VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Desarrollo de Indicadores de Calidad Ambiental para el Cierre de Minas

Development of Environmental Quality Indicators for Mine Closure

Víctor Manuel Quezada Aguilera[1], Martín Caudillo González[1], Karol Itzel Ayala Álvarez[2], Juan Alberto Mendoza Morales[2].
[1]PTC del Departamento de Minas, Metalurgia y Geología de la Universidad de Guanajuato, [2]Estudiantes de Nivel Licenciatura de la Universidad de Guanajuato adscritos al PE de Ingeniería de Minas.
vmqa@ugto.mx, mcaudill@ugto.mx, ki.ayalaalvarez@ugto.mx, ja.mendozamorales@ugto.mx.

Resumen

Conocer el estado del medio ambiente en el sitio y alrededor del mismo hasta la zona de influencia/afectación de un proyecto minero en la fase de cierre y poscierre demanda contar con el instrumento que permita la medición, evaluación y comunicación de los efectos de las actividades de origen antrópico sobre los ecosistemas, una herramienta que puede ser usada para ello son los indicadores de calidad ambiental. Su desarrollo ha evolucionado desde indicadores simples hasta índices compuestos que integran múltiples variables. En el contexto de la minería, estos indicadores adquieren una relevancia particular debido al alto impacto potencial que esta actividad ejerce sobre el aire, agua, suelo y biodiversidad. Se propone un marco metodológico generalizable para la determinación de Índices de Calidad Ambiental (ICA) aplicables a la etapa de Cierre y Poscierre de proyectos mineros de cualquier tipo de yacimiento. La propuesta integra cuatro índices de estado ambiental —Índice de Calidad del Suelo (SQI), Índice de Calidad del Agua (WQI-M), Índice de Calidad del Aire (AQI-M) e Índice de Calidad Biótica (BQI)— en un Índice Ambiental Integrado para Cierre y Poscierre (IAI), con el fin de validar la integración de los índices de estado ambiental como herramienta metodológica transferible a cualquier tipo de mina (metálica, no metálica, a cielo abierto o subterránea). Cada índice componente se construye mediante un Conjunto Mínimo de Datos (MDS) que permita identificar los cambios en el entorno, identificar la recuperación debida a aplicación de las medidas de mitigación, y no sólo el cumplimiento puntual de límites máximos permisibles. Se define e identifican los criterios cuantitativos de verificación del cierre exitoso a través de categorías propuestas de clasificación de resultados del Índice Ambiental Integrado para Cierre y Poscierre.

Palabras clave: *indicadores ambientales (IA), cierre de minas, poscierre, índices compuestos.*

Introducción

La fase de cierre y poscierre de una mina normalmente ocurre en un período que puede ser mayor a la duración de la fase de explotación del proyecto minero, es un proceso gradual y de largo plazo que puede extenderse por décadas, dependiendo entre otras causas, de la composición mineralógica de los residuos y de la eficacia de las medidas de gestión implementadas (Younger et al., 2002). Históricamente, la gestión ambiental en la minería se ha basado en el cumplimiento de límites máximos permisibles (LMP) puntuales, lo que ofrece una visión fragmentada del estado del ecosistema (Ott, 1978, citado en (Ramos et al., 2004)). La literatura científica ha demostrado que la salud de un ecosistema no puede evaluarse a través de variables aisladas, sino que demanda enfoques multivariados integrados (Andrews et al., 2004; Doran & Parkin, 1994).

La evaluación objetiva de la condición del ambiente en el área en la que se desarrolla el proyecto minero, así como en su área de influencia, requiere de herramientas capaces de traducir información compleja, heterogénea y multidimensional en valores comprensibles para la toma de decisiones de las empresas mineras mismas y de las autoridades competentes (Nardo et al., 2005; OECD et al., 2008). Los indicadores de calidad ambiental cumplen esta función: son variables o conjuntos de variables que, mediante procedimientos de medición, normalización y, en muchos casos, agregación, permiten describir, comparar y monitorear el estado de los componentes bióticos y abióticos del entorno de una unidad minera, incluyendo el aprovechamiento de agua,

el manejo y la disposición de residuos mineros a lo largo del tiempo y del espacio (Nardo et al., 2005; Zhang et al., 2018). Ramos et al., (2004) adoptan la definición de Ott (1978) y Jackson et al. (2000), la cual señala que "un indicador es una señal que transmite un mensaje complejo, derivado de una única variable que refleja un atributo ambiental, de manera simplificada y útil". El diseño de indicadores cuantitativos surge como una alternativa científica indispensable para traducir variables biofísicas complejas en datos numéricos que faciliten la toma de decisiones (Argüelles & Peña, 2018), los indicadores compuestos, una vez normalizados, condensan información compleja en un valor numérico adimensional, generalmente escalado en el intervalo [0, 1] (Nardo et al., 2005; OECD et al., 2008).

Los indicadores ambientales han cobrado relevancia internacional en las últimas décadas; sin embargo, su desarrollo no es reciente, las primeras referencias importantes datan de los años setenta (Thomas, 1972; Inhaber, 1976; Ott, 1978, citados por Ramos et al., 2004)

Los indicadores de calidad ambiental constituyen herramientas fundamentales para la medición, evaluación y comunicación del estado del medio ambiente y los efectos de las actividades humanas sobre los ecosistemas (Naciones Unidas, 1995). La Comisión de Desarrollo Sustentable de las Naciones Unidas aprobó en 1995 un programa de trabajo para indicadores de desarrollo sustentable, el cual incluía una lista de 134 indicadores organizados en el marco "Fuerza Motriz – Estado - Respuesta" (Driving Force – State - Response, DSR), una variante del marco "Presión – Estado - Respuesta" (Pressure – State - Response, PSR) de la OCDE (Naciones Unidas, 1995); en marzo de 2000, los expertos acordaron abandonar el esquema Fuerza Motriz-Estado-Respuesta (DSR) y adoptar un marco temático, reduciendo el conjunto a 57 indicadores núcleo (Naciones Unidas, 2001). Su desarrollo ha evolucionado desde indicadores simples hasta índices compuestos que integran múltiples variables, permitiendo una visión más holística de la calidad ambiental (Nardo et al., 2005; OECD et al., 2008).

Su desarrollo ha sido impulsado por diversos organismos internacionales, dando lugar a una extensa literatura que abarca desde los marcos conceptuales que definen la relación entre la actividad minera y el ambiente (OECD, 1993; Smeets et al., 1999), hasta índices específicos para componentes como el agua (Andrews et al., 2004; Gitau et al., 2016; Uddin et al., 2021), el suelo (Muller, 1969), el aire (Horn & Dasgupta, 2024) y la biodiversidad (Queirós et al., 2016; Sturbois et al., 2023).

La actividad minera constituye uno de los sectores productivos con mayor potencial de alteración ambiental sobre el aire, agua, suelo y biodiversidad (Barbarossa et al., 2026; Enow et al., 2023). El uso de indicadores de calidad ambiental en la minería se debe entender como una necesidad de gestión, regulación y responsabilidad social y corporativa (Bascompta et al., 2022; Oliveira & Da Silva, 2026), lo cual se alinea con los marcos normativos de gestión ambiental y desempeño corporativo ya establecidos para el sector. Se han desarrollado índices de sostenibilidad específicos para minería, tres ejemplos de ello lo son el Índice de Evaluación de Sostenibilidad Ambiental de Industrias Mineras (I_ESAMI) desarrollado por Angelakoglou & Gaidajis, 2020 con 108 indicadores; el Índice de Sostenibilidad de la Minería (ISM) propuesto por Viana, 2012; y el Índice de Sostenibilidad de la Minería de Carbón basado en DEA de Wang & Zhang, 2018, que resultó en 20 minas de carbón certificadas como verdes.

Existe un gran un gran número de propuestas de determinación de indicadores ambientales que pueden ser adaptados y usados para la etapa de operación de un proyecto minero, lo cual se puede encontrar en bibliografía muy variada como, por ejemplo (Barbarossa et al., 2026; Bascompta et al., 2022; Ramakrishnaiah et al., 2009), pero carece de marcos metodológicos específicamente diseñados y validados para la fase de cierre, en la que las metas son distintas, orientadas principalmente hacia alcanzar un estado similar al de referencia definido, en lugar de ajustarse a un estándar regulatorio fijo. La importancia de definir indicadores para la etapa de cierre de mina radica en que esta fase concentra los mayores riesgos ambientales a largo plazo, tales como la alteración de patrones de drenaje natural, inestabilidad de depósitos de jales, pérdida de biodiversidad, erosión acelerada de los suelos, entre otros (Manero et al., 2020); contar con estándares puede servir de apoyo a las empresas para identificar los cambios que el proyecto genera en el entorno y determinar los costos ambientales reales desde la etapa operativa, previniendo pasivos ambientales e identificando las actividades alternativas viables que podrían llevar a cabo los pobladores de la región al concluir la mina sus actividades (Villas-Bôas & Beinhoff, 2002). El objetivo del presente trabajo de investigación es proponer indicadores por factor ambiental (Suelo, Agua, Aire, Biota), con el fin de determinar un Índice de Calidad Ambiental para proyectos mineros en la etapa de cierre y poscierre.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Metodología

Para el presente trabajo se ha decidido usar el marco de evaluación de calidad de suelos de Andrews et al., 2004, extrapolado a todos los factores ambientales. Se considera que la metodología tiene las características y flexibilidad que permiten su aplicación a otros ámbitos, la cual se encuentra en su estructura de tres pasos, definida como una herramienta de evaluación generalizada que es maleable, puede refinarse y actualizarse para diferentes climas, tipos de recursos y necesidades del usuario.

1. **Selección de Indicadores:** Basada en reglas de decisión expertas que consideran los objetivos de manejo y las funciones críticas del ecosistema.

El sistema emplea una base de datos de más de 80 indicadores y 169 reglas de decisión, organizadas como un sistema experto que sugiere un conjunto mínimo de datos (Minimum Data Set, MDS) a partir de dos elementos: el objetivo de manejo del sitio (productividad, reciclaje de residuos o protección ambiental) y las funciones del suelo asociadas a dicho objetivo (ciclo de nutrientes, relaciones hídricas, estabilidad física, filtrado y amortiguamiento, resistencia y resiliencia, biodiversidad y hábitat). La selección se afina posteriormente mediante factores específicos del sitio, tales como el clima, el cultivo, el sistema de laboreo, el propósito de la evaluación y propiedades inherentes del suelo como la textura, el pH o el contenido de materia orgánica (Andrews et al., 2004).

Selección del Conjunto Mínimo de Datos (MDS)

De acuerdo con los fundamentos de evaluación biofísica, la dispersión, fragmentación y falta de comparabilidad de la información en regiones mineras exige delimitar un Conjunto Mínimo de Datos (MDS). Para la etapa de cierre y poscierre, este conjunto evita la redundancia y reduce los costos operativos de monitoreo a largo plazo. Los mismos se seleccionarán verificando el cumplimiento de tres criterios científicos obligatorios:

1. **Relevancia funcional:** Capacidad para medir la alteración de patrones de drenaje, erosión de suelos, pérdida de biodiversidad e inestabilidad geoquímica.

2. **Sensibilidad al cambio antrópico:** Capacidad de respuesta medible ante las obras de reconversión industrial y estabilización de depósitos.

3. **Accesibilidad analítica:** Viabilidad técnica para obtener series estadísticas continuas mediante registros administrativos, estaciones de monitoreo y planes de manejo (Villas Bôas & Beinhoff, 2002).

2. **Interpretación:** Transformación de datos observados (independientemente del factor ambiental) normalmente en puntuaciones adimensionales de 0 a 1 o de 1 a 10 mediante algoritmos de puntuación no lineales, lo que permite comparar mediciones de distinta naturaleza.

Cada valor observado de un indicador, expresado en unidades originales no comparables entre sí, se transforma mediante una curva de puntuación no lineal en un valor adimensional normalmente en el intervalo de 0 a 1 o de 1 a 10. Se usan tres formas de curva:

a) más-es-mejor (sigmoidea ascendente)
b) menos-es-mejor (asíntota descendente)
c) óptimo intermedio (función gaussiana)

Los parámetros de cada curva se ajustan de acuerdo con factores de control específicos del sitio, como por ejemplo la textura, el clima, el cultivo o la mineralogía, de modo que un mismo valor observado puede recibir una puntuación distinta según el contexto (Andrews et al., 2004).

3. **Integración:** Combinación de las puntuaciones en un índice único para obtener una visión general del estado del sistema ambiental.

Las puntuaciones normalizadas se combinan mediante una función aditiva simple, dividiendo la suma de las puntuaciones entre el número de indicadores del MDS y multiplicando el resultado por diez, para obtener un índice de calidad del suelo (SQI) en una escala de 1 a 10, se usa así, porque se considera más intuitiva comparada con la escala de 0 a 1 (Andrews et al., 2004).

$$SQI = (\Sigma S_i / n) \times 10 \qquad \textbf{Ec. 1}$$

donde S_i representa la puntuación de cada indicador y n el número de indicadores incluidos en el conjunto mínimo de datos.

Selección y recalibración del MDS por índice componente

Para cada uno de los cuatro índices se seleccionó un Conjunto Mínimo de Datos (MDS) siguiendo el protocolo de Andrews et al. (2002), modificando adaptando para aplicar a la fase de cierre considerando tres criterios adicionales respecto a la etapa operativa: (a) inclusión de parámetros biológicos funcionales (biomasa microbiana, respiración basal) que capturan recuperación temprana antes de que sea evidente en parámetros estructurales; (b) sustitución de LMP normativos por valores del sitio de referencia como meta de las funciones de transformación; y (c) incorporación de fracciones biodisponibles de metales (en lugar de solo totales) cuando exista evidencia de que la biodisponibilidad cambia significativamente durante la rehabilitación por efecto de enmiendas o coberturas.

Funciones de transformación

Dado que las variables del MDS tienen normalmente unidades dispares (ej. pH, mg/kg, µg/m³, índices de diversidad), cada parámetro se transforma a puntajes adimensionales (x_i) en el intervalo [0, 1], mediante funciones sigmoidea o gaussiana, calibradas de forma que f(x) = 1 cuando x alcanza el valor del sitio de referencia y f(x) → 0 en el valor de máximo impacto observado:

$$f(x) = 1 / [1 + e\text{^}(+k \cdot (x - x_0))] \quad \text{(sigmoidea ascendente)} \qquad \textbf{Ec. 2}$$

$$f(x) = 1 / [1 + e\text{^}(-k \cdot (x - x_0))] \quad \text{(sigmoidea descendente)} \qquad \textbf{Ec. 3}$$

$$f(x) = e\text{^}[-(x - x_REF)^2 / (2\sigma^2)] \quad \text{(gaussiana, con valor referencia)} \qquad \textbf{Ec. 4}$$

Los parámetros k y x_0 se calibran mediante regresión logística sobre series temporales de recuperación de sitios mineros documentados en la literatura (Ormerod et al., 2010; Sheoran et al., 2010), complementadas con los valores de referencia obtenidos en campo para el caso de aplicación.

Algoritmos de Integración

Una vez obtenidos los puntajes (x_i), se integran en un ICA final. La propuesta establece el uso de dos algoritmos:

- Aditivo Ponderado (Útil para factores donde la gestión puede compensar impactos puntuales).

$$ICA_adit = \Sigma(x_i * wi) \quad \textbf{Ec. 5}$$

• Geométrico Ponderado (No compensatorio. Un valor cercano a 0 colapsa el índice. Obligatorio para factores donde la toxicidad aguda sigue la Ley del Mínimo ecológica).

$$ICA_geo = (\Pi\ xi\text{^}wi)\text{^}(1/\Sigma wi) = ICA_geo = (\Pi\ xi^{wi})^{(1/\Sigma wi)} \quad \textbf{Ec. 6}$$

Resultados

a) Selección de indicadores por factor ambiental

Se define el objetivo de la evaluación para cada factor ambiental, de forma similar a como se realiza con el factor suelo mediante una base de reglas de decisión específica para cada matriz (Tabla 1).

Factor ambiental	Objetivos de evaluación	Indicadores ambientales por factor
Suelo	Productividad Reciclaje de residuos Protección ambiental	Ciclo de nutrientes, Relaciones hídricas, Estabilidad física, Filtrado/amortiguamiento, Resistencia/resiliencia, Biodiversidad y hábitat. (definidas originalmente por Andrews et al., 2004)
Agua	Abastecimiento/potabilidad Protección de ecosistemas acuáticos Asimilación de vertidos	Regulación hidrológica, Provisión de hábitat acuático, Capacidad de autodepuración, Soporte de usos humanos. (Gitau et al., 2016; Uddin et al., 2021)
Aire	Protección de la salud humana Regulación climática Calidad paisajística/visibilidad	Capacidad de dispersión/dilución, Amortiguamiento de contaminantes criterio, Regulación de gases de efecto invernadero. (Horn & Dasgupta, 2024)
Biota	Conservación de especies Integridad del ecosistema Provisión de servicios ecosistémicos	Viabilidad poblacional, Estructura trófica, Conectividad de hábitat, Resistencia/resiliencia frente a disturbios. (Barbarossa et al., 2026; Queirós et al., 2016; Sturbois et al., 2023)

***Tabla 1**. Objetivos de evaluación e indicadores ambientales por factor. (Creación propia)*

Cada indicador candidato dentro de la base de reglas quedaría condicionado por factores de contexto específicos del sitio, de forma similar a la textura, el clima o la mineralogía del suelo, tales como el tipo de cuerpo de agua, el régimen climático, el tipo de ecosistema y, en el caso específico de la minería, el tipo de mineralización y la etapa del ciclo de vida del proyecto (exploración, construcción, operación, cierre y poscierre). Esta característica responde directamente a la brecha metodológica señalada en la literatura sobre estandarización de índices ambientales mineros, consistente en la falta de un mecanismo estructurado para adaptar el índice al contexto operativo y geológico específico de cada mina (Asr et al., 2019; Tost et al., 2018).
En la Tabla 2 se propone un conjunto mínimo de datos (MDS) inicial para cada factor, construido a partir de la literatura científica ya revisada en este proyecto.

Factor	Conjunto mínimo de datos (MDS) propuesto
Agua	pH, oxígeno disuelto, sulfatos, acidez/alcalinidad, metales disueltos (Fe, Mn, Al), conductividad, parámetros clave del drenaje ácido de mina (U.S. Environmental Protection Agency, 1994).
Aire	PM10, PM2.5, partículas totales en suspensión, y metales específicos asociados a la mineralogía del yacimiento cuando exista riesgo de exposición (Horn & Dasgupta, 2024).
Suelo	Indicadores originales del SMAF (Andrews et al., 2004), complementados con el índice de geoacumulación (I_geo) para metales pesados (Müller, 1969; Strezov et al., 2025).
Biota	Riqueza y abundancia de especies indicadoras, cobertura vegetal (NDVI), índices de integridad biótica y conectividad de hábitat (Barbarossa et al., 2026; O'Donnell et al., 2024).

***Tabla 2**. Conjunto Mínimo de Datos (MDS) propuesto por cada factor ambiental. (Creación propia)*

b) Curvas de puntuación generalizado para cada factor

En la generalización se mantienen las tres formas de curva de puntuación, aplicada ahora a cada factor ambiental:

- Más-es-mejor (curva ascendente): oxígeno disuelto en agua, cobertura vegetal, riqueza de especies, capacidad de infiltración del suelo.
- Menos-es-mejor (curva descendente): concentración de PM2.5, metales pesados en suelo o agua, sulfatos en agua de drenaje de mina.
- Óptimo intermedio (curva gaussiana): pH del suelo o del agua, donde tanto la acidificación como la alcalinización excesivas son indeseables.

c) Conjunto Mínimo de Datos complementarios (MDS)

Se proponen además para la etapa de cierre y poscierre 25 indicadores complementarios que cumplen con los criterios definidos anteriormente, que se podrían usar discrecionalmente dependiendo de tipo de proyecto minero de que se trate, estos indicadores se presentan en la Tabla 3.

Macrodimensión de Sostenibilidad	Indicador de Gestión del Proyecto	Arquetipo de Función	Peso Relativo (Wi)	Justificación Funcional en Fase de Cierre y Poscierre
ECONÓMICA Y OPERATIVA	1. % Cumplimiento del Plan de Excavación de Mena (toneladas)	Tipo I (Ascendente)	2.38%	Garantiza la liberación ordenada de frentes remanentes y define geometrías de taludes estables antes del abandono.
ECONÓMICA Y OPERATIVA	2. % Cumplimiento del Plan de Excavación de Materiales No Conformes (limonita/estéril)	Tipo II (Descendente)	2.38%	Mide la reducción del volumen de escombros expuestos en superficie, mitigando la lixiviación de materiales.
ECONÓMICA Y OPERATIVA	3. % Cumplimiento del Plan de Carga de Vagones (N° de vagones)	Tipo I (Ascendente)	2.38%	Asegura la evacuación de stocks remanentes y previene la acumulación de mineral oxidado en patios de transferencia.

ECONÓMICA Y OPERATIVA	4. % Cumplimiento de Relación Mena/Material No Conforme	Tipo III (Gaussiana)	2.38%	Mide el balance cinético crítico de masa. Desviaciones extremas alteran la estabilidad del diseño de coberturas.
ECONÓMICA Y OPERATIVA	5. % Cumplimiento de Turnos por Operación (horas-hombre)	Tipo I (Ascendente)	2.38%	Monitorea la continuidad y estabilidad del ritmo operacional asignado al desmantelamiento seguro de la infraestructura.
ECONÓMICA Y OPERATIVA	6. % Cumplimiento de Especificaciones de Calidad del producto	Tipo I (Ascendente)	2.38%	Asegura que el mineral remanente despachado minimice las penalizaciones comerciales e internalice costos.
ECONÓMICA Y OPERATIVA	7. % Cumplimiento del Plan de Desarrollo de Minas (Exploración)	Tipo I (Ascendente)	2.38%	Define con exactitud matemática las líneas base geomecánicas de los macizos rocosos para el diseño de poscierre.
ECONÓMICA Y OPERATIVA	8. % Cumplimiento del Plan de Perforación geotécnica (metros)	Tipo I (Ascendente)	2.38%	Permite el monitoreo continuo de fracturas y planos de debilidad estructural para prevenir derrumbes masivos.
ECONÓMICA Y OPERATIVA	9. % Cumplimiento del Plan de Consumo de Explosivos (Kg)	Tipo II (Descendente)	2.38%	Minimiza la inducción de vibraciones sonoras nocivas y previene daños microestructurales en taludes remanentes.
ECONÓMICA Y OPERATIVA	10. % Cumplimiento del Plan de Voladura controlado (pozos)	Tipo I (Ascendente)	2.38%	Asegura la fragmentación óptima del terreno reduciendo el retratamiento mecánico y el consumo difuso de energía.
ECONÓMICA Y OPERATIVA	11. % Cumplimiento del Plan de Disponibilidad de Equipos Mineros	Tipo I (Ascendente)	2.38%	Garantiza que la maquinaria pesada crítica para las obras de remediación física se mantenga operativa.
ECONÓMICA Y OPERATIVA	12. % Cumplimiento del Plan de Uso de la Disponibilidad de Equipos	Tipo I (Ascendente)	2.38%	Mide el aprovechamiento real del tiempo mecánico programado en las labores de estabilización y transporte.

***Tabla 3**. Matriz de Conjunto Mínimo de Datos (MDS) e Indicadores de Gestión para la Explotación y Cierre Sostenible. (Creación propia)*

Macrodimensión de Sostenibilidad	Indicador de Gestión del Proyecto	Arquetipo de Función	Peso Relativo (Wi)	Justificación Funcional en Fase de Cierre y Poscierre
ECONÓMICA Y OPERATIVA	12. % Cumplimiento del Plan de Uso de la Disponibilidad de Equipos	Tipo I (Ascendente)	2.38%	Mide el aprovechamiento real del tiempo mecánico programado en las labores de estabilización y transporte.
ECONÓMICA Y OPERATIVA	13. % Cumplimiento del Plan de Inversión en Equipos Mineros y Repuestos	Tipo I (Ascendente)	2.38%	Controla la asignación presupuestaria indispensable para internalizar los activos mecánicos del cierre.
ECONÓMICA Y OPERATIVA	14. % Cumplimiento del Plan de Inversión en I+D tecnológico	Tipo I (Ascendente)	2.41%	Financia la investigación cineto-química de coberturas de aislamiento y tratamientos pasivos de drenajes.
MEDIOAMBIENTAL Y GEOQUÍMICA	15. % Cumplimiento del Plan de manejo de desechos peligrosos y materiales recuperables	Tipo I (Ascendente)	5.56%	Asegura el confinamiento y remoción de sustancias ecotóxicas (aceites, grasas y reactivos), evitando fugas al entorno.
MEDIOAMBIENTAL Y GEOQUÍMICA	16. % Cumplimiento del Plan de disminución de afectación a cuerpos de agua	Tipo I (Ascendente)	5.56%	Mide la contención del drenaje ácido mediante el monitoreo de la conductividad eléctrica, sulfatos y pH.
MEDIOAMBIENTAL Y GEOQUÍMICA	17. % Cumplimiento del Plan de disminución de emisiones de polvo (PM10)	Tipo I (Ascendente)	5.56%	Evita la dispersión eólica de material particulado eólico y metales pesados desde las playas de relaves secas.
MEDIOAMBIENTAL Y GEOQUÍMICA	18. % Cumplimiento del Plan de Rehabilitación de superficies afectadas	Tipo I (Ascendente)	5.56%	Monitorea la conductividad hidráulica saturada y la materia orgánica en la restauración vegetal de laderas.
MEDIOAMBIENTAL Y GEOQUÍMICA	19. % Cumplimiento del Plan de Sensibilización en Materia Ambiental	Tipo I (Ascendente)	5.56%	Promueve la capacitación interna del personal en protocolos de prevención y control integrado de contaminación.
MEDIOAMBIENTAL Y GEOQUÍMICA	20. % Cumplimiento del Plan de Reutilización y/o reciclado de residuos mineros	Tipo I (Ascendente)	5.53%	Mide la tasa de valorización de subproductos (lodos o revoque de lavado) en la reconversión de perfiles de suelo.
SOCIAL Y BIENESTAR HUMANO	21. % Cumplimiento del Plan de formación de trabajadores en seguridad y operación	Tipo I (Ascendente)	6.67%	Habilita al capital humano en técnicas de desmovilización segura, liderazgo y operación eficiente de remediación.
SOCIAL Y BIENESTAR HUMANO	22. % Cumplimiento del Plan de evaluación y disminución de riesgos laborales	Tipo I (Ascendente)	6.67%	Controla y reduce los índices de frecuencia, incidencia y gravedad de siniestros en frentes críticos de cierre.
SOCIAL Y BIENESTAR HUMANO	23. % Cumplimiento del Plan de dotación de equipos de Protección Personal (EPP)	Tipo I (Ascendente)	6.67%	Garantiza la barrera física de seguridad higiénica ante entornos con ruido industrial y polvos mecánicos elevados.
SOCIAL Y BIENESTAR HUMANO	24. % Cumplimiento del Plan de Empleo local (directo e indirecto)	Tipo I (Ascendente)	6.67%	Mide la incorporación laboral comunitaria periférica, mitigando impactos contractivos por la reducción de faenas.
SOCIAL Y BIENESTAR HUMANO	25. % Cumplimiento del Plan de Integración Empresa-Comunidad (CPI-EC)	Tipo I (Ascendente)	6.65%	Desarrolla programas e inversiones conjuntas para la reconversión hacia actividades económicas alternativas viables.
TOTAL PONDERACIÓN INTEGRADA			100.0 1%	Representa el 100% del peso distribuido de forma equilibrada entre las macrodimensiones del MDS.

***Continuación Tabla 3**. Matriz de Conjunto Mínimo de Datos (MDS) e Indicadores de Gestión para fase de Cierre y Poscierre Sostenible. (Creación propia)*

La estructura presentada en la Tabla 3 corresponde a una elaboración y sistematización propia. El diseño integra de forma unificada los veinticinco indicadores analíticos de control de procesos mineros a cielo abierto propuestos por (La Cruz & Salomón, 2019), articulándolos metodológicamente con los arquetipos lineales de transformación adimensional de datos desarrollados por el marco indexado de (Andrews et al., 2004) y bajo los criterios de verificación e indicadores de la norma internacional de gestión minera sostenible UNE 22470.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

d) Listado Exhaustivo y Sustentación de uso de los 25 componentes propuestos

Los componentes del MDS se dividen en las tres dimensiones fundamentales de la sostenibilidad, priorizando las dinámicas críticas de la transición hacia el cese definitivo de operaciones:

- **Dimensión Económica y Operativa (Componentes 1 al 14):** Durante el cierre, la gestión eficiente de los recursos materiales restantes, el inventario de maquinarias y equipos, el uso óptimo de los mismos, son indispensables para garantizar la estabilidad física del entorno. Controlar la relación de mena con tepetate y/o terreros y el cumplimiento de planes de excavación e inversiones en investigación previene la generación de pasivos ambientales críticos y optimiza la eficiencia en la fase de cierre (La Cruz & Salomón, 2019).

- **Dimensión Medioambiental y Geoquímica (Componentes 15 al 20):** Un aspecto relevante es el control de la dispersión de contaminantes como el drenaje ácido de mina y las emisiones de partículas generadas. El monitoreo y manejo de desechos peligrosos, la reducción de emisiones de polvo en caminos de acceso a la mina y de la mina misma, el control de la afectación a cuerpos de agua superficiales/subterráneos y los planes de valorización o reutilización de residuos mineros resultan determinantes para la estabilización geoquímica y la restauración ecológica de las superficies erosionadas (Amos et al., 2015; Lazo & Joel, 2019; Nordstrom, 2011; Pimiento, 2000)

- **Dimensión Social y Seguridad Laboral (Componentes 21 al 25):** Es imprescindible que el recurso humano participe en programas intensivos de formación y entrenamiento para llevar a cabo el cese de operaciones y cierre de un proyecto minero de forma segura, la evaluación de riesgos implica que se identifiquen las necesidades de equipos de protección personal (EPP) para reducir las tasas de siniestralidad o enfermedades ocupacionales. Asimismo, el fomento del empleo local y los planes de integración empresa-comunidad facilitan el proceso de reconversión socioeconómica de la población afectada, asegurando la viabilidad de las comunidades de la región dentro de la zona de influencia del proyecto después del cese de operaciones (La Cruz & Salomón, 2019; Pimiento, 2000)

e) Funciones de Transformación

Ya se señaló con anterioridad los tres tipos de funciones de transformación a usar, se anexan sólo de manera ilustrativa los resultados para algunos indicadores ambientales generados, figuras 1 y 2.

***Figura 1**. Funciones de transformación (Arquetipos matemáticos) tipo usadas*

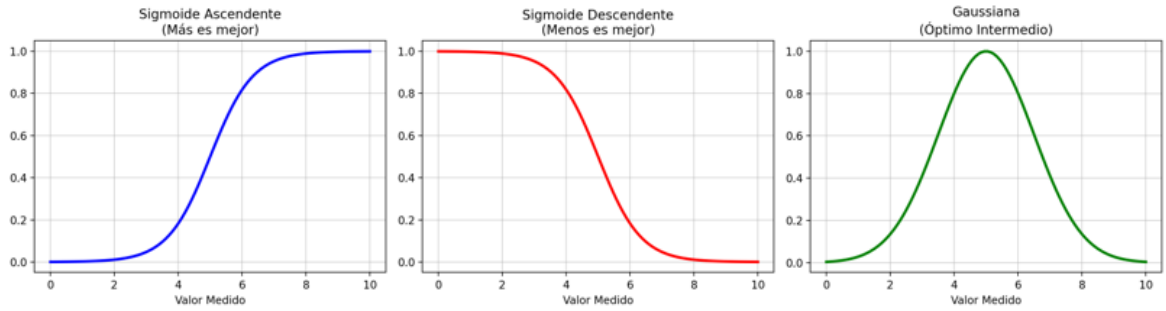
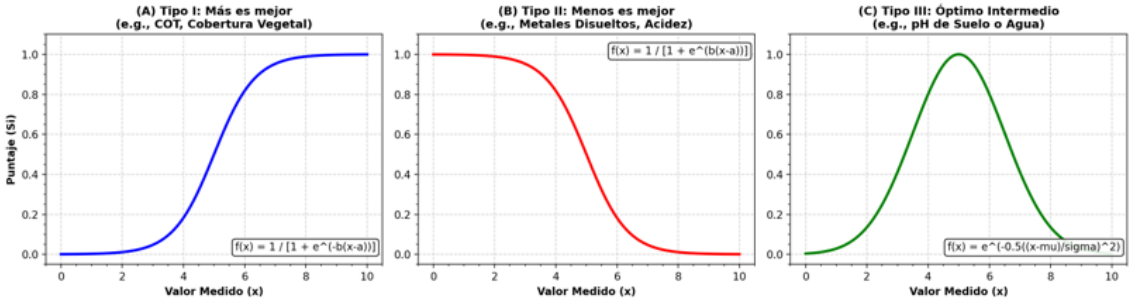


***Figura 2.** Arquetipos matemáticos aplicables a parámetros de poscierre.*



f) Algoritmo de Integración Matemática

Para la obtención del Índice de Calidad Ambiental, se establece un uso dual y complementario de algoritmos de integración en función de la compensabilidad de las dimensiones, que corresponden a las ecuaciones 5 y 6. Para su desarrollo se propone la siguiente estructura del Índice Ambiental Integrado para Cierre y Poscierre, que incluye a los cuatro índices de estado, 30 parámetros totales y pesos de integración.

Estructura tipo del Índice Ambiental Integrado

Índice	Factor	N° params.	Peso (w) en IAI-CP	Agregación	Parámetros del MDS
SQI	**Suelo**	8	**0.27**	Aditivo/Geométrico	pH, COT, metales totales/biodisponibles, Da, CBM, ADH, respiración basal
WQI-M	**Agua**	9	**0.27**	Aditivo/Geométrico	pH, CE, OD, As, Pb, Zn, Fe, SO_4^{2-}, alcalinidad/acidez neta
AQI-M	**Aire**	6	**0.22**	Aditivo/Geométrico	PM_{10}, $PM_{2.5}$, polvo fugitivo de relaves/jales, SO_2, Hg°, ruido
BQI	**Biodiversidad**	7	**0.24**	Aditivo/Geométrico	BMWP/ASPT, IBI, H', cobertura vegetal nativa, QBR, fauna indicadora

Tabla 4. *Estructura del Índice Ambiental Integrado para Cierre y Poscierre: cuatro índices de estado, 30 parámetros totales y pesos de integración.*

Clasificación de resultados de acuerdo al Índice Ambiental Integrado (IAI) obtenido

La Tabla 5 presenta la escala de clasificación del IAI propuesto para los cuatro componentes.

ESCALA DE CLASIFICACIÓN DEL IAI			
Clase	**Rango**	**Calidad integrada**	**Criterios de gestión para Cierre y Poscierre**
I	0.85–1.00	Excelente	Ecosistema funcionalmente equivalente al de referencia.

II	0.70–0.84	Buena	Recuperación avanzada. Funciones ambientales íntegras.
III	0.50–0.69	Regular	Recuperación parcial en la mayoría de factores ambientales.
IV	0.25–0.49	Deficiente	Al menos 2 índices en Clase V o VI. Remediación urgente. Revisión del plan de cierre con autoridad.
V	0.10–0.24	Muy mala	Colapso de funciones en mayoría de factores ambientales. Intervención regulatoria inmediata.
VI	0.00–0.09	Crítica	Degradación extrema en todos los factores ambientales. Pasivo ambiental en emergencia activa.

Tabla 5. *Escala de clasificación del resultado de cálculo de Índice Ambiental Integrado. Código de color: verde oscuro = Clase I, verde claro = Clase II, amarillo = Clase III, naranja = Clase IV, rojo claro = Clase V, rosa = Clase VI.*

Discusión

Para la etapa de cierre - poscierre se requiere desarrollar metodologías que consideren e integren las características propias de la etapa. Hay una diferencia importante en las que se pueden considerar como presiones dominantes durante la etapa de operación de un proyecto minero en comparación a la etapa de cierre; por lo que el modelo que se desarrolle debiese identificar esas diferencias y permitir su determinación; asimismo, se ha pretendido lograr un modelo que sea simple y permita determinar el estado del medio ambiente a todo proyecto minero, que sea universal, sin embargo, no debe dejar de considerarse que existen características muy variables de un proyecto minero a otro, como lo puede ser el tipo de yacimiento, geología, tipo de minado, tamaño de mina, mecanización, automatización, etc., lo que puede agregar y marcar diferencias en la aplicación del procedimiento para determinar el índice de calidad ambiental del proyecto.

Conclusiones

La evaluación del cierre de minas requiere de un enfoque integrado y no compensatorio. El modelo propuesto, puede permitir la identificación de los factores o elementos que motivan una presión sobre el medio ambiente en la etapa de cierre – poscierre. La aplicación de funciones de transformación no lineales y su integración geométrica ofrece una herramienta objetiva para determinar si un proyecto minero ha alcanzado un cierre exitoso o no.

1. Se propone el Índice Ambiental Integrado para Cierre y Poscierre (IAI), un marco generalizable que integra cuatro índices de estado ambiental (SQI, WQI-M, AQI-M, BQI), con el objetivo de determinar si puede ser aplicado a cualquier tipología de operación minera.

2. Será importante observar y determinar su validez en los casos en que la disponibilidad de la información sea escasa.

3. Se debe incluir el análisis de las medidas de mitigación aplicadas, con el fin de comparar tanto espacial como temporalmente el estado del ambiente para el sitio minero en cuestión.

4. Se considera que la propuesta presenta características que le permiten ser aplicado a diferentes tipos de proyectos mineros.

Referencias

Amos, R. T., Blowes, D. W., Bailey, B. L., Sego, D. C., Smith, L., & Ritchie, A. I. M. (2015). Waste-rock hydrogeology and geochemistry. *Applied Geochemistry*, *57*, 140-156.

Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Cambardella, C. A. (2004). The Soil Management Assessment Framework. *Soil Science Society of America Journal*, *68*(6), 1945-1962. https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1945

Angelakoglou, K., & Gaidajis, G. (2020). A conceptual framework to evaluate the environmental sustainability performance of mining industrial facilities. *Sustainability*, *12*(5), 2135.

Argüelles, C. L. R., & Peña, R. G. A. (2018). LA VALORACIÓN ECONÓMICA Y AMBIENTAL EN LA ACTIVIDAD MINERA. ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL ASSESSMENT IN MINING ACTIVITY. *Revista Científica ECOCIENCIA*, *5*(5).

Asr, E. T., Kakaie, R., Ataei, M., & Mohammadi, M. R. T. (2019). A review of studies on sustainable development in mining life cycle. *Journal of Cleaner Production*, *229*, 213-231.

Barbarossa, V., Schipper, A. M., Andringa, I., van Oorschot, M., Sonter, L. J., & Marques, A. (2026). The Many Pathways of Mining Impacts on Biodiversity. *Conservation Letters*, *19*(1), e70000. https://doi.org/10.1111/con4.70000

Bascompta, M., Sanmiquel, L., Vintró, C., & Yousefian, M. (2022). Corporate social responsibility index for mine sites. *Sustainability*, *14*(20), 13570.

Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1994). Defining and Assessing Soil Quality. En *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment* (pp. 1-21). John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c1

Enow, O. F., Gbabo, E. Y., Ofoedu, A. T., Chima, P. E., & Adebowale, O. J. (2023). *Environmental Impact of Mining Activities: A Review of Management Strategies and Rehabilitation Techniques*.

Gitau, M. W., Chen, J., & Ma, Z. (2016). Water Quality Indices as Tools for Decision Making and Management. *Water Resources Management*, *30*(8), 2591-2610.https://doi.org/10.1007/s11269-016-1311-0

Horn, S. A., & Dasgupta, P. K. (2024). The Air Quality Index (AQI) in historical and analytical perspective a tutorial review. *Talanta*, *267*, 125260.

La Cruz, V. D., & Salomón, L. (2019, febrero). Sistematización de indicadores de gestión minera. *UNIVERSIDAD, CIENCIA y TECNOLOGÍA*, *23*(90).

Lazo, D., & Joel, H. (2019). Indicadores ambientales en una minería sostenible. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, *22*(43), 37-37.

Manero, A., Kragt, M., Standish, R., Miller, B., Jasper, D., Boggs, G., & Young, R. (2020). A framework for developing completion criteria for mine closure and rehabilitation. *Journal of Environmental Management*, *273*, 111078. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111078

Muller, G. (1969). *Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River*. https://www.sid.ir/paper/618491/en

Naciones Unidas. (1995). *Work Programme on Indicators for Sustainable Development.* Comisión de Desarrollo Sustentable. https://www.un.org/esa/documents/ecosoc/cn17/1995/ecn171995-32.htm

Naciones Unidas. (2001). *Indicators of sustainable development: Framework and methodologies*. United Nations Department of Economic and Social Affairs, Division for Sustainable Development. https://www.un.org/esa/sustdev/csd/csd9_indi_bp3.pdf

Nardo, M., Saisana, M., Saltelli, A., Tarantola, S., Hoffmann, A., & Giovannini, E. (2005). Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide. *OECD Statistics Working Papers*, *2005*(3). https://doi.org/10.1787/533411815016

Nordstrom, D. K. (2011). Hydrogeochemical processes governing the origin, transport and fate of major and trace elements from mine wastes and mineralized rock to surface waters. *Applied geochemistry*.

OECD. (1993). *OECD core set of indicators for environmental performance reviews*. Organisation for Economic Co-operation and Development.

OECD, Union, E., & European Commission, J. R. C. (2008, agosto 21). *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide*. OECD; OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/9789264043466-en

Oliveira, F. M., & Da Silva, E. A. (2026). Corporate Social Responsibility (CSR) in Mining: An Integrated Institutional and Agency Theory Perspective. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, *33*(4), 4591-4606. https://doi.org/10.1002/csr.70399

Ormerod, S. J., Dobson, M., Hildrew, A. G., & Townsend, C. R. (2010). Multiple stressors in freshwater ecosystems. *Freshwater Biology*, *55*(s1), 1-4. https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02395.x

Pimiento, E. V. (2000). Indicadores de Sostenibilidad y su Aplicación a las Empresas Mineras. *Gestión y Ambiente*, 35-48.

Queirós, A. M., Strong, J. A., Mazik, K., Carstensen, J., Bruun, J., Somerfield, P. J., Bruhn, A., Ciavatta, S., Flo, E., & Bizsel, N. (2016). An objective framework to test the quality of candidate indicators of good environmental status. *Frontiers in Marine Science*, *3*, 73.

Ramakrishnaiah, C. R., Sadashivaiah, C., & Ranganna, G. (2009). Assessment of Water Quality Index for the Groundwater in Tumkur Taluk, Karnataka State, India. *Journal of Chemistry*, *6*(2), 757424. https://doi.org/10.1155/2009/757424

Ramos, T. B., Caeiro, S., & de Melo, J. J. (2004). Environmental indicator frameworks to design and assess environmental monitoring programs. *Impact Assessment and Project Appraisal*, *22*(1), 47-62. https://doi.org/10.3152/147154604781766111

Sheoran, V., Sheoran, A. S., & Poonia, P. (2010). *Soil reclamation of abandoned mine land by revegetation: A review*. https://scholarworks.umass.edu/items/d2a22895-2923-45fd-a961-d400f19b9b20

Smeets, E., Weterings, R., Ambiente, A. E. del M., Agency, E. E., & Bosch, P. (1999). *Environmental Indicators: Typology and Overview*. European Environment Agency. https://books.google.com.mx/books?id=lhulSgAACAAJ

Sturbois, A., De Cáceres, M., Bifolchi, A., Bioret, F., Boyé, A., Gauthier, O., Grall, J., Grémare, A., Labrune, C., Robert, A., Schaal, G., & Desroy, N. (2023). Ecological quality assessment: A framework to report ecosystems quality and their dynamics from reference conditions. *Ecosphere*, *14*(12), e4726. https://doi.org/10.1002/ecs2.4726

Tost, M., Hitch, M., Chandurkar, V., Moser, P., & Feiel, S. (2018). The state of environmental sustainability considerations in mining. *Journal of cleaner production*, *182*, 969-977.

Uddin, M. G., Nash, S., & Olbert, A. I. (2021). A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. *Ecological indicators*, *122*, 107218.

Viana, M. B. (2012). *Índice de desempenho ambiental para mineração a cielo abierto* [Tesis de Doctorado]. Universidade de Brasília (Brasil).

Villas Bôas, R. C., & Beinhoff, C. (2002). *Indicadores de Sostenibilidad para la industria extractiva mineral*. CNPq/CYTED/IMAAC/UNIDO. http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/686/1/IndicadoresSostenibilidad_LivroCompleto.pdf

Villas-Bôas, R. C., & Beinhoff, C. (2002). *Sostenibilidad para la Industria Extractiva Mineral*.

Wang, W., & Zhang, C. (2018). Evaluation of relative technological innovation capability: Model and case study for China's coal mine. *Resources Policy*, *58*, 144-149.

Younger, P. L., Banwart, S. A., & Hedin, R. S. (2002). Mine water hydrology. En *Mine Water: Hydrology, Pollution, Remediation* (pp. 127-270). Springer.

Zhang, T. Q., Zheng, Z. M., Lal, R., Lin, Z. Q., Sharpley, A. N., Shober, A. L., Smith, D., Tan, C. S., & Van Cappellen, P. (2018). Environmental Indicator Principium with Case References to Agricultural Soil, Water, and Air Quality and Model-Derived Indicators. *Journal of Environmental Quality*, *47*(2), 191-202. https://doi.org/10.2134/jeq2017.10.0398