





Programa de Prácticas Líderes (Leading Practice) para el Desarrollo Sostenible de la Industria Minera

Agosto de 2016



Programa de Prácticas Líderes (Leading Practice) para el Desarrollo Sostenible de la Industria Minera

Agosto de 2016

Descargo de responsabilidad

Programa de Prácticas Líderes (Leading Practice) para el Desarrollo Sostenible de la Industria Minera.

Esta publicación ha sido desarrollada por un grupo de trabajo formado por expertos, representantes de la industria y representantes gubernamentales y no gubernamentales. Reconocemos y agradecemos enormemente el esfuerzo realizado por el Grupo de trabajo.

Las opiniones y puntos de vista expresados en esta publicación no reflejan necesariamente los del Gobierno de Australia o del Ministro de Asuntos Exteriores, el Ministro de Comercio e Inversión, y el Ministro de Recursos y Australia Septentrional

Aunque se han tomado medidas razonables para garantizar que el contenido de esta publicación sea objetivamente correcto, la Commonwealth no se hace responsable de la precisión o integridad del mismo, así como de ninguna pérdida o daño que pudiera ocasionarse directa o indirectamente por el uso de esta publicación o por confiar en su contenido.

Los usuarios de este manual deben tener en cuenta que ha sido concebido como una referencia general y no pretende reemplazar el asesoramiento profesional que los usuarios pudieran necesitar en circunstancias particulares. La referencia a empresas o productos en este manual no debe considerarse como un respaldo a dichas empresas o productos por parte del Gobierno de Australia.

El programa de ayuda australiano administrado por el Departamento de Comercio y Asuntos Exteriores prestó su apoyo al Programa de Prácticas Líderes para el Desarrollo Sostenible de la Industria Minera (LPSDP), debido al valor de los informes para proporcionar asesoramiento y estudios de casos para su uso y aplicación en países en vías de desarrollo.

Imagen de portada: Rehabilitación de New Wallsend Colliery de Xstrata Coal en Newcastle Coalfields, Nueva Gales del Sur © Commonwealth of Australia 2016

Este trabajo está protegido por derechos de autor. Aparte del uso permitido en virtud de la *Ley de derechos de autor de 1968*, queda prohibida la reproducción de cualquier parte de este manual de ninguna forma sin el consentimiento previo por escrito de la Commonwealth. Las consultas y solicitudes de información sobre la reproducción y los derechos se deben enviar a Commonwealth Copyright Administration, Attorney General's Department, Robert Garran Offices, National Circuit, Canberra ACT 2600 o realizarse a través de www.ag.gov.au/cca.

Agosto de 2016.

Contenido

AGRADECIMIENTOS	\
PRÓLOGO	V
1.0 INTRODUCCIÓN	
2.0 LA IMPORTANCIA DE LA REHABILITACIÓN DE MINAS	3
2.1 ¿Qué es la rehabilitación?	3
2.2 La rehabilitación en el contexto del desarrollo sostenible	2
2.3 El caso de negocio para la rehabilitación	5
3.0 ÉXITO DE LA REHABILITACIÓN	7
3.1 Metas y objetivos de la rehabilitación	7
3.2 Criterios de éxito de la rehabilitación	10
3.3 Directrices de rehabilitación	14
3.4 La función de las partes interesadas	15
4.0 PLANIFICACIÓN DE LA REHABILITACIÓN	16
4.1 Referencias de rehabilitación y medioambiente	16
4.2 Caracterización de materiales	17
4.3 Diseño del relieve	19
5.0 IMPLEMENTACIÓN DE LA REHABILITACIÓN	27
5.1 Construcción de relieves	27
5.2 Selección de especies	28
5.3 Establecimiento de un medio para el crecimiento de la vegetación	3
5.4 Mejora física	34
5.5 Mejora química	35
5.6 Mejora biológica	37
5.7 Recolonización de la fauna	40
5.8 Gestión de la rehabilitación	42
6.0 MONITOREO DEL DESEMPEÑO	44
6.1 Monitoreo	44
6.2 Desarrollo de un programa de monitoreo	45
6.3 La función de sitios análogos o de referencia	46
6.4 Indicadores de desempeño	49
6.5 Gestión adaptativa y control de calidad	50
6.6 Técnicas de monitoreo	50
6.7 Preparación de informes	58
6.8 Investigación y pruebas de rehabilitación	58
REFERENCIAS	59
GLOSARIO	65

ESTUDIO DE CASO:

Objetivos de rehabilitación de Anglo American para minas de carbón en Queensland y	
Nueva Gales del Sur	8
Criterios de finalización de la mina de bauxita de Alcoa	11
Selección de especies y gestión de la cubierta superior del suelo en minas de bauxita de Alcoa, en Australia Occidental	28
Protección del hábitat para cacatúas negras amenazadas en el bosque de eucaliptos jarrah de Australia Occidental	41
Programa de monitoreo de rehabilitación de la mina de carbón Wesfarmers Curragh	51
Murciélagos que habitan en cuevas y minas	56

AGRADECIMIENTOS

El Programa de Prácticas Líderes para el Desarrollo Sostenible está gestionado por un comité directivo presidido por el Departamento de Industria, Innovación y Ciencia del Gobierno de Australia. Los 17 temas del programa fueron desarrollados por grupos de trabajo formados por representantes del gobierno, la industria, la investigación, académicos y comunitarios. Los manuales de prácticas líderes no se podrían haber realizado sin la colaboración y participación activa de todos los miembros de los grupos de trabajo.

También agradecemos a Bruce Thompson (Redleaf Environmental), Dr. Patrick Audet (EDI Environmental Dynamics Inc. (Canadá), Amanda Dawson-Evenhuis y Elmien Ballot (Wesfarmers Curragh Pty Ltd).

COLABORADOR	MIEMBRO	CONTACTO
AngloAmerican	Dr. Carl Grant Director de Planeamiento de Cierre de Minas y Medioambiente	carl.grant@angloamerican.com
Landloch	Dr. Rob Loch Consultor Principal	lochr@landloch.com.au
SMICMLR Centre for Mined Land Rehabilitation THE UNIVERSITY OF QUEENSLAND	Nic McCaffrey Miembro Honorario Centre for Mined Land Rehabilitation	n.mccaffrey@uq.edu.au
+ Stuart Anstee and Associates	Stuart Anstee Director	stuart@stuartanstee.com
SMICMLR Centre for Mined Land Rehabilitation THE UNIVERSITY OF QUEENSLAND AUSTRALIA	Dr. David Doley Miembro Honorario de Investigación Centre for Mined Land Rehabilitation	d.doley@uq.edu.au

PRÓLOGO

La serie de manuales del *Programa de Prácticas Líderes para el Desarrollo Sostenible de la Industria Minera* se ha producido para compartir la experiencia líder mundial de Australia en gestión y planificación minera. Los manuales facilitan orientación práctica sobre aspectos medioambientales, económicos y sociales a través de todas las fases de la extracción de minerales, desde la exploración hasta la construcción, operación y cierre de las minas.

Australia es un referente mundial en minería, y se ha utilizado nuestra experiencia nacional para garantizar que estos manuales proporcionen un asesoramiento útil y actualizado sobre prácticas líderes.

El Departamento de Industria, Innovación y Ciencia de Australia se ha encargado de la gestión y coordinación técnica de los manuales, en colaboración con socios de la industria privada y gobiernos estatales. El programa de ayuda internacional de Australia, gestionado por el Departamento de Asuntos Exteriores y Comercio, ha cofinanciado la actualización de los manuales en reconocimiento del papel clave que desempeña el sector minero en el impulso del crecimiento económico y la reducción de la pobreza.

La minería es una industria global y las compañías australianas son inversoras y exploradoras activas en casi todas las provincias mineras del mundo. El Gobierno de Australia reconoce que una mejor industria minera significa más crecimiento, trabajo, inversión y comercio, y que estos beneficios deberían dar lugar a mejores condiciones de vida para todos.

Para alcanzar la excelencia minera, es fundamental contar con un sólido compromiso con las prácticas líderes para el desarrollo sostenible. La aplicación de prácticas líderes permite a las empresas ofrecer un valor duradero, mantener su reputación de calidad en un clima competitivo de inversión, y garantizar el apoyo firme de comunidades y gobiernos anfitriones. Entender las prácticas líderes también es esencial para gestionar riesgos y garantizar que la industria minera despliegue todo su potencial.

Estos manuales están diseñados para facilitar información esencial a los operadores mineros, las comunidades y los organismos reguladores. Contienen estudios de casos para ayudar a todos los sectores de la industria minera, dentro y más allá de los requisitos establecidos por la ley.

Recomendamos estos manuales de *Prácticas líderes (Leading practice)* y esperamos que los encuentren útiles a nivel práctico.

El Excmo. Matt Canavan, Miembro del Parlamento

Ministro de Recursos y Australia Septentrional La Excma. Julie Bishop, Miembro del Parlamento

Ministra de Asuntos Exteriores

1.0 INTRODUCCIÓN

La minería tiene el potencial de afectar al medioambiente y a las comunidades en todo el ciclo de vida de un proyecto. Dichos impactos, ya sean directos, indirectos o acumulativos, hacen que muchos desarrollos de proyectos potencialmente sean un tema delicado para los reguladores, comunidades locales, inversores, organizaciones no gubernamentales (ONG) y empleados. Por tal motivo, la obtención de acceso a la tierra a los efectos de la extracción de minerales, se hace cada vez más difícil y se ha convertido en un riesgo clave para la industria. Para garantizar un acceso continuo, las empresas mineras australianas deben demostrar su compromiso con el desarrollo sostenible a los reguladores y sus diferentes grupos de interés. Aunque la rehabilitación de yacimientos mineros es una obligación legal para todos los proyectos de minería en Australia, también es una actividad en la que la industria pueda demostrar claramente su compromiso con el desarrollo sostenible a sus grupos de interés clave.

Este manual trata sobre la rehabilitación de minas, uno de los temas del Programa de Desarrollo Sostenible en Minería basado en el concepto de Prácticas líderes (Leading Practice). Los manuales de prácticas líderes son relevantes para todas las etapas de la vida de una mina (exploración, viabilidad, diseño, construcción, operación y cierre) y para todas las facetas de una operación. La rehabilitación siguiendo el concepto de prácticas líderes comienza en la etapa inicial del proyecto minero y continúa hasta el cierre de la mina y el cese del arrendamiento. Debe tener en cuenta todos los aspectos pertinentes del emplazamiento, locales, regionales, nacionales y hasta internacionales.

El público principal al que está destinado este manual es la dirección a nivel operativo, quienes están a cargo de implementar las medidas de prácticas líderes en las operaciones mineras. Además, también es importante para todos aquellos interesados en la gestión de biodiversidad siguiendo el concepto de prácticas líderes en la industria de la minería, incluidos funcionarios de medioambiente, consultores de minas, gobiernos y reguladores, organizaciones no gubernamentales, comunidades mineras y zonas aledañas, y estudiantes. Se anima a todos los lectores a trabajar juntos de manera asociada, adoptando el desafío de mejorar de forma continua las normas de rehabilitación de la industria minera, como parte de su desempeño para el desarrollo sostenible. Se puede lograr un mejor desempeño a través de la aplicación de los principios descriptos en este manual.

Este manual describe los principios y procedimientos clave que hoy en día se reconocen como prácticas líderes para la planificación, implementación y monitoreo de la rehabilitación:

- comprensión de la importancia de la rehabilitación y su caso de negocios para el sector de la minería (Sección 2)
- formulación de objetivos, metas y criterios de éxito de la rehabilitación (Capítulo 3)
- planificación para rehabilitar por medio de la comunicación con las partes interesadas, la fijación de objetivos y
 criterios de terminación, y el establecimiento de puntos de referencia para la rehabilitación (Capítulo 4)
- integración e implementación de planes de rehabilitación durante la vida de la operación (Sección 5)
- monitoreo y preparación de informes acerca del desempeño de rehabilitación en el yacimiento minero (Sección 6).

Este manual no se escribió de manera aislada y debería leerse junto con los otros manuales de prácticas líderes, especialmente los que se ocupan de:

- monitoreo y gestión de aguas subterráneas y de superficie
- drenaje ácido y metalífero
- gestión de escorias
- biodiversidad
- planeamiento del cierre
- compromiso con la comunidad
- monitoreo.

El manual pretende ser una guía general solamente y no es preceptivo ni está descrito en detalle. Se alienta a gerentes y profesionales del medioambiente a tener acceso y utilizar el material técnico al que se hace referencia en todo el manual para obtener información más detallada.

2.0 LA IMPORTANCIA DE LA REHABILITACIÓN DE MINAS

Mensajes clave

- La rehabilitación es un componente integral de las estrategias de desarrollo sostenible de una empresa minera.
- Invariablemente, la rehabilitación es un indicador clave de desempeño contra el que se juzga el desempeño medioambiental de una empresa.
- Las minas rehabilitadas de manera deficiente dejan un importante legado de problemas para todos los miembros de la sociedad, gobiernos, comunidades y empresas.
- El hecho de no planear ni comenzar la rehabilitación en una etapa temprana en la vida de la operación puede crear un obstáculo en la generación de los conocimientos y capacidades necesarios para producir un resultado sostenible que cumpla con los criterios de éxito acordados.

2.1 ¿Qué es la rehabilitación?

Este manual adopta la siguiente definición de rehabilitación:

La rehabilitación comprende el diseño y la construcción de relieves, así como el establecimiento de ecosistemas sostenibles o vegetación alternativa, según el uso de la tierra deseado después de la operación.

La rehabilitación del emplazamiento minero se debería diseñar para cumplir tres objetivos clave:

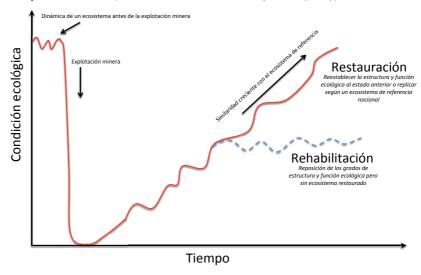
- 1. la estabilidad y sostenibilidad a largo plazo de la orografía, los terrenos y la hidrología del sitio
- 2. la reparación total o parcial de la capacidad del ecosistema para proveer hábitats para biotas y servicios para las personas (WA EPA 2006)
- 3. la prevención de la contaminación del medioambiente adyacente.

Se han utilizado varios términos para describir la reparación de la tierra alterada por la minería y otras formas de uso del terreno, incluidas rehabilitación, recuperación, reconstrucción, reparación, restauración y revegetación. Para ser coherentes con las Directrices Nacionales para la Práctica de Restauración Ecológica de Australia (Standards Reference Group SERA 2016), los dos términos que se usan principalmente en este manual son rehabilitación y restauración.

Si bien se ha cuestionado la importancia de definiciones estrictas de términos como rehabilitación y restauración, es beneficioso contar con una comprensión funcional de las diferencias entre los dos procesos. Tal comprensión también puede ayudar a lograr más consistencia en la política, legislación y normas que regulan la reparación medioambiental.

Las trayectorias de la rehabilitación y la restauración se muestran en la Figura 1, en la que el eje Y representa la condición ecológica y las curvas muestran cambios en dicha condición para ambas, con el paso del tiempo.

Figura 1: Desarrollo hipotético de un ecosistema que incorpora los conceptos de estado y transición (modificado de Grant 2006 y Doley & Audet 2014) para contribuir a mostrar las diferencias entre la rehabilitación y la restauración (del Standards Reference Group SERA (2016)).



Fuente: basado en Bradshaw (1987).

Después de la explotación minera, típicamente se produce una regresión en la complejidad estructural y funcional. La rehabilitación pretende restablecer la funcionalidad del ecosistema y la productividad de la tierra, aunque probablemente adoptará un uso diferente del terreno y de la composición de especies del ecosistema original. El nuevo ecosistema puede ser de estructura más simple que el original, pero más productivo, como cuando un bosque se reemplaza con una plantación o tierras de pastoreo. Otra posibilidad es que nuevo ecosistema puede ser más simple pero menos productivo, adoptando la forma de un ecosistema híbrido o innovador, como eucaliptos plantados sobre una vegetación de superficie de malezas y pastos.

Por el contrario, la restauración tiene el objetivo más ambicioso de restablecer la estructura y función de los ecosistemas de acuerdo a una imagen de su estado antes de la perturbación, o de reproducir un ecosistema de referencia deseado. La restauración pretende restablecer un ecosistema que se desarrolle a lo largo de una estructura de sucesión, de manera que adopte una estructura, función y composición similares, pero no necesariamente idénticas. a las del ecosistema original.

Es importante destacar que, a medida que los ecosistemas se desarrollan, las definiciones también podrían transformarse o desarrollarse con el tiempo. Por ejemplo, un ecosistema o paisaje rehabilitado puede progresar hacia un ecosistema casi natural, restaurado. Por el contrario, los ecosistemas que supuestamente se están restaurando pueden descuidarse debido a la falta de intervención de la dirección y ser más representativos de la rehabilitación.

2.2 La rehabilitación en el contexto del desarrollo sostenible

La minería es un uso temporal de la tierra (aunque algunas minas pueden tener vidas muy largas), y se espera que todas las operaciones cierren en algún momento en el futuro. El cierre de la operación se produce generalmente cuando se agota el recurso o cuando el costo de producción es superior a la rentabilidad. Por lo tanto, el cierre proporciona oportunidades para que las tierras alteradas por la minería sean rehabilitadas para uno o más usos sostenibles de la tierra después de la actividad minera (DEHP 2014).

Para las empresas mineras de Australia, la rehabilitación debería ser un componente integral de sus estrategias de desarrollo sostenible. La rehabilitación es, invariablemente, un indicador clave del rendimiento contra el cual se juzga el rendimiento medioambiental de las empresas. Las minas mal rehabilitadas dejan un legado de problemas significativos para todos los elementos de la sociedad, gobiernos, comunidades y empresas.

2.3 El caso de negocio para la rehabilitación

Diversos de factores definen el caso de negocios para la rehabilitación del yacimiento minero (Figura 2). Tener acceso al terreno cada vez más requiere que las empresas demuestren su compromiso con la administración del uso de la tierra. La rehabilitación es, invariablemente, un indicador clave del rendimiento. Las tendencias regulatorias indican que el logro de la rehabilitación de acuerdo a prácticas líderes, en el corto y mediano plazo, será una ventaja competitiva; en el largo plazo, será la calificación mínima para la obtención de acceso a la tierra. La imposibilidad de demostrar un sólido compromiso con la administración del uso de la tierra, especialmente la rehabilitación exitosa, puede dar lugar a demoras en la aprobación y, en el peor de los casos, a la pérdida total de las oportunidades de desarrollo.



Figura 2: El caso de negocios para la rehabilitación de yacimientos mineros

2.3.1 Rehabilitación progresiva

El no iniciar la rehabilitación en una etapa temprana de la vida de la operación (o en las etapas posteriores del desarrollo del proyecto) puede crear un obstáculo para generar los conocimientos y capacidades necesarias para ofrecer un resultado sostenible que satisfaga los criterios de éxito acordados. En el peor de los casos, iniciar las operaciones de cierre cuando la mina no ha desarrollado las habilidades, el equipo y los conocimientos técnicos necesarios para llevar a cabo un extenso programa de rehabilitación con éxito puede dar lugar a resultados muy deficientes, que exigen una recuperación muy costosa, y con muy reducidas probabilidades de cierre exitoso.

La rehabilitación exitosa requiere un enfoque de mejora continua, basado en el conocimiento, la investigación y el monitoreo específicos del lugar. Las oportunidades y amenazas deben identificarse en etapas tempranas para que las operaciones mineras no reduzcan las opciones de rehabilitación. Por lo tanto, la inversión retrasada conduce a retraso en el cese más allá de la vida útil de una mina, aumentando los costos y, en algunos casos, la retención de un pasivo por más años de lo necesario.

2.3.2 Riesgo de cumplimiento

El hecho de no cumplir con las expectativas de regulación podría atraer un mayor escrutinio, dando lugar a restricciones adicionales a las empresas, mayores costos de cumplimiento y posiblemente costos legales. En el peor de los casos, podría dar lugar a la pérdida de la licencia social para operar de la empresa y limitar su futuro acceso a recursos.

2.3.3 Responsabilidad financiera

La rehabilitación es una parte fundamental de la planificación del cierre de una mina, y la planificación eficaz y temprana ayuda a minimizar los costos de rehabilitación. La rehabilitación progresiva también puede proporcionar una indicación temprana de si los objetivos de cierre del yacimiento son realistas y alcanzables. Desde un punto de vista legislativo, los gobiernos estatales refuerzan cada vez más el vínculo fundamental entre la rehabilitación y el cierre, a través de requisitos para que los yacimientos desarrollen planes de vida útil de la mina o de operaciones mineras (DTIRIS 2013).¹

2.3.4 Riesgo a la reputación

Los antecedentes de rehabilitación deficiente pueden dañar la reputación entre los reguladores y las partes interesadas externas. Esto puede manifestarse en demoras en la aprobación del proyecto, condiciones de autorización más estrictas, o incluso la pérdida de la licencia social para operar de la empresa. Por el contrario, un historial probado de rehabilitación con buena calidad de resultados tiene el potencial de ser un punto de diferenciación y definir a la empresa como socio de desarrollo preferido para los reguladores y las comunidades locales.

2.3.5 Rehabilitación y servicios del ecosistema

La Society for Ecological Restoration recomienda el uso de nueve atributos del ecosistema para medir el éxito de la restauración (rehabilitación en el contexto minero) (SER 2004):

- · diversidad de ecosistema y estructura de la comunidad similares a los de los sitios de referencia
- presencia de especies autóctonas
- presencia de grupos funcionales necesarios para la estabilidad a largo plazo
- la capacidad del medioambiente físico para mantener poblaciones que se reproducen
- · funcionamiento normal
- · integración con el paisaje
- · eliminación de posibles amenazas
- · resistencia a las perturbaciones naturales
- · autosostenibilidad.

En un estudio realizado en 2005, Ruiz-Jaen y Aide llegaron a la conclusión de que pocos estudios de restauración contaban con los recursos financieros para supervisar todos esos atributos. En su revisión de 68 estudios publicados, comprobaron que las medidas más evaluadas se pueden clasificar como uno de tres tipos de medidas: diversidad, estructura de la vegetación y atributos de los procesos ecológicos. De los tres, encontraron que los procesos ecológicos rara vez se miden, debido a su recuperación más lenta en comparación con la diversidad o estructura de la vegetación.

La naturaleza fragmentada de la rehabilitación de yacimientos mineros también debe tenerse en cuenta al considerar el uso de procesos ecológicos y servicios de ecosistemas como criterios de atributos para el monitoreo del éxito. En ciertas circunstancias, puede que no sea posible utilizar los atributos del servicio del ecosistema para monitorear el éxito de la rehabilitación en sitios de rehabilitación pequeños e individuales.

¹ El manual de prácticas líderes Cierre de minas explica este tema en detalle

3.0 ÉXITO DE LA REHABILITACIÓN

Mensajes clave

- La rehabilitación es un proceso costoso y por lo tanto debe ser cuidadosamente planificado y ejecutado.
- Las metas y los objetivos SMART son esenciales para el éxito de la rehabilitación.
- El desarrollo de los criterios de éxito de rehabilitación debe involucrar a las partes interesadas (tanto de la comunidad como del gobierno) en su desarrollo y evaluación.

La rehabilitación es un proceso costoso, y las oportunidades para repetir las obras de rehabilitación que no han sido exitosas suelen ser limitadas, por ello es importante que las obras alcancen resultados aceptables de manera consistente. Con el fin de tener éxito, los programas de rehabilitación deben seguir una serie de pasos (Figura 3).

Figura 3: Pasos de la planificación e implementación de la rehabilitación



3.1 Metas y objetivos de la rehabilitación

Como en todos los proyectos, es fundamental establecer metas y objetivos para las obras de rehabilitación, para usar como guía para la planificación y ejecución. Al principio, los objetivos claramente definidos son esenciales para informar a las partes interesadas, y para proporcionar una base para el aporte y las consultas de las partes interesadas. Los criterios de éxito proporcionan mayores detalles sobre los objetivos de rehabilitación y dan

confianza de que las obras de rehabilitación lograrán un amplio rango de objetivos, como la estabilidad y la sostenibilidad.

Los objetivos generales de la rehabilitación pueden variar considerablemente entre sitios, o incluso dentro de un sitio. El objetivo del sitio puede incluir:

- La restauración o recuperación de la zona para que se repliquen las condiciones anteriores a las actividades de minería (el 75% de las minas en Australia utilizan especies de plantas nativas debido a que el establecimiento de los ecosistemas nativos da la mayor posibilidad de autosostenibilidad)
- rehabilitación para mejorar las condiciones anteriores a las actividades de minería (por ejemplo, algunos procesos de rehabilitación de extracción de carbón en Hunter Valley incrementan la capacidad de carga ganadera de la tierra)
- la rehabilitación para una orografía, capacidad del terreno o uso final de la tierra nuevos (campos de golf, pantanos, plantaciones, subdivisiones de viviendas y campos de juego recreativos se han establecido en antiguos yacimientos mineros).

La gestión de la contaminación, así como de otros riesgos de salud y seguridad tiene que ser un objetivo de todas las actividades de rehabilitación (véase el Estudio de caso 1).

CEstudio de caso 1: Objetivos de rehabilitación de Anglo American para minas de carbón en Queensland y Nueva Gales del Sur

El objetivo general de rehabilitación de Anglo American Coal Australia es:

Rehabilitar las áreas perturbadas por las actividades de minería a una condición que sea segura, estable, no contaminante y sostenible, y que tenga en cuenta las expectativas de las partes interesadas.

Este objetivo general de rehabilitación se complementa en todos los sitios con objetivos más específicos desarrollados en base a cada sitio en particular. Dichos objetivos se centran en el componente de sostenibilidad del objetivo general y se vinculan con los planes de cierre de minas.

Los dos principales usos de la tierra pertinentes para las operaciones de Anglo American son vegetación nativa y pastoreo de bajo mantenimiento, que suelen incluirse en las condiciones de las autoridades medioambientales o de consentimiento de los yacimientos.

Al definir los objetivos de rehabilitación, los sitios análogos o de referencia pueden ser útiles en la determinación de la composición, estructura y función del resultado deseado de la rehabilitación. Es importante destacar que los sitios rehabilitados nunca serán exactamente los mismos que los sitios análogos y, en algunos aspectos, pueden ser muy diferentes. Sin embargo, esto no debería ser visto como una razón para no utilizar sitios análogos, sino como una razón importante para definir claramente las limitaciones de esta estrategia. Cada sitio debe definir los objetivos específicos de rehabilitación para cada tipo de uso de la tierra. Un ejemplo de un objetivo específico de rehabilitación para vegetación nativa sería:

Rehabilitar las zonas definidas para una vegetación nativa de bajo mantenimiento, con la composición, estructura y función basadas en un ecosistema análogo relevante (o sitio representativo acordado), y con relieve estable y cubierta vegetal autosostenible.

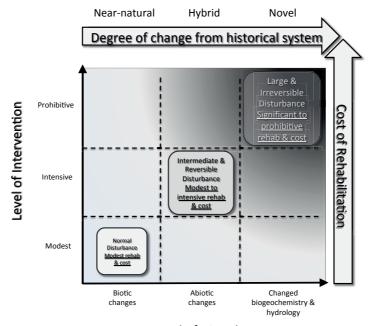
Un ejemplo de un objetivo específico de rehabilitación para el pastoreo sería:

Rehabilitar las áreas definidas para uso como tierra de pastoreo, con una capacidad de carga equivalente a las áreas sin actividad minera, y con una forma de relieve estable y cubierta con vegetación autosostenible.

La escala y el tipo de impactos de la minería (por ejemplo, la remoción debajo de la superficie durante la extracción de bauxita en comparación con la extracción de carbón o metales a cielo abierto), junto con factores ambientales locales, afectan la capacidad de una mina para alcanzar sus metas y objetivos de rehabilitación. Muchas minas en Australia están en regiones en las que es difícil o imposible la provisión de paisajes agrícolas productivos o vegetación similar a los ecosistemas pre-existentes (Doley y Audet de 2016; Mulligan 1996; Tongway y Ludwig 2011). Esto es particularmente pronunciado cuando los recursos físicos son limitados (por ejemplo, la calidad física o nutricional del suelo, la disponibilidad y previsibilidad de precipitaciones), tal como ocurre en los paisajes semiáridos (Audet et al 2013; Vickers et al 2012.).

En combinación con la magnitud de la perturbación debido al método de extracción de recursos, dichos factores ambientales locales influyen en gran medida en la probabilidad de que las actividades de rehabilitación sean exitosas (Doley y Audet 2013) (Figura 4).

Figura 4: Relación entre el nivel de perturbación y el nivel de intervención realista, que indica el grado de cambio del ecosistema histórico y los correspondientes costos financieros de la rehabilitación de las tierras afectadas



Level of Disturbance

Fuente: modificado de Doley & Audet (2013), Jackson & Hobbs (2009), Seastedt et al. (2008).

Dentro de cualquier mina, hay diferentes áreas que requieren diferentes estrategias y metodologías de rehabilitación. Dichas áreas se conocen comúnmente como "dominios" e incluyen pozos, pilas de desechos de roca, depósito de almacenaje de escorias, caminos, infraestructura, acopios de capa superficial del suelo, desvíos de corrientes, rampas y áreas no perturbadas. Es probable que se necesiten diferentes objetivos de rehabilitación, prescripciones y criterios de éxito para los diferentes dominios. La rehabilitación de algunos dominios (por ejemplo, infraestructura y carreteras) no puede ocurrir hasta el final de la vida de la mina. Sin embargo, otros dominios (como pilas de desechos de roca y embalses de escorias) pueden ser rehabilitados progresivamente durante la fase operativa

La condición de la tierra previa a la actividad minera proporciona una guía de las opciones disponibles para el uso de la tierra posterior a la minería, que deberían incluirse en el objetivo de la rehabilitación. La documentación del estado de la tierra antes de la minería también proporciona una base de comparación contra la cual se puede juzgar el éxito futuro de la rehabilitación, por lo que conviene al interés de la empresa minera registrar la mayor cantidad de información posible.

Es importante distinguir entre el uso de la tierra y la aptitud de la tierra. Esta última es una medida de la capacidad del terreno para distintos tipos de usos de la tierra (como conservación, cultivo o pastoreo). El uso actual de la tierra puede ser apropiado para su adecuación para usos definidos o puede ser inapropiado, lo que lleva a la degradación de la tierra a través de la erosión, invasión de malezas o pérdida de materia orgánica y fertilidad. Si la tierra se degrada gravemente, puede ser apropiado considerar opciones alternativas de uso de la tierra posterior a la explotación, tales como campos de golf, desarrollos residenciales, zonas verdes o áreas industriales.

3.2 Criterios de éxito de la rehabilitación

En la rehabilitación de minas, los criterios de éxito se definen como los estándares cualitativos o cuantitativos de desempeño utilizados para medir el éxito o fracaso de las acciones de rehabilitación necesarias para el cierre del yacimiento y el cese de la concesión minera (WA EPA 2006). Ellos representan hitos en los procesos biofísicos de rehabilitación que proporcionan un alto grado de confianza de que el sitio rehabilitado llegará a alcanzar el estado sostenible deseado (el objetivo de rehabilitación).

La empresa busca criterios que indiquen el éxito de su trabajo de rehabilitación y que le permitan determinar cuándo cesa su responsabilidad por la zona. Los gobiernos también desean una rehabilitación exitosa para asegurar que no están heredando un pasivo permanente, o que un pasivo será transferido a los propietarios de tierras privadas o al próximo usuario de la tierra en el caso de tierras públicas.

La formulación de objetivos para la rehabilitación, el diseño de criterios de éxito alcanzables e indicadores de rendimiento equivalentes (véase la Sección 6.4) deben estar estrechamente vinculados para producir éxito a largo plazo (Figura 5).

Formulación de Indicadores de objetivos Criterios de éxito desempeño ------Relieve físico: 1. Seguro, estable y adecuado para • formación del terreno el uso acordado sin aportes Seguro y estable control de la erosión 2. Aspecto patrimonial y visual deposición Relieve resistente 3. Hidrología apropiada propiedades físicas / Aspecto de químicas (pH/EC) 4. Impactos aceptables fuera de la patrimonio mina Aspecto visual 5. Sin contaminación importante, Idoneidad del uso estabilidad del suelo suelos ácidos • capa superficial del de la tierra suelo 6. Función y estructura del suelo suministro de 7. Autosostenible y resistente nutrientes ------------- hidrología toxicidad 8. Metas de diversidad de especies 9. Metas de abundancia de densidad Sistemas Vegetación: resistentes 10. Diversidad genética riqueza de especies **Especies locales** 11. Metas de diversidad de crecimiento de raíces materia orgánica ecosistemas Metas logradas reclutamiento 12. Especies clave y de árboles de colonización de la 13. Control efectivo de las malezas Fauna, hongos, etc.: • polinización 14. Control de plagas y pestes dispersión de semillas 15. Metas de diversidad animal micorrizas Hábitats adecuados 16. Metas de diversidad de hábitat descomponedores • pastoreadores, plagas

Figura 5: Relación entre formulación de objetivos, criterios de éxito e indicadores de desempeño

Nota: No todos los criterios se aplican a todas las minas, pero el nivel de perturbación y el nivel de intervención realista deben corresponder a condiciones específicas del yacimiento, como se demuestra en la Figura 4.

Fuente: modificado de WA EPA (2006).

Otro aspecto del establecimiento de criterios de éxito para los objetivos de la rehabilitación es un reconocimiento de que las zonas rehabilitadas se desarrollan durante varios años y que las etapas específicas de crecimiento y los criterios de éxito asociados pueden tener que cambiar con el tiempo. Por lo tanto, el uso de criterios de éxito progresivos, a diferencia de un único criterio de éxito final, permite la progresiva aceptación por parte del regulador y acciones de gestión correctiva desde el principio de la rehabilitación para resolver los problemas que puedan surgir. Un ejemplo de prácticas líderes de criterios de éxito sensatos es el de Alcoa (Estudio de caso 2).

Estudio de caso 2: Criterios de finalización de la mina de bauxita de Alcoa

Alcoa comenzó a desarrollar los criterios de finalización para sus operaciones de extracción de bauxita en Australia Occidental en la década de 1990. Las recomendaciones para la rehabilitación utilizadas antes de 1988 (era inicial) eran diferentes de las utilizadas en años posteriores (era actual), lo que significaba que se necesitaban dos conjuntos de criterios. El primer conjunto de criterios de rehabilitación para la era actual fue aprobado en 1998, y el de la rehabilitación para la era inicial en 2002. Alcoa se compromete a revisar periódicamente los criterios de rehabilitación de la era actual para poder integrar mejoras en el conocimiento (por ejemplo, derivadas de la investigación de Alcoa y programas de monitoreo), nuevas tecnologías y cambios en las expectativas de las partes interesadas. Hasta la fecha se han realizado dos revisiones.

Los criterios fueron diseñados para reflejar las directrices de cumplimiento de los objetivos de rehabilitación, integración paisajística, crecimiento sostenible, resistencia e integración de gestión de la tierra. La rehabilitación se evaluó durante diversas etapas de las operaciones de rehabilitación y durante los primeros y últimos años del desarrollo del ecosistema. La evaluación temprana de los criterios seleccionados permite que se lleven a cabo acciones correctivas de manera eficaz y económica. Uno de los 30 criterios de finalización para la rehabilitación establecido a partir de 2016 se detalla en la siguiente tabla. Un aumento adecuado de reserva de árboles del dosel de las dos especies forestales dominantes, jarrah (Eucalyptus marginata) y marri (Corymbia callophylla), se evalúa dentro del primer año posterior al establecimiento (a los 9 meses), lo que permite que la replantación, la resiembra o el adelgazamiento (mediante la aplicación de herbicidas) se lleven a cabo en una etapa temprana. Alcoa hace la evaluación internamente, y el Western Australian Department of Parks and Wildlife hace una inspección de campo y auditoría anuales. Para el requisito de aumento de reserva combinada, se aplica tanto un límite mínimo como uno máximo, como intento de equilibrar los objetivos de producción de madera con el agua, la conservación y otros valores forestales.

Uno de los 30 criterios de terminación para la rehabilitación a partir de 2016 (3. Asentamiento temprano—primeros 5 años; 3.1 Asentamiento de vegetación)

CRITERIO E INTENCIÓN	DIRECTRICES PARA LA ACEPTACIÓN	PARÁMETRO	ACCIÓN CORRECTIVA
3.1.1 Establecimiento de un dosel arbóreo (a) Aumento de reserva de árboles de dosel, tanto de jarrah como de marri, para cumplir con los parámetros	Las áreas rehabilitadas deben tener una tasa de reserva que cumplirá con los usos designados de la tierra. Alcoa debe presentar datos de monitoreo de 9 meses a DPaW anualmente. DPaW debe revisar e informar a Alcoa la aceptación o solicitar acciones correctivas Se considerará aceptable el asentamiento de un dosel arbóreo que ha cumplido con el parámetro, a menos que DPaW informe por escrito a Alcoa dentro de los tres meses de la autocertificación, salvo que se acuerde otra opción.	Cantidad promedio de tallos por ha dentro de una cantera (datos de monitoreo de 9 meses): • Mín.: 600 tallos de eucalipto por ha (incluidos un mínimo de 150 tallos de jarrah por ha y un mínimo de 200 tallos de marri por ha) • Máx.: 1.400 tallos de eucalipto por ha • Meta: 1.000 tallos de eucalipto por ha • Meta: 1.000 tallos de eucalipto por ha (excepto en carreteras de arrastre y canteras < 2 ha). Los sitios no rehabilitados (>2 ha de tamaño) tienen áreas de >0,5 ha (identificadas con monitoreo de 9 meses o posterior revisión de imágenes aéreas de -5 años de edad) con <100 tallos por ha.	Alcoa debe suministrar información y comunicar a DPaW si la autocertificación produjo resultados que no cumplen con el parámetro. Las áreas rehabilitadas que no cumplen con el parámetro mínimo serán replantadas o resembradas por Alcoa con demora mínima (una vez que las condiciones sean adecuadas) para permitir que se cumpla el parámetro mínimo. Las áreas rehabilitadas que excedan el parámetro máximo serán inspeccionadas por DPaW, y es probable que sean adelgazadas por Alcoa para reducir la densidad de los árboles hasta llegar al nivel aceptable identificado, según sea necesario.

DPaW = Western Australian Department of Parks and Wildlife.

Hay una copia de los criterios de finalización completos en http://www.dsd.wa.gov.au/alcoa's-bauxite-mine-rehabilitation-program.

Evaluaciones posteriores indican si la rehabilitación está exhibiendo crecimiento y desarrollo sostenido, y aseguran que los requisitos de escala regional, tales como el restablecimiento de las vías de acceso necesarias para la gestión forestal futura, se hayan completado. Las solicitudes de cese están planeadas para subregiones más que para canteras individuales rehabilitadas. Las evaluaciones siguen un proceso acordado de inspecciones, finalización de obras de reparación y baja final. En 2005, un total de 975 hectáreas de tierra rehabilitada en el yacimiento de la mina Jarrahdale de Alcoa, actualmente desmantelado, fueron devueltas al gobierno del estado y se emitió un certificado de aceptación para Alcoa. Este fue el primer cese a gran escala de tierras rehabilitadas por una empresa minera en Australia. Se emitió un certificado de recepción para otras 380 hectáreas de rehabilitación de minas en Jarrahdale en 2007.



El primer paso en el desarrollo de criterios de éxito es definir las directrices que permitirán que se diseñen criterios más específicos para el yacimiento. Las directrices deben incluir elementos tales como los siguientes:

- Se cumplen los objetivos de rehabilitación.
- Los relieves se integran en el paisaje adyacente y no son contaminantes.
- La rehabilitación exhibe un crecimiento sostenido y es resistente.
- La rehabilitación se puede integrar con las zonas adyacentes y no requiere recursos adicionales continuos.

El segundo paso es definir las categorías en el tiempo según las que se debe evaluar cada criterio de éxito. Es fundamental que cada principio se controle varias veces. Las posibles categorías en el tiempo para los criterios de éxito son:

- desarrollo y explotación minera
- proceso de rehabilitación
- desarrollo inicial (rehabilitación de 0 a 5 años)
- rehabilitación asentada (rehabilitación de >5 años).

El tercer paso es comenzar a desarrollar criterios de éxito específicos del sitio bajo cada directriz para cada categoría en el tiempo. Esto debería comenzar con una revisión de las necesidades de rehabilitación descritas en el permiso del sitio. Deberían desarrollarse criterios para cada requisito de permiso de conformidad con la directriz y la categoría en el tiempo pertinente.

El cuarto paso es definir los criterios de éxito de rehabilitación específicos del yacimiento. Cada criterio debería contar con los siguientes elementos:

- criterios e intención
- directrices para la aceptación
- parámetro aceptado
- acciones correctivas potenciales.

Este proceso para el desarrollo de criterios de éxito ha sido utilizado con éxito para la extracción de bauxita en el bosque de jarrah de Australia Occidental, donde más de 3.000 ha de terreno rehabilitado han recibido un certificado de terminación. Un proceso similar se ha propuesto para el Valle de Hunter en Nueva Gales del Sur y la Cuenca de Bowen, en Queensland (Nichols 2004).

3.3 Directrices de rehabilitación

La mayoría de los estados de Australia tienen directrices para orientar la rehabilitación de minas, especialmente los estados con actividades mineras más intensivas. Algunos ejemplos de directrices más detalladas para la rehabilitación y el cierre de minas son los siguientes:

- Australia Occidental: Rehabilitation of terrestrial ecosystems: guidance for the assessment of environmental factors, Western Australia (Rehabilitación de ecosistemas terrestres: guía para la evaluación de factores medioambientales, Australia Occidental - WA EPA 2006) y Guidelines for preparing mine closure plans (Directrices para la preparación de planes de cierre de minas - WA EPA 2015)
- Queensland: Rehabilitation requirements for mining resource activities (EM1122) (DEHP 2014) (Requisitos de rehabilitación para actividades de recursos mineros – EM1122)
- New South Wales: ESG3: Mining Operations Plan (MOP) guidelines (ESG3: Plan de operaciones mineras MOP) directrices (DTIRIS 2013).

Algunos manuales y documentos no gubernamentales incluyen Mulligan (1996); Nichols (2004, 2005); Tongway & Ludwig (2011).

En las minas donde materiales radiactivos pueden estar presentes y que constituyen un riesgo (por ejemplo, minas de uranio o algunas minas de arenas minerales), la gestión de la radiación será un factor clave para la rehabilitación y el cierre (ver ARPANSA 2005).

A nivel nacional, el marco estratégico para el cierre de minas (ANZMEC MCA-2000) proporciona una orientación general sobre la rehabilitación de minas, al igual que los otros manuales de la serie de leading practice.

Ejemplos clave de directrices internacionales para el monitoreo y su objetivo son *Good practice guidance for mining and biodiversity* (Buenas prácticas para la minería y la biodiversidad - ICMM 2006b), Planning for integrated mine closure: toolkit (Planeamiento para el cierre integrado de minas: herramientas - ICMM 2008), Community development toolkit (Herramientas para el desarrollo de la comunidad - ICMM 2006a) y Responsible mining: case studies in managing social and environmental risks in the developed world (Minería responsable: estudios de caso en la gestión de riesgos medioambientales y sociales en el mundo desarrollado - Jarvie-Eggart 2015).

3.4 La función de las partes interesadas

El compromiso eficaz y oportuno con las partes interesadas es un aspecto esencial de la gestión de rehabilitación de prácticas líderes. En este contexto, las partes interesadas son todos aquellos que tengan un interés justificable en, o preocupación por, el proyecto y sus impactos (positivos o negativos) sobre el uso de la tierra posterior a la explotación minera. No son un grupo homogéneo. En algunas situaciones, la cantidad y variedad de partes interesadas que la operación podría necesitar consultar sobre la rehabilitación podría parecer enorme. Su proximidad geográfica a la operación no es necesariamente un buen indicador de su importancia, por ello, el primer paso en el compromiso es el mapeo de partes interesadas potencialmente relevantes.

El compromiso de las partes interesadas en los objetivos de rehabilitación es un aspecto fundamental de la fijación de objetivos. Es muy importante alinear sus expectativas con la realidad de la rehabilitación de la mejor manera posible. Muchos ejemplos recientes de proyectos mineros que produjeron costos y retrasos en la rehabilitación y el cese se pueden remontar a la participación deficiente de las partes interesadas, como resultado de la gestión de riesgos de la empresa.

El nivel de influencia que las partes interesadas externas pueden tener en el resultado de la rehabilitación debería describirse claramente. Por ejemplo, los requisitos reglamentarios pueden excluir algunos usos innovadores del terreno después de la explotación minera (como un campo de golf o una pista de motocross). Se debe aclarar este tipo de restricciones a las partes interesadas desde el principio. Ha habido muchos casos en los que las partes interesadas que detallaron preferencias inalcanzables dejaron de participar.

El compromiso con las partes interesadas puede adoptar muchas formas y servir para diversos propósitos. Las personas y organizaciones pueden participar en calidad de:

- fuentes de datos y recursos de referencia para monitorear la rehabilitación:
 - · titulares de tierras
 - · comunidades autóctonas
 - · universidades y otras entidades de investigación
 - departamentos medioambientales estatales
 - · ONGs medioambientales
- como grupos potencialmente afectados por los impactos de la operación en el medioambiente y los objetivos de rehabilitación posteriores a la explotación minera:
 - comunidades autóctonas
 - · otras comunidades locales
 - reguladores (gobierno local, estatal, federal)
 - individuos y organizaciones de todos los niveles con intereses en la biodiversidad de la región
- · como socios en la gestión de la tierra:
 - · comunidades autóctonas
 - · ONGs.

4.0 PLANIFICACIÓN DE LA REHABILITACIÓN

Mensajes clave

- Evaluar las referencias de rehabilitación y medioambiente lo antes posible en el desarrollo del proyecto.
- Caracterización de la capa superior del suelo y terrenos de sobrecarga desde la fase de exploración y
 continuar durante las etapas de pre-viabilidad y viabilidad, como base de planificación de la mina.
- Realizar un estudio completo del terreno antes, o al comienzo de las operaciones.
- Diseñar los relieves finales del sitio tan pronto como sea posible en el proyecto para minimizar costos.

4.1 Referencias de rehabilitación y medioambiente

Una evaluación de referencia adecuada y precisa del medioambiente local es un importante punto de partida para un programa de rehabilitación de minas de prácticas líderes, de modo que es importante comenzar a evaluar las referencias de rehabilitación y medioambiente tan pronto como sea posible en el desarrollo del provecto.

Por lo general, se llevan a cabo sondeos ambientales y sociales de referencia, como parte de la planificación y de la evaluación de impacto ambiental para proyectos mineros. Siempre que sea posible, los datos de referencia y monitoreo que son la base para la planificación y ejecución de la rehabilitación, deberían ser incorporados en los sondeos de evaluación de impactos ambientales y sociales.

Los datos de referencia esenciales deberían incluir:

- para el clima: promedio de precipitaciones diarias a largo plazo, intensidad de las precipitaciones, temperaturas y evaporación
- para suelos: pH, salinidad, cationes intercambiables, profundidades del suelo, capacidad de retención de agua disponible para las plantas (CRAD), nutrientes del suelo, perfiles de carbón orgánico, equilibrios anuales de agua y erosionabilidad
- para vegetación y ecosistemas: especies, grupos funcionales, cobertura de dosel y de contacto, y profundidad de las raíces
- presencia y poblaciones de fauna.

Se debe tener especial consideración con especies de plantas o animales exóticos o en peligro, que pueden ser fundamentales para los objetivos de rehabilitación.

Una evaluación sólida de la referencia de la rehabilitación mejora la comprensión del equipo de diseño del proyecto, acerca de hasta qué punto la rehabilitación puede abordar y mitigar los impactos de la operación de manera realista, y también puede servir de base para el desarrollo de directrices o procedimientos para el manejo y colocación de materiales, para asegurar que se puedan lograr los objetivos de rehabilitación.

También es una buena práctica comenzar pruebas de rehabilitación tan pronto como sea posible. En los casos en que la rehabilitación es el control esencial más importante para afrontar los impactos, debería haber alta seguridad de éxito, ya sea proveniente de ejercicios de rehabilitación similares en otros lugares. o de pruebas realizadas como parte del proyecto. Al mismo tiempo, los objetivos a corto plazo se pueden configurar para hacer un seguimiento del desarrollo de los servicios de vegetación fundamentales, como la cubierta de la superficie, la estructura del terreno y la entrada de agua.

Las directrices de la Environment Protection and Biodiversity Conservation Act (EPBC Act) (Ley sobre la Conservación Medioambiental y la Protección de la Biodiversidad de 1999) requiere que los proponentes de los proyectos estimen la confianza en el éxito de su rehabilitación, y requiere que la estimación se justifique mediante resultados de pruebas en el sitio y fuera de él, en medioambientes y hábitats bióticos similares, y usando técnicas de rehabilitación similares.

La recolección de datos de referencia y la planificación de la rehabilitación en la etapa inicial también son importantes para asegurar que se tomen las medidas adecuadas durante la construcción y las operaciones para permitir la rehabilitación más adelante. Esto podría incluir sondeos topográficos e hidrológicos del lugar; documentación de la vegetación; la recolección y el almacenamiento de la capa superficial del suelo; la colocación estratégica de desechos; y la recolección de germoplasma (semillas, esquejes, vástagos) si no hay otra fuente local disponible.²

Las metodologías de recopilación de datos de referencia deberían coincidir con el uso primario de la del medioambiente anterior a la perturbación y con los objetivos de la rehabilitación. Por ejemplo, un yacimiento que perturba pastizales mejorados y tiene ese uso de la tierra como objetivo de rehabilitación, debería incluir metodologías de evaluación de la calidad de pastizales en su nivel básico de rehabilitación.

4.2 Caracterización de materiales

Las propiedades de los materiales excavados y colocados en relieves de desechos son fundamentales y pueden afectar dramáticamente los costos y el éxito de la rehabilitación. La caracterización de las capas superficiales del suelo y terrenos de sobrecarga debería comenzar en la fase de exploración y continuar a través de las etapas de pre-viabilidad y viabilidad, como base para la planificación de la mina. Dicha información puede incluso determinar si las excavaciones son a cielo abierto o subterráneas. La caracterización temprana de materiales puede permitir la planificación para evitar riesgos significativos y para hacer el mejor uso posible de los materiales que pueden ser deseables para la infraestructura del sitio y la rehabilitación.

En términos generales, la caracterización de los residuos inicialmente tendrá el objetivo de identificar los materiales de alto riesgo que requerirán manejo especial o colocación selectiva. Esos son materiales para los que existe un riesgo importante de drenaje ácido de minas, fibras asbestiformes, alta salinidad y movimiento de las sales y / o elementos específicos en el drenaje y la escorrentía, y altas tasas de erosión (las chorreras son una preocupación importante).

La litología de los desechos a ser excavados puede proveer información para el diseño de relieve. Por ejemplo, la presencia de una alta proporción de roca dura competente permite planear relieves de residuos más altos y más empinados de lo que sería el caso si todos los desechos fueran altamente oxidados, de textura fina y altamente erosionables. Una vez más, la colocación selectiva puede ser necesaria para aprovechar desechos específicos que sean más útiles para la estabilización y la rehabilitación de la orografía.

Las secciones transversales iniciales de la cantera tienen el potencial de proporcionar una cuota inicial de gran parte de esta información, pero la caracterización de los residuos debería continuar durante toda la operación de la mina, en particular cuando la ley del mineral y el plan de la mina cambian.

Suele ser necesario realizar estudios de suelos como parte de las propuestas de extracción minera, y se utilizan para proporcionar información sobre los recursos disponibles en el suelo, sobre la relación entre los terrenos y los ecosistemas de vegetación, y acerca de los recursos de la capa superficial del suelo que podrían recolectarse para las obras de rehabilitación. En general, los análisis y caracterización se centran en las propiedades químicas, mineralógicas y físicas de los materiales.

La calidad de los datos obtenidos en gran medida depende del diseño o estrategia del muestreo. Los costos pueden reducirse en cierta medida al aumentar de manera estratégica el volumen de submuestras, pero sigue siendo fundamental aplicar una intensidad de muestreo apropiado. Dollhopf (2000), De Gruijter (2002) y Yates y Warrick (2002) proporcionan una orientación útil sobre los protocolos de muestreo.

² Esto también podría requerir una mayor comprensión de la floración y la siembra de semillas estacionales, para asegurar que las semillas se puedan recoger en el momento adecuado.

4.2.1 Desechos

Por lo general, los desechos consisten en una combinación de partículas gruesas (roca) y material más fino. Las proporción y el tamaño de las partículas de roca puede variar según los métodos de excavación, pero se espera que un análisis inicial tenga en cuenta lo siguiente:

- distribución y contenido del tamaño de las rocas
- salinidad de partículas gruesas y finas
- el potencial de producción de ácido de los desechos
- elementos específicos que pueden causar preocupación respecto a la calidad del drenaje o la escorrentía
- la presencia de litologías asbestiformes.

Si se considera que los desechos tienen potencial para ser utilizados en las obras de rehabilitación (por ejemplo, están ubicados cerca de la superficie del relieve o mezclados con la capa superior del suelo), sería de utilidad que los análisis adicionales (principalmente de los componentes finos) pudieran incluir:

- competencia de las rocas
- distribución de los tamaños de las partículas (incluidos el contenido de arcilla y cieno)
- contenido de pH y cloro
- sodicidad y riesgo de chorreras
- erosionabilidad
- · capacidad de retención de agua
- fertilidad.

4.2.2 Capa superior del suelo

Por lo general, se llevan a cabo estudios de suelos documentados o de gran escala durante las etapas iniciales de planificación y aprobación de un proyecto. Sin embargo, generalmente se requiere un estudio más exhaustivo del suelo en, o antes, del inicio de las operaciones. Se puede realizar con estudios a intervalos de uno a varios años, para evaluar los recursos del suelo en las zonas de perturbación planificadas antes del salvamento de la capa superior del suelo y la excavación del yacimiento.

La intensidad requerida de muestreo (tanto de sitios de observación como de perfiles analizados) debería estar claramente definida antes del estudio. Se puede encontrar orientación sobre métodos de estudio de suelos en:

- Guidelines for surveying soil and land resources (Directrices para el estudio de recursos de suelos y tierras)
 (McKenzie et al. 2008)
- The Australian Soil Classification (Clasificación australiana de suelos) (Isbell 2002)
- Australian Soil Survey and Land Survey field handbook (Manual de campo de estudios de suelos y tierras) (NCST 2009)
- Soil and landscape issues in environmental impact assessment (Cuestiones de suelos y paisajes en la evaluación de impactos medioambientales) (DLWC 2000)
- Protocols for soil condition and land capability monitoring (Protocolos para el monitoreo de las condiciones del suelo y la capacidad de la tierra) (DECCW 2009).

La información recopilada puede incluir el uso actual de la tierra y los atributos de condición y de paisaje, junto con las descripciones morfológicas de perfiles del suelo. Para cada tipo de suelo identificado, se deben obtener muestras de una serie de perfiles y ser analizadas por un laboratorio acreditado por la National Association of Testing Authorities (Asociación Nacional de Autoridades de Pruebas) o el Australian Soil and Plant Analysis Council (Consejo australiano de análisis de plantas y suelos). Se pueden adoptar diferentes conjuntos de aplicaciones analíticas, en base a las propiedades del sitio y la información existente sobre el suelo.

Una aplicación analítica típica para suelos de referencia (DECCW 2009) es:

Aplicación para capa superior del suelo y subsuelo

- pruebas químicas, incluyendo el pH, la conductividad eléctrica (CE) (1: 5 agua), capacidad de intercambio catiónico y cationes intercambiables, carbono orgánico, nitrógeno total, fósforo disponible
- pruebas físicas, incluidos el análisis de tamaño de partícula, la prueba agregada de Emerson, límite superior de drenaje y el límite inferior de cosechas.

La presencia de rocas, aunque no deseable para las operaciones agrícolas, suele ser muy útil para la rehabilitación de minas. La cubierta de roca de la superficie de la roca puede reducir el potencial de erosión (Simanton et al. 1984) y aumentar el movimiento del agua a la profundidad, lo que reduce los impactos de la salinidad en algunas situaciones (Jennings et al. 1993).

4.3 Diseño del relieve

4.3.1 Tiempo de ejecución

Para minimizar los costos de la conformación final del relieve (y posiblemente del manipuleo múltiple), es fundamental tener diseños de relieve preparados lo antes posible en la vida de un proyecto.

Por lo tanto, es igualmente esencial que los objetivos de rehabilitación para el uso final de la tierra, la estabilidad y la gestión a largo plazo sean discutidos y acordados con los reguladores y las partes interesadas clave de la comunidad tan pronto en la vida de la mina como sea posible. El diseño detallado de los relieves y su construcción no se puede hacer (ni lograr un ahorro significativo) hasta que se establezcan tales objetivos. Cuanto mayor sea el retraso en dicha planificación, menores serán las posibilidades de obtener esos ahorros que se pueden lograr.

4.3.2 Estrategias de diseño

En general, el objetivo de la rehabilitación de minas en última instancia es lograr el cierre, la baja y el cese de la responsabilidad de la empresa minera con respecto a la zona minada. Para algunos usos de la tierra posteriores a la explotación minera, como el pastoreo, puede ser necesaria la gestión permanente del sitio, pero otros usos pueden no requerirla. Por esa razón, el diseño de prácticas líderes suele tratar de evitar la dependencia a largo plazo sobre estructuras de ingeniería tanto como sea posible.

Las estructuras de ingeniería como bancales escalonados, bermas o drenajes de piedra están diseñadas para ciertas condiciones, como un período de retorno de precipitaciones especificado, y tienen posibilidades de fallar con el tiempo cuando dichas condiciones de diseño inevitablemente se excedan. Además, (comúnmente) hay una pérdida gradual de la capacidad de las bermas debido a la erosión y la deposición, y el asentamiento de relieves de desechos puede alterar significativamente las trayectorias de caudal construidas, por lo que se requiere un mantenimiento continuo.

En muchos casos, las estructuras de ingeniería se incorporan en los diseños de relieve como estructuras temporales que serán retiradas en cuanto el establecimiento de la vegetación alcance el punto en que las tasas de riesgo de erosión y escorrentía se reduzcan significativamente.

4.3.3 Perfiles y riesgo de bancales

A pesar de las sugerencias de que los perfiles minados reconstruidos, siempre que sea posible, deberían imitar los perfiles naturales dentro de la región de la operación, se debería entender que la mayoría de los relieves de desecho son esencialmente grandes montículos de material no consolidado, que, en sus propiedades, pueden tener escasa, de haberla, relación con las rocas y el material degradado que constituyen los relieves naturales de las inmediaciones. Tampoco, a diferencia de lo ocurre en las pendientes naturales, hay posibilidad de que incisiones que puedan ocurrir se vean limitadas por el lecho de roca subyacente. En consecuencia, imitar los relieves naturales sin ninguna consideración por las propiedades de los materiales tiene una muy alta probabilidad de fracaso, en particular cuando el riesgo de erosión es alto.

Los riesgos de fracaso de los relieves de desechos pueden variar enormemente, y eso debería afectar a los procesos de diseño y esfuerzos aplicados. Los perfiles de alto riesgo tienen algunas de las siguientes características, o todas ellas:

- cubierta vegetal baja (probablemente relacionada con la escasez de precipitaciones o con los patrones de Iluvia)
- alta erosividad de precipitaciones
- bancales altos (la definición de "altos" varía de acuerdo al clima y los materiales, pero en muchas situaciones
 ≥60 m se consideraría alto)
- · materiales altamente erosionables
- capacidad limitada para reducir los gradientes a niveles eficaces.

Por el contrario, los sitios de bajo riesgo tienen algunas de, o todas las siguientes características:

- cubierta de vegetación elevada y efectiva
- moderada erosividad de las precipitaciones (asociada con precipitaciones de baja intensidad, pero con volumen suficiente para que crezca la vegetación)
- bancales bajos (en general ≤20 m)
- · materiales de baja erosionabilidad, a menudo con un contenido significativo de roca competente
- capacidad para reducir los gradientes a niveles eficaces.

En los sitios de bajo riesgo, se puede aplicar una amplia gama de opciones de diseño de relieve, el aspecto estético del relieve se puede abordar a fondo, y la aplicación de software especializado puede ofrecer resultados eficaces.

Sin embargo, cuando los riesgos de relieves son altos, hay una necesidad considerablemente mayor de desarrollar diseños muy estrechamente ligados a los materiales, el clima y los resultados de la revegetación del sitio. En general, esto requiere una cuidadosa caracterización de materiales y el uso apropiado de los modelos de escorrentía / erosión y evolución de relieve.

Las prácticas líderes actuales en Australia han hecho un amplio uso de la erosión del suelo y de los modelos de evolución de relieves para elaborar perfiles de relieves específicos para el yacimiento y las metas (Howard et al. 2011) y en muchos casos incorporan la mayoría o todos los elementos considerados deseables estéticamente. Los diseños eficaces se basan en:

- el clima del sitio y la erosividad de las precipitaciones
- la erosionabilidad de los materiales utilizados para construir el relieve
- la probable cubierta vegetal y los cambios resultantes en la función del suelo.

Existen ejemplos de aplicaciones de modelos y revisiones de opciones en Hancock et al. (2000, 2003); Loch (2010); Howard et al. (2010); y Howard & Lowe (2014). Algunas opciones avanzadas ofrecidas por modelos o que pueden tenerse en cuenta mediante el uso de modelos son:

- perfiles cóncavos, que pueden reducir significativamente la erosión de algunos materiales (figuras 6 y 7)
- incorporación de roca para reducir la erosionabilidad y aumentar la infiltración
- colocación de mantillo para proporcionar un control de la erosión superficial en puntos estratégicos de la pendiente
- modificación de la capacidad de infiltración del suelo mediante crecimiento vegetal (Figura 8).

Figura 6: Perfil de pendiente cóncava exitosamente revegetada y estable (extracción de níquel de Murrin Murrin, región aurífera noroccidental de Australia Occidental)



Nota: Se obtuvo la devolución completa de la garantía 4 años después de la rehabilitación.

Figura 7: Pendiente cóncava y restos de árboles en la mina Wattle Dam mine, cerca de Kambalda, WA



Foto: R Gerrard.

Figura 8: El éxito de la revegetación en la mina de Wattle Dam, 4 años después de la revegetación, apuntalado por el tratamiento de yeso de residuos subyacentes, la fertilización de la capa superior del suelo , la eliminación de bermas (para evitar chorreras) y la colocación de restos de árboles para controlar la erosión.



Nota: véase Howard et al. (2010). Foto: R Gerrard

Ha habido una amplia aplicación del modelo de escorrentía / erosión (Flanagan y Livingston 1995) del Proyecto de predicción de erosión del agua (WEPP) (por ejemplo, Loch 2010) y del modelo de evolución de relieve SIBERIA (Willgoose et al., 1991). A pesar de que ha habido un uso generalizado de los diversos factores de la ecuación universal de pérdida de suelo revisada (RUSLE) (Renard et al., 1997), se recomienda precaución en la aplicación de ese modelo, ya que da tasas de erosión promedio para una pendiente solamente y no provee información sobre las tasas de erosión máximas que se pueden desarrollar en puntos a lo largo de una pendiente. Otros modelos están en desarrollo y prueba, pero los usuarios potenciales de cualquier modelo deberían tener en cuenta:

- si el modelo ha sido validado y el nivel de exactitud demostrado
- la disponibilidad de datos iniciales apropiados y precisos (preferiblemente medidos directamente)
- la aplicabilidad del modelo a la situación de interés.

Si se utilizan datos de partida precisos, modelos como WEPP pueden dar certeza considerable de que la estabilidad del relieve será consistente con los requisitos del sitio y las expectativas (Howard y Roddy 2012a).

Actualmente no existe un amplio consenso sobre lo que constituye una tasa "aceptable" de erosión en una mina rehabilitada. El desarrollo precoz de modelos de erosión de Estados Unidos provocó interés en las tasas de erosión tolerables y se sugirió un valor de 12,6 t / ha / año para el mantenimiento de la fertilidad de las tierras de cultivo (Wischmeier y Smith 1978). Para suelos inalterados, tanto Wight y Siddoway (1979) como Skidmore (1979), observaron que fue fijada una tasa de pérdida de suelo tolerable de 4,5 t / ha / año para pastizales, y

Skidmore sugirió que un valor de 2 t / ha / año puede ser apropiado para algunos suelos de pastizales frágiles. Una estrategia australiana común ha sido la adopción de una tasa de erosión meta, de modo que la erosión en surcos y el desarrollo eventual de caudales sean improbables.

En algunos casos, la proximidad a las aguas receptoras sensibles puede significar que las tasas de erosión meta sean definidas por los objetivos de calidad del agua, mientras que en otros, el mantenimiento de la productividad del suelo superficial puede limitar las tasas meta de erosión a corto y largo plazo.

4.3.4 Colocación de relieves

Los relieves construidos deben estar situados de forma de que no interfieran con las características importantes del paisaje y con las potenciales reservas futuras de mineral. Se deberían tener en cuenta las trayectorias de caudal superficial existentes en el sitio para asegurarse de que el relieve no desvíe u obstruya ninguna corriente valiosa. Los impactos sobre la el movimiento de la fauna y el acceso a los puntos de agua también deberían evitarse.

4.3.5 Minimización de huella

El área del terreno perturbado por la construcción de relieves (la huella) debería reducirse al mínimo, de ser posible. Sin embargo, es necesaria una compensación para evitar que esa prioridad dé lugar a la construcción de relieves empinados y altos, con poco potencial de estabilidad. Además, relieves empinados y altos podrían no combinar bien con los relieves naturales adyacentes. Por lo tanto, es importante identificar la altura del relieve que se puede construir con éxito (es decir, encapsulando los residuos reactivos sin riesgo significativo de erosión posterior), de manera que el mantenimiento a largo plazo pueda evitarse o reducirse al mínimo.

La altura estable que es posible depende de:

- el potencial de erosión del clima
- · la erosionabilidad de los materiales de la superficie, incluyendo residuos de roca, escombros y medios de cultivo
- la altura y el gradiente de la pendiente creados
- · la probable cubierta vegetal en el bancal exterior
- el perfil adoptado (lineal, cóncavo, convexo) y cómo se construye.

Si la altura estable identificada es inferior a la que se considera deseable económicamente o en la práctica, se pueden investigar opciones para una mayor estabilización del relieve, como la colocación estratégica de material más estable, o la colocación de escollera en los bancales exteriores.

4.3.6 Gestión del potencial de chorreras

Diversos residuos mineros y suelos australianos son altamente susceptibles a chorreras. Cuando ocurren, las chorreras pueden causar graves fallas en los relieves de la mina, y en particular en las estructuras de ingeniería colocadas en ellas. Las chorreras generalmente se asocian con materiales que contienen arcillas dispersivas y con materiales que contienen una alta proporción de partículas finas de gran movilidad. Los métodos para la identificación y gestión de materiales propensos a chorreras se describen en Vacher et al. (2004) y Landloch (2006).

En primer lugar, los residuos y terrenos a ser utilizados en la rehabilitación deberían ser evaluados con respecto a la dispersión de arcilla y al riesgo de chorreras. Se debería tener cuidado de no depender de pruebas sencillas de dispersión, dado que la salinidad del suelo puede enmascarar los efectos de la sodicidad. (Como la sal soluble se lixivia hacia fuera de los materiales colocados cerca de la superficie del suelo, un material estable salino o sódico puede convertirse en no salino, sódico e inestable).

La dispersión de arcilla generalmente es causada por niveles elevados de sodio intercambiable, por sales de baja solubilidad o por niveles elevados de magnesio (o alguna combinación de los tres factores). Para prevenir o reducir la dispersión, se podría considerar una modificación con una fuente de calcio, tal como yeso (o cal si el material es ácido). Si se usa yeso, se debe tener en cuenta que su disolución es lenta y que debería añadirse al suelo o a los residuos tan pronto como sea posible (preferiblemente cuando la capa superior del suelo se extrae inicialmente) para dar algo de tiempo para que se disuelva y para reemplazar el sodio dentro de la tierra o los residuos. Las tasas de yeso se calculan sobre la base de la capacidad de intercambio catiónico del suelo y los residuos, el contenido de sodio (o magnesio) intercambiable, la densidad aparente y el volumen a tratar.

Cuando hay materiales propensos a chorreras presentes, se debe tener cuidado en el diseño y la construcción del relieve para eliminar o minimizar cualquier concentración y encharcamiento prolongado de las escorrentías. Las estructuras de control de drenaje que acumulan las escorrentías son comúnmente sometidas a chorreras.

4.3.7 Equilibrios de agua y drenaje profundo

Si el relieve contiene materiales preocupantes (como el potencial de drenaje ácido o el transporte de algunos contaminantes, como sales altamente solubles o algún elemento específico), el diseño del vertedero de residuos debe tener en cuenta tanto el control del drenaje profundo (que podría aumentar la posibilidad de filtraciones no deseadas) y la minimización de la erosión (que en última instancia podría exponer al material encapsulado).³

No obstante, si se trata de reducir el drenaje profundo dentro y a través de un relieve, es importante tener en cuenta algunos principios básicos:

- Capas de barrera compactadas, si es cerca de la zona activa de humectación / secado y de la actividad biológica, por lo común fallan en el corto y medio plazo.
- Las cubiertas de acumulación y descarga pueden reducir en gran parte el drenaje profundo, pero todavía habrá algo de drenaje en los años de muchas precipitaciones.
- La eficacia de las cubiertas de acumulación y descarga puede variar mucho, según dos parámetros fundamentales: la magnitud de la reserva de agua disponible en el suelo para el uso de plantas y la eficacia de la vegetación en el uso del agua almacenada en el suelo.

Una serie de estudios en la Cuenca de Murray-Darling en Queensland ha demostrado que, en el caso de árboles nativos de raíces profundas en suelos arcillosos con alta capacidad de agua disponible para plantas (PAWC) del centro y sur de Queensland, el drenaje a profundidades inferiores a 2,4 m puede ser bastante bajo. Esto se ilustra en la Tabla 1, que muestra una selección de datos de Yee Yet y Silburn (2003), sobre el drenaje profundo anual modelado para un lugar cercano a Theodore, en el centro de Queensland. Para esa ubicación, las simulaciones tomaron en cuenta:

- PAWC consistente con la gama de tipos de suelo en el sur y centro de Queensland
- cambios leves en la PAWC (generalmente solo de 5 a 12 mm) debido a las diferencias en la profundidad de las raíces entre los tipos de vegetación
- diferencias en la transpiración entre los tipos de vegetación.

³ Las capas protectoras y la encapsulación de desechos se cubren en mayor detalle en el manual de leading practice de Prevención de drenaje metalifero y acídico (DIIS 2016a).

Tabla 1: Drenaje profundo anual modelado en Brigalow Research Station, del centro de Queensland.

SUELO	RUDOSOL	RUDOSOL GRIS	TENOSOL	DERMOSOL ROJO	VERTOSOL GRIS	VERTOSOL NEGRO
PAWC (mm) a 1,5m	43	51	88	132	182	232
DRENAJE PRONOSTICADO (MES/AÑO), PARA BRIGALOW RESEARCH STATION (702 MM PRECIPITACIONES/AÑO)						
Bosque	100	59	14	5	0	0
Pastos	142	111	78	19	2	0

Fuente: adaptado de Yee Yet y Silburn (2003).

Una gama de otras investigaciones sobre los perfiles de sales solubles en el suelo de la región (de los cuales Tolmie et al. 2011 es un ejemplo útil) ha confirmado que estas estimaciones de drenaje modeladas son coherentes con el rendimiento en el campo. Sin embargo, los siguientes comentarios de Yee Yet y Silburn (2003) sobre los impactos en la vegetación son instructivos:

Los árboles potencialmente reducen el drenaje por dos razones (a) tienen raíces más profundas que los cultivos o pasturas y por lo tanto crean un mayor déficit hídrico del suelo, y (b) transpiran durante más días del año en comparación con los cultivos y pasturas latentes de invierno, esto es, más "días verdes" durante todo el año. Poco se sabe acerca de la profundidad de la absorción de agua de las raíces de los árboles en la [cuenca Murray-Darling, Queensland] y en algunos suelos puede no ser mayor que para pastos y cultivos. Sin embargo, es poco probable que los pastos y cultivos tengan raíces más profundas que los árboles sanos y otras plantas perennes saludables y bien adaptadas. Del mismo modo, es poco probable que los cultivos y pasturas, en la mayoría de los casos, tengan más "días verdes" que los árboles de hoja perenne. Por lo tanto, los árboles o la vegetación perenne en general tienen una mayor evapotranspiración y menos drenaje que otros tipos de vegetación.

El desafío para la rehabilitación de relieves de minas es ser capaz de entregar una cubierta de acumulación y descarga de profundidad y textura adecuadas para proporcionar suficiente PAWC y fertilidad adecuada para sustentar el crecimiento de árboles y hierbas.

También hay que tener en cuenta que la descarga de agua desde la parte superior de los vertederos de residuos conlleva un riesgo significativo. En muchas situaciones, la escorrentía de la parte superior del relieve se concentra de manera tal que se necesita algún tipo de línea de caudal estable para llevar el agua a nivel del suelo, donde se requerirá un punto de descarga controlada. Normalmente se utilizan conductos de roca o rampas, pero las posibilidades de falla de este tipo de estructuras son extremadamente altas.

Cuando los niveles de cubierta de la vegetación (particularmente hierba) son altos, es posible tener una escorrentía desde la cima del relieve que circule de modo constante y pausado hasta los bancales externos y se desplace hasta el nivel del suelo sin ocasionar daños. En estas situaciones, son esenciales altos niveles de cubierta de contacto en la superficie.

Si se retiene agua en la cima del vertedero de desechos o de la instalación de almacenaje de escorias, es esencial tener en cuenta el posible estancamiento prolongado y el daño para las plantas. También es posible que el agua estancada en la cima del relieve se infiltre y pueda causar cierto hundimiento dentro de materiales poco compactados y dar lugar a pozos. Por estas razones, se debería minimizar la profundidad y duración del estancamiento en todos los puntos de la superficie del relieve. Esto se puede conseguir manteniendo a nivel la parte superior del relieve, aumentando al máximo la aspereza de la superficie e instalando diques para crear celdas relativamente pequeñas de una a tres hectáreas.

También es apropiada la instalación de vegetación de raíces profundas para aumentar el consumo de agua.

4.3.8 Gestión de caudales de drenaje de la superficie

Regularmente, se adopta una gama de opciones para "gestionar" los caudales de superficie. Debido a que estas opciones pueden incluir importantes riesgos a largo plazo, la decisión de construir un control de caudal o una red de drenaje de ingeniería debería tomarse con cierto cuidado.

Se pueden instalar diques perimetrales para contener el exceso de lluvias en la parte superior del relieve e infiltrarla de manera relativamente uniforme en las células de nivel (véase, por ejemplo, Squires et al. 2012), en lugar de que caudales incontrolados se descarguen sobre las pendientes de los bancales exteriores y produzcan barrancos. Como alternativa, se pueden formar trayectorias de caudal en la parte superior del relieve y diseñarlas para descargar exceso de precipitaciones en un punto de descarga estabilizado. La parte superior del relieve puede tener una cuenca o múltiples cuencas, cada una con un punto de descarga designado. Las decisiones sobre cómo gestionar el exceso de precipitaciones en la capa superior de un relieve rehabilitado se ven influidas por los riesgos percibidos de drenaje profundo, por el clima reinante y probables tasas de escorrentía, y por las condiciones del suelo y de la vegetación que puedan crearse en la parte superior del relieve. Cuanto mayor sea el caudal que se recoge en un solo canal, mayor será la dificultad de la estabilización de su descarga, y mayor es el daño potencial si la estrategia de estabilización falla.

Las laderas y bancales exteriores construidas para los montículos han sido tradicionalmente lineales, con bermas situadas a intervalos para interceptar escorrentías. Las bermas pueden servir tanto para recoger el agua como para encauzar las escorrentías hasta los drenajes de roca. En general, la formación de cauces es el tipo de erosión más común producida en los relieves construidos sobre minas; esto es una consecuencia directa de la falla de las bermas. Cuando las bermas fallan, descargan caudales concentrados laderas abajo e inician barrancos. Las razones para el colapso de las bermas incluyen construcción inadecuada, formación de chorreras y saturación por acumulación de sedimentos. En los lugares en que las tasas de erosión sean significativas (normalmente en zonas áridas con muy escasa vegetación de superficie para proporcionar control de la erosión), los perfiles externos de bancal que cuenten con bermas necesitarán mantenimiento regular (retirada de los sedimentos) en tanto que la erosión continúe, o de lo contrario, terminarán por colapsarse con sedimentos y provocarán la formación de barrancos (Howard & Roddy 2012b).

Los riesgos y las consecuencias asociados con la presencia de bermas en relieves de residuos han sido ampliamente documentados (Loch y Willgoose 2000; Vacher et al 2004;. Loch y Vacher 2006; Stevens 2006; Howard et al., 2010). Por esta razón, durante la rehabilitación inicial algunas minas han adoptado la práctica de utilizar bermas o cierta forma de bancales que cruzan las laderas, para después retirarlas una vez que la vegetación se ha asentado y la ladera se ha estabilizado. Otros sitios adoptaron opciones que les permitieron evitar el uso de bermas; algunas de las estrategias incluyeron la colocación estratégica de restos de árboles para controlar la erosión (Howard et al. 2010) y la incorporación de roca en la superficie de los bancales externos para reducir la erosión potencial. Otra opción es usar modelado de erosión para crear laderas de perfil cóncavo para reducir la erosión potencial (Howard et al. 2010). Esto puede producir una reducción significativa en el potencial de erosión, aunque sólo en materiales adecuados.

5.0 IMPLEMENTACIÓN DE LA REHABILITACIÓN

Mensajes clave

- La construcción de perfiles de rehabilitación varía considerablemente y suele ser determinada en gran parte por los métodos de excavación minera.
- Una gama de software está disponible para permitirle a las empresas optimizar los costos de la construcción de vertederos de residuos, garantizando programación óptima de arrastre y vaciado.
- La selección de las especies de plantas a ser utilizadas en las áreas de rehabilitación está influenciada por los objetivos de la rehabilitación, los criterios de finalización y el uso de la tierra posterior a las actividades mineras
- El medio de cultivo colocado en áreas que serán rehabilitadas debe ser capaz de soportar una cubierta vegetal autosostenible.
- Los principales problemas de la gestión de la rehabilitación son incendios, malezas, animales salvajes, la erosión, enfermedades de las plantas y el ciclo de nutrientes.

En esta sección, la aplicación de técnicas de rehabilitación se divide en subsecciones: construcción de relieves; selección de especies; asentamiento de un medio de crecimiento de plantas; mejora física; mejora química; mejora biológica; recolonización de la fauna; y gestión de la rehabilitación.

Existe una superposición significativa entre las subsecciones, que en última instancia debería integrarse en una normativa de rehabilitación detallada.

5.1 Construcción de relieves

La construcción de relieves rehabilitados varía considerablemente, a menudo dictada por los métodos de excavación. Por ejemplo, las pilas de residuos dragados ofrecen pocas opciones de ubicación selectiva, mientras que las operaciones con camión/pala permiten la ubicación selectiva para encapsular los materiales problemáticos, o para asegurar la colocación de los materiales más estables en la parte superior del relieve.

Una gama de programas informáticos permite a las empresas optimizar los costos de construcción de vertederos, asegurando esquemas óptimos de arrastre y vertido. Sin embargo, la mayoría de estos programas cuentan con suposiciones incorporadas que afectan los resultados, por lo que éstas tienen que ser claramente comprendidas para conseguir los resultados planeados.

Del mismo modo, el ahorro en el costo del vertido inicial tiene poco valor si los costos de remodelación final luego aumentan considerablemente. En general, el vertido debe llevarse a cabo para optimizar la remodelación del relieve final.

Es importante considerar la rugosidad de la superficie para la rehabilitación de relieves de minas. La rugosidad tiende a atrapar agua y semillas, y en general, se acepta que una superficie irregular proporciona mejor asentamiento para la vegetación que otra lisa. Sin embargo, mientras que la creación de amplias superficies rugosas mediante cortes o "marcas lunares" puede dar beneficios a corto plazo, a largo plazo puede provocar un incremento de la erosión y la inestabilidad de los relieves, dado que elementos de rugosidades grandes tienden a concentrar caudales sobre mayores amplitudes de ladera y esos grandes caudales luego producen tasas más altas de erosión. Aunque algo de rugosidad en la superficie en general es bueno, ello no implica necesariamente

que grandes elementos de rugosidad sean por tal motivo mejores. El valor de la rugosidad de la superficie está estrechamente ligado con su persistencia en el tiempo, que es controlada en gran parte por la distribución del tamaño de partículas (contenido de roca) del material en el que se crea la rugosidad y el grado en que la saturación puede o no desarrollar nuevas vías de caudal.

5.2 Selección de especies

La selección de las especies vegetales que se utilizarán en las zonas rehabilitadas se ve influenciada por los objetivos de rehabilitación, criterios de éxito y el uso previsto de la tierra (Sección 3.2). En algunos casos, determinadas formas de vegetación y especies pueden ser necesarias para lograr funciones específicas de los ecosistemas, como niveles críticos de la cubierta de la superficie de contacto, el ciclo o la fijación de nutrientes y los impactos sobre la infiltración y el drenaje profundo.

Pueden ser necesarias diferentes especies para los diferentes dominios del sitio. También deben tenerse en cuenta los aspectos físicos, químicos y biológicos del medio de crecimiento, sobre todo cuando se ha producido una modificación significativa en la condición del medio debido al uso previo de la tierra, al almacenamiento o a la influencia de la extracción o procesamiento.

Cuando ha habido una modificación significativa, una estrategia útil puede ser buscar en el área local análogos naturales del paisaje, y de terrenos de mina posteriores a las actividades mineras y utilizarlos como modelos para el ecosistema posterior a la actividad minera propuesto.

Si no se pueden encontrar análogos naturales, esto no debe ser visto como una limitación. Una opción es seleccionar las especies que son tolerantes a las condiciones dentro del medio de crecimiento y una combinación adecuada de formas de vida para satisfacer los objetivos de rehabilitación. Como alternativa, es posible que el medio de crecimiento deba modificarse o gestionarse para asegurar que se puedan cumplir los objetivos de rehabilitación.

Estudio de caso 3: Selección de especies y gestión de la cubierta superior del suelo en minas de bauxita de Alcoa, en Australia Occidental

En operaciones de bauxita de Alcoa, en Australia Occidental, el monitoreo de la composición de especies del bosque de eucaliptos jarrah no afectado por la minería proporciona los datos de referencia utilizados para seleccionar especies para la restauración de las zonas excavadas. Alcoa hace estudios de vegetación previos a las actividades mineras en una cuadrícula de 120 m x 120 m en todas las áreas a ser excavadas. Además, se ha establecido una red de parcelas forestales permanentes de 20 m x 20 m en algunas partes del bosque de eucaliptos jarrah donde normalmente se efectúa la explotación minera. Estas dos fuentes de datos se utilizan para determinar la meta de riqueza de especies para las áreas que se restauran y para guiar la selección de especies para la mezcla de semillas que se aplica a las áreas restauradas y para las plantas que se cultivan en viveros de Alcoa. Alcoa ha establecido una meta interna de alcanzar el 100% de la riqueza de las especies de las plantas en las zonas restauradas. En la práctica, esto significa que una parcela de monitoreo de 20 m x 20 m en bosque restaurado debería tener el mismo número de especies que una parcela de 20 m x 20 en bosques no afectados por la minería. Sin embargo, también es importante el asentamiento de un bosque restaurado de eucaliptos jarrah con una composición similar a la de un bosque no excavado.

Alrededor del 60% de las especies en los sitios restaurados se originan a partir de semillas en la capa superior fértil que se remueve de sitios "donantes", que han sido despejados antes de las actividades de minería, y de inmediato se "devuelven" a las áreas que se están restaurando. El uso de la capa superior fértil de suelo de los sitios donantes es importante, porque esta produce como mínimo un 33% más especies en los sitios restaurados, que la capa superior del suelo que ha sido apilada antes de su uso.

Anteriormente, la capa superior fértil se devolvía usando rascadores. Sin embargo, es muy difícil aplicar capas finas de suelo usando solamente rascadores. Para permitir un uso más eficiente de una cantidad limitada de capa superior fértil, un medida reciente ha sido esparcir capas finas (de 10 a 25 mm) de tierra usando un camión articulado modificado.



Capa superior fértil esparcida como capa fina sobre una excavación minera recientemente restaurada.



Sotobosque rico en especies en un bosque de eucaliptos jarrah no afectado por la minería, con abundantes especies de monocotiledóneas (especialmente juncos y juncias).

Se utilizan datos de monitoreo botánico de bosques no afectados por las actividades mineras para identificar especies que son abundantes en el bosque, pero que están ausentes o se producen sólo en cantidades muy bajas en las zonas restauradas. Esas especies son objeto de inclusión, ya sea en la mezcla para siembra a voleo o para la propagación en vivero. Si la semilla está disponible en grandes cantidades, la siembra a voleo es la opción preferida. Sin embargo, el bosque de eucaliptos jarrah también contiene una cantidad importante de especies rebrotadoras de larga vida, de crecimiento lento, sobre todo juncos y juncias. Dichas especies son muy abundantes en los bosques no afectados por actividades mineras, pero no se vuelven a asentar a partir de la capa superior de suelo fértil utilizada en la restauración, y suelen producir pocas semillas o semillas que son difíciles de germinar, lo que los hace inadecuadas para su inclusión en una mezcla para siembra a voleo. Estas especies denominadas

"recalcitrantes" se propagan en el vivero Marrinup de Alcoa y luego se siembran en zonas recién restauradas. Las investigaciones realizadas durante más de 20 años se han traducido en el desarrollo de técnicas de propagación adecuadas para una gama de especies recalcitrantes. El cultivo de tejidos se utiliza para los juncos, juncias y esquejes para la mayoría de las especies de sotobosque de hoja ancha. Todos los años, Alcoa produce y planta alrededor de 450.000 plantas recalcitrantes en zonas recién restauradas.



Tetraria capillaris (Cyperaceae) producida por cultura de tejido y plantada en un sitio restaurado. La planta está rodeada de una malla protectora de plástico para desalentar el pastoreo de canguros

El intento inicial de revegetación debe establecer las bases para un sistema autosostenible, de manera que los procesos sucesivos den como resultado el complejo de vegetación deseado. Se deberían utilizar estudios de vegetación de las evaluaciones de impacto medioambiental como punto de partida para confeccionar una lista de especies, si el objetivo es que zonas afectadas por la minería vuelvan a tener un tipo de vegetación similar al que existía antes de la explotación. En general, las especies no nativas deberían evitarse, pero pueden tenerse en cuenta cuando el uso previsto de la tierra después de la minería es el pastoreo o cultivo, o cuando son ampliamente endémicas en las zonas circundantes.

En los ecosistemas nativos, se debería utilizar una combinación de especies de cubierta terrestre, arbustos y árboles. También se deberían tener en cuenta especies más raras o amenazadas, si el medio de crecimiento es adecuado para su asentamiento. Esto podría ocurrir usando trasplantes directos que fueron rescatados antes del despejado, o el uso de semillas que fueron obtenidas de plantas removidas o plantas de zonas adyacentes.

Se puede sembrar un cultivo de cubierta con las especies nativas para proteger el terreno reemplazado contra la erosión durante el primer año, antes de que las especies nativas de crecimiento lento puedan proporcionar algo de protección. En tales casos, se debería añadir suficiente fertilizante para lograr el crecimiento deseado del cultivo de cubierta sin afectar negativamente a las especies nativas. Por ejemplo, un cultivo de avena de cubierta se siembra con fertilizantes y semillas nativas sobre áreas con mantilla en una rehabilitación minera en arenas minerales pesadas cerca de Eneabba en Australia Occidental. La avena proporciona protección para la germinación de los vástagos en la primera temporada y luego es reemplazada por especies pioneras de rápido crecimiento en estaciones posteriores (Petersen y Brooks 1996).

Sin embargo, en algunos casos, el cultivo de cubierta puede competir con la vegetación meta por los nutrientes vegetales escasos y el agua del suelo. Además, a pesar de que parecen proporcionar altos niveles de cubierta de contacto, los cultivos de cubierta suelen no alcanzar la densidad de tallos y los niveles de cubierta de contacto de superficie necesaria para controlar la erosión de los caudales de la superficie. En consecuencia, se deberían considerar estrategias de revegetación a la luz de las condiciones específicas del lugar.

5.3 Establecimiento de un medio para el crecimiento de la vegetación

El medio de crecimiento colocado en áreas a ser rehabilitadas debe ser capaz de sustentar una cubierta vegetal autosostenible. Debería:

- tener la capacidad de infiltración adecuada
- tener una capacidad suficiente de agua disponible
- · tener una aireación adecuada
- proporcionar una adecuada profundidad a las raíces, no restringida por la impedancia mecánica o por condiciones hostiles del subsuelo
- ser capaz de suministrar nutrientes adecuados para las plantas
- estar libre de salinidad, acidez y alcalinidad excesivas
- proporcionar las asociaciones microbianas necesarias para el crecimiento vegetal.

Puede ser posible crear un medio de crecimiento adecuado a partir del material de sobrecarga excavado o de las escorias solamente, o a partir de la capa superior del suelo colocada sobre esos materiales. Para lograr una zona de raíces satisfactoria, es posible que el suelo y la sobrecarga puedan tener que manipularse de forma selectiva. Esto implica la colocación de materiales que no son adecuados para el crecimiento profundo de plantas dentro del perfil, y la colocación de material adecuado cerca de la superficie. Si hay un déficit de la cubierta superior (como suele ser el caso en las minas más antiguas), el material de subsuelo inerte puede ser adecuado, pero es probable que requiera mejoras adicionales físicas, químicas y, en especial, biológicas, antes de que sea adecuado para el crecimiento de la vegetación.⁴

⁴ Las subsecciones siguientes exponen opciones de mejoramiento. Las subsecciones sobre mejoras físicas, químicas y biológicas son particularmente pertinentes cuando se utiliza sobrecarga o material de escorias como medio de crecimiento.

La capa superior del suelo suele ser el factor más importante en el éxito de la rehabilitación, en particular cuando el objetivo es restaurar un ecosistema nativo. La decisión sobre si el suelo se debe conservar durante la extracción minera puede hacerse sólo después de una evaluación exhaustiva de la naturaleza y distribución de la tierra y de los tipos de sobrecarga antes de la actividad minera. En general, el suelo debería conservarse y utilizarse en el programa de rehabilitación, cuando el material de sobrecarga o las escorias no pueden sustentar el uso deseado de la tierra tras la explotación minera, incluso si se aplican tratamientos de mejora con valor similar al costo involucrado en la conservación y la reposición de la capa superior del suelo.

Sin embargo, en casos excepcionales, la capa superior del suelo puede contener cargas excesivas de semillas de malezas o hierbas introducidas que pueden rivalizar con la vegetación meta. Si el costo de la gestión de las malezas en la capa superior del suelo después de su extensión supera el costo de mejorar el subsuelo para que sea un medio de crecimiento adecuado, la capa superior del suelo se debería enterrar. Si las cargas de semilla de hierbas introducidas e invasoras en la capa superior del suelo son un problema, una alternativa es colocar tiras de suelo fértil con tiras intermitentes de material de sobrecarga. Las áreas de capa superior de suelo fértil proporcionan una cobertura de hierba inmediata y actúan como una fuente de semillas de hierba para invadir las zonas de sobrecarga una vez que se han asentado árboles nativos, superando de esta manera el problema de que especies introducidas rivalicen con los árboles y arbustos nativos. Esta estrategia depende en gran parte del objetivo de la rehabilitación, las propiedades del material y el uso previsto de la tierra.

La mayoría de los suelos superficiales presentan menos limitaciones al crecimiento de las plantas que el material de sobrecarga, y el costo adicional de manejo del suelo en general se ve compensado por un mayor éxito en el asentamiento de una cubierta vegetal. Las ventajas y desventajas de la conservación de la capa superior fértil para la rehabilitación se describen a continuación y deberían ser evaluados para cada sitio en particular.

Por lo general, el uso de todo el perfil del suelo es solo aconsejable si todos los horizontes son satisfactorios para el crecimiento de plantas, o son capaces de ser convertidos en satisfactorios a través de la mejora química. Los horizontes pueden ser quitados y posteriormente colocados en orden, o se pueden mezclar. Sin embargo, no se recomienda mezclar el subsuelo si tiene atributos como elevada salinidad, sodicidad o la capacidad de fijación de P, que producirían una reducción considerable del valor del suelo fértil como medio de crecimiento.

Remover el horizonte superficial separado del subsuelo ofrece la oportunidad de recrear, lo más exactamente posible, el perfil del suelo original, con el horizonte A rico en nutrientes y microbios en la superficie, donde será explotado al máximo por las raíces de las plantas. La doble remoción de la capa superior del suelo, por la que se eliminan de 50 a 100 mm de tierra y se colocan nuevamente por separado en la parte superior de la capa superior del suelo restante, puede ser justificado, en particular cuando el objetivo es restaurar la flora nativa. La mayoría de las semillas se almacenan en esta capa superior del suelo, y su remoción y retorno como una capa delgada sobre la superficie maximizan la contribución de esas semillas a la flora posterior a la explotación minera. En la Tabla 2, se enumeran algunas de las ventajas y desventajas del uso de la capa superior fértil en un programa de rehabilitación.

Tabla 2: Ventajas y desventajas del uso de la capa superior de suelo fértil en un programa de rehabilitación

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Suministro de semillas	Infestación de malezas
Microbios beneficiosos	Costo
Reducción de fertilizante	Riesgo de erosión
La cubierta se establece más rápidamente	Competencia
Entierro de rocas	
Reduce las propiedades adversas de la sobrecarga	

Si el banco de semillas del suelo es importante para el éxito de la rehabilitación, durante las operaciones de rehabilitación, la capa superficial se debería manejar de manera de que pueda conservar diversidad de plantas en el banco de semillas de la capa superficial, y maximice el asentamiento de la vegetación tras la redistribución del terreno. Las consideraciones específicas para la gestión del banco de semillas del suelo incluyen:

- recoger la capa superficial en la época del año en que sea probable que el banco de semillas del suelo sea mayor
- antes de comenzar la actividad minera, tener en cuenta los efectos de la quema de vegetación y si esto puede influenciar la supervivencia de las semillas o la germinabilidad
- redistribuir la capa superior del suelo directamente sobre una zona preparada para la rehabilitación, de ser posible.

Cuando la cantidad de capa superior es limitada, es preferible esparcirla ligeramente o por franjas. La superficie final de la capa superior del suelo debe estar recientemente colocada y disponible para la siembra, si es éste el paso siguiente.

Idealmente, la capa superior no debería apilarse, debería levantarse, transportarse y distribuirse en un área recontorneada en una operación (conocida como "devolución directa"). Cuando la capa superior del suelo se remueve doblemente, el horizonte superficial debería ser devuelto directamente, de ser posible, y el horizonte subterráneo puede ser apilado adyacente a la zona donde se va a utilizar en la rehabilitación. La devolución directa tiene varias ventajas en comparación con la colocación de la capa superior en apilados y su almacenamiento para la rehabilitación posterior. En primer lugar, se evita la doble manipulación. En segundo lugar, la necesidad de crear apilados puede significar que debe despejarse tierra adicional. En tercer lugar, y más importante, el apilado reduce la calidad del recurso del suelo. Los apilados se vuelven anaeróbicos, se deteriora la estructura del suelo, la materia orgánica y los nutrientes se pueden perder, las semillas se deterioran, otros propagadores de plantas mueren y las poblaciones de microorganismos beneficiosos para el suelo se reducen significativamente. Por ejemplo, la investigación de las semillas en la capa superior del suelo antes de la minería, y durante todo el procedimiento de rehabilitación después de la extracción de bauxita en Australia Occidental, demostró que gran parte de este valioso acopio se estaba perdiendo en el proceso de rehabilitación. Sin embargo, también demostró que se perdieron menos semillas cuando la cubierta superior se devolvió directamente (50%) a los sitios de rehabilitación en lugar de ser apilada (15%) (Koch et al. 1996).

Por el contrario, Keipert (2005) llegó a la conclusión de que la mayor parte del deterioro de la capa superior se produjo en los primeros 12 meses del apilado, sin importar la altura del mismo. En el Hunter Valley, donde el espacio para apilados de cubierta superior del suelo es limitado, Keipert comprobó que era aceptable apilar material en grandes vertederos y concentrarse en mejorar los aspectos físicos, químicos y biológicos del proceso de rehabilitación. Esto resalta la importancia de igualar la rehabilitación identificada del uso de la tierra con las limitaciones del sitio en las diferentes regiones mineras de Australia.

Sin embargo, las condiciones climáticas y las dificultades en la sincronización de la rehabilitación para adaptarse a la actividad minera por lo general significan que al menos un poco de terreno debe ser apilado para su uso posterior. El apilado durante más de unos seis meses puede causar la degradación estructural y la muerte de las semillas y microorganismos. Si la capa superior del suelo debe ser apilada, debería serlo durante un tiempo lo más breve posible y los apilados deben ser:

- a la menor altura posible (<2 m), con una gran área de superficie
- revegetados para proteger el suelo de la erosión, desalentar malezas y mantener poblaciones activas de microbios beneficiosos para el suelo
- ubicados donde no se verán afectados por futuras actividades de minería, ya que el manejo excesivo afectará negativamente la estructura del suelo.

El material de la capa superior del suelo y del subsuelo debe ser apilado por separado. La capa superior no debe ser manipulada cuando está mojada, ya que puede producirse un deterioro estructural que es difícil y costoso de mejorar. Idealmente, los suelos deben removerse y reemplazarse con un contenido de humedad de entre el 10% y el 15%, para evitar los efectos adversos de la compactación y la descomposición estructural. El sitio debe utilizar un SIG para mantener un inventario de volúmenes y ubicaciones de apilados de la capa superficial del suelo, para asegurar el uso y la gestión más eficientes del material. Se debería usar mapeo de los suelos durante las evaluaciones de impacto ambiental en las zonas de remoción, para garantizar que se utiliza la máxima cantidad de capa superior del suelo.

La capa superior del suelo se puede extraer y reponer usando diversas maquinarias, las técnicas más comunes son usar un cargador y camión, un raspador o excavadora, que empuje la capa superior en una hilera.

5.4 Mejora física

Las áreas rehabilitadas deberían removerse para eliminar la compactación de maquinaria pesada, favorecer la infiltración del agua (excepto en los casos en que exista una razón particular para desalentar la infiltración, como se señaló anteriormente) y evitar la erosión. Si hay cursos de agua de ingeniería incluidos en el relieve, las áreas deberían removerse con inclinación (por ejemplo, 0,5 %). De lo contrario, deben removerse en el contorno. La remoción generalmente se hace con una excavadora, aunque el escarificado superficial se puede hacer con tractores o motoniveladoras. Las profundidades de los cortes varían según el tipo de material de despojo, la profundidad de la capa superior del suelo y el equipo utilizado para las operaciones de rehabilitación. Por ejemplo, en algunos sitios la remoción puede tener como objetivo llevar rocas hacia arriba para que se mezclen con la capa superior del suelo y reducir su erosionabilidad. En otros casos, se debe tener cuidado de evitar mezclar residuos salinos o sódicos subyacentes en la capa superior del suelo.

Mezclar rocas en la superficie del suelo puede ser útil para reducir el potencial de erosión (Howard y Lowe 2014), y para aumentar la infiltración y la lixiviación de sales a la profundidad (Jennings et al. 1993). Sin embargo, es importante lograr la mezcla correcta de roca y suelo (Howard y Lowe 2014), y la estabilidad del componente fino mezclado con roca sigue siendo importante. Si componente fino es dispersivo, normalmente los caudales continuarán erosionándolo, independientemente de la cubierta de roca (Figura 9).

Figura 9: la erosión progresiva de un drenaje formado en suelo arenoso dispersivo con una cubierta limitada de roca, erosión inicial (izquierda) y aumento de la incisión (derecha)





Fotos: R Loch.

5.5 Mejora química

Las preocupaciones comunes con respecto a las propiedades químicas de las sobrecargas y capas superiores del suelo incluyen extremos de pH, sodicidad, salinidad y baja fertilidad.

5.5.1 pH

Al tratar con comunidades de plantas nativas, se debe tener en cuenta que el rango de pH comúnmente especificado para cultivos agrícolas podría no ser pertinente para las obras de rehabilitación. La vegetación nativa puede adaptarse a los extremos de pH, y la información sobre las condiciones del suelo de referencia es esencial. De ser necesario, se podría utilizar cal o azufre para modificar el pH.

5.5.2 Sodicidad

Los suelos se describen como "sódicos" cuando el sodio intercambiable excede el 6% de la capacidad de intercambio de cationes, y "altamente sódicos" cuando excede el 15%. Los suelos sódicos generalmente son propensos a la dispersión de las arcillas; aunque hay interacciones con la salinidad del suelo, con otros cationes intercambiables y con el tipo y contenido de arcillas. Por tal motivo, científicos de suelos experimentados deberían participar en la evaluación del riesgo de dispersión.

Las sobrecargas y capas superiores del suelo dispersivas son propensas al endurecimiento de la superficie, baja permeabilidad y resecamiento, y también (por lo general) son altamente erosivas y susceptibles a chorreras. Los impactos de la dispersión de arcilla son más significativos en materiales con más de un 10 por ciento de arcilla. El grado de dispersión producido también dependerá de la salinidad, ya que los niveles elevados suprimen la dispersión.

Se debería tener en cuenta la aplicación de yeso para estos materiales. Deberían realizarse pruebas específicas del suelo para determinar las tasas de aplicación, pero se requiere generalmente de 5 a 15 t/ha. La aplicación de yeso a las áreas de rehabilitación reformadas puede ser difícil debido a sus relativamente altos gradientes, y se ha utilizado la aplicación aérea en algunos casos. Para las capas superficiales del suelo, es muy recomendable la aplicación de yeso antes de la remoción inicial, ya que el yeso se mezcla con el suelo durante el proceso de remoción y luego tiene un período más largo para disolverse e interactuar con el suelo. Se debe tener en cuenta que el yeso no es altamente soluble, y sus efectos significativos sobre las propiedades del suelo pueden ser lentos.

5.5.3 Salinidad

Los desechos salinos son comunes en la minería. En general, es poco lo que se puede hacer para remediarlos. Las estrategias de gestión son identificarlos y asegurarse de que no se coloquen cerca de la superficie de los relieves de desechos rehabilitados.

Debe procederse con cuidado para minimizar o gestionar la filtración salina desde la base de los vertederos de desechos que contengan materiales salinos. Las opciones incluyen la minimización de drenaje profundo (que podría lixiviar la sal del relieve), el uso de vegetación tolerante a la sal, la mezcla con residuos de roca para aumentar la lixiviación de sal de la zona radicular de la planta, y la encapsulación, de ser posible. Igualmente, puede ser necesario abordar el movimiento de la filtración salina a profundidad y a las aguas subterráneas locales.

5.5.4 Fertilidad

En muchas situaciones, el medio de crecimiento preparado implicará que cierta cantidad de la capa superior del suelo se coloque sobre desechos con diversos grados de aptitud para el crecimiento de las plantas. Es probable que el "suelo" resultante contenga totales de nutrientes de plantas que son muy diferentes de (y más bajos) que los que se encuentran en el ecosistema meta que las obras de rehabilitación buscan establecer. En consecuencia, la fertilización puede ser necesaria para reponer los niveles que pueden ser esenciales para la sostenibilidad de los ecosistemas, pero hay desafíos. En un ecosistema en funcionamiento, una proporción de los totales de nutrientes está presente en la biomasa por encima y por debajo del suelo, y una proporción muy alta está en forma lentamente disponible como materia orgánica (Westman 1978). La aplicación de una única gran cantidad de algún nutriente en forma altamente soluble como fertilizante puede no alcanzar los resultados deseados. El crecimiento de malezas puede verse fomentado, el nutriente puede perderse o quedar inmovilizado, y la reservas y ciclo de nutrientes necesarios pueden no lograrse. Por lo tanto, debe pensarse en lo siguiente:

- los niveles de nutrientes necesarios para iniciar el crecimiento de plantas
- cuáles nutrientes se añadirán posteriormente al sistema mediante la actividad de las plantas
- una estrategia para lograr el ecosistema final, completa con reservas de nutrientes en funcionamiento, en diversas formas y cantidades, con el ciclo adecuado.

Suele requerirse una aplicación inicial de fertilizantes en las áreas de rehabilitación, en particular para reponer los niveles de nitrógeno que bajan a través de la oxidación durante el manejo de la capa superior del suelo y para fomentar el crecimiento de pastos para controlar los riesgos de erosión.

Las muestras de suelo deben ser recogidas y analizadas para determinar el tipo de fertilizante apropiado, formulaciones y tasas de aplicación. Las tasas de aplicación típicas de fertilizantes ricos en nitrógeno y en fósforo son de 100 a 300 kg/ha. Sin embargo, deben realizarse pruebas específicas en el sitio para determinar la tasa más adecuada. La remoción, fertilización y siembra se realizan a menudo en una única operación para evitar la compactación y la perturbación causada por el uso de varios vehículos diferentes para las operaciones, o de hacer varias pasadas con el mismo vehículo.

La aplicación continua de fertilizantes no es común, pero puede ser necesaria en algunos casos a medida que el ecosistema se desarrolla, para asegurar que se alcancen los totales de nutrientes. (El fósforo del suelo suele ser una limitación importante.)

Cuando se asientan arbustos y árboles nativos en terrenos excavados para minas, normalmente se incluye especies de leguminosas que fijan el nitrógeno en la mezcla de semillas; estas especies pueden fijar hasta 20 kg de N/ha al año. Los fertilizantes orgánicos (tales como biosólidos, mantillo y abono) generalmente son beneficiosos, pero suelen ser costosos y difíciles de aplicar. A diferencia de la mayoría de los fertilizantes inorgánicos, son beneficiosos tanto como fertilizantes y como correcciones del suelo. La aplicación excesiva de fertilizantes (especialmente nitrógeno) puede agravar un problema de malezas existente y debería evitarse.

Si se producen toxicidades de metal, hay dos estrategias para obtener una cubierta vegetal: la reducción de la toxicidad o el uso de especies de plantas tolerantes al metal. La solubilidad de muchos metales se puede reducir por alcalinización para elevar el pH, mediante la adición de fertilizantes de fósforo o mediante la incorporación de materia orgánica, como lodos de aguas residuales, para formar un complejo de metales. Sin embargo, hay límites para lo que se puede lograr de esta manera y el objetivo de un programa de rehabilitación debería ser evitar materiales potencialmente tóxicos en la zona radicular. La aplicación de cal agrícola a una tasa de 2,5 a 3,5 t/ha aumentará el pH en aproximadamente 0,5 unidades, siempre que el pH del suelo no sea superior a 5,0.

5.6 Mejora biológica

La forma más importante de mejora biológica en las zonas mineras rehabilitadas es el asentamiento de vegetación. La vegetación debe ser compatible con el objetivo de rehabilitación y uso del suelo previsto (véase la Sección 4.2.2). Las especies de plantas se pueden establecer en las zonas rehabilitadas a partir de propagadores (semillas, tubérculo-lignosas, cormos, bulbos, rizomas y raíces) almacenados en la capa superior del suelo y por:

- · siembra de semillas
- difusión de plantas cosechadas con semilla bradysporous (semilla retenida en la planta en cápsulas leñosas persistentes) en las zonas rehabilitadas
- plantación de vástagos de vivero
- trasplante de plantas individuales desde áreas naturales
- transferencia de cantidades sustanciales (> 1 m²) de suelo relativamente inalteradas, con su vegetación intacta desde áreas naturales
- permitir la invasión desde zonas circundantes a través de vectores, tales como aves, animales y viento.

Cada una de estas técnicas se discute en más detalle a continuación. En general, se necesita una combinación de técnicas, y el costo es el elemento más importante para la selección de las técnicas más apropiadas.

Por lo general, las reservas de semillas en el suelo reemplazado deben ser complementadas con semillas adicionales recogidas de la vegetación, en o cerca, del yacimiento de la mina. El sembrado de semillas es un método económico y fiable para el establecimiento de algunas especies. La siembra da como resultado una distribución más aleatoria de las plantas que la plantación de vástagos, y genera una vegetación de aspecto más natural. Otras ventajas de la siembra directa son costos bajos de mano de obra y la falta de necesidad de controlar las tasas de crecimiento a través del transplante, lo que significa que es probable que se obtenga una distribución más heterogénea de tamaños de plantas dentro de una especie. Los riesgos incluyen un mayor riesgo de fracaso través de condiciones climáticas adversas, la competencia de malezas, la pérdida de semillas por los insectos y las bajas tasas de germinación de semillas.

Se debe tener en cuenta una serie de aspectos para aumentar las posibilidades de éxito con la plantación directa:

- Aporte de semillas: Las semillas pueden recolectarse o comprarse, pero independientemente de ello, es esencial un control de calidad sobre todas las fases del proceso. La planificación para la recolección de semillas autóctonas debería comenzar con al menos dos años de antelación a la siembra de las mismas, para poder identificar los volúmenes que se necesitan y las fuentes de recolección. Cuando se pueda, las semillas deberían recogerse localmente, porque estarán mejor adaptadas a las condiciones y mantendrán la integridad genética de las procedencias locales. Tras la recolección, habrá que limpiar y almacenar las semillas en condiciones que mantengan la máxima viabilidad durante este tiempo y reduzcan al mínimo el daño de plagas y hongos.
- Tratamiento de las semillas: Con anterioridad a su distribución, es posible que las semillas de muchas especies necesiten tratamiento para iniciar su germinación. Dentro de estos métodos se puede incluir el tratamiento con calor, la escarificación o la exposición a humo o a agua ahumada. Dentro de las fuentes de información sobre qué métodos podrían necesitarse se incluyen los proveedores de semillas, el personal de investigación y las referencias clave (como Floradata, 2001). En zonas donde la lluvia es impredecible, podría ser prudente no tratar todas las semillas, para poder disponer de algunas en los próximos años. Otras semillas podrían necesitar la inoculación con rizobio o presencia de cal.
- Sucesión de ecosistemas: Si el objetivo es establecer un ecosistema autóctono, diverso y sostenible, se deben considerar los aspectos relativos a la evolución de los ecosistemas. Se deberían incluir en la mezcla de semillas las especies pioneras que colonizan rápidamente las zonas afectadas; sin embargo, también deberían asentarse pronto las especies propias de las etapas posteriores, si la experiencia indica que eso es factible. La relativa abundancia de ciertas especies cambiará en cuanto las primeras colonizadoras vayan dando paso a las especies más longevas o, aquellas que colonizaron después, se conviertan proporcionalmente en dominantes. La altas tasas de siembra de algunas especies colonizadoras tempranas puede reducir la diversidad general al rivalizar con otras especies.

- Tasa de siembra: La tasa de siembra se debe determinar mediante pruebas en el yacimiento de la mina. Las tasas comunes para especies nativas de árboles y arbustos utilizadas en las industrias mineras de bauxita y de arenas con alta cantidad de minerales son de 1 a 3 kg/ha, de las cuales del 25 al 35% del peso total son semillas de especies de árboles de dosel, como eucaliptos. La tasa máxima de supervivencia en la siembra directa generalmente es de 1 a 5% para las especies de semilla fina y de 5 a 10% para las especies de semillas gruesas. Si se supone un 75% de viabilidad de las semillas, una guía aproximada de las tasas de siembra es de 0,1 a 1,0 kg/ha para las especies de semilla fina y de 2 a 4 kg/ha para las especies de semilla gruesa. La tasa de aplicación para cada especie en la mezcla de semillas debería basarse en la densidad deseada en las áreas rehabilitadas, ajustada por la viabilidad de las semillas, y las tasas de germinabilidad y asentamiento. En áreas de bosques abiertos o donde la capa de pasto es tanto un componente importante del ensamblaje de la vegetación como esencial para la estabilización de la superficie, pueden ser necesarias tasas de siembra de pasto de 10 a 20 kg/ha.
- Distribución de semillas: Los métodos de esparcimiento de semillas dependerán en parte de la mano de obra
 y equipamiento disponibles. Se puede tratar de reparto manual, con helicóptero, aeronave de ala fija, con
 esparcidor de semillas agrícola o excavadora para remover la tierra (esto asegura que las semillas se depositen
 sobre una superficie recién removida y no en una que tiene costra). Es importante asegurarse de esparcir cada
 especie de acuerdo a la tasa meta seleccionada. Algunos métodos mecánicos no distribuyen correctamente
 ciertos tipos de semillas.
- Tiempo de siembra: el tiempo de la siembra puede ser importante para una revegetación exitosa. En la mayoría de los casos, las semillas deben sembrarse inmediatamente antes del comienzo esperado de lluvias confiables o después del final de la temporada. Las semillas autóctonas pueden requerir condiciones de humedad y temperatura específicas para germinar, para asentarse en el momento óptimo del año para la supervivencia. Esta necesidad de múltiples condiciones puede permitir que la semilla se siembre mucho antes de lo que normalmente se esperaría que germine.
- **Distribución de la vegetación:** En muchas comunidades de plantas, como los brezales, muchas especies no liberan sus semillas con facilidad. Tales especies se pueden reintroducir recolectando vegetación de las zonas despejadas para la minería y devolviéndola directamente a las nuevas zonas en rehabilitación, donde podrán liberar sus semillas y dar protección contra la erosión.

Por lo general, es más económico asentar plantas por siembra directa que por plantación de brotes. La plantación de brotes de vivero es más apropiada cuando la especie en particular no pueden ser asentada en las cantidades adecuadas a través de la siembra o el retorno de la capa superior del suelo, o cuando la densidad de las plantas meta no es muy alta. Puede ser posible propagar estas especies a partir de semillas, esquejes, cultura o divisiones de tejidos, cultivarlas en recipientes en un vivero y luego plantarlas como parte del proceso de rehabilitación. La plantación de brotes de manera regular requiere un proveedor confiable de brotes de calidad consistente o un vivero en el lugar. Las ventajas de la plantación de brotes incluyen el uso más eficiente de las semillas disponibles, el potencial de infección de micorrizas apropiada de los brotes, el control sobre la mezcla de especies y la colocación, y la falta de limitación de las especies incluidas en el programa de revegetación. Las desventajas incluyen mayores costos de la plantación y operación del vivero o compras de brotes, control de la tasa de crecimiento durante la plantación, la necesidad de hacer pedidos con anticipación o de sembrar varios meses antes del uso previsto, el mayor tiempo de plantación requerido y el posible deterioro de los brotes si se retrasa la plantación.

Cuando se plantan brotes en áreas rehabilitadas, se debería tener en cuenta lo siguiente:

- · la época del año (normalmente, justo cuando comienzan las precipitaciones más confiables del año)
- si es conveniente la utilización de herramientas o máquinas para la plantación
- aumentar la disponibilidad de agua para las plantas (por ejemplo, plantando los brotes en el fondo de los surcos hacia los cuales se dirigirá la escasa lluvia)
- proporcionar agua a las plantas mediante el riego físico o mediante el establecimiento de un sistema de goteo
- plantar brotes en montículos donde las inundaciones puedan presentar un problema
- proporcionar protección contra la competencia de las malezas, como el rociado local o el uso de estera de malezas

- proporcionar protección contra los animales de pastoreo (como protectores biodegradables)
- proporcionar la cantidad y el tipo correcto de fertilizante.

El trasplante directo de especies que no se pueden asentar por otros medios es posible mediante la transferencia de secciones o cubos de tierra con remolques de carga y descarga con la vegetación intacta (método conocido como "transferencia de habitat"). Sin embargo, esta es una opción costosa.

Con el paso del tiempo, aunque no se hayan asentado fácilmente utilizando otras técnicas, algunas especies invadirán provenientes de las zonas forestales adyacentes. Por ejemplo, muchas especies de orquídeas no se encuentran en la rehabilitación inicial de minas de bauxita pero invaden con el tiempo, a medida que la micorriza requerida se desarrolla en los ecosistemas de suelo y hojarasca (Grant y Koch 2006). La invasión desde zonas circundantes se puede incrementar mediante el aumento de la superficie de las fronteras entre el área de la rehabilitación y el bosque circundante, y dejando islas de bosque en el medio de excavaciones rehabilitadas.

Algunas plantas no logran asentarse en los sitios rehabilitados donde el objetivo es restaurar la flora nativa, a pesar de la aplicación de semillas y del uso de capa superior de suelo fértil. Suelen ser especies que normalmente responden a la perturbación por medio del rebrote a partir de yemas epicórmicas debajo de la corteza o de varios órganos subterráneos de almacenamiento (tales como tubérculos lignosos, cormos, bulbos, rizomas y raíces). Tales especies recalcitrantes deberían ser el foco de investigación adicional para aprender más acerca de sus ciclos de vida y explorar mecanismos alternativos para asentarlas en las zonas rehabilitadas.

Las plantas forman asociaciones simbióticas beneficiosas con una serie de microorganismos del suelo, incluyendo hongos, bacterias y actinomicetos (plantas unicelulares que normalmente se encuentran en el suelo). Las micorrizas son un componente natural del ecosistema en la mayoría de los suelos australianos. Son muy importantes en Australia, ya que son necesarias para asegurar el asentamiento de algunas especies de plantas. La mayoría de las especies de plantas nativas utilizadas en la rehabilitación probablemente formen asociaciones con micorrizas vesiculares arbusculares (VAM) y hongos ectomicorrícicos. Estos hongos han demostrado ser eficaces en el aumento de la absorción de fósforo por las plantas que crecen en suelos deficientes. La capacidad de los hongos VAM de asociarse con las plantas se agota rápidamente por la perturbación de la capa superior del suelo y el apilamiento. Esto suele dar como resultado bajos niveles de infección en los primeros años de la rehabilitación. De manera similar, sólo un número limitado de especies de hongos ectomicorrícicos se ha observado en las rehabilitaciones iniciales. Como resultado, algunas especies pueden no colonizar áreas de rehabilitación hasta que micorrizas específicas se hayan recolonizado. Para conservar el inóculo de micorriza, la capa superficial del suelo debe ser devuelta directamente siempre que sea posible; cuando el apilamiento es inevitable, las pilas deben ser bajas y revegetadas tan pronto como sea posible. Más recientemente, se han desarrollado inóculos biológicos, que se han aplicado en las zonas rehabilitadas para acelerar el restablecimiento de microbios esenciales

5.7 Recolonización de la fauna

Generalmente, los animales colonizarán áreas rehabilitadas si la composición y la estructura de la vegetación rehabilitada son similares a las áreas circundantes. La experiencia ha demostrado que algunos componentes claves de las necesidades de hábitat de las especies de fauna podrían faltar en la zona de rehabilitación durante muchas décadas. Algunos de los métodos para reintroducir componentes que faltan en el hábitat incluyen:

- el transplante de xantorreas
- la conservación y reutilización de la vegetación mediante su astillado o esparcimiento como mantillo, o la colocación de ramas como cobijo para pequeños invertebrados y reptiles, protección contra la erosión y aporte de nutrientes
- la construcción de nidos como cobijo y hábitat de reproducción para muchas especies de aves y mamíferos
- la devolución de madera cortada para proporcionar cobijo en forma de troncos y pilas de troncos para especies terrestres que buscan refugio dentro o debajo de ellos
- la construcción de hábitats para reptiles mediante una distribución limitada de rocas de superficie
- la construcción de perchas para las aves de rapiña y otras aves (que pueden esparcir semillas)
- el asentamiento de viejos árboles muertos que proporcionan huecos, grietas, corteza exfoliante, etc., todo lo cual sirve de cobijo para muchas especies de reptiles e invertebrados pequeños.

No todas estas técnicas serán adecuadas en todas las situaciones, y se debería proceder con precaución porque algunas pueden plantear más problemas de los que resuelven. Además, deben estar alineadas con el objetivo identificado de la rehabilitación y uso previsto de la tierra (por ejemplo, las pilas de roca o madera podrían no ser compatibles con el uso de la tierra deseado).

Estudio de caso 4: Protección del hábitat para cacatúas negras amenazadas en el bosque de eucaliptos jarrah de Australia Occidental

Alcoa gestiona los efectos de la extracción de bauxita en la fauna amenazada del bosque de eucaliptos jarrah de Australia Occidental a través de un programa de gestión de especies amenazadas. La cacatúa negra de cola roja del bosque es una de esas especies. Anida en grandes huecos de eucaliptos jarrah forestales, especialmente en árboles marri muy grandes (de más de 1,5 m de diámetro) y antiguos (de más de 200 años).

La conservación de árboles con huecos es una estrategia importante en la gestión de los efectos de la minería, y se logra de varias maneras. No se realiza actividad minera en masas forestales antiguas designadas, hecho que preserva árboles jarrah y marri antiguos. También se establecen zonas de amortiguamiento alrededor de masas de edad madura, en la que se excluye la minería. Dentro del panorama de producción más amplio, Alcoa ha desarrollado procedimientos para la identificación y qestión de hábitats de nidos.

El objetivo de esta estrategia es conservar el suficiente hábitat natural de nido para ayudar a mantener las poblaciones reproductoras. Esto implica:

- estudios previos a la actividad minera para identificar y mapear los árboles con nidos en las zonas planeadas para caminos de acarreo y excavaciones
- uso de cartografía SIG para informar y ayudar a la planificación minera para priorizar y proteger el hábitat del nido
- monitoreo de la utilización de huecos de árboles para la reproducción a través de todas las etapas de la actividad minera.

Por ejemplo, la información de mapeo de árboles con nido se utiliza en el diseño de los caminos de acarreo, sumideros de drenaje y zonas de apilado del suelo para evitar eliminar árboles con nido, siempre que sea posible. Los árboles con nido en áreas operacionales potenciales son evaluados y priorizados de manera individual para la protección en función de su uso histórico por cacatúas, su condición y su cercanía a otros nidos fuera del área que se desea despejar.



Además, se han identificado y excluido de actividades de minería alrededor de 100 hectáreas de bosque que es importante para la conservación de las cacatúas negras en las operaciones Myara de Alcoa. La zona tiene una alta concentración de huecos con nidos (más de 40) y es también un sitio de descanso importante para varios cientos de cacatúas.

Estrategias de gestión para todas las especies amenazadas en el área están sustentadas por un programa de investigación de fauna que busca una mejor comprensión de sus requisitos de ecología y hábitat.

Una cacatúa negra de cola roja hembra sentada a la entrada de un hueco con nido. Se calcula que el árbol tiene 250 años. Los nidos se controlan para reproducción y reclutamiento por medio de un sistema innovador de cámara montada en poste, que se utilizó para tomar esta foto.

Foto: T Kirkby.



Se puede ver una cría de cacatúa en el centro hacia abajo de la imagen.

Foto: T Kirkby.

5.8 Gestión de la rehabilitación

El objetivo de la gestión de la rehabilitación es que la zona rehabilitada sea autosostenible y resistente, y que no requiera un mayor esfuerzo de gestión que las áreas circundantes no perturbadas. Los principales problemas de gestión de rehabilitación son incendios, malezas, animales salvajes, erosión, enfermedades de las plantas y el ciclado de nutrientes. Los criterios de éxito requieren que estos temas se aborden antes de que se pueda considerar el cese del arrendamiento. Los principales problemas de gestión para las zonas rehabilitadas se analizan con más detalle en esta sección. Este tema también se trata en el manual de leading practice *Cierre de minas* (DIIS 2016b).

Los incendios son un factor importante en el desarrollo de comunidades de plantas en Australia. Algunas especies son intolerantes al fuego o son intolerantes cuando son jóvenes. Puede ser necesario un plan de protección contra incendios para proteger la zona rehabilitada durante varios años hasta que las plantas sean capaces de sobrevivir a un incendio o hayan fijado las semillas, de modo de poder reasentarse después de un incendio. Las estrategias de control de incendios pueden incluir cortafuegos, quemas para reducción de riesgos en las zonas adyacentes, quemas con frío prescritas en las zonas rehabilitadas y control de malezas. Grant et al. (2007) resumió el trabajo realizado sobre la ecología del fuego realizado en yacimientos de minas de bauxita rehabilitados en el bosque de eucaliptos jarrah de Australia Occidental. Consistió en el uso de fuego para ayudar en el desarrollo sucesivo de zonas rehabilitadas, así como para demostrar la resistencia al fuego como agente de perturbación. Ese trabajo fue fundamental para demostrar la sostenibilidad y la resistencia de las zonas rehabilitadas y facilitó la expedición de un certificado de terminación para grandes áreas que previamente eran parte de la mina Jarrahdale.

El control de la introducción y propagación de malezas es una consideración importante en la rehabilitación. Las infestaciones de malas hierbas en zonas rehabilitadas pueden ser muy difíciles de controlar, por lo que el énfasis debería ponerse en la prevención en lugar de la cura. Las malas hierbas en las zonas adyacentes al área perturbada deben ser controladas para reducir la carga potencial de semillas. Se debe tener cuidado de que las malezas no se introduzcan en la zona en abonos o como contaminantes en semillas de especies deseables. Hay muchos ejemplos de especies de plantas que se han convertido las malas hierbas después de haber sido

introducidas en Australia a sabiendas o inconscientemente, y esta posibilidad debería considerarse siempre cuando se introducen especies exóticas en un programa de rehabilitación. Las técnicas para controlar especies de malas hierbas incluyen métodos físicos/mecánicos, químicos, biológicos y ecológicos. Una cubierta vigorosa de especies de plantas deseadas suele ser un impedimento eficaz para la invasión de especies de malas hierbas. Se puede utilizar el cultivo, el deshierbe manual, la quema y la fumigación con herbicidas para controlar las infestaciones de malezas. Sin embargo, el control puede ser difícil donde hay plantas que necesitan ser retenidas y crecen entre la maleza. Se pueden utilizar herbicidas selectivos para malas hierbas en zonas revegetadas con especies no gramíneas. El deshierbe manual es costoso, pero puede ser eficaz para áreas más pequeñas.

Los animales salvajes pueden dañar gravemente las zonas rehabilitadas por medio de nuevas perturbaciones. Estas especies introducidas pueden ser controladas en los yacimientos mineros y en las zonas adyacentes a través de la utilización de cebos no tóxicos para los animales nativos (por ejemplo, 1080) y el cercado (en algunos casos). Las armas de fuego por lo general no están permitidas en los yacimientos mineros, lo que elimina el tiro como control potencial.

El mantenimiento o aumento de la capacidad del suelo para suministrar nutrientes, para almacenar y abastecer de agua y para apoyar el crecimiento de la raíz debería ser una preocupación importante en el desarrollo de un ecosistema sostenible. El restablecimiento de los ciclos de nutrientes es esencial para la sostenibilidad de la rehabilitación. La minería elimina la vegetación e inevitablemente produce la pérdida de algunos nutrientes vegetales del lugar. Esto es particularmente importante cuando la proporción de los nutrientes totales en el ecosistema que está contenido en la vegetación y la hojarasca sobre la superficie del suelo es alta, como es el caso en muchos ecosistemas australianos. En tales casos, debe haber una entrada de nutrientes al sistema si se trata de alcanzar un nivel de productividad equivalente al del ecosistema previo a las actividades mineras y que sea autosostenible en el largo plazo. A veces, esto se puede lograr a través de una sola aplicación de fertilizante durante la fase de establecimiento de la rehabilitación. Sin embargo, a veces se necesitan aplicaciones de seguimiento, en particular para uso de la tierra para pastoreo o cultivo. En cualquier caso, es importante que los ciclos de nutrientes sean monitoreados en la zona rehabilitada y que los resultados apoyen el restablecimiento de un ecosistema funcional.

Se debe monitorear cualquier desarrollo de erosión significativo. En general, la incisión por caudales terrestres (barrancos, zanjas o chorreras) puede ser motivo de preocupación, debido a su potencial de aumentar gradualmente con el paso del tiempo. Cuando se considere la necesidad y el tipo de acción de reparación, se deben evaluar tanto la causa de la erosión como su potencial de aumento. En algunos casos, la acción de reparación puede causar más perturbaciones o daños al área rehabilitada que el problema específico que se está abordando.

6.0 MONITOREO DEL DESEMPEÑO

Mensajes clave

- El monitoreo de la rehabilitación según prácticas líderes debe tener objetivos claros, estar bien diseñada y estar claramente integrada en la planificación global de la vida de la mina, para asegurar que se han desarrollado soluciones oportunas y rentables para facilitar el cierre de minas sostenible.
- Se deben evaluar los indicadores de rendimiento de rehabilitación y los criterios de terminación con respecto a los objetivos realistas de rehabilitación específicos del sitio, dando cuenta de los recursos físicos y la escala de la perturbación.
- Los indicadores o parámetros a controlar deben ser cuidadosamente seleccionados y obtenidos para facilitar el monitoreo útil a largo plazo y la evaluación de la respuesta a la rehabilitación.
- El monitoreo debe sentar las bases para la gestión de rehabilitación adaptativa.
- La planificación para el cierre debe comenzar antes de la explotación minera, y la rehabilitación y su monitoreo deben ser progresivos a lo largo de la vida de la mina.

6.1 Monitoreo

El monitoreo y la evaluación son esenciales para comprender mejor y orientar las prácticas de rehabilitación. Sin la evaluación progresiva de las actividades de rehabilitación, existe el riesgo de reducir la credibilidad de la ciencia y la práctica de la rehabilitación de minas, y el problema de que la empresa podría no rehabilitar adecuadamente para permitir el cese del arrendamiento.⁵

El monitoreo es la recolección, análisis e interpretación de información para la evaluación del progreso y la finalización de la rehabilitación. El monitoreo de uso común en el contexto de la rehabilitación incluye supervisión del contenido y la calidad del agua; estabilidad de la superficie del suelo y erosión; hidrología de las pilas de desechos de roca y las balsas de escorias; calidad del aire y emisiones de gas; desarrollo de la vegetación; colonización por fauna; y el grado en que se están cumpliendo los objetivos finales de uso de la tierra y la rehabilitación.

La gestión fundada en el monitoreo y la auditoría ayuda a la empresa minera a lograr resultados de desarrollo sostenibles y aceptables, al asegurar que se implementen procesos y procedimientos para seguir parámetros sociales y medioambientales. El seguimiento del progreso debería determinar si se han abordado los objetivos o las medidas de desempeño acordados, y debería demostrar que se han cumplido los criterios de éxito para demostrar que el sitio es seguro para los seres humanos y la vida silvestre, no contaminante, estable y sostenible (por ejemplo, el sitio puede sostener un uso acordado de la tierra posterior a la actividad minera) (ANZMEC-MCA 2000; DEHP 2014).

Es poco probable que esas condiciones se puedan demostrar en menos de cinco años después del final de la extracción minera en una sección particular de un yacimiento minero (ANZMEC MCA-2000). Por lo tanto, es particularmente importante que los mecanismos de soporte (tales como la contabilidad y el personal in situ) y los recursos de mantenimiento (tales como la maquinaria necesaria para la remodelación de barrancos de erosión) estén disponibles. Estas condiciones se satisfacen mejor cuando la mina está todavía en funcionamiento, por lo tanto, se deduce que debe adoptarse una rehabilitación progresiva; donde exista la oportunidad, la zonas rehabilitadas se pueden aprobar progresivamente.

⁵ Hay más detalles acerca de la monitoreo del desempeño en otros libros de leading practice de esta serie, entre ellos *Evaluar el desempeño: monitoreo* y auditoría (DIIS 2016c), *Cierre de minas* (DIIS 2016b) y *Gestión de la biodiversidad* (DIIS 2016d).

6.2 Desarrollo de un programa de monitoreo

El monitoreo de la rehabilitación de acuerdo a prácticas líderes tiene varios componentes basados en el conocimiento de los sitios mineros de Australia y la *Good practice guidance for mining and biodiversity* (Orientación de buenas prácticas para la minería y la biodiversidad) de ICMM (ICMM 2006b):

- Proceso técnico
 - La documentación de los procedimientos de rehabilitación, incluyendo preparación del suelo; uso de la capa superior del suelo (fuentes, manipulación, duración del almacenamiento); tipos de abonos, tasas de aplicación e historia; mezcla de semillas (composición, tasas y aplicación); densidad de especies plantadas; y aparición de perturbaciones, tales como incendios, son todos factores críticos para la interpretación de los resultados del monitoreo en una fecha posterior.
- Variables bióticas
 - Otra información de rutina que suele recogerse en los yacimientos mineros, tal como información sobre
 precipitaciones, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, escorrentías del sitio, nivel y calidad de
 las aguas subterráneas, procesos de la zona vadosa (por encima del nivel freático), sedimentación,
 infiltración de agua, y niveles acuáticos en los cursos de agua, también es muy útil para comprender por qué
 se logró un resultado determinado de rehabilitación.
- · Sitios de referencia
 - El monitoreo de referencia y continuo de sitios referentes sin actividad minera o análogos (generalmente describen condiciones previas a las actividades mineras), establece comparaciones útiles en la evaluación comparativa o de control de calidad.
- Procesos biológicos / de sucesión
 - El monitoreo del asentamiento inicial, que se lleva a cabo al poco tiempo (<2 años) de la conclusión de las operaciones de rehabilitación, es un paso útil de control de calidad.
 - El monitoreo a largo plazo, a partir de los 2 a 3 años después del asentamiento inicial, evalúa el progreso de la rehabilitación con respecto a trayectorias a largo plazo, y si esas tendencias son o no propensas a ofrecer un ecosistema sostenible en el largo plazo.

El buen mantenimiento de registros a cargo de quienes realizan el monitoreo es fundamental para que los directores observen de qué manera la historia del relieve rehabilitado se relaciona con la realización de la práctica de rehabilitación actual. Dicha evaluación es esencial para completar el proceso de feedback, de modo de poder lograr la mejora continua y es vital en los casos en los que el personal de la mina podría no permanecer en el sitio durante la duración de la rehabilitación.

6.2.1 Qué constituye un buen programa de monitoreo

Un monitoreo efectivo requiere un compromiso para crear medidas sistemáticas y fiables que sean suficientes, amplias y precisas para detectar cambios en las condiciones derivadas de las actividades de rehabilitación, a diferencia de las que se producen por la variación ambiental natural, seguidas de acciones de gestión apropiadas, de ser necesario (Barker 2001). Esto sólo se puede conseguir si el programa de monitoreo es cuidadosamente concebido y rigurosamente diseñado.⁶

⁶ Como se remarcó en un estudio de directores de medioambiente de yacimientos mineros de Australia Occidental, sobre la adecuación de las prácticas de monitoreo de rehabilitación de minas (Thompson y Thompson 2004).

Un programa de monitoreo de rehabilitación efectivo sigue los siguientes pasos:

- Identificar objetivos de monitoreo y rehabilitación claros e inequívocos.
- Identificar sitios de referencia adecuados para permitir como mínimo amplias comparaciones con zonas rehabilitadas.
- Seleccionar unidades de muestreo y métodos apropiados para el sistema (por ejemplo, con una adecuada estratificación de tipos de suelo o vegetación).
- Establecer una cobertura espacial y temporal adecuada para hacer frente a los objetivos.
- Usar replicación suficiente para permitir análisis estadísticos de los resultados a una potencia aceptable con efectos predeterminados.
- Evitar o minimizar preferencias en la selección de los lugares de monitoreo (por ejemplo, mediante la asignación al azar de la selección de duplicación en el diseño de muestreo).
- Usar pruebas piloto para evaluar la eficacia del diseño de muestreo de las condiciones del sitio.
- Usar capacitación y pruebas para asegurar que los métodos son repetibles y comparables en el tiempo, y entre diferentes observadores.
- Mantener el control de calidad para asegurar que los datos permitan el análisis estadístico y la inferencia (Green 1979; Legg y Nagy 2006; Lindenmayer y Likens 2010).

6.3 La función de sitios análogos o de referencia

La industria minera suele causar inmensos cambios en la hidrología (aguas superficiales y subterráneas), la topografía y la geología de un área (Doley et al. 2012). Además, la variabilidad en el manejo de la capa superior del suelo, las operaciones de siembra, el nivel de la gestión del asentamiento temprano y otras condiciones del lugar hacen que sea difícil predecir cómo progresará una rehabilitación, sobre todo en los primeros años. Por lo tanto, los sitios de referencia deberían ser utilizados para orientación temprana y no como metas firmes (Nichols 2004).

Una vez que la trayectoria de sucesión del ecosistema sea más predecible (demostrada por una disminución de las tendencias de desarrollo estructural, la estabilización de la riqueza de especies y el progreso hacia los criterios de éxito identificados), es conveniente revisar o refinar los objetivos de referencia. Utilizar el enfoque de modelo de estado-y-transición de Grant (2006) ayuda a entender la trayectoria de desarrollo.

Si bien los estándares comparativos tienen algunas limitaciones, es valioso establecer bases de comparación en los sistemas no explotados por varias razones. Ejemplos de marcas de referencia:

- proporcionar una orientación sobre el nivel y tipo de cubierta vegetal y su influencia sobre la infiltración y el agua de escorrentía
- permitir evaluaciones de influencias climáticas y estacionales que puedan afectar el progreso de la rehabilitación
- proporcionar conocimientos de la disponibilidad de agua y del movimiento a través de relieves reconstruidos y cómo podrían afectar la disponibilidad de nutrientes en el sistema rehabilitado.

Cuadro 1

Neldner y Ngugi (2014) demostraron el potencial de agrupación de tres comunidades locales de bosques de eucalipto en la mina Meandu, en el sureste de Queensland, para base de comparación. Utilizaron el marco de evaluación BioCondition (Eyre et al. 2011) como una "ficha de puntuación" para evaluar el estado actual de un sitio rehabilitado con respecto a la marca de referencia. De esta manera, se adoptó una evaluación del estado de la vegetación asentada para su uso en un entorno de rehabilitación de minas, y se adoptó a las condiciones locales para proporcionar evaluaciones apropiadas para el sitio en lugar de evaluaciones ambiciosas de rehabilitación para sitios de menos de 50 años de edad.

Un complemento importante de esto fue el sistema de modelado (Simulador de dinámica de ecosistemas) desarrollado para predecir el crecimiento a largo plazo de árboles y arbustos (Ngugi et al. 2015). Esto permitió medir las trayectorias futuras de crecimiento de árboles y arbustos contra los atributos de comparación pertinentes, proporcionando un marco para apoyar intervenciones de gestión temprana y evaluar los riesgos asociados con el cese del arrendamiento.

Cuadro 2

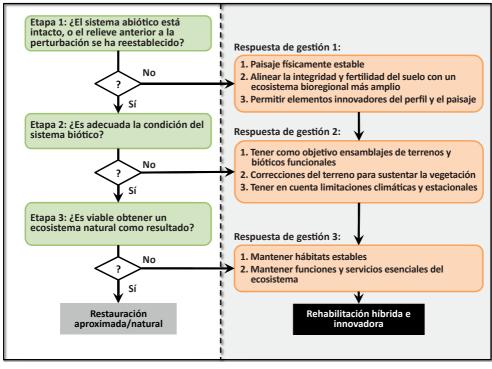
Doley y Audet (2013) propusieron un árbol de decisiones (véase el gráfico a continuación) para identificar las condiciones para la restauración o rehabilitación (y por lo tanto la evaluación comparativa) basado en la escala de perturbación combinada con las limitaciones del clima local, la geología y los relieves sobre el crecimiento de la vegetación y el desarrollo del ecosistema.

El primer paso requiere una evaluación inicial detallada de la función de los ecosistemas, además de una vigilancia intensiva del riesgo (Doley et al. 2012). A continuación, un análisis de la idoneidad del paisaje y la función biológica utiliza el árbol de decisiones para plantear una serie de preguntas para ayudar a orientar a los proponentes acerca de qué podría considerarse alcanzable dentro de las limitaciones del sitio.

Ya sea el objetivo de la rehabilitación un ecosistema natural, híbrido o innovador, el énfasis está puesto en el logro de los estándares más altos posibles de cuidado de los ecosistemas, y definitivamente no se trata de transigir en el compromiso con la rehabilitación o con la dotación de recursos para la misma.

Utilizando las respuestas de gestión en el árbol de decisiones de restauración / rehabilitación, se han aplicado directrices en un yacimiento cercano a Mount Isa y en cuatro yacimientos mineros en la cuenca Bowen (datos no publicados CMLR).

Árbol de decisiones de restauración / rehabilitación simplificado



Fuente: modificado de Doley y Audet (2013, 2014).

6.4 Indicadores de desempeño

Generalmente, se requiere la prueba de los resultados de la rehabilitación contra metas o criterios de éxito específicos para el monitoreo y la presentación de informes sobre los proyectos de rehabilitación de la minas. Los criterios se utilizan para demostrar el progreso y, en última instancia, el éxito de un proceso de gestión biofísica.

El número de posibles indicadores de monitoreo es muy grande, pero cada selección debería ser adecuada a la ubicación y relevante para los objetivos de rehabilitación definidos. Cada indicador debe estar justificado por su importancia para las directrices, prácticas líderes de la industria, requisitos de aprobación del proyecto, teoría ecológica y otras fuentes de información similar. En general, los indicadores seleccionados deberían ser los que se sabe o espera que sea más limitantes para el éxito de la estabilidad del relieve, el asentamiento de la vegetación, desarrollo y sostenibilidad.

Por lo general, existen tres estrategias para el uso de indicadores para evaluar el progreso de la rehabilitación hacia la terminación (SER 2004):

- Comparación directa que puede medirse directamente a partir de datos de referencia o de sitios análogos (como riqueza de las especies).
- Análisis de atributos que compara datos de los indicadores de desempeño predeterminados que equivalen a los objetivos de rehabilitación y criterios de cierre.
- Análisis de trayectoria que examina las tendencias en la estructura y función del ecosistema que se desarrollan progresivamente hacia los objetivos de rehabilitación acordados.

Las dos últimas estrategias son probablemente las más ampliamente utilizadas, hasta que la estructura y función de la vegetación se desarrollan hacia un estado en el que el sistema empieza a parecerse al objetivo final previsto (como pastoreo o un ecosistema casi natural, híbrido o innovador).

La mayoría de los proyectos de rehabilitación requieren criterios de éxito para tratar los factores abióticos, tales como la estabilidad del terreno, y la restauración o creación de la función y los servicios de los ecosistemas. Por lo general, el monitoreo de la rehabilitación incluye:

- indicadores abióticos: estabilidad de superficies y pendientes; el rendimiento de cubiertas construidas (por
 ejemplo, residuos minerales); equipamiento visual; contaminación en las zonas rehabilitadas (tales como
 drenaje ácido de minas); propiedades de los medios de suelo y zona de raíces (por ejemplo, química, fertilidad,
 carbono orgánico del suelo); consideraciones hidrológicas
- indicadores bióticos: estructura de la comunidad vegetal (cobertura, densidad y altura de árboles y arbustos); composición de la vegetación (riqueza de especies, presencia de malas hierbas); presencia de animales dañinos; recolonización por fauna de invertebrados (como hormigas) y fauna de vertebrados (como anfibios, reptiles, mamíferos, aves).

Una vez que se consideran satisfactorios los criterios abióticos y de vegetación, en general, se supone que seguirá la colonización por la fauna; sin embargo, se ha comprobado que los criterios de flora son sustitutos deficientes para la recolonización de la fauna (Cristescu et al. 2013) y puede ser necesario el monitoreo directo.

Proyectos complejos o de mayor tamaño que requieren la demostración de la funcionalidad del ecosistema pueden contemplar el monitoreo de procesos ecológicos, a través de indicadores tales como la colonización de micorrizas, el ciclo de nutrientes (como descomposición, mineralización o transformación de la materia orgánica del suelo), interacciones entre plantas y animales y la recolonización de invertebrados. Los procesos ecológicos no se miden tan frecuentemente como las mediciones de diversidad o estructura de la vegetación, ya que pueden ser más lentos de recuperar y requieren múltiples mediciones, y así aumentan el tiempo y el costo del proyecto (Ruiz-Jaen y Aide 2005). Según el uso final del terreno tras la minería, en particular para la restauración casi natural, será esencial demostrar una trayectoria positiva hacia un ecosistema de larga duración, resistente, en funcionamiento, mediante la medición de una serie de procesos ecológicos.

6.5 Gestión adaptativa y control de calidad

La gestión adaptativa es un proceso iterativo de toma de decisiones en un contexto de incertidumbre, con el objetivo de reducir la incertidumbre utilizando un enfoque basado en el riesgo. Se utilizan niveles de activación (superior e inferior) para identificar con claridad los niveles en los que se necesitan respuestas de gestión a condiciones inesperadas o de rehabilitación deficiente. Las herramientas de gestión, tales como los planes de respuesta de activación (TARPs), pueden ayudar a proporcionar señales de alerta temprana acerca de la probabilidad de que exista una tendencia hacia niveles inaceptables de riesgo. Los TARPs se describen con más detalle en ESG3: *Plan de operaciones de minería* (MOP) *directrices* (DTIRIS 2013).

6.6 Técnicas de monitoreo

Algunos de los atributos que se miden con mayor frecuencia en los proyectos de rehabilitación en todo el mundo son la diversidad de las especies vegetales, la cubierta vegetal o densidad y diversidad de especies de artrópodos, de acuerdo con un estudio de 68 proyectos de rehabilitación (Ruiz-Jaen y Aide 2005). Las técnicas utilizadas para recopilar datos sobre dichos atributos típicamente consisten en unidades de muestreo o mediciones de campo como parcelas, transectos y puntos para determinar conteo de especies, densidades y estimaciones de cobertura.

Se describen en detalle las técnicas y tecnologías de monitoreo en el manual de leading practice *Evaluación de desempeño: monitoreo y auditoría* (DIIS 2016c). Sin embargo, es importante abordar algunos de los métodos de monitoreo aquí, debido a su naturaleza específica y su uso en el análisis.

Algunos de los atributos que se miden con mayor frecuencia en los proyectos de rehabilitación en todo el mundo son la diversidad de las especies vegetales, la cubierta vegetal o densidad y diversidad de especies de artrópodos, de acuerdo con un estudio de 68 proyectos de rehabilitación (Ruiz-Jaen y Aide 2005). Las técnicas utilizadas para recopilar datos sobre dichos atributos típicamente consisten en unidades de muestreo o mediciones de campo como parcelas, transectos y puntos para determinar conteo de especies, densidades y estimaciones de cobertura.

El análisis de la función del paisaje (LFA) ha sido ampliamente utilizado en la minería para medir la función del ecosistema (estabilidad, infiltración y ciclo de nutrientes) y para el análisis de trayectoria, mediante la realización de evaluaciones rápidas de las características de la superficie del suelo (Tongway et al 2003; Tongway y Hindley 2004). El debate científico sobre estrategias tales como LFA comparadas con indicadores basados en especies y estructuras más fáciles de medir no se ha resuelto (WA EPA 2006; Erskine et al 2013.). Independientemente del debate, es probable que cualquier estrategia que no tenga en cuenta la gama de factores bióticos y abióticos necesarios para demostrar el uso seguro, estable y en funcionamiento de la tierra, coherente con los objetivos de rehabilitación, no sea fiable.

6.6.1 Detección remota

El monitoreo basado en la detección remota de imágenes cada vez desempeña una función en la evaluación de rehabilitaciones mineras. Previamente, la falta de resolución y los altos costos limitaban el uso de técnicas de estudio aéreo para un monitoreo adecuado de la rehabilitación en desarrollo. La llegada de sensores aéreos de alta calidad y de software de procesamiento de imágenes georreferenciadas produjo una variedad creciente de aplicaciones y nuevas tecnologías. En las siguientes subsecciones se suministran algunos ejemplos de prácticas líderes y "prueba-de-concepto", usando detección remota.

Estudio de caso 5: Programa de monitoreo de rehabilitación de la mina de carbón Wesfarmers Curragh

La mina de carbón Wesfarmers Curragh en la cuenca de Bowen del centro de Queensland tiene un programa de monitoreo de rehabilitación continuo, permanente y sólido, establecido en 2002. El objetivo general del programa es obtener información precisa sobre el rendimiento y desarrollo del relieve rehabilitado a través del tiempo, y en el proceso, presentar su caso para el cese del arrendamiento.

Desde finales de 1980, Curragh ha creado de forma proactiva una arquitectura de investigación aplicada, examinando la forma más eficiente para asentar especies de árboles, arbustos y pastos nativos en una variedad de opciones de medios desafiantes, incluidos desechos básicos, cubierta superior del suelo apilada o recién removida (colocada sobre desechos a varias profundidades), carbón crudo rechazado y alternación de franjas de cubierta superior y desechos. Uno de los principales resultados de la investigación anterior fue que el método de franjas de cubierta superior y desechos mejora la germinación de árboles y arbustos, y es compatible con un aumento en la riqueza de especies nativas, mediante la reducción de los impactos de la competencia de pasto buffel (Cenchrus ciliaris) (Mulligan y Bell, 1991; Orr y Bell, 1990).

Tradicionalmente, el programa de monitoreo de rehabilitación en Curragh incluía un sondeo de terreno usando transectos de 8 mx 50 m (400 m2) para obtener muestras de pequeñas áreas de rehabilitación, bajo el amplio supuesto de que la ubicación aleatoria de transectos proporciona datos florísticos y de relieve que son representativos de todo el relieve restaurado. Sin embargo, desde 2012, el programa se ha ampliado para incluir el uso de un vehículo aéreo no tripulado (UAV), para proporcionar imágenes de alta resolución espacial y temporal para complementar la evaluación desde el terreno.

El agregado de imágenes de UAV ha permitido la obtención de información valiosa sobre métrica de los criterios de terminación, como focos de erosión, estabilidad de las laderas del lugar, cubierta de follaje proyectivo y densidad de árboles y arbustos. Además, UAV ha demostrado el potencial de mapas temáticos del yacimiento y revelado la presencia y distribución de especies de malezas, como leucaena (Leucaena leucocephala). El UAV es una forma barata y fiable de detectar métricas que cambian con el tiempo y es particularmente valioso para barrancos de erosión activos, áreas descubiertas y movimientos de malezas a través de los yacimientos. El monitoreo continuo proporciona a los reguladores, la industria y otras partes interesadas la confianza necesaria al demostrar el desarrollo de resultados de la rehabilitación y la trayectoria hacia criterios de finalización.

Evaluación por vehículo aéreo no tripulado

La concisión y la capacidad de utilización de la tecnología UAV significa que la captura de datos se puede adaptar para fines muy específicos a resoluciones menores de 10 cm y en una mayor gama de resoluciones temporales y espaciales. La tecnología UAV se utiliza en Curragh anualmente para proporcionar:

- imágenes de zonas meta de alta resolución espacial (de 8 a 10 cm)
- datos sobre la presencia / ausencia de zonas de erosión, incluida la pérdida de suelo / cálculos de volumen de deposición
- datos sobre la presencia / ausencia de especies de malezas específicas, tales como la leucaena
- ortofotos geométricamente corregidas de 4 bandas (rojo, verde, azul e infrarrojo cercano) de las zonas rehabilitadas
- mapas temáticos que muestran el porcentaje de cobertura de árboles, arbustos, área descubierta y cubierta de hierba y focos de erosión
- modelos digitales de superficie que muestran la pendiente y el aspecto de la rehabilitación.

Evaluación tradicional basada en parcelas

Una estrategia modificada basada en transectos continúa en Curragh con el fin de dar continuidad al monitoreo previo y para complementar la interpretación de imágenes de detección remota.

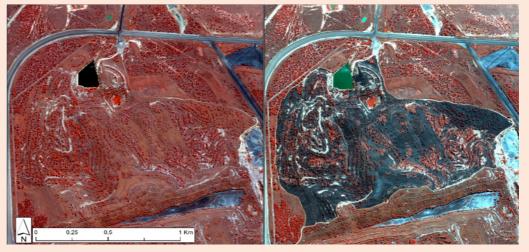
En cada sitio nuevo, se asentaron y se marcaron permanentemente para futuras reevaluaciones tres transectos de $50 \text{ m} \times 8 \text{ m} (400 \text{ m}^2)$, que se extienden pendiente abajo y perpendiculares a franjas de cubierta superior del suelo y de residuos. Las medidas métricas incluyen:

- la cantidad y alturas de especies de arbustos y árboles leñosos
- riqueza de especies para parcelas de 50 m x 8 m
- · La cubierta proyectiva de follaje
- cuadrantes de cubierta y presencia de especies
- muestreo de suelos (0 a 10 cm) de la capa superior del suelo y medios de residuos para el análisis de CE, pH y macro nutrientes.

Los resultados de monitoreos anteriores y continuos proporcionan información valiosa para el personal del yacimiento, incluidas recomendaciones sobre mejoras en el proceso de rehabilitación. El aumento de la confianza en las capacidades de análisis de imágenes UAV está ayudando a Curragh a avanzar en la obtención de un nuevo modelo de monitoreo que probablemente implicará un programa reducido de estudio sobre el terreno, mientras se mantienen conocimientos científicos sólidos y precisos acerca de los procesos de rehabilitación y las trayectorias ecológicas.

Investigación acerca de incendios

La mina Curragh está poniendo a prueba la capacidad de recuperación de su rehabilitación a través de un proyecto de investigación destinado a estudiar la respuesta de las comunidades con predominancia de pasto buffel a los incendios descontrolados. En mayo de 2015, Curragh quemó más de 100 hectáreas de rehabilitación de 21 años de edad en un incendio controlado. Los científicos del Centre for Mined Land Rehabilitation de la Universidad de Queensland están utilizando una combinación de técnicas de detección remota y evaluaciones del terreno para estudiar el comportamiento de incendios en ecosistemas innovadores, y la recuperación de la rehabilitación después de un incendio. El proyecto tiene como objetivo comprender los riesgos residuales que presentan perturbaciones tales como los incendios a los administradores de la mina y a futuros propietarios después del cese.

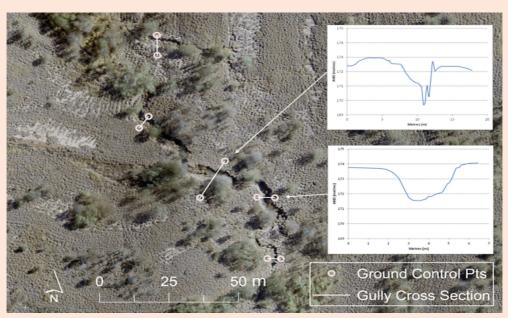


Imágenes multiespectrales satelitales World View-3 del incendio experimental antes (izquierda) y después (derecha) de la quema. Las tomas en infrarrojo cercano muestra la vegetación sana como rojo brillante.

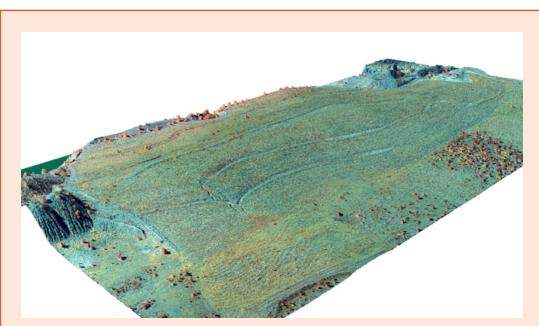


Quema controlada en un ecosistema innovador con predominio de pasto buffel, mayo de 2015. La resistencia de la rehabilitación requiere pruebas antes del cese del arrendamiento.

Foto: Phill McKenna



El ortomosaico de UAV de 10 cm muestra la presencia de barranco de erosión identificado por medio del programa de detección remota. Este barranco en la actualidad se monitorea a lo largo del tiempo usando mosaicos de ortofotografías de UAV, transectos de nubes de puntos y campos en 3D para detectar cambios a largo plazo. Los gráficos de la derecha muestran los perfiles transversales de un barranco activo, generados usando medidas del modelo digital de la superficie en cinco ubicaciones a lo largo del barranco.



Imágenes generadas por UVA como base para nubes de puntos de color falso en 3D, que muestran árboles, barrancos de erosión y otras características.

Fotografía aérea

La mayoría de los yacimientos mineros a cielo abierto usan algún tipo de detección remota, tales como la fotografía aérea (~ 50 cm píxeles de resolución), con regularidad. Esto permite a los profesionales preparar algunos productos espaciales muy informativos, como modelos digitales de superficie derivados de la fotogrametría y mapas temáticos (por ejemplo, utilizando el análisis iso-cluster del software GIS para demostrar la presencia de áreas descubiertas) (DIIS 2016d).

Satélites

En la actualidad, hay acceso a datos de resolución espacial y espectral mucho más precisos a través del satélite WorldView-2, lanzado en 2009, y del WorldView-3 (WV3), lanzado en 2015. El WorldWiew-3 tiene ocho bandas multiespectrales (~ 1,2 m píxeles de resolución), imágenes pancromáticas (~ 0,31 m de resolución) e imágenes infrarrojas de onda corta (3,7 m de resolución).

Estos nuevos conjuntos de datos han permitido el desarrollo de nuevos métodos de monitoreo, tales como el mapeo de la salud de la vegetación en la mina de carbón Ulan (Nueva Gales del Sur) utilizando el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) como un indicador (Raval et al. 2013), para identificar los cambios sutiles en la composición y la salud de la vegetación con el paso del tiempo.

En otro ejemplo, se utilizaron imágenes derivadas de los satélites SPOT para detectar e investigar cambios en el porcentaje de cubierta vegetal en la mina de oro cerrada Kidston, en el norte de Queensland (Bao et al. 2012). En este estudio se utilizó el NDVI y un índice de vegetación del suelo ajustado para examinar las influencias estacionales, como las precipitaciones, para evaluar patrones en la condición de la vegetación con el paso del tiempo.

Escaneo por láser de imágenes terrestres y aéreas (LiDAR)

El Escaneo por láser de imágenes terrestres y aéreas (LiDAR) suele utilizarse en la ingeniería de minas y prospección, para producir una nube de puntos en 3D. El LiDAR aéreo tiene la ventaja de recoger múltiples puntos de datos de las superficies de vegetación y del terreno. El LiDAR terrestre o el escaneo terrestre con láser presenta la oportunidad de obtener características cuantitativas y altamente precisas (<10 mm de precisión) de los relieves y la vegetación (como altura de las plantas, cubierta y biomasa).

Las tecnologías LiDAR actualmente no se utilizan demasiado para la medición y el monitoreo de la rehabilitación, pero hay un gran potencial para su uso en el futuro. La aplicación del LiDAR con base en el terreno para la planificación y el monitoreo de la rehabilitación y el cierre, y algunos ejemplos recientes son examinados en Pratt y Mangan (2013).

Vehículos aéreos no tripulados

La creciente disponibilidad de imágenes derivadas de UAV proporciona a la industria minera nuevas estrategias para el monitoreo de la vegetación. Un modelo que complementa el uso tradicional de evaluaciones basadas en parcelas mediante la captura de dominios enteros de rehabilitación mientras se está realizando la evaluación de campo proporciona un vínculo directo de referencia. Permite la extrapolación de las medidas de puntos a escalas de polígonos, sin depender de supuestos estadísticos o aumentar el tiempo requerido en el campo.

Los vehículos aéreos no tripulados que utilizan pilotos automáticos guiados por GPS permiten la captura de imágenes de muy alta resolución (píxeles de resolución de ~ 5 a 10 cm) de los dominios de rehabilitación. La aplicación de esta tecnología paralelamente con el monitoreo de campo proporciona un vínculo directo entre las mediciones de campo, donde los marcadores de parcelas son visibles en las imágenes, y aumenta la capacidad del personal de campo para evaluar la condición y la biodiversidad a la escala de polígono.

6.6.2 Monitoreo de la fauna

Aunque la fauna de vertebrados e invertebrados desempeña una función importante en el desarrollo de un ecosistema en funcionamiento después de la explotación minera, el monitoreo de los diversos grupos de fauna suele ser menos común que el monitoreo de la vegetación. Una de las razones de esto es la idea errónea de que la fauna volverá sin ayuda después del asentamiento de la vegetación (Cristescu et al 2013; Thompson y Thompson 2004). Esto se conoce como el "paradigma de que la flora es igual a la fauna". Hay poca evidencia empírica de que la restauración de la flora tenga una equivalencia directa con la restauración de la fauna (Critescu et al. 2012).

La incorporación de características que favorezcan a la fauna en paisajes rehabilitados (por ejemplo, la mejora de la estructura y composición de la vegetación mediante el uso de capa superior de suelo fértil, control de los depredadores salvajes y agregado de troncos y cajas nido) es un paso hacia la solución de este problema. En el caso de las minas subterráneas, la instalación de portones adecuados para murciélagos puede permitir el libre paso de murciélagos que habitan en las cuevas, mientras se restringe el acceso no autorizado de seres humanos.

Hay reflexiones adicionales acerca del monitoreo de la fauna y tecnologías emergentes en los manuales de leading practice *Gestión de la Biodiversidad (DIIS 2016d) y Evaluación del rendimiento: monitoreo y auditoría* (DIIS 2015c).

Estudio de caso 6: Murciélagos que habitan en cuevas y minas

Al menos 34 especies de murciélagos en Australia utilizan cuevas y minas abandonadas, y 20 de ellas están clasificadas como raras o amenazadas a nivel estatal o federal. Por lo tanto, el uso de explotaciones mineras subterráneas como hábitats artificiales para dormideros de murciélagos tras el cierre puede producir un resultado positivo de conservación. Esto se ha logrado con eficacia en diversas minas abandonadas y rehabilitadas en Australia y en el extranjero. Las minas adecuadas para su uso como hábitat de murciélagos tienen las siguientes características:

- · No tienen residuos ni gases tóxicos.
- Están en roca dura y estable (las entradas se pueden estabilizar con cemento o alcantarillas de metal, que también proporcionan un marco sólido para compuertas, de ser necesario).
- Los techos pueden ser de piedra reconstruida o madera burda con cavidades, para que los murciélagos puedan aferrarse mientras duermen. Puede ser necesario crear asperezas en los techos de cemento o perforar agujeros en ellos.
- Las paredes más bajas deberían ser relativamente lisas para evitar la depredación por ratas y serpientes.
- · Las superficies no deben tener polvo.
- Las mejores explotaciones tienen tanto cavidades aéreas como otras secciones más bajas que la entrada. Esto atrapa el aire caliente y frío en diferentes áreas, con capacidad para distintas preferencias entre las especies o dentro de las especies, en las diferentes etapas del ciclo de vida.
- La temperatura interna y la necesidad de humedad deben ser más estables que las condiciones externas, para que los murciélagos conserven energía, en particular durante la reproducción e hibernación.
- Los murciélagos que descansan necesitan oscuridad, de modo que el espacio debería ser lo suficientemente grande o complejo para evitar que la luz llegue a las zonas de dormidero.
- Debería existir una corriente de aire de reposición proveniente de múltiples entradas a diferentes niveles o, en su defecto, a través de una entrada, ya sea más alta o más baja que las obras principales para crear gradientes de temperatura y presión, de modo que la mina "respire" libremente.

Sin embargo, una de las dificultades con el uso de minas cerradas para el hábitat de murciélagos es la seguridad de los seres humanos. Si el área es remota o rara vez visitada por el público, dejar al descubierto la entrada es la mejor opción, pero en caso de existir problemas de responsabilidad legal que lo impidan, otras opciones incluyen vallas del perímetro exterior o parte inferior o la instalación de "portones de murciélago" (redes metálicas) en la entrada. Será necesaria la orientación de expertos en murciélagos y cierres de minas, ya que diferentes especies tienen diferentes necesidades.

Se necesita monitoreo posterior del hábitat artificial para murciélagos para determinar si se ha producido la recolonización. En los últimos años, un gran número de estudios han demostrado que la presunción "soñada" (presuponer que la simple reconstrucción del hábitat de la fauna dará como resultado el retorno de la vida silvestre) no es exacta, a pesar de que en general se confía en ella para la rehabilitación.

El monitoreo es particularmente importante cuando las entradas están enrejadas, debido a las dificultades que muchas especies tienen en maniobrar a través de agujeros, debido a la morfología de sus alas y la agilidad para volar. Varios métodos de monitoreo (incluidas cámaras infrarrojas, recuentos de aparición o grabadoras de ecolocalización direccional) suelen ser específicos para yacimientos y especies, de modo que el monitoreo debería ser llevado a cabo por ecologistas con experiencia en murciélagos.



Los murciélagos prefieren superficies rugosas (como piedras o madera) para aferrarse cuando duermen.

Foto: E Williams.



El túnel de Muntapa, en el sudeste de Queensland, con la sección inferior vallada para evitar el acceso de seres humanos

Foto: E Williams.



Un portón para murciélagos en los Estados Unidos. Foto: B Thomson.

6.7 Preparación de informes

La preparación de informes sobre los resultados del monitoreo para los reguladores y otras partes interesadas, con frecuencia anual o con otra regularidad, puede ser parte de los requisitos de cumplimiento, según las aprobaciones iniciales de la mina.

La determinación de a quién dirigir los informes y quién los interpretará a veces es un proceso iterativo entre los reguladores, la empresa minera y en algunas ocasiones, las partes interesadas externas. Una estrategia proactiva durante las consultas entre las partes interesadas y la comunidad es identificar las líneas de presentación de informes y la frecuencia de los informes de monitoreo.

El informe sobre la rehabilitación debe ser progresivo a lo largo de la vida de la mina, para permitir el feedback regular, en lugar de que suceda a medida que se acerca la baja final. La presentación de informes periódicos aumenta la confianza en las estrategias y técnicas empleadas para la empresa, los reguladores y las partes interesadas externas. También puede identificar brechas en la información, resaltar cuestiones que exijan reparaciones y reducir la posibilidad de incumplimiento de los criterios de cierre.

6.8 Investigación y pruebas de rehabilitación

Las ciencias de rehabilitación y restauración todavía son campos en desarrollo, y hay pocos informes de investigación ecológica y gestión de paisajes rehabilitados a largo plazo (más de 20 años) (Doley y Audet 2013), con la excepción de los yacimientos de extracción de bauxita en Australia Occidental y el Territorio del Norte.

Es importante que la industria y el gobierno continúen fomentando y alentando a las universidades, otros centros de investigación y profesionales de rehabilitación a incorporar nuevas investigaciones a las prácticas líderes de rehabilitación activa y adaptativa.

REFERENCIAS

ANZMEC-MCA (Australian and New Zealand Minerals and Energy Council and the Minerals Council of Australia) (2000). *Strategic framework for mine closure*, ANZMEC and MCA, http://www.sernageomin.cl/pdf/mineria/cierrefaena/DocumentosRelacionados/Strategic-Framework-Mine-Closure.pdf.

ARPANSA (Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency) (2005). *Code of practice and safety guide for radiation protection and radioactive waste management in mining and mineral processing*, Radiation Protection Series, no. 9, August 2005, ARPANSA,

http://www.arpansa.gov.au/Publications/Codes/rps9.cfm.

Audet, P, Arnold, S, Lechner, AM, Baumgartl, T (2013). 'Site-specific climate analysis elucidates revegetation challenges for post-mining landscapes in eastern Australia', *Biogeosciences*, 10(10):6545–6557.

Bao, N, Lechner, A, Fletcher, A, Erskine, P, Mulligan, D, Bai, Z (2012). 'SPOTing long-term changes in vegetation over short-term variability', *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 28(1):2–24.

Barker, P (2001). A technical manual for vegetation monitoring, resource management and conservation, Department of Primary Industries, Water and Environment, Hobart, http://live.greeningaustralia.org.au/nativevegetation/pages/pdf/Authors%20D/12a_DPIWE_Barker.pdf.

Bell, LC (1996). 'Rehabilitation of disturbed land', in DR Mulligan (ed.), *Environmental management in the Australian minerals and energy industries: principles and practices* (227–264), UNSW Press, Sydney.

Cristescu, RH, Frère, C, Banks, PB (2012). 'A review of fauna in mine rehabilitation in Australia: current state and future directions', *Biological Conservation*, 149(1):60–72.

Cristescu, RH, Rhodes, J, Frére, C, Banks, PB (2013). 'Is restoring flora the same as restoring fauna? Lessons learned from koalas and mining rehabilitation', *Journal of Applied Ecology*, 50(2):423–431.

De Gruijter, JJ (2002). 'Sampling', in JH Dane and GC Topp (eds), *Methods of soil analysis*, Part 4: Physical methods (45–80), Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin.

DECCW (NSW Department of Environment, Climate Change and Water) (2009). *Protocols for soil condition and land capability monitoring*, DECCW, Sydney South.

DEHP (Queensland Department of Environment and Heritage Protection) (2014). *Rehabilitation requirements for mining resource activities (EM1122)*, DEHP, Brisbane.

DIIS (Department of Industry, Innovation and Science) (2016a). *Preventing acid and metalliferous drainage*, DIIS, Canberra.

DIIS (Department of Industry, Innovation and Science) (2016b). Mine closure, DIIS, Canberra.

DIIS (Department of Industry, Innovation and Science) (2016c). Evaluating performance: monitoring and auditing, DIIS. Canberra.

DIIS (Department of Industry, Innovation and Science) (2016d). Biodiversity management, DIIS, Canberra.

DLWC (NSW Department of Land and Water Conservation) (2000). *Soil and landscape issues in environmental impact assessment*, technical report no. 34, 2nd edition, Natural Resource Information Systems Branch, DLWC, Sydney.

Doley, D, Audet, P (2013). 'Adopting novel ecosystems as suitable rehabilitation alternatives for former mine sites', *Ecological Processes*, 2(22).

Doley, D, Audet, P (2014). 'Changing restoration priorities in the 21st century—opportunities for novel ecosystem design in mine closure', *Life-of-Mine 2014*, Brisbane, Australia, Australia, Institute of Mining and Metallurgy.

Doley, D, Audet, P (2016). 'What part of mining are ecosystems? Defining success for the "restoration" of highly disturbed landscapes', in Squires VR (ed.), *Ecological restoration: global challenges, social aspects and environmental benefits* (Chapter 4), Nova Science Publishers, New York, ISBN: 978-1-63484-611-0.

Doley, D, Audet, P, Mulligan, DR (2012). 'Examining the Australian context for post-mined land rehabilitation: reconciling a paradigm for the development of natural and novel ecosystems among post-disturbance landscapes', *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 163:85–93.

Dollhopf, DJ (2000). 'Sampling strategies for drastically disturbed lands', in RI Barnhisel, RG Darmody, WL Daniels (eds), Reclamation of drastically disturbed lands (21–40), American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.

DTIRIS (NSW Department of Trade and Investment, Regional Infrastructure and Services) (2013). ESG3: Mining Operations Plan (MOP) guidelines, DTIRIS, Maitland NSW.

Elliott, P, Gardner, J, Allen, D, Butcher, G (1996). 'Completion criteria for Alcoa of Australia Limited's bauxite mine rehabilitation', *Proceedings of 3rd international and 21st annual Minerals Council of Australia Environmental Workshop*, MCA, Canberra.

Erskine, P, Fletcher, A, Seaborn, B (2013). 'Opportunities and constraints of functional assessment of mined land rehabilitation', in M Tibbett, A Fourie, C Digby (eds), *Mine closure 2013*, Perth, Australian Centre for Geomechanics.

Eyre, TJ, Kelly, AL, Neldner, VJ, Wilson, BA, Ferguson, DJ, Laidlaw, MJ, Franks, AJ (2011). *BioCondition: a condition assessment framework for terrestrial biodiversity in Queensland—assessment manual*, version 2.1, Biodiversity and Ecosystem Sciences, Department of Environment and Resource Management, Brisbane.

Flanagan, DC, Livingston, SJ (1995). 'Water Erosion Prediction Project (WEPP) Version 95.7: user summary', in Flanagan, Livingston (eds), *WEPP user summary*, NSERL report no. 11.

Fletcher, A, Erskine, P (2013). 'Rehabilitation closure criteria assessment using high resolution photogrammetrically derived surface models', in G Grenzdörffer, R Bill (eds), *UAV-g2013*, Rostock, Germany, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing.

Floradata (2001). *A guide to collection, storage and propagation of Australian native plant seed*, ISBN 0957796617, http://www.acmer.com.au/publications/floradata.htm.

Grant, CD (2006). 'State-and-transition successional model for bauxite mining rehabilitation in the jarrah forest of Western Australia', *Restoration Ecology*, 14(1):28–37.

Grant, C (2007). 'Developing Completion Criteria for Alcoa's bauxite mine rehabilitation in Western Australia: an iterative process', in A Fourie, M Tibbett, J Wiertz (eds), *Mine closure 2007* (155–166), proceedings of the 2nd International Seminar on Mine Closure, October, Chile, Australian Centre for Geomechanics, Perth.

Grant, CD, Koch, JM (2006). 'Ecological aspects of soil seed-banks in relation to bauxite mining. II. Twelve year old rehabilitation mines', *Australian Journal of Ecology*, 22(2):177–184.

Grant, C, Koch, J (2007). 'Decommissioning Western Australia's first bauxite mine: co-evolving vegetation restoration techniques and targets', *Ecological Management and Restoration*, 8:92–105.

Grant, CD, Norman, MA, Smith, MA (2007). 'Fire and silvicultural management of restored bauxite mines in Western Australia', *Restoration Ecology*, 15:S127-S136.

Green, RG (1979). Sampling design and statistical methods for environmental biologists, John Wiley & Sons, New York.

Hancock, G, Evans, KG, Willgoose, GR, Moliere, D, Saynor, M, Loch, RJ (2000). 'Long-term erosion simulation on an abandoned mine site using the SIBERIA landscape evolution model', *Australian Journal of Soil Research* 38:249–264.

Hancock, GR, Loch, RJ, Willgoose, GR (2003). 'The design of post-mining landscapes using geomorphic principles', *Earth Surface Processes and Landforms*, 28:1097–1110.

Howard, EH, Shemeld, J, Loch, RJ (2010). 'Ramelius Resources' Wattle Dam Project: achieving bond reduction through leading practice', *Proceedings Goldfields Environmental Management Workshop 2010*, Kalgoorlie-Boulder.

Howard, EJ, Loch, RJ, Vacher, CA (2011). 'Evolution of landform design concepts', *Trans. Inst. Mining and Metallurgy*, 120:112–117.

Howard, EJ, Lowe, SM (2014). 'Innovative rehabilitation of marine dredge spoil', in AB Fourie, M Tibbett (eds), *Mine closure 2014*, Australian Centre for Geomechanics, Perth.

Howard, EJ, Roddy, BP (2012a). 'Evaluation of the water erosion prediction project (WEPP) model: validation data from sites in Western Australia', in AB Fourie and M Tibbett (eds), *Mine closure 201*2, Australian Centre for Geomechanics, Perth, ISBN 978-0-9870937-0-7.

Howard, EJ, Roddy, BP (2012b). 'Importance of surface water flow concentration and its impact on erosion potential of constructed mine landforms', *Proceedings Goldfields Environmental Management Workshop 2012*, Kalgoorlie-Boulder.

ICMM (International Council on Mining and Metals) (2006a). *Community development toolkit*, ICMM, London, http://www.icmm.com/document/4080.

ICMM (International Council on Mining and Metals) (2006b). *Good practice guidance for mining and biodiversity*, ICMM, London, http://www.icmm.com/page/1182/good-practice-guidance-for-mining-andbiodiversity.

ICMM (International Council on Mining and Metals) (2008). *Planning for integrated mine closure: toolkit*, ICMM, London, http://www.icmm.com/page/9568/planning-for-integrated-mine-closure-toolkit.

Isbell, R, (2002). The Australian Soil Classification, revised edition, CSIRO Publishing, Melbourne.

Jackson, ST, Hobbs, RJ (2009). 'Ecological restoration in the light of ecological history', *Science*, 325(5940):567–569.

Jarvie-Eggart, ME (2015). Responsible mining: case studies in managing social and environmental risks in the developed world, Society for Mining, Metallurgy & Exploration, Englewood, Colorado.

Jennings, B, Barrett-Lennard, EG, Hillman, BJ, Emrose, M (1993). *Mine waste management in arid areas*, report no. 110, Minerals and Energy Research Institute of Western Australia.

Keipert, NL (2005). 'Effect of different stockpiling procedures in open cut coal mine rehabilitation in the Hunter Valley, NSW, Australia', PhD thesis, University of New England.

Koch, JM (2015). 'Mining and ecological restoration in the jarrah forest of Western Australia', in M Tibbett (ed.), *Mining in ecologically sensitive landscapes*, CSIRO.

Koch, JM, Hobbs, RJ (2007). 'Synthesis: is Alcoa successfully restoring a jarrah forest ecosystem after bauxite mining in Western Australia?', 'Restoration Ecology, 15(4):S137-S44.

Koch, JM, Ward, SC, Grant, CD, Ainsworth, GL (1996). 'The effect of bauxite mining and rehabilitation operations on the topsoil seed reserve in the jarrah forest of Western Australia', *Restoration Ecology*, 4:368–376.

Landloch Pty Ltd (2006). *Validation of a risk assessment model for tunnel erosion on waste dumps*, final report, ACMER project R68, Australian Centre for Mining Environmental Research.

Legg, CJ, Nagy, L (2006). 'Why most conservation monitoring is, but need not be, a waste of time', *Journal of Environmental Management*, 78(2):194–199.

Lindenmayer, DB, Likens, GE (2010). *Effective ecological monitoring*, CSIRO Publishing and Earthscan, Melbourne and London.

Loch, RJ (2010). Sustainable landscape design for coal mine rehabilitation, ACARP project C18024 report.

Loch, RJ, Vacher, CA (2006). 'Assessing and managing erosion risk for constructed landforms on minesites', *Proceedings of the Goldfields Environmental Management Workshop 2006*, Kalgoorlie–Boulder.

Loch, RJ, Willgoose, GR (2000). 'Rehabilitated landforms: designing for stability, in *Environmental standards for the New Millennium* (39–44), proceedings of the 2000 Workshop on Environmental Management in Arid and Semi-arid Areas, Goldfields Land Rehabilitation Group.

McDonald-Madden, E, Baxter, PWJ, Fuller, RA, Martin, TG, Game, ET, Montambault, J, Possingham, HP (2010). 'Monitoring does not always count', *Trends in Ecology & Evolution*, 25(10):547–550.

McKenzie, N, Grundy, M, Webster, R, Ringrose-Vaose, A, (2008). *Guidelines for surveying soil and land resources*, 2nd edition, CSIRO Publishing, Melbourne.

Mulligan, DR (1996). Environmental management in the Australian minerals and energy industries: principles and practices, UNSW Press, Sydney.

Mulligan, DR, Bell, LC (1991). 'Tree and shrub growth on land rehabilitated after mining at Curragh coal mine', unpublished report, Department of Agriculture, University of Queensland.

NCST (National Committee on Soil and Terrain) (2009). *Australian Soil and Land Survey field handbook*, 3rd edition, CSIRO Publishing, Collingwood.

Neldner, VJ, Ngugi, MR (2014). 'Application of the BioCondition assessment framework to mine vegetation rehabilitation', *Ecological Management & Restoration*, 15(2):158–161.

Ngugi, MR, Neldner, VJ, Kusy, B (2015). 'Using forest growth trajectory modelling to complement BioCondition assessment of mine vegetation rehabilitation', *Ecological Management & Restoration*, 16(1):78–82.

Nichols, OG (2004). Development of rehabilitation completion criteria for native ecosystem establishment on coal mines in the Bowen Basin, ACARP project C12045, Australian Centre for Mining Environmental Research, Kenmore, Queensland.

Nichols, OG (2005). Development of rehabilitation completion criteria for native ecosystem establishment on coal mines in the Hunter Valley, ACARP project C13048, Australian Centre for Minerals Extension and Research.

Orr, MS, Bell, LC (1990). Strategies for site stabilization and native species regeneration at the Curragh open-cut coal mine, final report to Curragh Queensland Mining Ltd, unpublished report, Department of Agriculture, University of Queensland.

Petersen, AE, Brooks, DR (1996). 'Environmental management practices at RGC's Eneabba operation in the dry heath sand-plains of Western Australia', in DR Mulligan (ed.), *Environmental management in the Australian minerals and energy industries: principles and practices* (571–582), UNSW Press, Sydney.

Pratt, AS, Mangan, CM (2013). 'The use of ground based LiDAR in rehabilitation performance and landform stability monitoring', in M Tibbett (ed.), *Mine closure 2013*, Australian Centre for Geomechanics, Perth.

Raval, S, Merton, RN, Laurence, D (2013). 'Satellite based mine rehabilitation monitoring using WorldView-2 imagery', *Mining Technology*, 122(4):200–207.

Reid, T, Hazell, D, Gibbons, P (2013). 'Why monitoring often fails to inform adaptive management: a case study', *Ecological Management & Restoration*, 14(3):224–227.

Renard, KG, Foster, GR, Weesies, GA, McCool, DK, Yoder, DC (1997). *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)*, Agriculture handbook no. 703, US Department of Agriculture.

Ruiz-Jaen, MC, Aide, TM (2005). 'Restoration success: how is it being measured?', *Restoration Ecology*, 13(3):569–577.

Seastedt, TR, Hobbs, RJ, Suding, KN (2008). 'Management of novel ecosystems: are novel approaches required?', Frontiers in Ecology and the Environment, 6(10):547–553.

SER (Society for Ecological Restoration) (2004). *The SER international primer on ecological restoration*, SER International Science & Policy Working Group.

SERA (Society for Ecological Restoration Australasia) (2016). *National standards for the practice of ecological restoration in Australia*, SERA, http://www.seraustralasia.com.

Sherwin, RE, Altenbach, JS, and Waldien, DL (2009). *Managing abandoned mines for bats*, Bat Conservation International, Austin, Texas.

Simanton, JR, Rawitz, E, Shirley, ED (1984). 'Effects of rock fragments on erosion of semiarid rangeland soils', in *Erosion and productivity of soils containing rock fragments* (65–72), SSSA special publication no. 13.

Skidmore, EL (1979). 'Soil loss tolerance', in *Determinants of soil loss tolerance* (87–94), publication no. 45, American Society of Agronomy.

Squires, H, Priest, M, Sluiter, I, Loch, R (2012). 'Leading practice waste dump rehabilitation at the Ginkgo mineral sands mine', in *Mine closure 2012*, Australian Centre for Geomechanics, Perth, ISBN 978-0-9870937-0-7.

Stevens, T (2006). 'The development of key performance indicators for progressive rehabilitation at the Murrin Murrin nickel/cobalt operation', *Proceedings of Goldfields Environmental Management Workshop* (112–120), Kalgoorlie–Boulder.

Thompson, SA, Thompson, GG (2004). 'Adequacy of rehabilitation monitoring practices in the Western Australian mining industry', *Ecological Management & Restoration*, 5(1):30–33.

Thomson, B (2002). Australian handbook for the conservation of bats in mines and artificial cave-bat habitats, AMEEF paper no. 15, Australian Centre for Mining Environmental Research, Kenmore.

Tolmie, PE, Silburn, DM, Biggs, AJW (2011). 'Deep drainage and soil salt loads in the Queensland Murray-Darling Basin using soil chloride: comparison of land uses', *Soil Research* 49:408-423.

Tongway, DJ, Hindley, NL (2004). *Landscape function analysis: Procedures for monitoring and assessing landscapes*, CSIRO Sustainable Ecosystems, Canberra.

Tongway, DJ, Ludwig, JA (2011). *Restoring disturbed landscapes: putting principles into practice*, Island Press, Washington DC.

Tongway, D, Hindley, N, Seaborn, B (2003). *Indicators of ecosystem rehabilitation success: Stage two—Verification of EFA indicators, final report*, Australian Centre for Mining Environmental Research, Kenmore, Queensland.

Vacher, CA, Loch, RJ, Raine, SR (2004). *Identification and management of dispersive mine spoils: final report*, Australian Centre for Mining Environmental Research.

Vacher, CA, Raine, SR, Loch, RJ (2004). 'Tunnel erosion in waste rock dumps', in *Proceedings of Goldfields Environmental Management Group*, Workshop on Environmental Management in Arid and Semi-arid Areas.

Vickers, H, Gillespie, M, Gravina, A (2012). 'Assessing the development of rehabilitated grasslands on post-mined landforms in north west Queensland, Australia', *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 163:72–84.

WA EPA (Western Australian Environmental Protection Authority) (2006). *Rehabilitation of terrestrial ecosystems: guidance for the assessment of environmental factors, Western Australia (in accordance with the Environmental Protection Act 1986*). WA EPA. Perth.

WA EPA (Western Australian Environmental Protection Authority) (2015). *Guidelines for preparing mine closure plans*, WA EPA, Perth.

Westman, WE (1978). 'Inputs and cycling of mineral nutrients in a coastal subtropical eucalypt forest', *Journal of Ecology*, 66:513–531.

Wight, JR, Siddoway, FH (1979). 'Determinants of soil loss tolerance for rangelands', in *Determinants of soil loss tolerance* (67–74), publication no. 45, American Society of Agronomy.

Willgoose, GR, Bras, RL, Rodriguez-Iturbe, I (1991). 'A physically-based channel network and catchment evolution model: I Theory', *Water Resources Research*, 27:1,671-1684.

Wischmeier, WH, Smith, DD (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*, US Department of Agriculture handbook no. 537, US Government Printing Office, Washington DC.

Yates, SR, Warrick, AW (2002). 'Geostatistics', in JH Dane and GC Topp (eds), *Methods of soil analysis*, Part 4: Physical methods (81–118), Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin.

Yee Yet, JS, Silburn, DM (2003). Deep drainage estimates under a range of land uses in the QMDB using water balance modelling, Department of Natural Resources and Mines, Queensland.

GLOSARIO

Aqua sobrante

La que se vierte procedente del lodo acumulado en la cima de un depósito de escorias.

Análogo

Un rasgo no afectado por la minería con el que otro sí implicado se puede comparar.

Rancal

Retrangueo o inclinación de una pared en sucesivos tramos.

Berma

Repisa horizontal o cornisa construida sobre un terraplén o pared inclinada, para romper la continuidad de la que de otra forma seria una larga ladera, con el propósito de fortalecer e incrementar la estabilidad de la ladera para recoger o detener los materiales en descenso, o para controlar el flujo de agua residual y la erosión.

Cese

Visto bueno formal por parte de la autoridad estatutaria pertinente, que indica que los criterios de terminación de la mina se consideran cumplidos a satisfacción de la autoridad.

Criterios de terminación

Un nivel o estándar de actuación acordado con el que se demuestra el cierre exitoso del lugar.

Cubierta de acumulación / descarga

Es la apropiada para los climas estacionales y escasamente húmedos, que almacena el agua de lluvia infiltrada durante la estación húmeda y luego la libera mediante la evapotranspiración durante la estación seca.

Cultura de tejidos

Un método de propagación asexual empleado para producir clones de una planta en particular en grandes cantidades.

Depósito de almacenaie de escorias

Una zona utilizada para confinar escorias; su primera función es la de generar sólidos y mejorar la calidad del agua. Se refiere a la totalidad del recinto y puede incluir uno o más embalses de escorias.

Depósitos ROM

La acumulación de mineral recién extraído utilizado para alimentar la acería y la planta de procesado.

Desecho reactivo

Desecho que reacciona ante la exposición al oxígeno.

Desechos de roca

Roca antieconómica extraída del terreno durante las actividades de minería para conseguir acceso al mineral.

Diaue

Un muro de retención compuesto de tierra.

Drenaje de ácido

Desagüe de ácido procedente de desechos mineros, que resulta de la oxidación de sulfatos como la pirita.

Ecosistema

Un sistema cuyos miembros se benefician de la participación de otros por medio de relaciones simbióticas (relaciones de sumas positivas). Es un término originario de la biología y que refiere a los sistemas autosostenidos.

Ecosistema funcional

En la fase posterior a la explotación minera, un ecosistema que es estable (no sujeto a altos índices de erosión), efectivo en la retención de agua y nutrientes, además de autosostenido.

Empedrado

Un ensamblaje poroso de piedras partidas situado para proteger el suelo de las fuerzas de la erosión o del movimiento debido al exceso de fuerzas hidrostáticas.

Encapsulado

El cierre total de un residuo en otro material que lo aísla de las condiciones externas (normalmente oxígeno o agua).

Escarificación

El proceso de provocar la germinación de las semillas mediante algún tipo de incisión o rotura.

Especies pioneras

Las primeras especies en colonizar una zona dañada.

Especies recalcitrantes

Especies difíciles de reasentar.

Estacas de erosión

Varillas de hierro clavadas en el suelo para proporcionar una base de comparación y estimar la magnitud del descenso de la superficie por la erosión en cualquier punto. Como la erosión de las laderas es altamente variable en el espacio, se necesita una gran cantidad de varillas para obtener una estimación precisa de la erosión, aunque generalmente la cantidad suele ser inadecuada. Esta práctica es más apropiada para la verificación del crecimiento de barrancos o grandes chorreras, donde se localiza fuertemente la erosión.

Gestión adaptativa

Proceso sistemático para mejorar de manera continua la política y prácticas de gestión a partir de los resultados de programa operativos. La *Guía de buenas prácticas sobre minería y biodiversidad* del ICMM se refiere a la gestión adaptativa como "hacer-controlar-evaluar-revisar".

Hidrosiembra

Esparcimiento de una mezcla de papel o mantillo vegetal con contenido en semillas, fertilizantes y un agente vinculante, sobre una ladera tan pronunciada o inaccesible que no se puede sembrar con técnicas convencionales.

Huella

La superficie de la zona cubierta por la mina e infraestructuras asociadas.

Humedad

Infiltración de precipitaciones entre los desechos de la mina, que progresa de manera descendente.

Licencia social para operar

El reconocimiento y aceptación de la contribución de una empresa a la comunidad en la que opera, yendo más allá del cumplimiento de los requisitos legales, para desarrollar y mantener relaciones constructivas con las partes interesadas, necesarias para que el negocio sea sostenible. En general, procede de esforzarse por mantener relaciones basadas en la honestidad y el respeto mutuo.

Lodo

Compuesto acuoso formado por sólidos finamente divididos por la utilización de espesantes.

Macroporos

Grandes espacios huecos entre partículas de tamaño grueso.

Marca lunar

Una técnica que utiliza la excavadora para festonear un patrón que ayuda a prevenir la erosión.

Mina abandonada

Una zona anteriormente utilizada para el minado o procesamiento de mineral, en que el cierre se considera incompleto y para la cual todavía existe un título de propiedad.

Prácticas líderes

La mejor práctica disponible en la actualidad promotora de desarrollo sostenible.

Procedencia local

Plantas cuyo origen autóctono está próximo de donde se van a plantar (por ejemplo en la misma zona local).

Propagador

Cualquier estructura con capacidad para originar una nueva planta, ya sea por reproducción sexual o asexual (vegetativa). Se incluyen semillas, esporas y cualquier parte de los cuerpos vegetales capaces de crecer independientemente al separarse del cuerpo principal.

Recuento de ácido y base estáticos

Equilibrio entre las reacciones completamente ácidas y las completamente alcalinas.

Rehabilitación

La vuelta de un terreno castigado hasta una condición estable, productiva y autosostenida, después de tener en cuenta los usos beneficiosos del lugar y sus alrededores. Reincorporación de grados de estructura del ecosistema y la función en los casos en los que no se aspira a lograr una restauración.

Restauración

Reasentamiento de la estructura y función del ecosistema a imagen de su estado previo casi natural o como réplica de un ecosistema de referencia deseado.

Restos de vegetación

Vegetación autóctona que queda después de que se haya realizado el despeje generalizado.

Rodamiento

El flujo y segregación de desechos rocosos de tamaño grueso con descarga basculante sobre una colina en ángulo de reposo.

Saturación

Agua o lodo de escorias que desborda la cima de la estructura de contención.

Suelo dispersivo

Suelos que son estructuralmente inestables y se disgregan en el agua formando partículas básicas (como arena, limo, arcilla). Los suelos dispersivos tienden a ser altamente erosivos y presentan problemas para la gestión exitosa del acondicionamiento del terreno.

Suelo sódico

Terrenos compuestos por sodio en una proporción significativa (normalmente superior al seis por ciento) de su total de cationes intercambiables. Los suelos sódicos tienden a tener un mal drenaje debido a su pobre estructura

Trayectoria de comunidades en rehabilitación

Tendencias en la rehabilitación conforme ella se desarrolla en el tiempo.

Vacío final

El hueco restante dejado en la cantera al cierre de la mina.

Volcado trasero

El proceso por el cual se descarga material por la parte posterior de un camión basculante. Los montículos de material de sobrecarga se construyen ubicando un camión basculante sobre la cima de un montículo, hacia el borde, y volcando los desechos de roca sobre la ladera del montículo.

