerimientos | Identificar las necesidades, por ejemplo, falta de hospitales, escuelas, transporte, entre otros. |
| 8 | Instituciones | Conocer las condiciones de las instituciones locales y el rol que tienen. |
| 9 | Entorno cultural | Identificar normas o prácticas culturales propias del sitio y el nivel de valor cultural. |

Figura 35. Elementos por considerar para realizar el análisis de los grupos de interés.

IV.9.2 Comunicación e interacción

IV.9.2.1 Conocimiento del proyecto

Una vez analizado las condiciones de los grupos de interés, se debe comunicar sobre el proyecto con el objetivo de recibir la aceptación de las comunidades sobre el proyecto. La comunicación inicial entre la empresa y las comunidades puede incluir información general sobre el proyecto; problemas de acceso al sitio; oportunidades de empleo; compra de productos locales; gestión de impactos ambientales; y cuestiones de salud y seguridad y, sobre todo, beneficios para ambas partes (Spitz & Trudinger, 2019). A medida que evoluciona el proyecto, la comunicación debe volverse más específica y frecuente con una mayor participación de la comunidad.

En esta etapa es importante comenzar a identificar qué intereses tienen las comunidades y de qué forma podrían participar en el proyecto. En la figura 36 se expone el proceso y la secuencia que se debe llevar a cabo para determinar la participación de los grupos. Se

identifica la cercanía de los grupos al proyecto mediante la elaboración de mapeos en donde se visualicen las comunidades más cercanas y alejadas. Después, se realiza una consulta con el objetivo de conocer la opinión, dudas, interés y posibles preocupaciones que existan, con toda la información obtenida se va a determinar la importancia que cada uno de los grupos tiene por el proyecto, así como, el grado de interés. Esta información va a permitir estimar las formas de participación de la población.

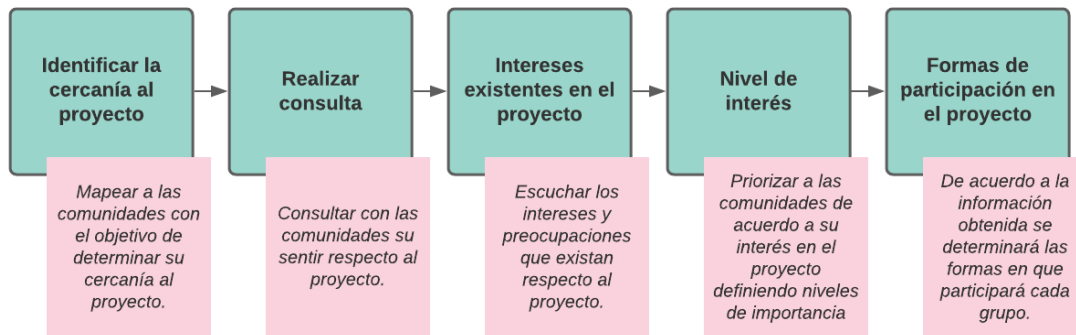


Figura 36. Identificar intereses y participación de los grupos de interés.

IV.9.2.2 Involucramiento en el proyecto y plan de cierre

Las iniciativas modernas de desarrollo comunitario se basan en un enfoque participativo, ya que, los miembros de las comunidades son los principales protagonistas en las etapas de planeación de los programas (Spitz & Trudinger, 2019). Por ende, además de dar a conocer el proyecto a los grupos de interés, se debe establecer un plan que permita la interacción constante con las partes interesadas. Involucrar a miembros de las comunidades en las etapas de planeación va a permitir incrementar considerablemente el desarrollo de medidas apropiadas y sostenibles (ICMM, 2012).

En la figura 37 se presenta un diagrama que propone una serie de estrategias para establecer el involucramiento de las partes interesadas durante la elaboración del plan de cierre. Las directrices comienzan por establecer los roles de cada grupo, es decir, de acuerdo con las competencias y capacidades de cada individuo se le asignará un rol definiendo las tareas que realizará. Posteriormente, se implementarán canales de comunicación, determinando las estrategias para mantener el contacto constante con los interesados. Todas las estrategias consideradas se aplicarán con base a las características de cada grupo. De igual forma, será establecido un plan de consulta y seguimiento, que tendrá como principal objetivo asegurar la información y resolución de dudas a los interesados durante toda la etapa de planeamiento del cierre.

Finalmente, se trabajará en conjunto con cada grupo, por ende, establecer metodologías de trabajo y gestionar tareas será de suma importancia.

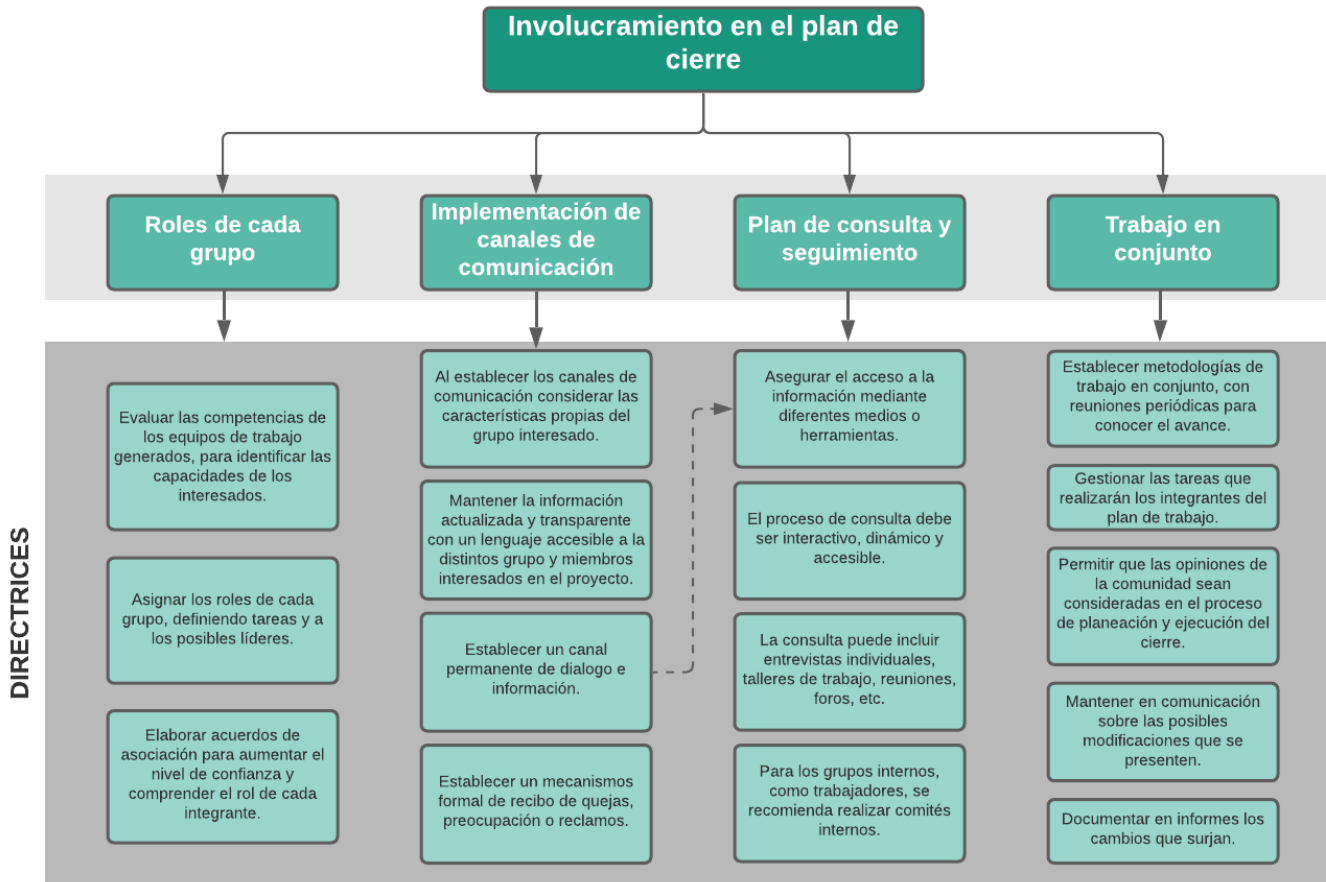


Figura 37. Estrategias para el involucramiento de los grupos de interés en el plan de cierre.

IV.9.3 Desarrollo de programas comunitarios

El desarrollo comunitario es el proceso que permite fortalecer a las comunidades dentro del área de impacto de la operación minera mediante la evaluación planificada de todos los aspectos económicos, sociales, ambientales y culturales. La principal meta de los programas de desarrollo comunitario es asegurar que cualquier comunidad afectada por el proyecto continúe prosperando como una comunidad autosuficiente y madura ICMM, 2012; Spitz & Trudinger, 2019).

Dentro de las empresas, se presentan tres modelos de gestión para planificar el desarrollo comunitario: el primer enfoque considera a la empresa como principal tomador de decisión y consiste en que las empresas realicen iniciativas para abordar las preocupaciones de las comunidades; el segundo enfoque aborda la creación de instituciones filantrópicas por la empresa, que mediante donaciones benéficas y contribuciones fortalecen el desarrollo de la comunidad; y finalmente, el modelo de asociación, enfoque que ofrece la cooperación en conjunto del sector industria, gobierno y la participación actividad de la sociedad civil (Yakovleva, 2016). El riesgo inherente de

los primeros dos enfoques radica en que las comunidades perciban que las empresas son las únicas en decidir lo que se va a hacer, causan el fracaso de los posibles programas que sean implementados (Spitz & Trudinger, 2019), por ende, el tercer modelo va a garantizar el éxito en la implementación de los programas al proponer una metodología que integra a los grupos internos y grupos externos.

En la figura 38, se presenta un diagrama que ejemplifica el papel que tiene el gobierno, la empresa minera y las comunidades en el desarrollo de programas. El caso tomado de Spitz & Trudinger, (2019) muestra cómo ante la falta de un sistema de abastecimiento de agua en una comunidad, las instituciones gubernamentales deben establecer entidades que serán encargadas de recaudar tarifas para el mantenimiento, actualizaciones o posibles ampliaciones. De esta forma, la participación de la empresa se limita en apoyar en la construcción del sistema facilitando mano de obra, equipos, materiales, insumos y fondos, caso contrario, al adjudicar la responsabilidad completa a la empresa, el sostenimiento del sistema probablemente se detenga al cierre de la operación. El papel que juega la comunidad es participar en las entidades que se realicen para lograr la conservación de la construcción.



Figura 38. Ejemplo de la interacción de la empresa, gobierno y comunidad (Adaptado de *Spitz & Trudinger, 2019*)

Con el ejemplo proyectado se concluye que la generación de los programas comunitarios debe evitar a toda costa la dependencia a largo plazo de la empresa minera. La participación y contribución de las comunidades juega un papel importante debido a que, los participantes analizarán la situación y ganarán confianza de su propia capacidad, ideando posibles soluciones y acciones futuras. Aunque la participación puede resultar

un proceso que tome más tiempo para desarrollarse e implementarse, traerá consigo resultados más favorables y programas más acertados a las necesidades del entorno.

El desarrollo de programas debe obedecer a las necesidades de la comunidad y no de la compañía (ICMM, 2012). En la figura 39 se presenta un esquema que resume los cuatro principales ejes de trabajo que son abordados en la mayoría de los proyectos mineros: construcción y mejora de la infraestructura, el principal objetivo es mejorar las instituciones que se encuentran presentes, o bien, construir las obras que aseguren el bienestar social; para el caso de mejorar los servicios básicos, se busca mejorar la educación y los servicios de salud que se encuentren en el sitio; fortalecer las capacidades de las comunidades, tiene como objetivo fortalecer a las comunidades mediante el desarrollo de sus capacidades; y finalmente, la diversificación de actividades económicas, aspecto que tiene como objetivo la generación de nuevas actividades que generen trabajo. Cada uno de estos ejes debe adaptarse a las especificaciones del sitio.

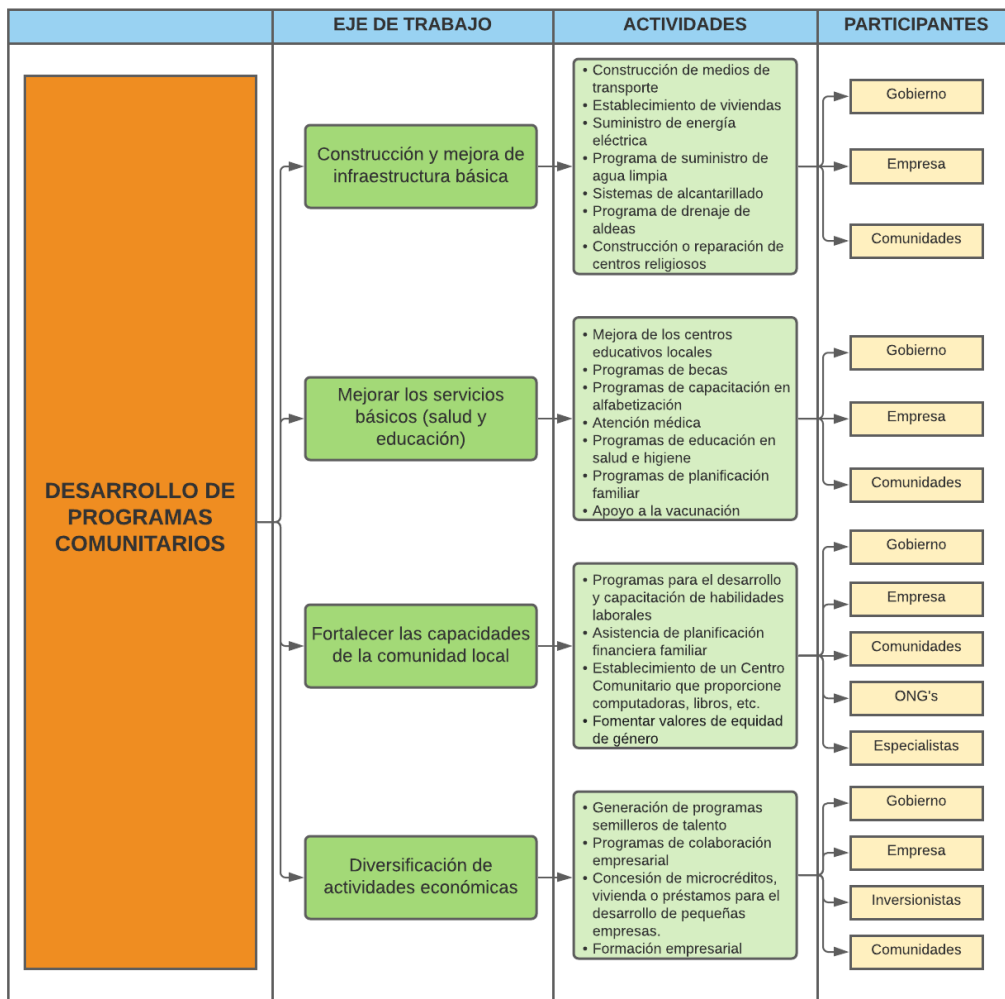


Figura 39. Desarrollo de programas comunitarios.

IV.10 Usos futuros del sitio

La planeación del uso del sitio posterior al cierre ayuda no solo a definir la visión del cierre y los objetivos específicos del sitio, sino también a establecer las actividades y criterios de éxito (ICMM, 2019). Las estrategias consideradas para sus usos no bastan con retornar a las condiciones previas a la extracción, ni tampoco resulta el objetivo más práctico (APEC, 2018), se deben analizar los factores, sociales, económicos y ambientales para proyectar todas las alternativas posibles.

En la Figura 40 se describe una metodología para examinar las opciones de uso posterior al cierre.

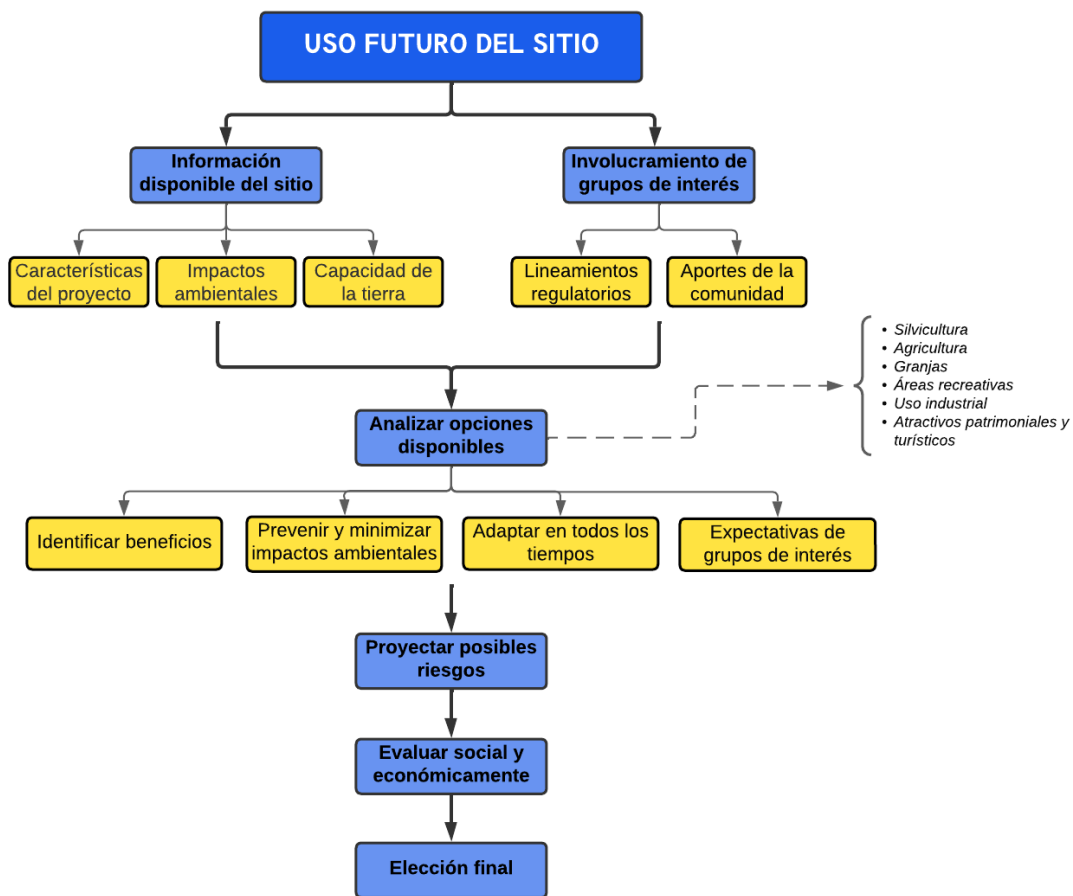


Figura 40. Metodología para evaluar los usos futuros del sitio minero.

En el diagrama presentado en la figura 40 se observa que el conocimiento de la información disponible del sitio y el involucramiento de los grupos de interés son las etapas iniciales que van a permitir evaluar en su totalidad las condiciones del proyecto e identificar las opciones disponibles para el sitio. El involucramiento de los grupos de interés radica en consultar y comprender los aportes que brinden a las alternativas para aumentar las probabilidades de éxito y potencializar los usos que serán establecidos.

Realizar la evaluación desde etapas tempranas del proyecto, garantizará la compatibilidad de las opciones estudiada.

Posteriormente, se hace un análisis de las opciones potenciales de uso de tierra, el cual consiste en determinar la serie de variables aplicables para las áreas mineras, ya que, el uso no será uniforme en todo el sitio y se verá afectado por la configuración posterior al cierre de mina y las áreas de depósitos de residuos mineros (ICMM, 2019). Por ende, se examinará la capacidad especificada de cada zona considerando los siguientes factores:

- **Identificar beneficios:** Para algunos usos de la tierra puede existir la posibilidad de generar beneficios económicos, sociales o culturales, esto puede facilitar la transferencia del sitio o generar una actividad económica que beneficie a las comunidades.
- **Prevenir y minimizar impactos ambientales:** El uso que sea elegido debe de garantizar la seguridad de los elementos ambientales y seres vivos del entorno. La elección del uso debe estar en función de minimizar los impactos ambientales.
- **Adaptar en todos los tiempos:** Es importante considerar que la alternativa elegida puede evolucionar conforme avance la operación minera, ya que, diversos factores como la opinión de las comunidades, técnicas aplicadas o condiciones del sitio pueden cambiar y ocasionar adaptar el uso a las nuevas necesidades.
- **Expectativas de grupos de interés:** Analizar con detalle el contexto socioeconómico, aspiraciones de las poblaciones, contexto histórico y condiciones del entorno beneficiará para lograr un sitio autosostenible a largo plazo.

Conforme la planeación del cierre avanza y aumenta el nivel de información, es posible agregar más detalle a las alternativas seleccionadas (ICMM, 2019), por ejemplo, para los casos en los cuales se elija implementar la agricultura como uso, el detalle puede consistir en determinar si la capacidad del suelo cambió y la selección de especies que se deben plantar son diferentes de acuerdo con cada zona.

Una vez que son mapeadas las diversas variables, se continúa realizando proyecciones para identificar los posibles riesgos que pueden surgir mediante la implementación del nuevo uso y abordar cada problemática, o bien, elegir otra opción. De igual forma, se debe evaluar la factibilidad económica del proyecto que será implementado y determinar si de acuerdo con las condiciones de la unidad resulta costeable.

CAPÍTULO V. PLANES ESPECÍFICOS

V.1 Implementación de las líneas de acción

El plan conceptual se considera el documento que da comienzo a la planeación del cierre de minas (ICMM, 2019), sin embargo, implementar cada una de las líneas de acción implica generar una estructura con un mayor detalle de información y planificación de actividades, ya que, las técnicas y metodologías planteadas para cada línea tienen particularidades que requieren considerar diferentes factores como los recursos necesarios, el tiempo, el personal y los costos, por lo tanto, se hacen planes independientes, nombrados como planes específicos. Los planes específicos serán documentos dinámicos de planificación interna, actualizados periódicamente o rediseñados durante la vida útil de la mina para reflejar las necesidades cambiantes, las condiciones cambiantes y la nueva información (ICMM, 2019).

En la figura 41 se expone un diagrama que abarca seis etapas, las cuales integran todo el proceso de elaboración y desarrollo de los planes específicos: formulación, programación, ejecución, evaluación, ajuste y finalización. A continuación, son descritas cada una de las etapas:

V.1.1 Formulación

La formulación es la etapa en la cual se realiza el planteamiento de las actividades de cada línea de acción, especificando con mayor detalle lo plasmado en la etapa conceptual. Esto se realiza para cada área operativa e instalación y se lleva a cabo conforme sean ejecutadas las líneas de acción.

Se comienza realizando una descripción con detalle de las actividades de cada línea de acción e identificando los indicadores de rendimiento que van a evaluar la eficiencia, por ejemplo, en el caso de elegir alguna técnica de remediación para un sitio contaminado se medirá su eficacia tomando muestras para determinar si las concentraciones del contaminante en cuestión disminuyeron. Otro aspecto que en algunos casos será considerado son las especificados establecidas en las regulaciones aplicables, ya que, para ciertas líneas se deben cumplir procedimientos y que serán evaluados por la autoridad para verificar su cumplimiento.

Por las características particulares de cada caso, durante la ejecución de actividades progresivas se pueden presentar escenarios que obliguen a reconfigurar las líneas de

acción definidas, por ende, en la fase de formulación se recomienda realizar proyecciones que abarquen todos los posibles escenarios que pueden originarse, las opciones proyectadas brindarán una mayor flexibilidad de las alternativas de cierre para el proyecto.

Finalmente, se elaboran los presupuestos para cada línea de acción específica, por lo tanto, se hace la delimitación de los recursos para cada actividad y los costos asociados. En las próximas secciones se profundiza sobre los tipos de recursos considerados.

V.1.2 Planeación

La etapa de planeación integra la serie de factores para preparar la ejecución de las actividades proyectadas en la formulación. Será estimada la programación de los tiempos de ejecución definiendo la secuencia en la que se ejecutarán cada una de las actividades, así como, el comienzo, duración y conclusión.

En esta fase es importante comenzar con el involucramiento de los grupos de interés, puesto que, la planeación debe ser un trabajo en conjunto que considere las preocupaciones de las comunidades y autoridades.

V.1.3 Ejecución

La ejecución es la etapa en la que se pone en marcha todo lo que se ha planeado. Se inicia con la asignación de los recursos humanos, financieros, materiales y técnicos a las actividades descritas. Por ende, es importante fijar responsables que organicen cada proceso y, midan el avance y cumplimiento de la secuencia programada.

En algunos casos resultará necesario preparar al personal mediante capacitaciones, o bien, contratar a un equipo de trabajo especializado. Por ejemplo, para manipular la flora utilizada en la revegetación de los sitios rehabilitados se requiere gente especializada en elegir las especies elegidas y capacitar al personal encargado de ejecutar la actividad.

De igual forma, se ejecuta el presupuesto, recaudando los ingresos y realizando los gastos planeados. Durante esta fase se pueden producir modificaciones en lo aprobado inicialmente, dando lugar a lo que se conoce como presupuesto definido.

V.1.4 Evaluación

La fase comprende el proceso de seguimiento de las actividades que son ejecutadas para evaluar el cumplimiento de las actividades específicas planteados en la formulación y la efectividad de las alternativas elegidas para cada línea de acción.

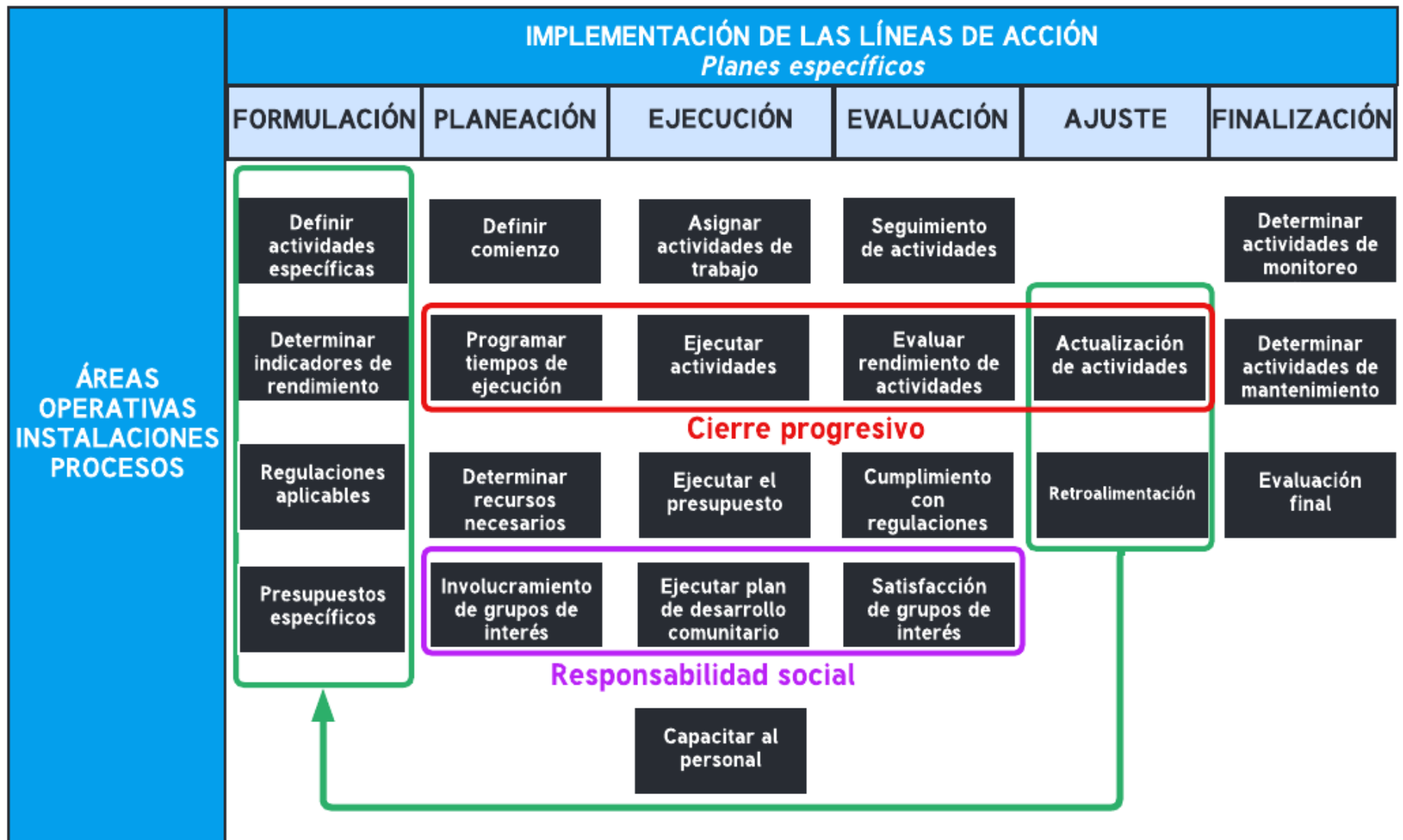


Figura 41. Implementación de las líneas de acción mediante la elaboración de planes a detalle.

Para realizar la evaluación se emplean los indicadores elegidos en la primera etapa. Este proceso se lleva a cabo en dos periodos de tiempo, primero durante la implementación progresiva de las actividades de cierre, ya que hacer un seguimiento continuo del desempeño permite actualizar la información y continuar con el plan inicial o cambiar los objetivos establecidos, en tanto que, al finalizar el proyecto se hace una evaluación final para determinar el éxito de su ejecución.

Similar a lo descrito se determina el nivel de satisfacción de los grupos de interés sobre los programas de desarrollo comunitario, así como, el cumplimiento de las regulaciones aplicables, por ejemplo, para el manejo de residuos se ejecutarán las actividades correspondientes considerando la normatividad vigente y evaluando su efectividad con base en lo establecido en la norma.

V.1.5 Ajuste

El ajuste consiste en realizar una retroalimentación a las actividades de cierre con base en la información obtenida en la evaluación. En este punto es posible hacer la actualización o modificación de lo establecido en el plan específico; se puede determinar la opción de ejecutar alguna de las proyecciones establecidas en la formulación o continuar.

V.1.6 Finalización

En la etapa de finalización, se determinan las medidas de monitoreo final llevadas a cabo al concluir la ejecución, es decir, una vez que se concluya con las actividades de cierre se determinarán las medidas y tiempos para continuar monitoreando el cumplimiento de los objetivos y hacer una evaluación final de la efectividad de las alternativas de cierre de cada línea de acción.

De igual forma, serán definidas las actividades de mantenimiento, definiendo los planes y estimando el tiempo en el cual se ejecutarán.

V.2 Planeación de actividades

La planeación es el proceso que coordina la secuencia de actividades necesarias para diseñar y ejecutar las líneas de acción del plan de cierre conceptual, así como las responsabilidades y estrategias para el cumplimiento oportuno de los objetivos específicos del proyecto.

Esta planeación se desarrolla en las etapas tempranas del proyecto como en la construcción, la planeación de actividades está orientada a cerrar las brechas en la base

de conocimientos, ejecutar estudios o investigaciones, refinar los objetivos y criterios de cierre, realizar seguimiento e inspecciones, revisar los datos recopilados (ICMM, 2019) y comenzar con el cierre progresivo, o bien, identificar en qué tiempo puede comenzar de acuerdo a las características de cada instalación y área operativa. A medida que la operación avance la planeación se enfoca en realizar las actividades del plan conceptual conforme las instalaciones y áreas operativas terminan su vida útil.

Para la planeación se establece una estrategia general que describa las actividades de forma detallada definiendo la secuencia trabajo con los recursos necesarios, responsables, costos asignados y tiempos de ejecución. De igual forma, es posible fijar la metodología que actualizará periódicamente las necesidades cambiantes, las condiciones cambiantes y la nueva información. Algunas de las características de las metodologías son tener un procedimiento de trabajo puntualizando los indicadores de rendimiento utilizados para evaluar el rendimiento de las actividades, los periodos para hacer la evaluación, los recursos y costos. En la figura 42 se presenta un resumen de todos los componentes que deben integrarse en la planeación.

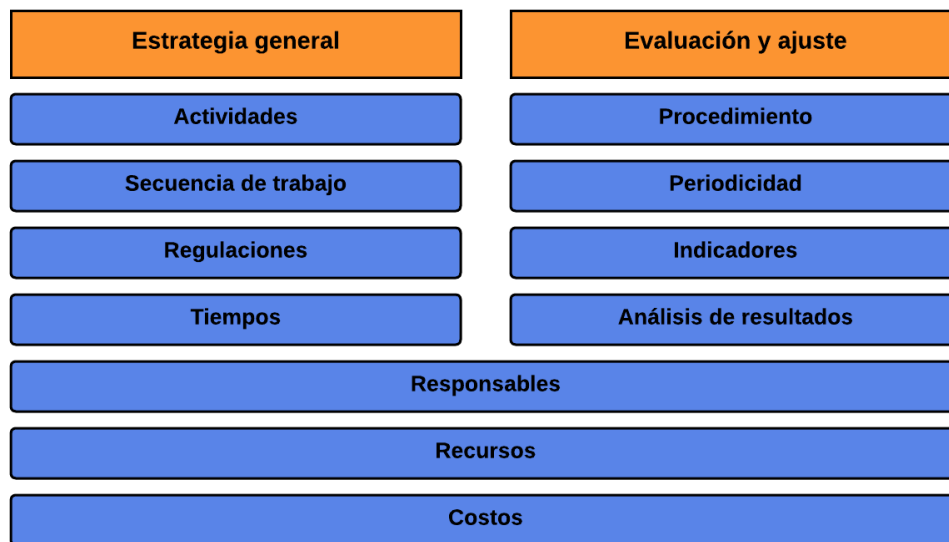


Figura 42. Componentes de la estrategia general, evaluación y ajuste de actividades.

En los próximos apartados se analizará cada uno de los componentes de la estrategia general estudiando los diversos casos que pueden presentarse.

V.3 Cierre progresivo

V.3.1 Importancia

La importancia del comienzo de las actividades de cierre antes de la terminación de las operaciones radica en analizar los tiempos para la ejecución de cada una de ellas y adecuar las alternativas elegidas de manera que se logre maximizar los usos posteriores del sitio después de la minería y minimizar los costos (ICMM, 2019). Algunos otros beneficios son los siguientes:

- **Confianza de los grupos de interés:** Generar el cierre progresivo brinda la confianza de los grupos de interés, debido a que, demuestra el compromiso y respeto que tiene la empresa con el sitio, siendo la principal evidencia la efectividad de las actividades implementadas.
- **Recuperación de la inversión:** Debido a que las actividades progresivas se llevan a cabo durante la generación de ingresos del proyecto, la inversión realizada en la ejecución de actividades es recuperada.
- **Minimización de alteraciones ambientales:** Al comenzar las actividades en etapas tempranas, es posible evitar la alteración de los sitios que por sus características tienen potencial a contaminar los elementos ambientales.

V.3.2 Proceso de preparación y ejecución

Las empresas identifican desde el plan conceptual las instalaciones y áreas operativas que pueden estar sujetas a la progresión, ya que, la vida útil no será homogénea para todos los elementos ni para todos los proyectos, por lo cual, contar con un diagnóstico completo del sitio permitirá delimitar los tiempos de ejecución. En el figura 43 se expone una propuesta para llevar a cabo el proceso de cierre progresivo.

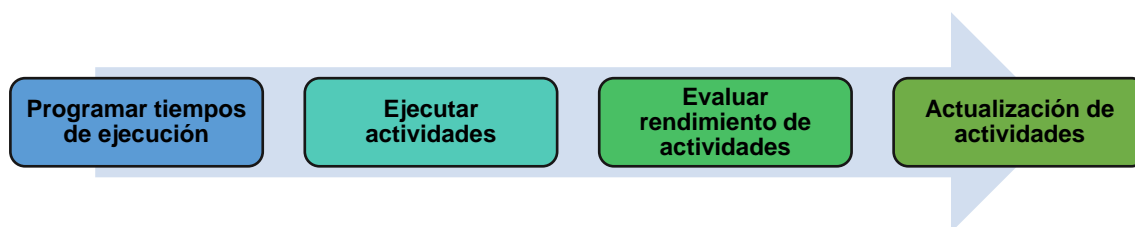


Figura 43. Proceso del cierre progresivo.

La programación de tiempos y ejecución de actividades son la esencia del cierre progresivo, ya que, son directrices que dirigen cuándo se comienzan las actividades de cierre. Para realizar la programación se considera principalmente las características del sitio donde se aplicará la línea de acción específica considerando: la configuración, los

aspectos técnicos, localización, extensión, ingeniería del proyecto, proceso y vida útil; aspectos ambientales, como los elementos ambientales vulnerables; y aspectos sociales, como usos futuros determinados para cada elemento. De igual forma, la planeación estratégica, táctica y operativa de la operación cobra relevancia, debido a que, es importante tener el conocimiento del plan general de la mina para integrar las actividades de cierre en los departamentos correspondientes y adaptar el plan a la planeación operativa.

La ejecución se determina estimando el tiempo que durarán cada una de las actividades, para ello es importante tener bien definidos los objetivos, puesto que, la duración de cada plan estará definida con base en el cumplimiento de dichos objetivos. También, la secuencia forma parte del proceso y consiste en describir el orden de realización de cada una de las actividades, esto se logra identificando el tipo de actividad: *actividades previas*, actividades que permiten preparar el área para comenzar con el plan; *actividades críticas*, actividades que deben mantenerse dentro de los tiempos establecidos para que el proyecto no sufra ningún retraso; *actividades simultáneas*, actividades que se pueden desarrollar al mismo tiempo sin obstaculizar una con la otra. Otro factor importante que se integra a la planeación de la secuencia son los tiempos perdidos o muertos y los retrasos que puedan surgir en cada actividad para identificar las medidas de minimización de tiempos.

Para todas las actividades se realiza el proceso de evaluación y actualización, el cual, radica en monitorear antes, durante y al finalizar el plan las condiciones del sitio para identificar la efectividad de las alternativas elegidas. Este proceso se explica en el Capítulo VI.

V.3.3 Análisis de las líneas de acción

Como se explicó anteriormente, determinar las líneas de acción que pueden ser implementadas mediante un cierre progresivo requiere estudiar los factores ambientales, sociales, económicos y técnicos de cada instalación y área operativa.

En todos los proyectos es posible comenzar con el cierre progresivo, sin embargo, cada línea se actualiza en diferentes momentos dependiendo del avance de la explotación minera. Incluso existirán casos que comiencen con el cierre progresivo, pero conforme evoluciona la etapa operativa se frene por las condiciones económicas o condiciones sociales. Todos estos escenarios serán considerados y proyectados para cada línea de acción en todas las fases del proyecto.

Algunos casos más comunes de cierre progresivo son los depósitos de residuos mineros, ya que, durante la operación se realizan actividades para la estabilización física y química, por ejemplo, el reforzamiento de los taludes, la generación de obras para el escurrimiento de agua, la reconfiguración y revegetación del sitio. En la figura 44 se presenta un ejemplo de la UNEP, 1998 que ilustra lo antes descrito. En el inciso a) se observa que la capa superior del suelo y el subsuelo retiradas en la fase de preparación, son almacenadas lo más cerca posible del sitio proyectado para ubicar la tepetatera. También, el diseño para depositar el material se planea en forma de medialuna con el objetivo de dejar el área libre en el centro.

En el inciso b) hay un relleno continuo en el interior del área, desde los bordes exteriores hacia el centro. Simultáneamente, se lleva a cabo la rehabilitación progresiva utilizando el material retirado en la preparación de la zona. Finalmente, en el inciso c) el primer nivel se ha concluido el relleno del terrero y se comienza el segundo aplicando la misma técnica de disposición, pero al mismo tiempo se continua con las actividades de cierre en el nivel inferior colocando obras para el manejo de agua y revegetando.

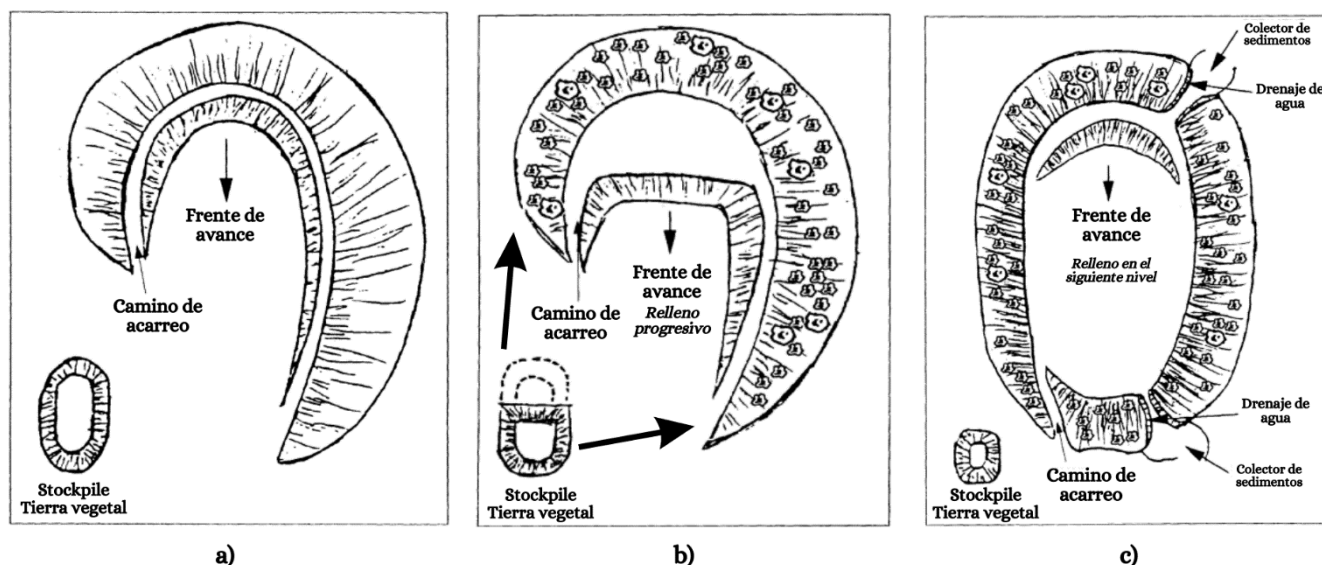


Figura 44. Se ilustra el cierre progresivo en un depósito de residuos mineros, específicamente un terrero (Adaptado de UNEP, 1999)

Así como se expuso en el ejemplo, diversas áreas operativas e instalaciones pueden desarrollar de manera simultánea actividades de cierre durante la operación. Otro de los casos que ilustra el concepto son los rebajes agotados de una explotación subterránea; conforme se explotan los rebajes y culmina la extracción mineral en cada uno de ellos, se rellenan, se preparan obras para el manejo de agua, se refuerzan los pilares y se sellan los accesos.

De igual forma, están los casos de los sitios en los que se encuentran elementos ambientales, por ejemplo, si las características de la mineralogía demuestran que hay presencia de minerales potenciales a generar agua ácida y que estos estarán expuestos al oxígeno o cuerpos de agua circundantes, se deben proyectar medidas de cierre durante la operación, como realizar el monitoreo de la calidad del agua, generar medidas preventivas y de control, y determinar los posibles tratamientos que se aplicables.

En algunos casos es posible que, por las características del sitio, ubicación, forma y leyes del yacimiento, se realice una planeación de la extracción integrando el cierre progresivo. En la figura 45 se ilustra un ejemplo de una mina a cielo abierto la cual, expone la explotación del mineral mediante una secuencia que permite realizar el relleno consecutivo de los tajos.

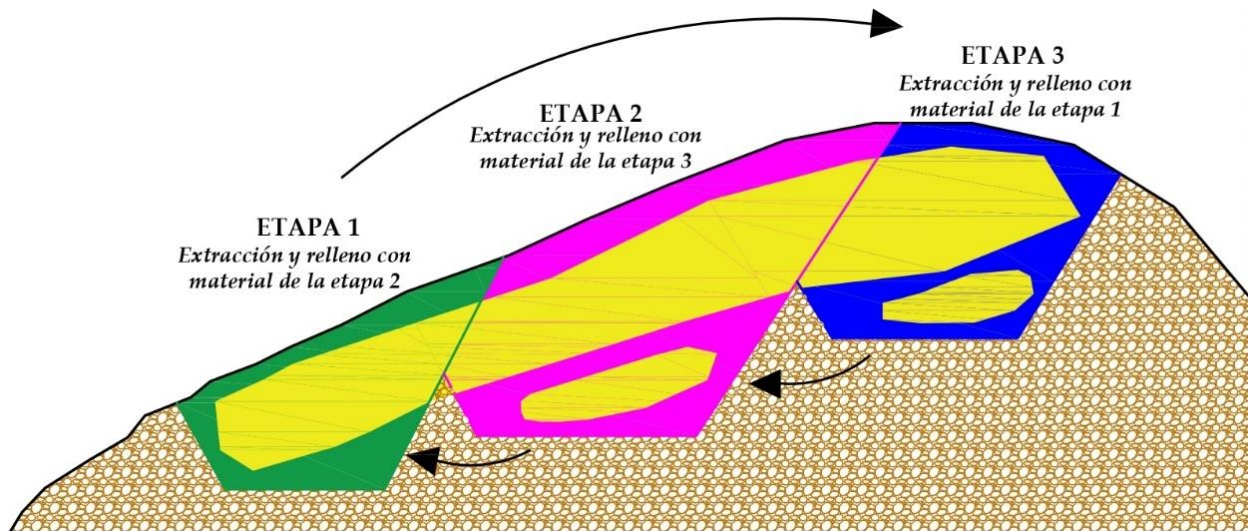


Figura 45. Cierre progresivo en una operación a cielo abierto mediante el relleno secuencial de los tajos.

La operación del proyecto comienza en la Etapa 1, para esta primera etapa el tepetate se apilará en una tepetatera. Posteriormente, se continúa con la extracción en la Etapa 2, pero de manera simultánea el material estéril es depositado al tajo de la Etapa 1. De manera análoga, en la Etapa 3 al ser extraído el material de interés se realiza al mismo tiempo el relleno del tajo de la Etapa 2, y finalmente, al concluir la extracción en la Etapa 3, se rellena el tajo con el material de la tepetatera construida en la Etapa 1. Esta sucesión es otro caso que logra ejemplificar el cierre progresivo durante la etapa operativa del proyecto.

Implementar las actividades progresivas proporcionar información que retroalimenta la planeación establecida en el cierre conceptual. En algunas circunstancias, es necesario reconfigurar el plan inicial, debido a que, las condiciones iniciales del proyecto se alteran, por ejemplo, para un taller de mantenimiento de equipos se determinó realizar un cierre

progresivo del sitio que consiste en dismantlar las instalaciones para reconfigurar el relieve y hacer una revegetación, sin embargo, conforme avanzó la operación de este taller se observó que los suelos fueron contaminados por derrames de hidrocarburos, por lo cual, la línea de acción se actualizó incluyendo una caracterización del suelo para determinar el grado de contaminación y posteriormente, establecer una técnica de remediación antes de la revegetación (figura 46).

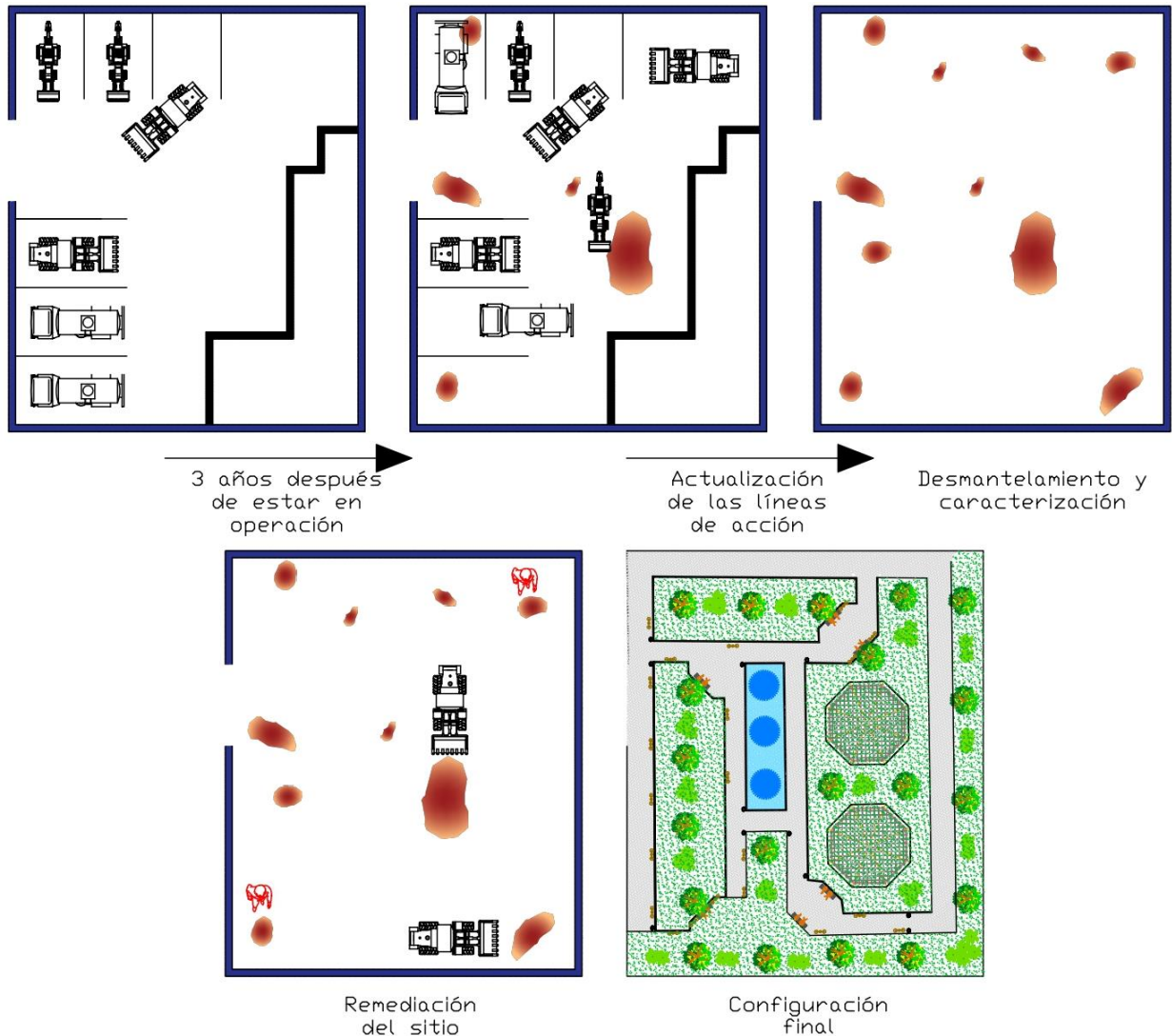


Figura 46. Actualización de las líneas de acción por el cambio de condiciones en el taller.

V.4 Recursos necesarios

Los recursos son los activos necesarios que son necesarios para la realización de los planes específicos, se debe hacer la asignación de los recursos con objetividad a cada una de las actividades. En la figura 47, se expone un diagrama de la clasificación de los recursos utilizados en el plan de cierre, enlistando algunos ejemplos.



Figura 47. Recursos empleados en las actividades de cierre.

El recurso humano es el conjunto de personas involucrado en la ejecución de las actividades mediante el desarrollo de habilidades, conocimientos y experiencia. En esta clasificación igual se involucran a los grupos de interés internos y externos, ya que, su participación tendrá influencia en la toma de decisiones. En algunos casos cuando no se dispone de las competencias necesarias se recurre a consultores o asociados para complementar el plan.

El recurso financiero se refiere al presupuesto designado para realizar el plan. En ese presupuesto se abarcan los costos y gastos que pueden producirse en todo el proceso de ejecución de las actividades, algunos ejemplos son: salarios del personal, compra de material, gastos de consultorio, gastos de equipos, etc. En el apartado V.6. *Financiamiento del plan*, se analiza con un mayor detalle la elaboración de presupuestos para el cierre de minas.

El recurso material abarca todos los recursos físicos que permiten realizar las actividades, entre ellos se encuentra: las instalaciones, materias primas, equipos, herramientas, maquinaria, etc. Para este caso, es importante que la empresa analice si en el tiempo que se ejecutarán las actividades hay disponibilidad de los recursos, o bien, si se deben adquirir o alquilar.

Los recursos ambientales, son todos los elementos ambientales comprendidos en cada actividad, por ejemplo, en el caso de la rehabilitación de los caminos el principal recurso

que será estudiado es el suelo, debido a que, si sus condiciones lo permiten puede ser utilizado para nivelar y revegetar.

Finalmente, los recursos técnicos son el conjunto de herramientas e instrumentos utilizados para gestionar y controlar las actividades, por ejemplo, las Normas Oficiales Mexicanas son instrumentos de que regulan la ejecución de las líneas de acción, permitiendo evaluar los procesos que se llevarán a cabo.

V.5 Indicadores de desempeño

Con el objetivo de que los reguladores, empresas mineras y comunidades evalúen el éxito y la confiabilidad de las líneas de acción ejecutadas, se establecen una serie de indicadores que permitan obtener información actualizada sobre las condiciones del sitio y la evaluación de las actividades de cierre elegidas.

La importancia de contar con indicadores de desempeño radica en comprender que en algunos casos la finalización de las actividades de cierre puede tardar años o incluso décadas, y los indicadores miden el progreso en el cumplimiento los objetivos y muestran si el plan va en la dirección correcta o es necesario hacer una intervención temprana para modificar lo estipulado (ANZMEC & Minerals Council of Australia, 2000). En el aspecto social, son una excelente herramienta de comunicación, pues pueden adelantar o revelar tendencias, además de identificar con anticipación la ocurrencia de situaciones económicas y sociales indeseables (IBRAM, 2016). En la figura 48, se presenta un diagrama que muestra el desarrollo y uso de los indicadores de acuerdo con las etapas del proyecto minero.



Figura 48. Desarrollo y uso de los indicadores durante las etapas del proyecto minero.

La definición de indicadores se realiza durante la etapa de conceptualización para formar una base en la toma de decisiones en las próximas etapas. Cada selección debe ser de acuerdo con la ubicación y los objetivos específicos definidos, justificando su importancia con base en las líneas de acción, la evaluación de impacto ambiental y social y las regulaciones aplicables (Australian Government, 2016). En las siguientes etapas de su aplicación radica en medir el monitoreo de las actividades de cierre progreso.

Por ende, se debe redactar un plan de monitoreo integral, el cual se realiza con base en las características específicas de las zonas rehabilitadas y en cualquier actividad o acción ejecutada en un plan específico donde se desea medir el progreso y la efectividad de las acciones. Algunos elementos del programa de monitoreo inevitablemente se basarán en los requisitos y recomendaciones estipulados en las regulaciones ambientales, por ejemplo, en el caso de las presas de jales se tomarán en cuenta los lineamientos establecidos en la NOM-141-SEMARNAT-2003. A continuación, se describen algunos de los puntos que deben ser integrados al programa de monitoreo.

1. Propósitos y objetivos del programa de monitoreo
2. Elementos y lugares
3. Variables o parámetros que se deben de medir
4. Regulaciones aplicables
5. Técnicas analíticas y de muestreo aplicables
6. Equipo e instrumentación necesaria
7. Metodologías aplicadas (métodos para inspeccionar, registrar y evaluar datos)
8. Frecuencia de muestreo
9. Duración
10. Responsabilidad (quién llevará a cabo el seguimiento y garantizará el cumplimiento)
11. Procedimiento para verificar las condiciones

De manera general, Australian Government, (2016) describe tres estrategias para el uso de indicadores en la determinación del progreso del plan de cierre, las cuales son:

- Comparar directamente los datos de los indicadores con los de datos de referencia o de sitios análogos. Por ejemplo, los diferentes tipos de flora y fauna, y la calidad del agua.
- Analizar los atributos comparando los datos de los indicadores de desempeño con los objetivos de rehabilitación y criterios de finalización esperados.
- Proyectar la tendencia de la estabilidad física y función de los elementos ambientales que se desarrollan hacia los objetivos de rehabilitación.

Algunos ejemplos comunes en los cuales se realiza dicha evaluación durante el cierre progresivo incluyen:

- Desempeño de las líneas de acción (costos y cronograma).
- Calidad y cantidad de los cuerpos de agua subterráneas y superficiales (mide la composición del agua).
- Erosión y caudal (áreas de depósitos de residuos mineros).

- Condiciones físicas del relleno (rebajes rellenados)
- Hectáreas/porcentaje de tierra rehabilitada que cumple con los criterios de éxito de la rehabilitación final.

En algunos casos, puede valer la pena usar indicadores de desempeño para establecer metas anuales.

En la figura 49 se observa el planteamiento de los indicadores en el plan conceptual, los parámetros son para determinar las condiciones físicas y químicas del agua que fluye cerca de la presa. Todos estos indicadores son medidos durante la operación, sin embargo, conforme se avanza al cierre y poscierre, si los resultados son constantes pueden omitirse algunos de ellos y el monitoreo final centrarse en la cantidad y calidad del agua en puntos de descarga.

EJEMPLO – Agua superficial en presa de jales



Figura 49. Ejemplo del uso de indicadores para monitorear aguas superficiales en una presa de jales.

V.6 Financiamiento del plan

El financiamiento del plan de cierre es un documento que enmarcar los recursos económicos necesarios para implementar las líneas de acción. Su principal objetivo es asegurar que el costo del cierre esté adecuadamente representado en el plan de mina y que las comunidades no queden con pasivos financieros al concluir el proyecto (ANZMEC & Minerals Council of Australia, 2000).

Dicho financiamiento se realiza en los dos posibles escenarios existentes en un proyecto minero: proyectos que iniciando con un plan de cierre y proyecto que han iniciado sin un plan de cierre y en algunos casos fueron abandonados. A continuación, se analizará el caso 1.

V.6.1 Proyectos que inician con el plan de cierre

Este primer caso abarca a los proyectos que realizan el plan de cierre conceptual en las etapas tempranas, en dicho plan se debe de integrar una primera estimación de los costos asociados al cierre. En la figura 50 se expone un esquema que ejemplifica los elementos que se integran en la primera estimación, visualizando los diferentes costos que se presentan en las distintas etapas de la vida del proyecto. La primera estimación se realiza con base en los diseños y suposiciones realizados en el plan conceptual, posteriormente se realizan actualizaciones incorporando la información cambiante y ajustando el documento. Todo el presupuesto obtenido se asignará de manera equivalente durante la operación minera, es decir, el presupuesto total de cierre será proporcional al presupuesto anual asignado durante los años que la unidad minera se encuentre en operación. Esta práctica permite distribuir los gastos cuando el flujo de caja es positivo, obteniendo una recuperación de la inversión asignada al cierre.

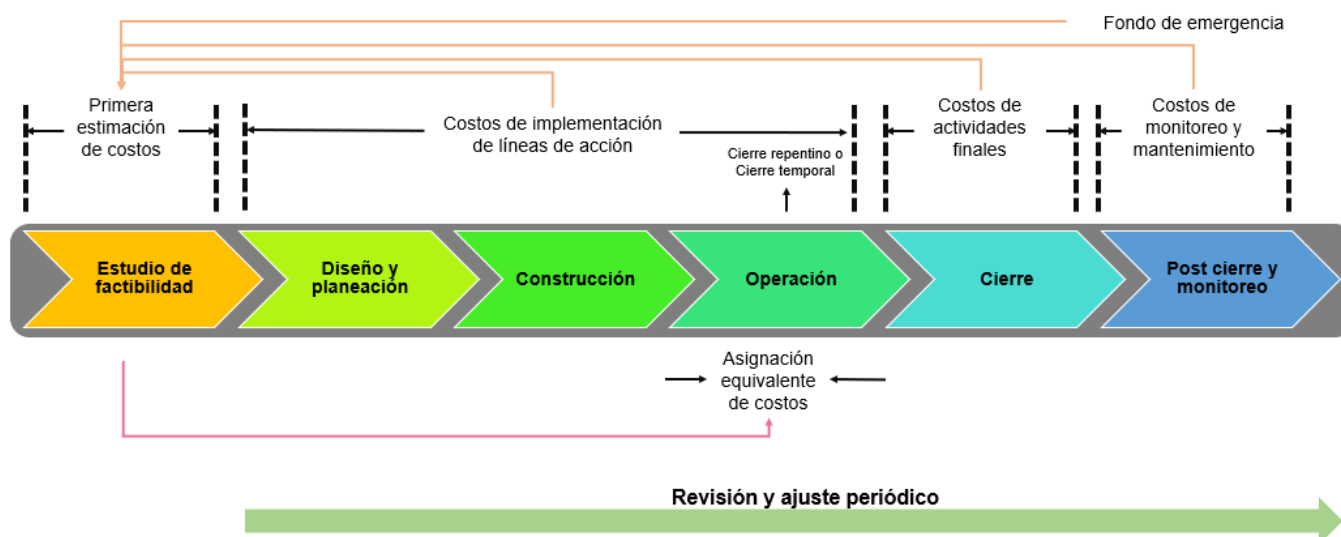


Figura 50. Caso 1 - Financiamiento del plan de cierre en proyectos que inician con un plan.

Hacer la distinción de los tipos de costos, es de suma importancia, ya que, permite cumplir con los propósitos de cada caso. En la tabla 13 se presentan algunos ejemplos con base en la información descrita por el ICMM, (2019), de los tipos de costos que deben incorporarse en la estimación:

Tabla 13. Ejemplos de los costos que deben ser considerados en la primera estimación.

| Costos de implementación de las líneas de acción | Costos de actividades finales | Costos de monitoreo y mantenimiento | Fondos de emergencia |
|--|---|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Desmantelamiento y demolición de estructuras y limpieza de sitios contaminados. • Construcción de relieves diseñadas, recubrimientos y/o reconfiguraciones. • Implementación de medidas de rehabilitación. • Gestión del agua, incluido el tratamiento del agua generada en la construcción y operación. • Estabilización de obras en minas subterráneas y a cielo abierto. • Investigaciones y estudios para cada línea de acción. • Costos de seguimiento. | <ul style="list-style-type: none"> • Desmantelamiento y demolición de estructuras y limpieza de sitios contaminados. • Actividades finales de las líneas de acción. | <ul style="list-style-type: none"> • Muestreos • Instrumentación • Inspecciones • Levantamientos topográficos • Mantenimiento | <p>Fondo que se estima con los posibles escenarios que pueden presentarse durante la operación minera. Dicho fondo de ahorro también puede incluir un fondo de garantía en caso de un cierre repentino.</p> |

De igual forma, durante la operación, se puede presentar un cierre repentino o cierre temporal, el cual se debe estimar con el objetivo de analizar las opciones disponibles y toma de decisiones. Los costos que forman parte son: obras de cierre, costos de reducción de personal, administración, estudios y costos de atención y mantenimiento asociados con el aplazamiento de las obras de cierre (ICMM, 2019). La estimación de costos también incluiría los costos posteriores al cierre, como los de mantenimiento y monitoreo.

Todo el presupuesto estimado, se actualiza con la información del cierre progresivo, logrando una caracterización con precisión de los costos reales, reduciendo los riesgos de estimaciones inexactas (ICMM, 2019), es decir, conforme se ejecuta el presupuesto estimado, se actualizan los costos estimados por los costos reales, y se hace una reevaluación exhaustiva de la proyección financiera actualizando los cambios sustanciales.

V.6.2 Proyectos que inician sin el plan de cierre

En este caso se integran los proyectos que han iniciado sin un plan de cierre, así como, los minas que han sido abandonadas sin la implementación de líneas de acción. En la figura 51, se presenta un diagrama que explica la forma de abordar dichos escenarios. La primera tarea radica en hacer una estimación de los costos con base en las líneas de acción que serán implementadas de acuerdo con las condiciones actuales del sitio. La estimación abarcará los costos de implementación y costos de monitoreo y

mantenimiento; estos costos al igual que en el caso pasado, será clasificados y cálculos de forma independiente.

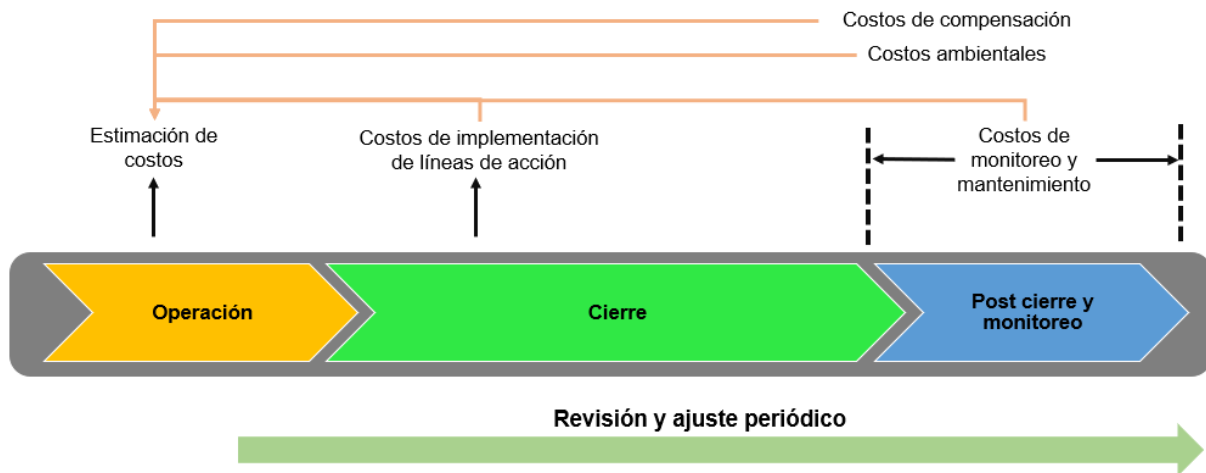


Figura 51. Caso 2 - Financiamiento del plan de cierre en proyectos que inician sin un plan.

Algunos otros costos asociados son los costos de compensación, que tienen por objetivo compensar a los grupos de interés internos y externos de los riesgos causados hasta ese momento por la actividad minera. De manera similar, se incorporan los costos ambientales, costos de indemnización por los posibles impactos ambientales provocados por el proyecto. Todo el presupuesto estimado se actualizará conforme avance la ejecución de las líneas de acción, realizando los ajustes con base en las condiciones cambiantes.

Este caso tiene la peculiaridad de estudiar a las partes interesadas que cubrirán el financiamiento del plan, estos pueden ser el gobierno, inversionistas externos, o bien, con los fondos proporcionados por las empresas mineras al inicio del proyecto.

V.7 Cierre temporal y cierre repentino

Las expectativas de un proyecto minero son operar interrumpidamente hasta la finalización de la extracción económica del mineral (ICMM, 2019), sin embargo, pueden presentarse una serie de escenarios inesperados que obliguen a la empresa a realizar un cierre temporal o repentino, generando implicaciones en la planeación del cierre de minas. Algunos de estos escenarios son:

- **Condiciones económicas:** fluctuaciones en los precios de los metales, ya que, cuando los precios son más bajos en el mercado, algunas minas se vuelven antieconómicas.
- **Acontecimientos ambientales:** eventos naturales como inundaciones o terremotos.
- **Acontecimientos sociales:** oposición durante la ejecución del proyecto, presiones sociales, grandes epidemias sanitarias o la seguridad.
- **Cambios en la política gubernamental:** cambios en el marco regulatorio.
- **Incidentes operativos:** fallas en las instalaciones y áreas operativas que alteren los elementos ambientales o trabajadores y comunidades.

En cada etapa de la vida de la mina, se recomienda contar con un plan de contingencia que aborde el cierre temporal y repentino, identificando las modificaciones que se realizarán al plan conceptual inicial, así como, integrar la estimación de costos que garantizará la ejecución de las actividades.

Para el caso del cierre temporal, la mina suspende sus actividades por un período limitado (ICMM, 2019), pero el sitio se mantiene con la intención de que las operaciones se reanuden cuando mejoren las condiciones (APEC, 2018). En la figura 52 se presenta un diagrama que resume las consideraciones y elementos que se integran en dicho plan de contingencia.

La principal dirección que toma la preparación del cierre temporal es el monitoreo y mantenimiento de la infraestructura, maquinaria, equipos y elementos ambientales que se encuentren en el proyecto o cerca del mismo. Se buscará evaluar constantemente las zonas para evitar la alteración de los sitios y desencadenar una posible contaminación. Normalmente se planifica un cierre temporal esperando que la operación se reanude, sin embargo, si las circunstancias son adversas para la reapertura, es recomendable implementar el plan inicial rehabilitando las áreas de trabajo (ANZMEC & Minerals Council of Australia 2000).

En el aspecto social, puede ser modificado el plan incluyendo actividades que beneficien a las comunidades durante este periodo, ya que, el personal requerido disminuye y en

muchos casos se desconoce el tiempo de cierre, por lo cual, se establecen actividades que diversifiquen la economía de la zona. De igual forma, es importante mantener la comunicación con los grupos de interés y actualizar sobre el estado de la mina.

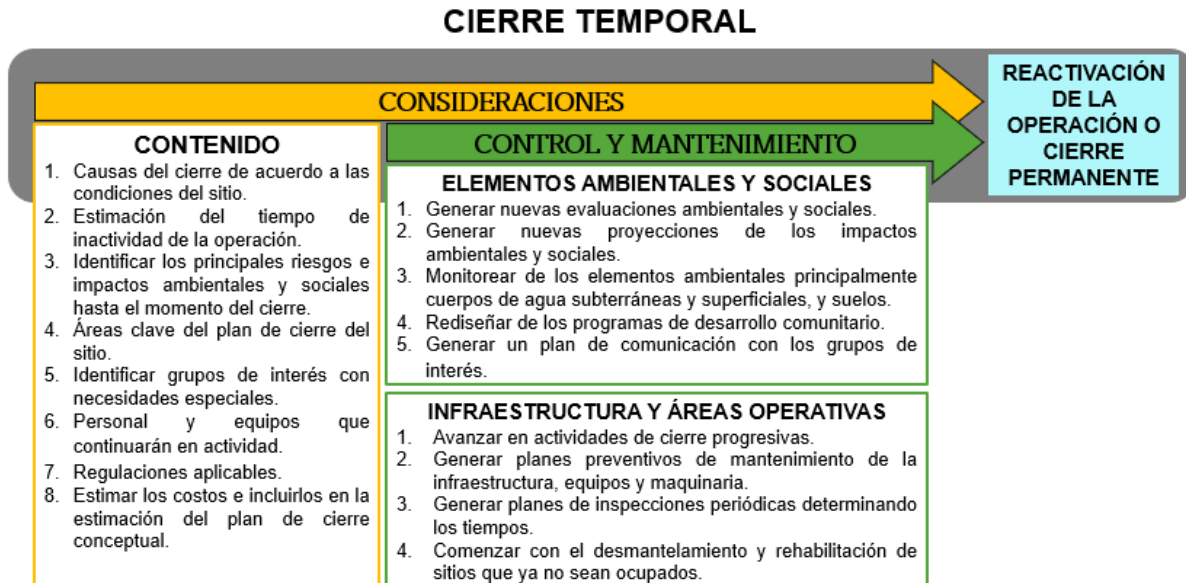


Figura 52. Elementos que deben integrarse al plan de contingencia para el caso del cierre temporal.

Para el caso del cierre repentino, la mina cesa definitivamente su operación antes de la fecha prevista originalmente, causando la implementación acelerada de las actividades originalmente planeadas (APEC, 2018; ANZMEC & Minerals Council of Australia 2000). Incluso cuando existe un plan conceptual, la mayoría de las minas no están bien preparadas para un cierre ordenado cuando las operaciones cesan repentinamente (Mining, Minerals and Sustainable Development [MMSD], 2002), por lo cual, de manera similar al caso anterior, se establece un documento que define el proceso para comenzar con el proceso de cierre, dicho documento será preparado e integrado al plan conceptual. En la figura 53 se describen algunos elementos que serán integrados.

El primer punto cubierto es el diagnóstico general para determinar las condiciones del sitio y del proyecto, debido a que, muchos de los estudios en progreso para respaldar el plan inicial puede que no estén completos, lo que obliga a analizar los impactos de los diseños de cierre. De igual forma, con la información obtenida se identifica la necesidad de replantear las líneas de acción y los objetivos específicos que se aplicarán a cada instalación y área de la unidad. Asimismo, la actualización se realizará para los programas de desarrollo comunitario estableciendo nuevos canales de comunicación.

Todos los cambios que se realicen van a implicar formular de nuevo la planeación de actividades considerando el personal responsable de ejecutar las obras, los recursos necesarios y los costos.

CIERRE REPENTINO

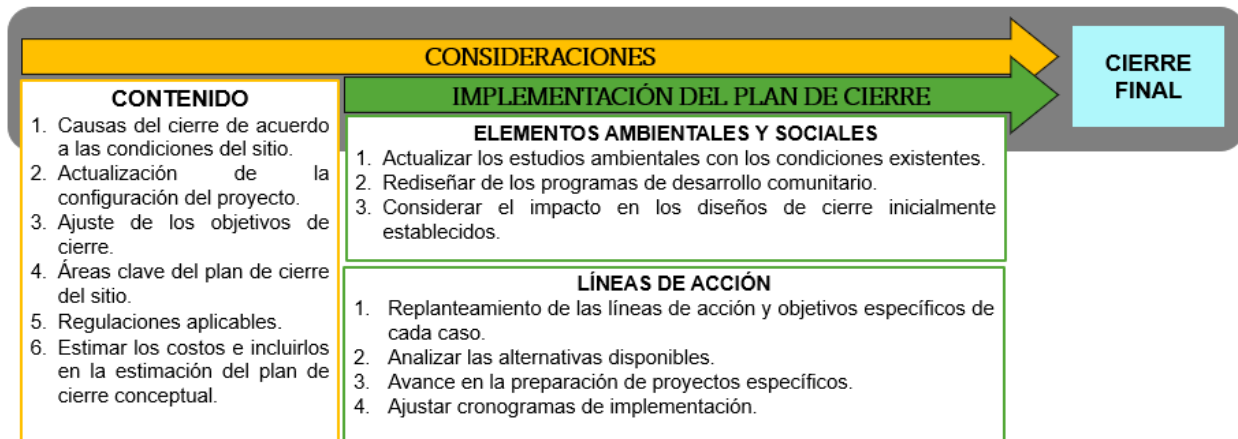


Figura 53. Elementos que deben integrarse al plan de contingencia para el caso del cierre repentino.

CAPÍTULO VI. POSCIERRE

VI.1 Monitoreo y mantenimiento

En la planificación del cierre, se debe prever un período adecuado de monitoreo y mantenimiento. El monitoreo es el proceso que se realiza para recolectar, analizar e interpretar la información del sitio con el objetivo de evaluar el progreso de las actividades de cierre (Australian Government, 2016). Por otra parte, la necesidad de mantenimiento reconoce que aún al realizar una buena planeación por lo general será necesario establecer alguna actividad correctiva que logre mantener la seguridad y no presente riesgos ambientales o de salud (ANZMEC, & Minerals Council of Australia, 2000). El mantenimiento es una actividad que se realizará en todas las líneas de acción, pero no con la misma intensidad, debido a que, van a existir casos donde se requiera una mayor atención con un plan más riguroso, por ejemplo, en los casos donde exista la presencia de agua ácida o para el seguimiento de los programas de desarrollo en las comunidades.

El enfoque del monitoreo y mantenimiento posterior al cierre es principalmente evaluar el desempeño y asegurar el éxito de la implementación de las líneas de acción, por lo cual, los programas generados para dicha etapa tomarán como base los datos obtenidos en los trabajos de seguimiento realizados durante la operación, ya que, con la información obtenida se puede determinar la adición o eliminación de ubicaciones de monitoreo, cambios en la frecuencia de medición, la posibilidad de agregar o eliminar tipos de monitoreo (ICMM, 2019) y las medidas de mantenimiento.

La duración requerida en ambos casos depende de las condiciones específicas del sitio, los requerimientos regulatorios y las características de las instalaciones y áreas operativas del proyecto, esperando que conforme se recopilen los datos y se documenten las tendencias se eliminen gradualmente los programas o la frecuencia de monitoreo o las actividades correctivas se minimicen (ICMM, 2019).

Para el caso del monitoreo, se debe abordar la estabilidad física, incluidos los efectos de las condiciones estáticas y dinámicas; la estabilidad química, que incluye las medidas de control de prevención, migración y tratamiento (UNEP, 1998); la estabilidad biológica, que incluye los impactos ambientales generados por las alternativas elegidas para la regeneración de los procesos biológicos. De igual forma, se debe integrar la estabilidad socioeconómica, que aborda la respuesta de los grupos de interés ante el cierre y la implementación de programas de desarrollo. Por ende, los objetivos del monitoreo se

clasificaron en 4 directrices: la estabilidad física, estabilidad química, estabilidad biológica y estabilidad socioeconómica.

De manera general, en la tabla 14, se exponen los objetivos que se persiguen en cada caso, ejemplificando en la tercera columna algunos de los sitios en los cuales se aplican:

Tabla 14. Objetivos y áreas por considerar en el monitoreo.

| ESTABILIDAD | OBJETIVOS | SITIOS POR CONSIDERAR |
|-----------------------------------|--|--|
| Estabilidad física | <ol style="list-style-type: none"> 1. Todas las estructuras restantes son físicamente estables, sostenibles frente a la erosión y seguras, y no imponen riesgos para la salud pública a largo plazo. 2. Las especificaciones consideradas para el diseño como los factores climáticos (precipitaciones, tormentas, extremos estacionales) y geográficos (proximidad a viviendas humanas, topografía, accesibilidad de la mina) son apropiados para las condiciones del sitio. 3. Las estructuras desempeñan las funciones para las que fueron diseñadas | <ol style="list-style-type: none"> a) Depósitos de residuos mineros que han sido rehabilitados b) Obras en minas subterráneas c) Obras en minas a cielo abierto d) Obras civiles que no se decidieron dismantelar para posterior uso |
| Estabilidad química | <ol style="list-style-type: none"> 1. Los diseños finales de cierre son químicamente estables y no imponen ningún riesgo para la salud pública o el medio ambiente en todas las fases de su ciclo de vida. 2. El cierre cumple con los requisitos específicos del sitio en términos de la calidad de las aguas superficiales, las aguas subterráneas y suelo. | <ol style="list-style-type: none"> e) Zonas en las cuales se realizó el dismantelamiento y fueron rehabilitadas |
| Estabilidad biológica | <ol style="list-style-type: none"> 1. El medio ambiente biológico se restaura a un ecosistema natural y equilibrado típico del área o se deja en tal estado que fomente y permita la rehabilitación natural de un medio ambiente biológicamente diverso y estable | <ol style="list-style-type: none"> a) Zonas en las cuales se realizó una rehabilitación mediante la revegetación y recolonización con especies autóctonas |
| Estabilidad socioeconómica | <ol style="list-style-type: none"> 1. La implementación de los programas de desarrollo comunitario tiende al éxito 2. El cierre apunta a asegurar la cantidad y calidad de los recursos naturales del sitio y la rehabilitación es tal que se optimiza el uso final de la tierra 3. Se asignan fondos disponibles adecuados y apropiados para el cierre 4. El cierre permite el uso productivo y económico de la tierra después de la operación siguiendo los principios del desarrollo sostenible | <ol style="list-style-type: none"> a) Grupos de interés externos como, las comunidades que dependían de la actividad en la mina b) Grupos de interés internos como, los trabajadores de la mina |

El tipo de monitoreo requerido se determinará de acuerdo con la naturaleza de cada caso específico del proceso minero y de las líneas de acción que se implementaron, poniendo principal atención a aquellos aspectos que representen un potencial problema en términos de seguridad o contaminación (Heikkinen, *et al.*, 2008). Por ejemplo, si se comprueba que las áreas de los terreros rehabilitados ya no representan algún riesgo de contaminación en los cuerpos de agua, puede ya no ser necesario mantener la calidad del agua en el sitio bajo estrecha vigilancia. En cambio, el programa de monitoreo puede enfocarse a la estabilidad física y biológica.

Algunos de los tipos de monitoreo descritos por la UNEP, (1998) que se pueden integrar al programa en la etapa de poscierre son:

- **Inspecciones visuales:** Observaciones cualitativas de las condiciones. Las inspecciones también incluyen mediciones cuantitativas simples, como el alcance la erosión o los cambios en la morfología y nivel de agua.
- **Levantamientos topográficos y muestreo:** Implica seleccionar un área de estudio y delimitar mediante un número de puntos para medir los parámetros físicos y químicos del sitio, para ello se realizan levantamientos topográficos o muestreos en agua y suelo.
- **Instrumentación:** Incluye equipos instalados para lectura periódica o instrumentación para recolección de datos remota, intermitente o continua, por ejemplo, el uso de piezómetros para el monitoreo de aguas subterráneas.

Todas estas alternativas se aplican de acuerdo con el contexto de una determinada área de seguimiento, evaluando específicamente los impactos ambientales y sociales de las líneas de acción. En las tablas 15 y 16 se presentan algunos ejemplos sobre la aplicación de los tipos de muestreo con base en algunos de los elementos típicos que se pueden monitorear en las áreas cerradas de un proyecto minero.

Es importante resaltar que las técnicas y métodos de muestreo aplicadas pueden cambiar conforme al paso del tiempo. Por ejemplo, en el caso de los taludes en una mina a cielo abierto, inicialmente se comienza realizando una inspección visual que consiste en tomar notas y fotografías, sin embargo, conforme avanza el tiempo se observa cierto agrietamiento por lo cual, se decide agregar un programa de instrumentación que incluye medidores de asentamiento e inclinómetros con el objetivo de determinar los riesgos en el talud. De manera similar se realizarán los ajustes en los demás casos de acuerdo con el cambio de condiciones que arrojen las medidas de monitoreo iniciales.

Tabla 15. Ejemplo de los posibles elementos a monitorear en las áreas cerradas de un proyecto minero.

| COMPONENTE | ÁREAS POTENCIALES | ELEMENTOS POR MONITOREAR | TIPO DE MONITOREO | | |
|-------------------------------|--|---|-------------------------------------|--|-------------------------------------|
| | | | Inspección visual | Levantamientos topograficos / Muestreo | Instrumentación |
| MINA SUBTERRÁNEA | Rebajes rellenados | <ul style="list-style-type: none"> • Condiciones del relleno • Si el relleno se hizo con agua, se debe evaluar la calidad y cantidad • Deterioro físico | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | Pilares corona | <ul style="list-style-type: none"> • Deterioro físico • Fracturas o grietas • Desplazamientos | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | Accesos sellados | <ul style="list-style-type: none"> • Deterioro físico • Agrietamientos • Deformaciones | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | Tratamientos de agua | | | | |
| | Puntos de descarga controlados | Calidad y cantidad | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| | Obras auxiliares cerradas | <ul style="list-style-type: none"> • Deterioro físico • Fracturas o grietas • Desplazamientos • Hundimientos | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | Flujos de agua naturales | <ul style="list-style-type: none"> • Nivel freático • Variaciones en el volumen • Composición química | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| MINA A CIELO ABIERTO | Taludes del tajo | <ul style="list-style-type: none"> • Condiciones geotécnicas • Deslizamientos • Erosión • Fallas o grietas | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | Infraestructura (caminos, bermas, etc) | | | | |
| | Relleno | <ul style="list-style-type: none"> • De acuerdo al tipo de relleno se debe de monitorear las condiciones biológicas y su interacción con el entorno • Condiciones físicas y químicas | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| | Agua | <ul style="list-style-type: none"> • Nivel freático • Precipitaciones • Variaciones en el volumen • Calidad • Condiciones de las aguas superficiales | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| DEPÓSITOS DE RESIDUOS MINEROS | TERREROS | <ul style="list-style-type: none"> • Erosión • Calidad del agua superficial y subterránea • Calidad del agua en puntos de descarga | | | |
| | PILAS DE LIXIVIACIÓN | <ul style="list-style-type: none"> • Caudal de agua • Precipitaciones • Fallas o agrietamientos • Eficiencia de obras hidráulicas • Desempeño de los materiales de cobertura | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| | PRESAS DE JALES | <ul style="list-style-type: none"> • Condiciones de la vegetación • Comportamiento de la fauna • Dispersión de polvos • Estética | | | |

Para el caso de los grupos de interés, la comunicación juega un papel importante aun cuando la operación ha cesado, debido a que, como se visualiza en la tabla 16, los indicadores que van a permitir medir el éxito de las medidas de cierre establecidas serán los grupos de interés que participan en su implementación y escuchar sus opiniones es el factor clave para finalizar la participación de la empresa.

Tabla 16. Continuación y descripción de los elementos a monitorear en los grupos de interés.

| COMPONENTE | ÁREAS POTENCIALES | ELEMENTOS POR MONITOREAR | TIPO DE MONITOREO | | |
|---------------------------|--|---|---|--|--------------------------|
| | | | Inspección visual | Levantamientos topográficos / Muestreo | Instrumentación |
| INFRAESTRUCTURA Y CAMINOS | Infraestructura y caminos desmantelados* | <ul style="list-style-type: none"> Desempeño de los materiales de cobertura Condiciones de la vegetación Erosión Comportamiento de la fauna | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | Infraestructura y caminos no desmantelados | <ul style="list-style-type: none"> Deterioro físico Condiciones de la infraestructura Condiciones de suelos Fugas de agua | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| GRUPOS DE INTERÉS | | <ul style="list-style-type: none"> Rendimiento de programas comunitarios Nivel de participación Capacidad para tomar decisiones Cambios de actitud Desarrollo de grupos Opiniones | <ul style="list-style-type: none"> Realizar entrevistas Documentar el nivel de participación en las actividades planeadas Realizar reuniones | | |

*En caso de implementar una alternativa de remediación se debe monitorear la eficiencia

Con toda la información obtenida en el seguimiento, se establecen los programas de mantenimiento que se llevarán a cabo. Algunas de las actividades comunes incluidas son la reparación de las áreas que se encuentren degradadas por la erosión, tratamiento de áreas donde los esfuerzos de vegetación no han tenido éxito, la reparación o reemplazo de señalización o controles de acceso y actividades correctivas al tratamiento de agua ácida. Igualmente, las áreas rehabilitadas pueden ser gestionadas como parte de las alternativas elegidas, esto podría incluir remoción y control de malezas (ICMM, 2019).

La duración del período de monitoreo también se abordará con base en las especificaciones de cada sitio (APEC, 2018), esperando que disminuya la frecuencia de seguimiento a medida que aumenta el tiempo posterior al cierre. En algunos casos, las características pueden requerir períodos permanentes o muy prolongados de monitoreo continuo. Este suele ser el caso de las configuraciones de cierre que incluyen grandes presas de retención de agua o que se encuentran en tratamiento activo de agua ácida (ICMM, 2019).

VI.2 Finalización

Las actividades de cierre se planean para cumplir con los objetivos específicos establecidos en la conceptualización del plan. La finalización de dichas actividades se logra al tener una ejecución efectiva, es decir, se obtiene el resultado esperado sin necesidad de continuar con el monitoreo y mantenimiento. Por lo cual, se deben establecer una serie de criterios que proporcionarán las especificaciones, medidas o requisitos ambientales, sociales y económicos que se deben cumplir, y así, determinar el momento exacto de finalización de cada línea de acción. Dichos criterios son denominados *criterios de finalización*, y son predefinidos desde el plan conceptual, siendo revisados y actualizados a lo largo del desarrollo y la operación del proyecto (ICMM, 2019; Australian Government, 2016). De igual forma, es una herramienta aplicable a la evaluación de las actividades progresivas con el fin de valorar el avance en el plan conceptual y la aceptación de las partes interesadas.

En la figura 53 se expone un ejemplo sobre la formulación de los criterios de finalización para una presa de jales, en el cual, se observa que la formulación de los objetivos específicos, el diseño de los criterios y los indicadores de desempeño deben estar estrechamente vinculados para producir éxito a largo plazo, ya que, los criterios se diseñan a partir de los objetivos específicos y el progreso de cada criterio se mide con los indicadores de desempeño.

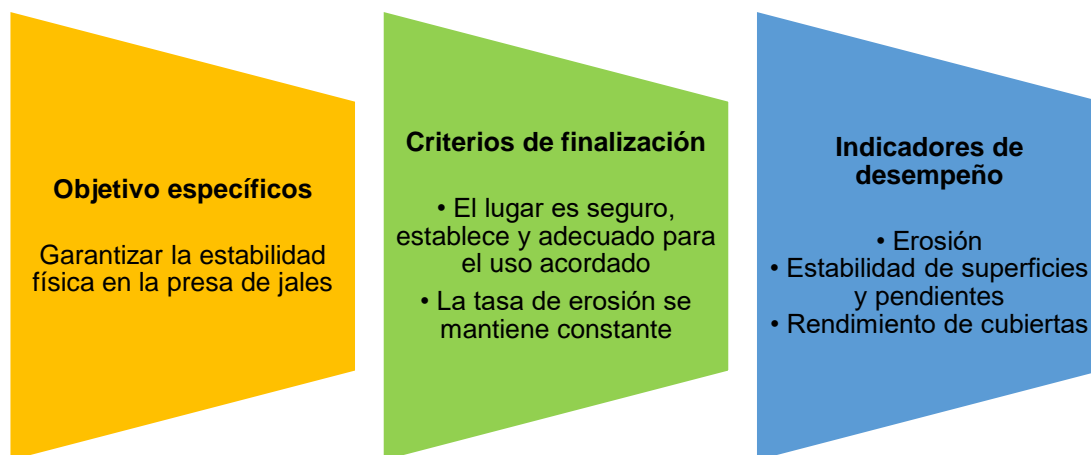


Figura 54. Relación entre los objetivos, criterios de éxito e indicadores de desempeño.

Para realizar los criterios se requiere realizar estudios y planes de investigación al inicio para definir las acciones de cierre como las alternativas de rehabilitación. También se debe asegurar la participación de la comunidad local y los reguladores para el acuerdo final sobre los usos futuros del sitio. De modo que, aunque los criterios son diseñados

para cumplir con los objetivos específicos, los cambios también pueden impulsar cambios en las actividades de cierre (ICMM, 2019).

VI.3 Renuncia

La renuncia de la concesión minera es la actividad que se lleva a cabo cuando el recurso económicamente explotable se ha agotado y se ha logrado el cierre exitoso (Australian Government, 2016). Este proceso ocurre cuando la propiedad puede devolverse a la jurisdicción correspondiente o al propietario original, en algunos casos también se transfiere a un tercero (ICMM, 2019), luego de completar las líneas de acción y satisfacer los criterios de éxito. A diferencia de los criterios de finalización, los criterios de éxito se consideran cumplidos cuando se cubren las siguientes directrices:

- Cumplir con los criterios de finalización ambientales, económicos y sociales.
- Garantizar que el sitio no deje responsabilidades ambientales o sociales a largo plazo.
- Reemplazar el activo del proyecto minero con beneficios sostenibles para la comunidad.
- Consultar con las partes interesadas como comunidades y gobierno local.

En la figura 54 se presenta un resumen de las consideraciones para la renuncia. Se plasma que una vez cumplidos los criterios de finalización se evalúa el éxito de las líneas de acción considerando los puntos descritos anteriormente.

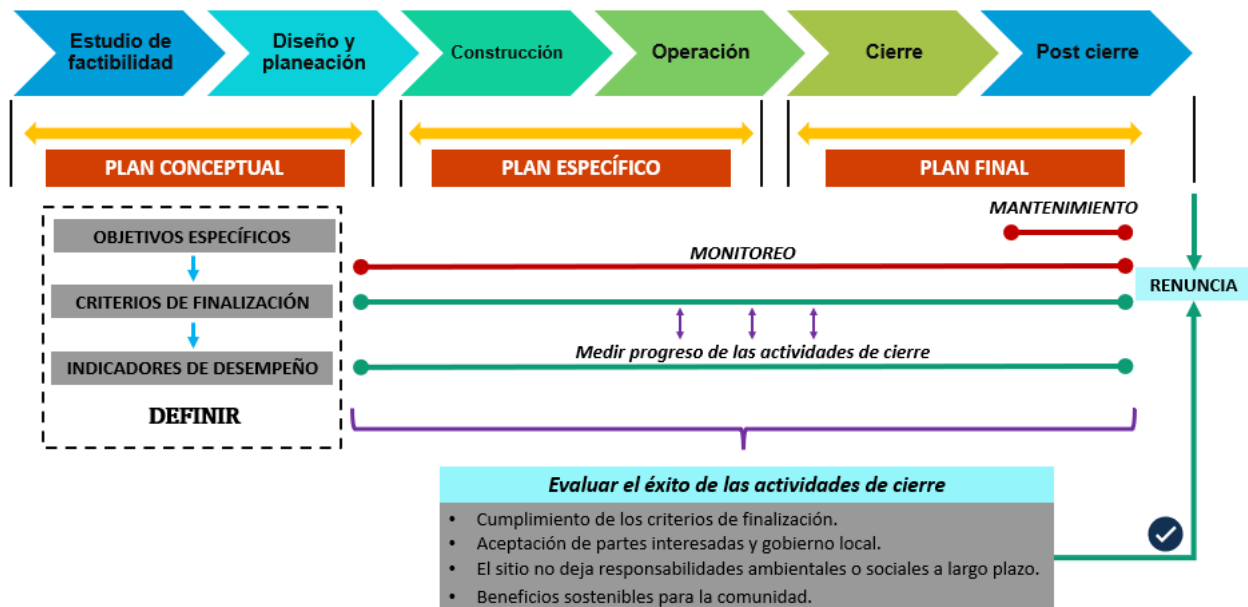


Figura 55. Consideraciones para la renuncia.



Las opciones disponibles para el uso del sitio posterior al proyecto juegan un papel importante en la cesión, ya que, es una oportunidad para hacer una renuncia parcial que consiste en definir la renuncia como un proceso gradual de acuerdo con las opciones de uso elegidas debido a que, como se analizó en el capítulo anterior los usos disponibles no serán homogéneos en todo el terreno del proyecto, por lo cual, serán estudiados y planeados con base en sus características propias. También es una oportunidad para que la comunidad participe activamente y brinde asesoramiento sobre si la empresa ha cumplido con todas las inquietudes de cierre de la comunidad planteadas durante la duración del proyecto. (Australian Government, 2016).

CONCLUSIONES

La investigación realizada, para elaborar esta tesis, permitió desarrollar un instrumento que expone los elementos clave que se integran a la planeación del cierre de minas partiendo del nivel conceptual y dirigiendo el trabajo hacia la planeación específica de las líneas de acción. La construcción del plan es un proceso dinámico que requiere un trabajo continuo por parte de las empresas y grupos de interés.

En la elaboración, fue posible identificar y analizar las estrategias aplicables en cada línea de acción de acuerdo con los tipos de cierre y las condiciones ambientales, sociales y económicas del sitio. Se destaca que conocer el estado inicial y características del proyecto es una actividad determinante para comenzar con la conceptualización del cierre, ya que, se analizan los impactos negativos y positivos ocasionados por la mina y se establecen las líneas aplicables para la posterior rehabilitación de las zonas ocupadas por las instalaciones y áreas operativas. De igual forma, se establecen indicadores que servirán para medir el rendimiento de las actividades durante su ejecución y así, hacer las actualizaciones y correcciones necesarias.

En la conceptualización se estructura una visión general de los puntos que lo conforman, partiendo con los objetivos generales que encaminarán el plan y, comenzando con el planteamiento de las líneas de acción, sus objetivos específicos y actividades. Aun cuando la descripción se realiza de manera general por el nivel de información que se tiene, será necesario examinar a profundidad las alternativas que están disponibles y que pueden ser aplicadas, puesto que, con base en su selección se inicia con la planeación específica.

La configuración final de los planes específicos contiene la propuesta de formulación y de los elementos que lo conforman. Se estimó a partir de analizar diversos instrumentos internacionales y de estudiar el nivel técnico que requiere la ejecución de las líneas de acción. El resultado arroja la serie de componente que serán desarrollados durante la planeación, entre ellos están los tiempos y secuencia, recursos, presupuestos, indicadores y un análisis de la implementación progresiva de las actividades de cierre.

Se exponen los procesos que continúan en la etapa de poscierre: monitoreo y mantenimiento. Estos se deben desarrollar en todo el sitio, pero tomando en cuenta que el período de ejecución cambia de acuerdo con el nivel de estabilidad alcanzado en cada elemento del proyecto. Además, estas actividades otorgan la evaluación final y definen si el plan de cierre ha finalizado y es posible pasar a la etapa de renuncia del sitio.

Con la elaboración de esta tesis se puede concluir que establecer una política de cierre de minas práctica y eficaz para todos los casos es una tarea complicada y laboriosa, sin embargo, en la propuesta se observa que sí es posible realizar instrumentos apegados a los lineamientos dictados por las regulaciones nacionales e internacionales y, que son adaptables tanto a proyectos nuevos, como a proyectos que han arrancado o que se encuentran abandonados.

Este trabajo, más allá de plantear una herramienta para realizar un plan de cierre aporta elementos que, pueden sentar las bases para la creación de una política pública mexicana en materia de cierre de minas que establezca un instrumento sobre cómo elaborar y ejecutar la planeación del cierre, y en el cual sea integrada la parte social, ya que, como se analizó a lo largo de este documento, México carece de una regulación sólida que aborde la formulación e implementación de las actividades que deben llevarse a cabo al concluir la operación.

Si bien, este documento establece una ruta que va de lo general a lo particular, se espera que las empresas adopten y lleven a la práctica el cierre progresivo integrando su ejecución durante la operación y fomentando la participación de las comunidades anfitrionas y gobierno. Planear con antelación el cierre brinda a las empresas una buena imagen y aumenta la confianza de las comunidades, puesto que, al avanzar en el plan durante la producción de la mina se está cumpliendo con lo establecido. También, se logra evitar y minimizar los posibles impactos ambientales.

Finalmente, esta tesis abre nuevas áreas de oportunidad para desarrollar mayor conocimiento sobre las metodologías aplicadas para comenzar anticipadamente la planeación progresiva del cierre de minas, así como, el estudio de las alternativas aplicadas para asegurar la estabilidad física y química, el desarrollo de las comunidades, los usos del sitio después de la minera y su sostenibilidad a largo plazo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alba, G., Cervantes, J., Alvidrez, R. (2014). *Sondeo e inyección -Aplicación en Minera Maple, Unidad Naica*. Geomimet (308). 27-36.
- Alvarado, N., Carrión, P., Saeteros, M., Olivio, S. (2018). *Propuesta metodológica de recuperación de espacios mineros para el desarrollo de comunidades*. Ecuador. 16-19.
- Andrews, N. (2019). *Gold Mining and the Discourses of Corporate Social Responsibility in Ghana*. Palgrave, MacMillan. Canada. 1 - 25.
- Anglo American, (2013). *Guía para cierre de faenas mineras*. Versión 2.
- Asia-Pacific Economic Cooperation [APEC], (2018). *Mine Closure Checklist for Governments*. Recuperado de <https://www.apec.org/publications/2018/03/mine-closure---checklist-for-governments>
- Australian and New Zealand Minerals and Energy Council [ANZMEC] & Minerals Council of Australia, (2000). *Strategic Framework for Mine Closure*. Australia.
- Australian Government, (2016). *Rehabilitación de minas*. Programa de Prácticas Líderes (Leading Practice) para el Desarrollo Sostenible de la Industria Minera. Australia.
- Australian Government, (2016). *Cierre de minas*. Programa de Prácticas Líderes (Leading Practice) para el Desarrollo Sostenible de la Industria Minera. Australia.
- Ávila, L. (2014). *La industria Minera de México y su Normatividad Ambiental*. Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas. Semarnat. Ciudad de México.
- Brennan, K., Majer, J. y Nichols, O., 2005. *Innovative Techniques for Promoting Fauna Return to Rehabilitated Sites Following Mining*. Australian Centre for Minerals Extension and Research (ACMER), Brisbane and Minerals and Energy Research Institute of Western Australia (MERIWA Report 248), Perth, 14-19 pp.
- Bruns, C. & Church J. (2018). *Managing the social impacts of mine closure*. Canadian Mining Journal. Vol 139, No. 06.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], (2020). *Documentos de proyectos, estudios e investigaciones*. Recuperado de <https://www.cepal.org/es/publicaciones/46532-guia-metodologica-cierre-minas> el 10 de junio de 2021.

- Cobos, A., Tarango, R. (2020). *Problema jurídico social del cierre de minas en México*. Actualidad Jurídica Ambiental, (104), Sección “Comentarios”. ISSN: 1989-5666; NIPO: 832-20-001-3
- Cowan, W., Mackasey, W., Robertson, J. (2010). The policy framework in Canada for mine closure and management of long-term liabilities a guidance document. National Orphaned/Abandoned Mines Initiative.
- Department of Industry, Science, Energy and Resources [DISER], (2011). Recuperado de <https://www.industry.gov.au/publications/leading-practice-handbooks-sustainable-mining> el 11 de junio de 2021.
- Environmental Law Alliance Worldwide [ELAW], (2010). *Guía para evaluar EIAs de proyectos mineros*. 1ra Ed. USA.
- EPA, (2000). *Abandoned mine site characterization and cleanup handbook*. EPA 910-B-00-001.
- FAO, (2003). *Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable*. Recuperado de [Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable \(2003\). Texto consolidado. | FAOLEX](#) el 09 de agosto de 2021.
- Franco, P., Angulo, M., Cáceres, R., Yamashiro, I., (2011). *Tratamiento contable de la provisión por cierre de minas*. ISSN: 2078—9424. Vol. 3(1).
- Fundación Chile (FCH), (2015). *Manual de tecnologías de remediación de sitios contaminados*. Chile.
- Garmedia, A, Salvador, A., Crespo, C., Garmedia, L. (2005). *Evaluación de impacto ambiental*. Pearson Educación, S.A. Madrid, España. 27-52, 111-163, 187-189, 226-228.
- Gobierno de la Rioja, (2022). *Revegetación / Reforestación*. Logroño. Revisado el 20/04/2022. Recuperado de: <https://www.larioja.org/larioja-client/cm/industria-energia/tkContent?locale=es&idContent=851342>.
- Heikkinen, P., Noras, P., Salminen, R. (2008). *Mine closure handbook*. Geological Society of Finland. ISBN: 978-952-217-055-2
- Hockley, D., Hockley, L. (2015). *Some histories of mine closure, the idea*. InfoMine. Canada. ISBN 978-0-9917905-9-3.
- Ighalo, J., Kurniawan, B., Iwuozord, K., Aniagor, C., Ajala, O., Oba, S., Iwuchukwua, F., Ahmadi, S., Igwegbe, C., (2021). *A review of treatment technologies for the*

- mitigation of the toxic environmental effects of acid mine drainage (AMD)*. Process Safety and Environmental Protection. 157. Elsevier B.V. 37-58.
- Intergovernmental Forum [IGF], (2021). Políticas sobre cierre de minas en América del Sur. The International Institute for Sustainable Development.
- International Council on Mining and Metals [ICMM], (2012). *Community Development Toolkit*.
- International Council on Mining and Metals [ICMM], (2015). *A practical guide to catchment-based water management for the mining and metals industry*.
- International Council on Mining and Metals [ICMM], (2019). *Integrated mine closure. Good Practice Guide, 2nd Edition*.
- Instituto de Derecho Ambiental de Honduras [IDAMHO], (2012). *La mina San Martín en el Valle de Siria. Exploración, explotación y cierre: impactos y consecuencias*. San Ignacio, Honduras.
- International Network for Acid Prevention [INAP], 2012. *Guía Global de Drenaje Ácido de Roca*. Revisado de: <http://www.gardguide.com/index.php/Resumen>.
- ISO, (2013). *ISO/TC 82/SC 7, Mine closure and reclamation management*. Recuperado de [ISO - ISO/TC 82/SC 7 - Mine closure and reclamation management](#).
- Jiménez, C., Huante, P., Rincón, E., (2006). *Restauración de minas superficiales en México*. SEMARNAT.
- Johnson, D., Hallberg, K., (2005). *Acid mine drainage remediation options: a review*. Process Safety and Environmental Protection. 338. 3-14.
- Julca, (2021). Evaluación de riesgos en el cierre de minas. Curso de cierre de minas. Recuperado de <https://minsus.net/minsus-bgr-y-cepal-realizan-exitoso-curso-de-cierre-de-minas-dirigido-a-funcionarios-publicos-de-la-region-andina/>
- Kelleher, E. & Thurber, M. (2020). *Planificación de cierre de Minas*. Revista Opimina
- Kaupilla, P., Räisänen, M.L. & Myllyoja, S. 2011. *Best Environmental Practices in Metal Ore Mining*. Finnish Environment 29 en/2011. p. 35.
- Laurence, D. (2006). Optimisation of the mine closure process. *Journal of Cleaner Production*, 14. Australia. Elsevir, pp.285-298.
- LEY DE AGUAS NACIONALES. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 1º de diciembre de 1992

- LEY GENERAL DE VIDA SILVESTRE. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 3 de julio de 2000
- LEY GENERAL DE DESARROLLO FORESTAL SUSTENTABLE. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 5 de junio de 2018
- LEY GENERAL DE EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE [LGEEPA]. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 28 de enero de 1988
- LEY GENERAL PARA LA PREVENCIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 18 de enero de 2021.
- LEY MINERA. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 26 de junio de 1992.
- Ley N° 28090 - LEY QUE REGULA EL CIERRE DE MINAS. (14.10.2003).
- Mining, Minerals and Sustainable Development [MMSD], (2002). *Mining for the Future Appendix B: Mine Closure Working Paper*. 34.
- Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles [MERN], (2017). *Guidelines for Preparing Mine Closure Plans in Québec*. Gouvernement du Québec. ISBN: 978-2-550-79804-0
- Ministerio de Producción y Trabajo de la Nación, (2019). *Guía de recursos de buenas prácticas para el cierre de minas*. Dirección Nacional de Producción Minera Sustentable. Argentina.
- Ministerio del Ambiente, (2021). *Guía para la evaluación de sitios contaminados y la elaboración de planes dirigidos a la remediación*. Perú.
- Morales, L., Hantke, M., 2020. *Guía metodológica de cierre de minas*. CEPAL.
- Moreno, J. (2017). *Análisis comparativo de métodos de la Evaluación de Impacto Ambiental*. Ciudad de México; Tesis profesional, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM.
- Mroueh, U., Juvankoski, M., Kaartinen, T., Ylijoki, J., Merta, E., Mäkinen, J., Niemeläinen, E., Punkkinen, H., Wahlström., (2022). *Management of soil contamination at mine áreas*. VTT Technical Research Centre of Finland Ltd. Finland.
- Newmont, (2017). *Mina Marlin cierra operación subterránea*. Revisado el 05 de enero de 2022 de: <https://newmont-marlin.com/mina-marlin-cierra-operacion-subterranea/>
- Ochoa, E. (2006). *Comparación teórica de los diferentes métodos de Evaluación de Impacto Ambiental*. Ciudad de México; Tesis profesional, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM.

- Ospina, E. & Molina, J. (2013). *Legislación colombiana de cierre de minas. ¿Es realmente necesario?* Universidad de Colombia. Boletín de Ciencias de la Tierra. N. 34. 51-62.
- Punkkinen, H., Räsänen, L., Mroueh U., Korkealaakso, J., Luoma, S., Kaipainen, T., Backnäs, S., Turunen, S., Hentinen, K., Pasanen, A., Kauppi, S., Vehviläinen, B., Krogerus, K. (2016). *Guidelines for mine water management*. VTT Technical Research Centre of Finland Ltd. Finlandia. pp. 14-27, 125, 135.
- Sánchez, E., Silva-Sánchez, S., Neri, A., 2015. *Guía para la Planificación del Cierre de Mina*. Brasíla: Instituto Brasileiro de Mineração.
- Semarnat, 2004. *NOM-141-SEMARNAT-2003, Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales*, Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, DOF del 13 de septiembre de 2004.
- Semarnat, 2011. *NOM-157-SEMARNAT-2009, Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros*, Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, DOF del 30 de agosto de 2011.
- Servicio Nacional de Geología y Minería [SERNAGEOMIN], (2014). *Guía de metodológica de evaluación de riesgos para el cierre de faenas mineras*. Versión 1. Santiago, Chile.
- Schor, J. & Gray, D., (2007). *Landforming: an environmental approach to hillside development, mine reclamation and watershed restoration*. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey.
- Silva, L. & Sánchez, M. (2022). *Cierre de minas y abandono de sitios mineros en México: ¿un proceso “normal”?* *Referencias al norte de México. Investigaciones geográficas*, (106), e60426. 06 de junio de 2022. <https://doi.org/10.14350/riq.60426>
- Spitz, K. & Trudinger, J., 2009. *Mining and the environment from ore to metal*. 1st ed. Leiden: CRC Press.
- Suthersan, S., Horst, J., Schnobrich, M., Welty, N., McDonough, J., 2017. *Remediation Engineering, Design concepts*. Second Edition. Taylor & Francis Group. 27-28.
- Tarango, R. & Cobos, A. (2020). *Problemática jurídico social del cierre de minas en México. Actualidad Jurídica Ambiental*, N. 104. 1 – 19. ISSN: 1989-5666



- Turunen, K. & Hentinen, K. (2022). *Closure technologies / Water management*. Geological Survey of Finland. P.O. Box 1237. FI-70211 Finlandia. Recuperado de: <https://mineclosure.gtk.fi/closure-technologies-water-management/>
- United Nations Environment Programme [UNEP], (1998). *Mine Rehabilitation for Environment and Health Projection*. 1ra Ed.
- U.S. Government, (2021). *Surface Mining Control and Reclamation Act of 1977 [SMCRA]*.
- Vivoda, V. & Fulcher, J. (2017). *Remediation, Rehabilitation and Mine Closure*. Mining Legislation Reform Initiative. Working Paper 2. Armenia.
- Witker, J. (2019). *Derecho Minero*. Instituto de Investigaciones Jurídicas, UNAM. ISBN 978-607-30-2179-1
- Yakovleva, N., 2005. *Corporate Social Responsibility in the Mining Industries*. 1st ed. Routledge.
- Younger, P., Banwart, S. y Hedin, R. (2002). *Mine Water: Hydrology, Pollution, Remediation*. Netherlands: Springer.