Metodología estándar para el desarrollo de programas de codisposición de relave y desmonte de mina

Mark Rizzuto, WSP Perú

Abstract

La codisposición consiste en almacenar conjuntamente los relaves y el desmonte de mina en una misma instalación y ofrece varias ventajas potenciales frente a los métodos convencionales de disposición de residuos mineros. Entre ellas destacan un uso más eficiente del espacio disponible, una mayor estabilidad geotécnica en comparación con los depósitos de relaves convencionales, una mejor calidad del agua de infiltración respecto a los botaderos de desmonte, una mayor recuperación de agua y otros beneficios operacionales y ambientales. En los últimos años, el interés por las tecnologías de codisposición ha aumentado significativamente en la industria minera. Sin embargo, aún no existe una metodología estandarizada que permita desarrollar y evaluar estas iniciativas de manera sistemática, desde la etapa conceptual hasta su implementación operacional.

Este articulo propone una metodología para el desarrollo de programas de codisposición de relaves y desmonte de mina, estableciendo una secuencia ordenada de etapas e hitos de decisión a lo largo del ciclo del proyecto. La metodología se centra en los aspectos técnicos y plantea un enfoque multidisciplinario que integra las disciplinas de procesos, geotecnia y geoquímica mediante campañas de ensayos adaptadas al nivel de desarrollo de cada fase del proyecto. El enfoque propuesto proporciona un marco estructurado para el desarrollo de programas de codisposición, permitiendo que las compañías mineras evalúen esta tecnología de manera sistemática y adopten decisiones informadas que conduzcan a soluciones eficientes y costo-efectivas.

1) Introducción

Los estudios de manejo de residuos mineros suelen emplear análisis multicriterio para comparar tecnologías y ubicaciones en proyectos nuevos o ampliaciones. La codisposición figura cada vez con mayor frecuencia entre las alternativas. Comprende distintas modalidades de disposición conjunta de relaves y roca de desmonte, con diferentes grados de mezcla. La modalidad conocida como commingling exige el mayor grado de mezclado.

La codisposición puede reducir o eliminar las lagunas de los depósitos de relaves durante la operación y el cierre. Los relaves pueden ocupar los vacíos de la roca de desmonte y reducir el volumen de almacenamiento requerido. La deshidratación permite recuperar más agua. Otros beneficios posibles incluyen mayor estabilidad geotécnica, menores volúmenes de filtración o mejor calidad de esas aguas, y menores costos de tratamiento a

largo plazo. Algunas mezclas también pueden servir como coberturas económicas y de menor huella de carbono para botaderos de desmonte o depósitos de relaves.

Tabla 1: Formas de codisposicón (Wickland et al., 2006)

Método de co-disposición	Grado de mezcla
Mezclas homogéneas (commingling): La roca de desmonte y los relaves se mezclan para formar una masa homogénea; las subcategorías incluyen: • Mezclas dominadas por el relave • Mezclas dominadas por el desmonte	Alto
Codisposición por bombeo: Los materiales gruesos y finos se transportan mediante bombeo hacia depósitos de almacenamiento para su disposición.	
Commingling en capas (*layered commingling*): Capas alternadas de roca estéril y relaves.	
Relaves depositados en celdas conformadas por desmonte	
Desmonte depositado en un depósito de relaves	
Relaves depositados en un botadero de desmonte	
Desmonte y relaves depositados en la misma depresión topográfica	Bajo

Cuando la codisposición resulta preferente, la empresa minera necesita establecer su viabilidad para obtener permisos y financiamiento e implementar el sistema. La limitada experiencia operativa dificulta este proceso. Este artículo presenta un programa escalonado para desarrollar e implementar la codisposición como una tecnología de gestión de residuos mineros. El programa incluye cinco fases con puntos de decisión y requisitos de datos para respaldar cada decisión, además de criterios para definir el éxito o la falla: 1) Identificación y selección preliminar de alternativas de codisposición, 2) Desarrollo conceptual y análisis comparativo, 3) Diseño de prefactibilidad, 4) Diseño de factibilidad, y 5) Ingeniería básica y de detalle.

2) Fase 1 Identificación y selección preliminar de alternativas

La fase 1 define los objetivos y las alternativas que podrían cumplirlos. Comprende una revisión de antecedentes, un taller de identificación de alternativas, una evaluación preliminar y un segundo taller para acordar cuáles seguirán en estudio. Utiliza información y bibliografía existentes. No contempla nuevos ensayos.

La revisión inicial establece los motivos para considerar la codisposición, los límites de batería, las áreas disponibles y las restricciones de permisos. La caracterización

geotécnica y geoquímica existente permite evaluar inicialmente los materiales. Los planes de minado aportan sus tipos, cantidades y programas de producción durante la vida de la mina. Los estudios previos permiten identificar conceptos prometedores y vacíos de información.

En el primer taller, la empresa minera y los especialistas confirman los objetivos y registran en una matriz las combinaciones de deshidratación, ubicación, modalidad de codisposición, transporte y colocación. Participan representantes de la empresa minera que conozcan el plan de minado, los aspectos ambientales sensibles, y las otras restricciones que existen junto con los especialistas en geotecnia, geoquímica, procesos, medio ambiente y permisos que revisaron los antecedentes.

El taller establece los criterios de selección preliminar. Pueden descartar una alternativa la incompatibilidad entre los programas de producción de relaves y roca de desmonte, el remanejo excesivo, las restricciones operativas o la baja probabilidad de obtener el permiso ambiental. Estas limitaciones deben detectarse antes de invertir en diseño o ensayos.

La comparación considera la capacidad de almacenamiento de relaves, la posibilidad de evitar o postergar un nuevo depósito, el orden de magnitud de los costos y los usos alternativos de los materiales. La recuperación de agua, la estabilidad sísmica y los efectos ambientales se evalúan cualitativamente. La codisposición puede generar drenaje ácido de roca o lixiviados con altas concentraciones de metales. Si la escorrentía o las filtraciones requieren captación y tratamiento, deben incluirse los costos de inversión y operación correspondientes.

En el segundo taller, los participantes revisan los resultados y ajustan los criterios y sus ponderaciones para acordar una lista reducida de alternativas viables. Las incertidumbres y los vacíos de información deben quedar explícitos para orientar los estudios posteriores. En el hito de decisión 1, la empresa minera define qué alternativas pasan al desarrollo conceptual.

3) Fase 2 Desarrollo conceptual y análisis comparativo

La fase 2 desarrolla diseños conceptuales e inicia los ensayos básicos de laboratorio. El equipo evalúa la justificación técnico-económica de las alternativas y su correspondencia con los objetivos del proyecto, mediante una comparación con el caso base de manejo de relaves y roca de desmonte.

Cada alternativa requiere el desarrollo de planos de infraestructura, un balance de masas para toda la vida de la mina, y un diagrama de flujo del proceso. El plan de manejo de materiales abarca la deshidratación, el transporte, el mezclado cuando corresponda y la colocación final. La selección y las especificaciones preliminares de los equipos complementan los análisis de estabilidad geotécnica. La información climática y un

balance hídrico inicial permiten estimar los volúmenes de escorrentía y filtración. La primera evaluación de la composición química de estas aguas utiliza propiedades supuestas de los materiales, que luego se ajustan con los resultados de laboratorio.

Investigaciones básicas de laboratorio

Esta es la primera fase del programa, que dará inicio a una nueva campaña de ensayos de los relaves y el desmonte. Los ensayos geoquímicos analizan cada material por separado, pues en esta etapa normalmente aún no se han definido las mezclas. El programa incluye balance ácido-base, pH de generación neta de ácido y composición química del lixiviado, análisis elemental de roca total mediante digestión ácida y mineralogía semicuantitativa por difracción de rayos X con refinamiento de Rietveld. Los ensayos de lixiviación en frasco agitado o mediante precipitación sintética evalúan el comportamiento de lixiviación. Los ensayos normalizados en celdas de humedad (HCT, por su sigla en inglés), los ensayos cinéticos de gran diámetro (LDKT), o ambos, aportan información cinética.

La investigación geotécnica comprende propiedades índice, densidad, granulometría y conductividad hidráulica. Los ensayos de corte directo y triaxiales evalúan la resistencia con un tamaño máximo de partícula de 25 mm. También pueden realizarse pruebas de mezclas cuando los resultados de la selección preliminar lo justifiquen. Los ensayos de procesos caracterizan los relaves y evalúan la sedimentación estática y dinámica, la selección de floculantes, la reología, el asentamiento y el desempeño de la filtración. Estos resultados proporcionan una base inicial para seleccionar los métodos de manejo de materiales y deshidratación.

Los ensayos cinéticos deben comenzar temprano. Los HCT y LDKT pueden superar las 40 semanas, más que muchos ensayos geotécnicos y de procesos. Iniciarlos con roca de desmonte y relaves por separado al comienzo de la fase 2 permite incorporar resultados al diseño de mezclas y a la evaluación ambiental.

El LDKT es un procedimiento no normalizado que emplea una muestra mayor y admite una distribución granulométrica más heterogénea que el HCT convencional. El LDKT propuesto utiliza aproximadamente 25 kg de muestra con partículas de roca de desmonte menores de 25 mm, frente a aproximadamente 1 kg y partículas menores de 6,3 mm en el HCT. Estas diferencias pueden hacerlo más representativo del comportamiento de los materiales en codisposición, incluidas las mezclas que se evaluarán en fases posteriores.

Comparación de conceptos e hito de decisión 2

Los resultados de laboratorio sustentan modelos hidrológicos, hidrogeológicos y geoquímicos iniciales de los volúmenes y la composición química de la escorrentía y las filtraciones. Las predicciones orientan el diseño de las pruebas de campo, la instrumentación de caudales y el dimensionamiento de drenajes, y pueden apoyar sus

solicitudes de permisos. Las observaciones posteriores permitirán calibrar y validar los modelos.

Las plantas piloto y las pruebas de campo deben esperar hasta la fase 3, cuando los resultados de laboratorio hayan acotado las alternativas. La fase 2 entrega diseños conceptuales con una estimación de costos de clase 5, o equivalente, y un análisis de costos y beneficios frente al caso base. En el hito de decisión 2, la empresa minera selecciona una o más opciones para prefactibilidad o detiene el programa.

4) Fase 3 Diseño de prefactibilidad

La fase 3 desarrolla las alternativas restantes hasta poder seleccionar un único sistema. Los resultados de la fase 2 sustentan los criterios preliminares, las configuraciones de las instalaciones, las capacidades y el manejo de materiales. Los ensayos avanzados, la planta piloto y las pruebas de campo evalúan el desempeño en condiciones representativas del sitio.

Ensayos de mezclas y procesos piloto

Las pruebas de mezclas identifican primero las composiciones que los equipos propuestos pueden transportar y colocar. El programa geotécnico avanzado caracteriza luego estas mezclas, incluida su línea de estado crítico, su respuesta en ensayos triaxiales de gran escala y su comportamiento frente a la licuación. Se recomiendan ensayos triaxiales con probetas de 1 m de diámetro y un tamaño máximo de partícula de 180 mm, así como ensayos en centrífuga bajo carga dinámica con un tamaño máximo de partícula de 25 mm. La investigación geoquímica incorpora LDKT de mezclas de codisposición con un tamaño máximo de partícula de roca de desmonte de 25 mm, además de ensayos estáticos de confirmación mediante balance ácido-base y mineralogía.

La planta piloto evalúa los procesos individuales a escala reducida. Por lo general, la deshidratación, el mezclado y el transporte operan de forma independiente para determinar el desempeño y las limitaciones de cada proceso. Las pruebas de deshidratación establecen las tasas de producción alcanzables, los contenidos de sólidos alcanzables para cada tipo de relave y el costo de producir el material requerido. Cuando la alternativa contempla mezclado, los ensayos permiten seleccionar los métodos y los equipos adecuados. Las pruebas de transporte y colocación evalúan cómo se desplazará el material por el sistema hasta llegar al área de disposición.

Comportamiento en campo y monitoreo a largo plazo

Las pruebas de campo evalúan el apilamiento, la segregación durante la colocación, la susceptibilidad a la erosión y la transitabilidad en las condiciones del sitio. También estudian el movimiento del agua y el comportamiento geoquímico a escalas mayores que las del laboratorio. Entre las configuraciones posibles se encuentran pilas de prueba de

aproximadamente 5 m de altura, 25 m de largo y 25 m de ancho sobre un lisímetro, o mesocolumnas de unos 6 m de altura y 1,5 m de diámetro. En climas áridos, el riego permite generar percolación cuando las condiciones naturales limitarían la obtención de muestras. La instrumentación registra la evolución del balance hídrico y los perfiles de presión de poros, oxígeno, succión y humedad del suelo. Los sistemas de muestreo recogen aguas de escorrentía y percolación para su análisis químico.



Figura 1: Mesocolumnas con mezclas de relave y desmonte de mina (Wickland et al., 2006)



Figura 2: Pilas de prueba de relaves deshidratados con desmonte de mina (Castendyk et al., 2022)

Los ensayos geoquímicos en barriles expuestos a la intemperie ofrecen una forma sencilla y económica de estudiar mezclas adicionales y compararlas con roca de desmonte y relaves por separado. Las pruebas propuestas utilizan barriles de 200 litros, con y sin riego. El riego puede acelerar las reacciones geoquímicas, mientras que los barriles sin riego reflejan las condiciones meteorológicas del sitio. Estos ensayos facilitan la comparación entre escalas y permiten evaluar una mayor variedad de materiales que las pilas de prueba por sí solas.

Las pilas de prueba, columnas y barriles deben ocupar lugares donde las operaciones y el ascenso del nivel de agua del depósito de relaves no los afecten durante al menos cinco años. Los registros prolongados aumentan su valor geoquímico y ambiental. La selección de la ubicación debe resolverse durante la planificación inicial.

La planta piloto puede suministrar materiales para las pruebas de campo. Si su capacidad resulta insuficiente, pueden emplearse materiales que simulen los relaves y la roca de desmonte previstos. El plan debe definir su procedencia antes de construir las instalaciones de prueba.

Permisos e hito de decisión 3

Las plantas piloto y las pruebas de campo pueden requerir permisos, cuyos plazos de aprobación deben figurar en el cronograma. Las pruebas permiten que autoridades y otras partes interesadas conozcan la tecnología en el sitio, y sus resultados pueden respaldar solicitudes de permisos ambientales.

La fase 3 entrega un diseño de prefactibilidad y una estimación de costos de clase 4, o equivalente, para cada alternativa restante. Los ensayos deben establecer cuáles pueden

operar satisfactoriamente. En el hito de decisión 3, la empresa minera selecciona una opción para factibilidad o detiene el desarrollo. El monitoreo de campo continúa.

5) Fase 4 Diseño de factibilidad

La fase 4 desarrolla la alternativa seleccionada a nivel de factibilidad e incorpora los resultados anteriores a los análisis de estabilidad, filtraciones y balance hídrico. El análisis de modos de falla y sus efectos y los estudios de identificación de peligros evalúan los riesgos que deberá abordar la siguiente etapa de diseño.

Esta fase incluye una prueba industrial que opera con aproximadamente una décima a una cuarta parte de la producción total de relaves. Integra todos los componentes, desde la producción hasta la disposición, para comprobar los supuestos de diseño y evaluar las interacciones entre relaves y roca de desmonte en condiciones operativas.

La operación continua es el aspecto central. La prueba comprueba si la deshidratación, el mezclado cuando corresponda, el transporte y la colocación funcionan de manera conjunta y sostenida. También identifica problemas que las pruebas piloto aisladas podrían omitir. Los resultados permiten ajustar equipos y métodos antes de definir el sistema para la producción total.

El monitoreo amplía la información geotécnica y geoquímica y orienta ajustes al diseño, los costos y las medidas de gestión de riesgos. Continúa durante la ingeniería de detalle, especialmente donde el comportamiento de los materiales o la composición química del agua evolucionan lentamente.

El diseño de factibilidad sustenta los permisos ambientales y el trabajo con las partes interesadas, normalmente mediante una evaluación de impacto ambiental o un proceso similar. La fase entrega el diseño respaldado por la prueba industrial y una estimación de costos de clase 3, o equivalente. En el hito de decisión 4, la empresa minera decide si procede con la ingeniería de detalle y la implementación.

6) Fase 5 Ingeniería básica y de detalle

La fase 5 completa el diseño para las adquisiciones y la construcción. Los resultados de la prueba industrial permiten finalizar los criterios y la configuración del sistema. El equipo prepara las descripciones detalladas del sitio y del diseño, los planos de construcción y las especificaciones técnicas, que definen los requerimientos de equipos y materiales.

El manual de operación, mantenimiento y vigilancia debe reflejar los equipos seleccionados, los métodos de colocación y el monitoreo requerido. El seguimiento de la prueba industrial continúa durante esta fase. El equipo revisa los nuevos resultados e incorpora los cambios pertinentes al diseño y al manual.

Las estimaciones de costos de clase 2 o clase 1, o equivalentes, respaldan el presupuesto final y el control de gastos durante la ejecución. El proyecto queda listo para las adquisiciones y la construcción, con documentación coherente con los resultados disponibles.

7) Conclusiones

El programa detallado en este articulo para el desarrollo de programas de codisposición de relaves y desmonte de mina vincula el avance de ingeniería con decisiones sustentadas en evidencia progresiva. La selección preliminar utiliza antecedentes, el desarrollo conceptual incorpora ensayos básicos y la prefactibilidad evalúa mezclas, procesos piloto y comportamiento en campo. La factibilidad prueba el sistema completo a escala industrial antes de completar la ingeniería para construirlo y operarlo.

La programación de los ensayos condiciona las decisiones. Iniciar temprano las pruebas cinéticas permite estudiar reacciones lentas, mientras que postergar las pruebas piloto y de campo hasta la fase 3 limita la inversión durante la comparación de conceptos. El monitoreo prolongado aporta información que los ensayos cortos no ofrecen. Cada hito permite revisar la justificación técnica y económica antes de comprometer nuevos recursos. La siguiente tabla resume las principales actividades realizadas en cada fase del programa de codisposición.

Tabla 1: Programa por etapas para evaluar alternativas de codisposición

Fase	Nombre	Actividades principales	Resultados	Opciones de inicio	Opciones de finalización
1	Identificación y selección de opciones	Evaluación de fallos graves; talleres con los stakeholder	Objetivos aprobados; lista de opciones	>12	<6
2	Desarrollo conceptual y trade-off	Revisión de datos y ensayos de laboratorio	Descripción conceptual de las opciones	<6	<3
3	Diseño de prefactibilidad	Planta de pre-piloto; generación de relaves; pruebas de mezcla; pruebas de campo	Conocimiento detallado de las opciones	<3	1

4	Diseño de factibilidad	Pruebas de escala 1/10 - 1/4; permisos	Comprensión detallada de una opción específica a escala industrial	1	1
5	Ingeniería de detalle	Especificación para la implementación completa	Implementación	1	1

La metodología aún requiere validación mediante aplicaciones y experiencia operativa. Estas deberán comprobar la pertinencia de los criterios de decisión e identificar cuándo los materiales, los programas de producción o las condiciones del sitio exigen modificar las investigaciones.

Referencias

Castendyk, D, Aparicio, M, Verburg, R & Thompson, JA 2022, 'Potential benefits of comingling waste rock and tailings as indicated from a multi-year field trial', in M Edraki, D Jones & KR Jain (eds.), Proceedings of the 12th International Conference on Acid Rock Drainage, Sustainable Minerals Institute, The University of Queensland, Brisbane, pp. 398–410, https://smi.uq.edu.au/conferences/international-conference-acid-rock-drainage-2022.

Wickland, B, Wilson, GW, Wijewickreme, D, & Klein, B 2006, 'Design and evaluation of mixtures of mine waste rock and tailings', Canadian Geotechnical Journal, vol.43, no, 9, pp. 928–945, https://doi.org/10.1139/T06-058.