

Año 27 No. 98
Abril-Junio, 2022



Año 27 No. 98

Abril-Junio, 2022

Revista Venezolana de Gerencia



UNIVERSIDAD DEL ZULIA (LUZ)
Facultad de Ciencias Económicas y Sociales
Centro de Estudios de la Empresa

ISSN 1315-9984

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons
Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 3.0 Unported.
http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/deed.es_ES

COMO CITAR: Gahona-Flores, O., y Juárez-Rubio, F. (2022). Selección de proveedores sostenibles en la minería del cobre con métodos de decisión de multicriterio. *Revista Venezolana de Gerencia*, 27(98), 479-497. <https://doi.org/10.52080/rvgluz.27.98.7>

Universidad del Zulia (LUZ)
Revista Venezolana de Gerencia (RVG)
Año 27 No. 98 2022, 479-497
ISSN 1315-9984 / e-ISSN 2477-9423



Proveedores sostenibles en la minería del cobre: análisis con métodos de decisión multicriterio

Gahona-Flores, Orlando*
Juárez-Rubio, Francisco**

Resumen

El artículo tiene como objetivo describir una metodología de selección de proveedores sostenibles basada en el proceso de análisis jerárquico y la técnica de preferencias ordenadas por similitud a una solución ideal para la minería del cobre. Con base en una revisión de la literatura, se desarrolla un modelo de selección de proveedores conformado por criterios de selección basados en las dimensiones de sostenibilidad, e incluye un modelo de ponderación de factores con base en comparaciones ordenadas. Esta metodología se valida en una compañía minera de cobre ubicada en la región de Antofagasta, Chile. Con los resultados se encuentra que la aplicación del proceso de análisis jerárquico y las técnicas de preferencia de ordenadas por similitud como una solución ideal que apoya el proceso de toma de decisiones y aumenta las capacidades para la selección de proveedores sostenibles al utilizar modelos cuantitativos y escalas de comparación de criterios que consideran la subjetividad en las decisiones. De esta manera, se contribuye al mejoramiento de empresas mineras, donde el proceso de compras y la gestión de proveedores son componentes críticos del sistema logístico minero.

Palabras clave: Selección de proveedores sostenibles; Chile; proceso de análisis jerárquico; técnicas de preferencia de ordenadas por similitud; minería.

Recibido: 12.09.21

Aceptado: 10.01.22

* Facultad de Ingeniería, Universidad de Antofagasta, Antofagasta, Chile, E-mail: orlando.gahona@uantof.cl
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6749-4522>

** Facultad de Derecho, Economía y Turismo, Universitat de Lleida, España. E-mail: fjuarez@aegern.udl.cat
ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2950-4192>

Sustainable suppliers in copper mining: analysis with multi-criteria decision methods

Abstract

The article aims to describe a sustainable supplier selection methodology based on the hierarchical analysis process (AHP) and the technique of preferences ordered by similarity to an ideal solution (TOPSIS) for copper mining. Based on a review of the literature, a supplier selection model is developed consisting of selection criteria based on sustainability dimensions, and includes a factor weighting model based on ordered comparisons. This methodology is validated in a copper mining company located in the Antofagasta region, Chile. With the results, it is found that the application of AHP and TOPSIS supports the decision-making process and increases the capacities for the selection of sustainable suppliers by using quantitative models and criteria comparison scales that consider subjectivity in decisions. In this way, it contributes to the improvement of mining companies, where the purchasing process and supplier management are critical components of the mining logistics system.

Keywords: Selection of sustainable suppliers; multi-criteria decision methods; AHP; TOPSIS; mining.

1. Introducción

La minería del cobre, es la actividad económica más relevante para Chile. De manera directa, representa más del 10% del PIB, más del 50% de las exportaciones, y es el principal receptor de inversión extranjera directa, representando uno de cada tres dólares que entran al país (Bustos-Gallardo y Prieto, 2019). La presencia de nuevos capitales foráneos ha impulsado fuertemente el desarrollo de la industria minera, transformando a la región de Antofagasta en la capital mundial de la minería del Cobre (Rivera y Aroca, 2014). Según Bustos-Gallardo y Prieto (2019) la región aportó cerca de 3,2 millones de toneladas de cobre a la producción nacional, es decir cerca del 57%. En

la actualidad la gestión de la cadena de suministro se ha convertido en un aspecto que contribuye a la productividad y competitividad en diferentes industrias mineras, tales como en el caso del cobre, oro, carbón, níquel, entre otros; debido a que la logística gestiona los flujos de información, materiales, minerales y dinero desde el aprovisionamiento de los suministros, pasando por el almacenamiento, utilización en las actividades de exploración, explotación y beneficio, hasta el transporte con el fin de atender los requerimientos de los clientes (Pedrosa, Blazevic & Jasmand, 2015).

La selección de proveedores es una de las decisiones críticas para cualquier organización, debido a su impacto directo

sobre la rentabilidad y el mantenimiento de la posición competitiva de la empresa. Históricamente, las decisiones de abastecimiento se tomaron en función de aspectos económicos. Sin embargo, debido a las crecientes tendencias de externalización de servicios, las políticas medioambientales cada vez más exigentes y las demandas sociales de los territorios donde desarrollan sus operaciones están obligando a las empresas a integrar los criterios económicos, ambientales y sociales en la cadena de suministro (Ghayebloo et al, 2015).

Las revisiones recientes de la literatura de Govindan et al, (2015) y Zimmer et al, (2016) indican que los métodos de decisión de multicriterio se encuentran entre los enfoques aplicados con más frecuencia para seleccionar proveedores sostenibles. Se realizó una revisión de la literatura para identificar los criterios asociados a las dimensiones de sostenibilidad económica, ambiental y social. Los criterios finales se eligieron de acuerdo a los resultados obtenidos en la investigación de Gahona (2021). Sin embargo, en una revisión de literatura realizada en bases de datos como WOS y SCOPUS, no se han encontrado modelos de selección de proveedores sostenibles para el sector minero, en especial para la industria del cobre, en donde se involucre los métodos AHP y TOPSIS, que es ampliamente utilizada y recomendada para estos casos.

Por los motivos expuestos, el presente artículo tiene como objetivo describir una metodología de selección de proveedores sostenibles basada en el proceso de análisis jerárquico (AHP) y la técnica de preferencias ordenadas por similitud a una solución ideal (TOPSIS) para la minería del cobre, que permita llevar a cabo un proceso

de abastecimiento eficiente. Debido a esto, en la segunda sección del artículo se exponen los conceptos asociados a la selección de proveedores, al igual que los conceptos básicos de los métodos AHP y TOPSIS. En la tercera sección se plantea y se justifica la implementación de una metodología para la selección de proveedores, conformado por criterios de selección basados en las dimensiones de sostenibilidad y un modelo de ponderación de factores con base en comparaciones ordenadas. Luego, en la sección de resultados se implementa la metodología en una empresa minera de cobre ubicada en la región de Antofagasta, Chile; con la cual se realiza un análisis para la toma de decisiones de selección de proveedores sostenibles. Finalmente, se presentan las principales conclusiones de esta investigación y trabajos futuros en el tema abordado en este artículo.

2. Cadena de suministro y selección de proveedores en el cobre en Chile

La cadena de suministro es “un conjunto de tres o más entidades que participan directamente en los flujos de productos, servicios, finanzas y/o información de una fuente a un cliente” (Mentzer et al, 2016). El concepto de cadena de suministro es aplicable a la minería debido a que ésta se compone de un conjunto de empresas que poseen instalaciones, actividades funcionales y sistemas de distribución que buscan entregar minerales a diferentes clientes (Arias et al, 2014). Adicionalmente, se debe indicar que en el caso chileno, las cadenas productivas, se asemejan al concepto de cadena de suministro debido a que éstas se conforman por

empresas de suministros, exploración, explotación, beneficio, comercialización y consumidores, los cuales generan diferentes relaciones entre ellos, tales como: encadenamientos productivos o aglomeraciones de empresas entre otros, los cuales se enfocan en aumentar la productividad y el aprovechamiento de los recursos minerales (Gahona, 2020). La minería del Cobre, es la actividad económica más relevante para Chile ya que representa más del 10% del PIB, más del 50% de las exportaciones, es el principal receptor de inversión extranjera directa, con un 30% del total de la producción y mantiene un tercio de las reservas conocidas, la mayor a nivel global (Bustos-Gallardo y Prieto, 2019; Rivera y Aroca, 2014). En el caso de la minería chilena la importancia de la cadena de suministros es fundamental, pues las empresas mineras han externalizado gran cantidad de funciones a sus proveedores, concentrando sus esfuerzos en el núcleo del negocio, es decir; la propiedad, la operación y gestión de los yacimientos. Por tanto, parte importante del éxito pasado y futuro de la minería chilena depende directamente de la productividad y competitividad de los proveedores (Korinek, 2013). La región de Antofagasta está estrechamente vinculada a la historia y desarrollo de la minería del cobre

de Chile. Por ello, no es de extrañar la incidencia que esta actividad tiene en todo el quehacer de esta zona. Según Bustos-Gallardo y Prieto (2019) esta región aportó 3,2 millones de toneladas de cobre a la producción nacional, es decir cerca del 57%. Las compras ejercen un rol estratégico y requiere una adecuada gestión en las organizaciones, debido a que pueden representar entre el 40% y 60% del valor de las ventas del producto final, y por estos motivos, una pequeña reducción en esos costos puede conllevar a un aumento de la eficiencia y rentabilidad de la empresa (Grzybowska y Gajdzik, 2014). Por tal motivo, identificar los criterios relevantes de selección de proveedores es una actividad clave en la gestión de la cadena de suministro, que garantiza contar con proveedores confiables y competentes que brindan insumos, suministros y equipos para la minería en el tiempo, momento, costo y calidad adecuada (Hanlin y Hanlin, 2012). Dickson (1966) fue pionero en investigar sobre los criterios relevantes en el proceso de selección de proveedores. Este autor identificó y analizó la importancia de 23 criterios y concluyó que la calidad era el criterio de mayor prioridad, seguida por las entregas a tiempo y el buen desempeño histórico de la organización (Tabla 1).

Tabla 1
Escala de criterios de selección de proveedores

Criterios de selección	Valoración de Dickson
Calidad	1
Entrega a tiempo	2
Desempeño histórico	3
Garantía y compensación	4

Cont.... Tabla 1

Equipos y capacidad de producción	5
Precio	6
Capacidad técnica	7
Situación financiera	8
Procedimiento legalidad	9
Sistema de comunicación	10
Reputación industrial	11
Relaciones comerciales	12
Gestión y organización	13
Capacidad de control de producción	14
Servicio de mantenimiento	15
Actitud de servicio	16
Imagen anterior	17
Capacidad de embalaje	18
Relaciones laborales	19
Ubicación geográfica	20
Ventas anteriores	21
Capacidad de formación	22
Negociación mutua	23

Fuente: Dickson (1966)

2.1. Selección de proveedores sostenibles

La selección de proveedores es una de las decisiones críticas para cualquier organización debido a su impacto directo sobre la rentabilidad y el mantenimiento de la posición competitiva de la organización. Históricamente, las decisiones de abastecimiento se tomaron en función de aspectos económicos. Sin embargo, las crecientes tendencias de externalización de servicios, las políticas ambientales y las preocupaciones sociales ahora están obligando a las empresas a integrar

los criterios económicos, ambientales y sociales en sus actividades de la cadena de suministro (Ghayebloo et al, 2015). La selección de proveedores sostenible es una decisión compleja, debido al permanente conflicto entre la regulación legal de la sostenibilidad y los objetivos organizacionales de las empresas (Zimmer et al, 2016). En consecuencia, el problema de selección de proveedores sostenibles se considera comúnmente como un problema de toma de decisiones de múltiples criterios. Existe una revisión sistemática integral dedicada a diferentes criterios de sostenibilidad ambiental en el área

de selección de proveedores sostenibles y ecológicos (Govindan et al, 2015; Zimmer et al, 2016). Recientemente, Zimmer et al, (2016) examinaron 143 artículos publicados entre 1997 y 2014, y

según los resultados de su investigación, los 10 principales criterios económicos, ambientales y sociales se enumeran a continuación en el cuadro 1.

Cuadro 1
Criterios de selección de proveedores sostenibles

Criterios Económicos	Criterios Ambientales	Criterios Sociales
Calidad	Sistema de gestión ambiental	Participación de las partes interesadas
Flexibilidad	Consumo de recursos	Capacitación del personal
Precio	Diseño ecológico	Compromiso en gestión social
Plazo de entrega	Reciclaje	Compromiso en gestión de salud y seguridad
Relación	Control de impactos ecológicos	Relaciones con partes interesadas
Costo	Aguas residuales	Código de conducta social
Capacidad técnica	Consumo de energía	Donaciones para proyectos sostenibles
Costos logísticos	Reutilización	Derechos de las partes interesadas
Logística inversa	Emisiones al aire	Prácticas de seguridad
Índice de rechazo	Código de conducta ambiental	Número anual de accidentes

Fuente: Zimmer, Frohling y Schultmann (2016)

También hay evidencia de un estudio realizado por Amindoust et al, (2012) que mostró que la decisión sobre los indicadores para la selección de proveedores depende de las condiciones de la organización y cada compañía puede pensar adicionalmente en sus propios criterios para elegir los mejores proveedores.

2.2. Métodos de decisión de multicriterio

Se desarrollaron una amplia

variedad de métodos para seleccionar proveedores sostenibles, los cuales pueden clasificarse en modelos cualitativos, de programación matemática, matemáticos analíticos, de inteligencia artificial y modelos híbridos. Los modelos de decisión multicriterio (MCDM) se han utilizado ampliamente en el proceso de selección de proveedores, ya que esta decisión naturalmente requiere múltiples objetivos que incorporan criterios en un entorno incierto. Las revisiones recientes de la literatura sobre selección de proveedores

sostenibles de Govindan et al, (2015) y Zimmer et al, (2016) indicó que los métodos de decisión de multicriterio (MCDM) se encontraban entre los enfoques aplicados con más frecuencia para evaluar y seleccionar proveedores sostenibles. Esta investigación aplica un enfoque de toma de decisiones de criterios múltiples basado en los métodos AHP y TOPSIS, los cuales se encuentra entre los métodos MCDM más conocidos. Según Zimmer et al, (2016) que revisó los modelos compatibles con la selección de proveedores sostenibles, señala que AHP y TOPSIS son los métodos dominantes entre los métodos de decisión de multicriterio para el problema de la selección de proveedores sostenibles. Una posible razón de esta popularidad es el hecho de que los métodos AHP y TOPSIS parecen ser más fáciles de entender y más simples de implementar en comparación con los métodos de clasificación superior como PROMETHEE y ELECTRE, que parecen ser sustancialmente más complicados y menos transparentes para quienes evalúan y seleccionan a los proveedores en comparación con los métodos AHP y TOPSIS.

2.3. Métodos AHP y TOPSIS

El método del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) se basa en realizar una distribución de las decisiones a tomar en base a una prioridad o jerarquía que ayude a visualizar cuál o cuáles son las decisiones que generan el impacto más significativo para el objetivo buscado, ya sea un problema y ajustándose a las necesidades del momento (Saaty, 1989). La técnica de orden de preferencia para la similitud con la solución ideal (TOPSIS) fue desarrollada por Hwang y Yoon (1981), e inicialmente surgió como una alternativa al método ELECTRE. El concepto básico del método TOPSIS es que la alternativa seleccionada debe tener la distancia más corta con la solución ideal positiva y la distancia más larga con la solución ideal negativa. Además, este método considera tres tipos de atributos: atributos de beneficios cualitativos, atributos de beneficios cuantitativos y atributos de costos.

El primer paso es desarrollar una matriz de decisión mostrando la evaluación de los atributos para diferentes alternativas (Tabla 2).

Tabla 2
Matriz de decisión

	Attribute 1	Attribute 2	...	...	Attribute n
Supplier1	X_{11}	X_{12}	...	...	X_{1n}
Supplier 2	X_{21}	X_{22}	...	...	X_{2n}
...
...
Supplier m	X_{m1}	X_{m2}	...	...	X_{mn}

Fuente: Hwang y Yoon (1981)

El segundo paso es elaborar la matriz de decisión normalizada, en la cual se desarrolla un sistema de relación donde se debe comparar un atributo de la alternativa con el representante para todas las alternativas. Este paso transforma varias dimensiones de atributos en atributos no dimensionales, lo que permite la comparación entre criterios. Los puntajes normalizados se obtienen usando la ecuación (1).

$$rij = \frac{xij}{\sqrt{\sum xij^2}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde rij es un número adimensional que pertenece al intervalo [0,1] que representa el rendimiento normalizado de la i-ésima alternativa en el criterio j.

En el tercer paso, se multiplican los atributos por su peso correspondiente que es el coeficiente de significación. Para obtener los pesos o ponderaciones de cada atributo se utiliza el método por comparaciones binarias que aplica el método AHP desarrollado por Saaty (1989). Esta ponderación de los criterios se obtiene procesando las preferencias del tomador de decisiones de selección de proveedores sostenibles, expresadas como comparaciones binarias entre los criterios. Cuando se toman en consideración estas ponderaciones de los atributos, la ecuación (1) se convierte en la ecuación (2).

$$Vij = wj rij \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde wj representa el conjunto de ponderaciones para cada criterio j = 1, ..., n.

En el cuarto paso, se determinan

las soluciones ideales y negativas. Para calcular la solución ideal, se utiliza la ecuación (3).

$$A^* = \{V1^*, \dots, Vn^*\} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

$$Vj^* = \{\max(Vij) \text{ if } j \in J; \min(Vij) \text{ if } j \in J'\} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Para calcular la solución negativa, se utiliza la ecuación (5).

$$A' = \{V1', \dots, Vn'\} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

$$Vj' = \{\min(Vij) \text{ if } j \in J; \max(Vij) \text{ if } j \in J'\} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Después de encontrar las soluciones ideales y negativas, el quinto paso es calcular la distancia para cada alternativa con respecto a la alternativa ideal la cual está dada por la ecuación (7).

$$Si^* = \sqrt{\sum_j (Vj^* - Vij)^2} \quad (\text{Ecuación 7})$$

La distancia de la alternativa negativa esta dada por la ecuación (8).

$$Si' = \sqrt{\sum_j (Vj' - Vij)^2} \quad (\text{Ecuación 8})$$

En el sexto paso, se calcula la cercanía relativa a la solución ideal usando a continuación la ecuación (9):

$$Ci^* = \frac{Si'}{Si^* + Si'} \quad (\text{Ecuación 9})$$

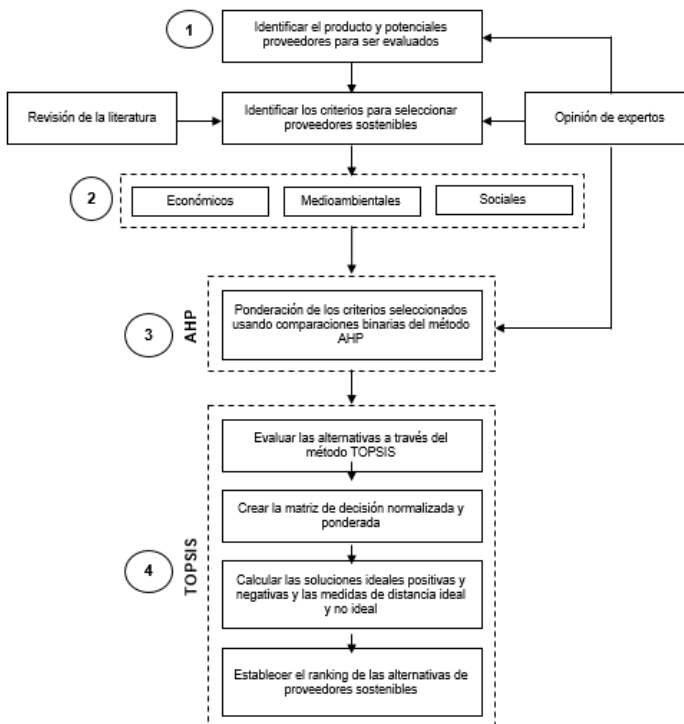
Finalmente, en el séptimo paso se realiza una clasificación de las alternativas según la que tiene la distancia más corta con respecto a la

alternativa ideal o positiva. Como es obvio de suponer, la alternativa que tiene la distancia más corta con respecto a la alternativa ideal tendrá a su vez, la mayor distancia con respecto a la alternativa no ideal o negativa. Por lo tanto, la mejor alternativa tendrá un valor de C_i^* más cercano a 1.

3. Metodología de selección de proveedores utilizando AHP y TOPSIS

En esta sección se desarrolla una metodología para la selección de proveedores sostenibles, basada en el proceso de análisis jerárquico (AHP) y la técnica de preferencias ordenadas por similitud a una solución ideal (TOPSIS) para la minería del cobre (Diagrama 1).

Diagrama 1
Metodología de selección de proveedores con AHP y TOPSIS



Fuente: Elaboración propia

La metodología de selección de proveedores sostenibles consta de cuatro etapas, las cuales se describirán detalladamente a continuación:

3.1. Identificación del producto y potenciales proveedores

Tiene como objetivo definir el producto que la empresa necesita comprar. Este proceso se inicia mediante la elaboración de una lista de potenciales proveedores, que proporciona el área de abastecimiento a través de sus registros internos de proveedores o de registros externos que proporcionan organismos calificadoros de empresas proveedoras de bienes y servicios.

3.2. Identificación de los criterios de selección

Tiene como objetivo seleccionar los criterios, basados en las tres dimensiones de sostenibilidad que son económicos, medioambientales y sociales. En este trabajo, se utilizaron los criterios de selección obtenidos en la investigación de Gahona (2021).

3.3. Ponderación de los criterios de selección usando el método AHP

Para determinar el peso relativo o importancia de cada uno de los criterios en el resultado final, se utiliza el método por proceso analítico jerárquico (AHP) desarrollado por Saaty (1989) el cual prioriza los criterios de sostenibilidad con base en comparaciones ordenadas, lo cual resulta idóneo para la selección de proveedores. Este modelo de selección permite mejorar el procedimiento administrativo al incrementar el grado de

objetividad y reducir sesgos cognitivos. Esta ponderación de los criterios se obtiene procesando las preferencias del tomador de decisiones de selección de proveedores sostenibles, expresadas como comparaciones binarias (o de pares) entre los criterios.

3.4. Ranking de proveedores sostenibles usando el método TOPSIS

Cada alternativa de proveedor es evaluado por el método TOPSIS. Se construye la matriz de decisión normalizada y ponderada, luego se calculan las soluciones ideales positivas y negativas junto con las medidas de distancia ideal y no ideal. Por último, se calculan las medidas de cercanía relativa a la solución ideal y el ranking de alternativas de proveedores.

4. Metodología de selección de proveedores sostenibles basado en los métodos AHP y TOPSIS

La metodología desarrollada para la selección de proveedores sostenibles, basada en el proceso de análisis jerárquico (AHP) y la técnica de preferencias ordenadas por similitud a una solución ideal (TOPSIS) se implementa en la Compañía minera G.G., la cual está localizada en la región de Antofagasta y extrae, produce y comercializa cátodos de cobre fino los cuales se transan en la Bolsa de Metales de Londres (LME). El mercado mundial de productores de Cobre tiene altos estándares de desempeño en seguridad y salud ocupacional, cuidado del medioambiente, cumplimiento de la normativa legal sobre contratación y

salarios y, por último, de relacionamiento con las comunidades y autoridades de los países donde opera. Compañía minera G.G. ha externalizado gran cantidad de funciones a sus proveedores, concentrando sus esfuerzos en el núcleo del negocio, es decir; la propiedad, la operación y gestión de su yacimiento. Por lo tanto, la sostenibilidad del negocio de Compañía minera G.G. depende directamente de contar con proveedores sostenibles en el largo plazo, que aseguren su competitividad en la industria mundial del Cobre y la licencia para operar en la región de Antofagasta (Korinek, 2013). Chile es el país minero más intensivo como consumidor mundial de ácido sulfúrico, debido a la producción hidrometalúrgica de cátodos de cobre SX-EW, que representan un 37% de la producción chilena de cobre mina y un 66% de la producción mundial de cátodos SX-EW. Buena parte de su demanda es satisfecha localmente desde las fundiciones de cobre y el resto es necesario importarlo (COCHILCO, 2020). Compañía minera G.G. quiere seleccionar al mejor proveedor de ácido sulfúrico, que se encuentra entre los insumos críticos de su proceso productivo. Después de una evaluación previa basada en registros de proveedores propios, de otras compañías mineras y de organismos externos calificadoros de proveedores, el departamento de abastecimiento obtuvo una lista de cinco potenciales proveedores sostenibles de ácido sulfúrico. Las alternativas de proveedores se identifican como: AA, BB, CC, DD y EE. Se utilizaron los criterios de selección de proveedores obtenidos en la investigación de Gahona (2021). Los criterios económicos seleccionados son: calidad, entrega a tiempo y precio. Los criterios medioambientales son: eficiencia medioambiental y reducción

de la contaminación. Y por último, los criterios sociales que son: seguridad y salud ocupacional.

$$C_j = (C_{1j}; C_{2j}; C_{3j}; C_{4j}; C_{5j}; C_{6j}; C_{7j})$$

Donde:

C_1 = Seguridad ocupacional: considera los accidentes laborales con tiempo perdido y se busca minimizar el indicador de accidentabilidad en el lugar de trabajo.

C_2 = Salud ocupacional: considera las enfermedades profesionales y se busca minimizar el indicador de enfermedades profesionales con secuelas permanentes.

C_3 = Eficiencia medioambiental: son los programas de protección ambiental que ejecuta el proveedor y se busca maximizar el % de cumplimiento de los programas en el área de influencia directa de la compañía minera.

C_4 = Entrega a tiempo: cumplimiento en los plazos de entrega, basado en los días de desfase entre el plazo acordado y el plazo real de entrega. Este criterio es cuantitativo y se busca minimizar los días de desfase.

C_5 = Reducción de la contaminación: considera sustancias contaminantes que pueden producir impactos negativos en el medioambiente o la salud de las personas. Se busca minimizar el % de accidentes ambientales en el transporte y descarga del ácido sulfúrico.

C_6 = Precio: se mide en dólares de Norteamérica y se busca minimizar el precio de la tonelada de ácido sulfúrico.

C_7 = Calidad: cumplimiento de los estándares de calidad del producto, basado en el porcentaje de rechazo por el departamento de control de calidad. Este criterio es cuantitativo y se busca minimizar el % de rechazo.

La selección de los proveedores

sostenibles consta de los siguientes pasos:

Paso 1: Determinar los pesos relativos de los criterios

Para determinar el peso relativo,

importancia o influencia de cada uno de los criterios en el resultado final, se utiliza el método por comparaciones binarias (o de pares) que aplica el método AHP desarrollado por Saaty (1989) (ver Tabla 3).

Tabla 3
Escala de comparación de criterios

Importancia	Definición lingüística	Explicación
1	Igual importancia	Los dos factores contribuyen equitativamente
3	Algo más importante	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente un factor
5	Mucho más importante	La experiencia y el juicio favorecen claramente a un factor
7	Sumamente más importante	La experiencia y el juicio favorecen muy ampliamente a un factor
9	Absolutamente más importante	Existe evidencia comprobada favoreciendo a uno de los factores

Fuente: Saaty (1980)

Esta ponderación de los criterios se obtiene procesando las preferencias del responsable de abastecimiento de la compañía minera G.G. para la selección

de proveedores sostenibles, expresadas como comparaciones binarias entre los criterios (ver Tabla 4).

Tabla 4
Preferencias del Responsable de Abastecimiento

Criterio	Nombre	Importancia
C ₁	Seguridad ocupacional	1
C ₂	Salud ocupacional	1
C ₃	Eficiencia ambiental	3
C ₄	Entrega a tiempo	5
C ₅	Reducción de la contaminación	5
C ₆	Precio	7
C ₇	Calidad	9

Fuente: Compañía minera G.G.

La matriz de comparaciones binarias se obtiene de la Tabla 5, que se utiliza para asignar valores cuantitativos

a comparaciones cualitativas entre los criterios seleccionados (ver Tabla 5).

Tabla 5
Matriz de comparaciones binarias

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇
C ₁	1,0000	1,0000	0,3333	0,2000	0,2000	0,1429	0,1111
C ₂	1,0000	1,0000	0,3333	0,2000	0,2000	0,1429	0,1111
C ₃	3,0000	3,0000	1,0000	0,6000	0,6000	0,4286	0,3333
C ₄	5,0000	5,0000	1,6667	1,0000	1,0000	0,7143	0,5556
C ₅	5,0000	5,0000	1,6667	1,0000	1,0000	0,7143	0,5556
C ₆	7,0000	7,0000	2,3333	1,4000	1,4000	1,0000	0,7778
C ₇	9,0000	9,0000	3,0000	1,8000	1,8000	1,2857	1,0000

Fuente: Elaboración propia

Luego, siguiendo con la metodología AHP se calcula la matriz

de comparaciones binarias normalizada (ver Tabla 6).

Tabla 6
Matriz de comparaciones binarias normalizada

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇
C ₁	0,0323	0,0323	0,0323	0,0323	0,0323	0,0323	0,0323
C ₂	0,0323	0,0323	0,0323	0,0323	0,0323	0,0323	0,0323
C ₃	0,0968	0,0968	0,0968	0,0968	0,0968	0,0968	0,0968
C ₄	0,1613	0,1613	0,1613	0,1613	0,1613	0,1613	0,1613
C ₅	0,1613	0,1613	0,1613	0,1613	0,1613	0,1613	0,1613
C ₆	0,2258	0,2258	0,2258	0,2258	0,2258	0,2258	0,2258
C ₇	0,2903	0,2903	0,2903	0,2903	0,2903	0,2903	0,2903

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, realizando el promedio por filas se obtiene una aproximación al peso relativo de cada uno de los criterios

C_j, ya que se parte de la subjetividad del responsable de abastecimiento de Compañía Minera G.G (ver Tabla 7).

Tabla 7
Pesos relativos de los criterios

Criterio (C_j)	Nombre	Peso Relativo (W_j)
C_1	Seguridad ocupacional	0,0323
C_2	Salud ocupacional	0,0323
C_3	Eficiencia ambiental	0,0968
C_4	Entrega a tiempo	0,1613
C_5	Reducción de la contaminación	0,1613
C_6	Precio	0,2258
C_7	Calidad	0,2903

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 8, se puede apreciar claramente que la calidad es el criterio más influyente, seguido por el precio, la reducción de la contaminación y la entrega a tiempo.

Paso 2: Crear la matriz de decisión

Una vez obtenidos los valores

de los pesos relativos de los criterios (W_j), se elabora la matriz de decisión en la cual se incluyen los valores D_{ij} de cada uno de los proveedores A_i para los diferentes criterios C_j . Estos valores son un dato de entrada de la presente investigación, y han sido proporcionados por el responsable de abastecimiento de la Compañía Minera G.G. (ver Tabla 8).

Tabla 8
Matriz de decisión

Proveedor	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7
AA	4,90	1,12	93	7	0,25	119	5,90
BB	3,70	1,30	82	11	0,48	123	7,50
CC	4,30	0,90	91	3	0,10	116	6,90
DD	4,00	0,87	79	8	0,90	110	6,50
EE	3,60	0,65	84	15	0,06	126	7,55

Fuente: Elaboración propia

Paso 3: Crear la matriz de decisión normalizada

El siguiente paso es construir

la matriz de decisión normalizada, utilizando los valores de la Tabla 9 y aplicando la ecuación (1). Para evitar las dificultades causadas por las diferentes

dimensiones de los criterios, se utiliza la relación del valor óptimo donde los valores se asignan en el intervalo [0;1]

aplicando la normalización a la matriz de decisión (ver Tabla 9).

Tabla 9
Matriz de decisión normalizada

Proveedor	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇
AA	0,531	0,504	0,483	0,323	0,236	0,447	0,382
BB	0,401	0,585	0,426	0,508	0,454	0,462	0,486
CC	0,466	0,405	0,473	0,138	0,094	0,436	0,447
DD	0,433	0,391	0,411	0,369	0,851	0,413	0,421
EE	0,390	0,292	0,437	0,693	0,056	0,473	0,489

Fuente: Elaboración propia

Paso 4: Crear la matriz de decisión normalizada ponderada

Utilizando los pesos relativos

de los criterios calculados usando el método AHP, se obtiene la matriz de decisión normalizada ponderada usando la ecuación (2) (ver Tabla 10).

Tabla 10
Matriz de decisión normalizada ponderada

Proveedor	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇
AA	0,017	0,016	0,046	0,052	0,038	0,101	0,111
BB	0,012	0,018	0,041	0,082	0,073	0,104	0,141
CC	0,015	0,013	0,045	0,022	0,015	0,098	0,129
DD	0,014	0,012	0,039	0,059	0,137	0,093	0,122
EE	0,012	0,009	0,042	0,111	0,009	0,107	0,142

Fuente: Elaboración propia

Paso 5: Obtener la solución ideal positiva y la solución ideal negativa

En este paso, se determinan la solución ideal positiva y la solución ideal

negativa usando las ecuaciones (4) y (6) respectivamente.

$$A^* = \{0,0126; 0,0097; 0,0463; 0,0296; 0,0092; 0,0934; 0,1181\}$$

$$A' = \{0,0171; 0,0168; 0,0393; 0,1110; 0,1374; 0,1070; 0,1380\}$$

Paso 6: Calcular las medidas de separación para cada alternativa

La medida de separación a partir de la alternativa ideal, se calcula usando las ecuaciones (7) y (8) respectivamente.

$$S^* = \{0,0382; 0,0111; 0,0223; 0,1318; 0,0848\}$$

$$S' = \{0,1176; 0,0709; 0,1471; 0,0573; 0,1285\}$$

Paso 7: Calcular la cercanía relativa a la solución ideal

La cercanía relativa a la solución ideal (C*), se calcula usando la ecuación (9). El puntaje obtenido por cada proveedor se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11
Puntaje de cada proveedor

Proveedor	Puntaje
AA	0,7546
BB	0,8636
CC	0,8680
DD	0,3032
EE	0,6024

Fuente: Elaboración propia

Paso 8: Clasificar a los proveedores

El proveedor que tiene el puntaje más cerca a uno, tendrá la primera posición en el ranking, y así sucesivamente. Por lo tanto, la clasificación final de los proveedores se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12
Ranking de proveedores

Ranking	Proveedor	Puntaje
1	CC	0,8680
2	BB	0,8636
3	AA	0,7546
4	EE	0,6024
5	DD	0,3032

Fuente: Elaboración propia

A partir de los resultados que se muestran en el ranking de proveedores (Tabla 13), se aprecia que la empresa minera G.G. debería seleccionar al proveedor CC, ya que este obtuvo un puntaje final de 0,8680 lo cual lo clasifica como el mejor proveedor sostenible. A pesar que el proveedor BB obtuvo un puntaje de 0,8636 está ligeramente por debajo del proveedor CC; sin embargo, esta condición es beneficiosa para la empresa minera G.G., ya que le permite tener una segunda buena alternativa para el caso en que necesite trabajar con dos proveedores, ya sea por motivos de políticas internas o por requerimientos que no pueda satisfacer el proveedor CC.

Las diferencias en el puntaje final entre los proveedores reflejan las ponderaciones asignadas a cada variable o criterio, al igual que las escalas numéricas de las definiciones lingüísticas. En este sentido, se destaca el proveedor CC entre los demás porque ofrece un alto desempeño en entrega a tiempo (C₄), eficiencia ambiental (C₃), reducción de contaminación (C₅) y precio (C₆); y presenta un desempeño poco relevante en seguridad ocupacional

(C₁) y salud ocupacional (C₂) que tienen menor peso relativo de importancia para la toma de decisiones en la selección de proveedores sostenibles. Igualmente, se destaca que el proveedor CC seleccionado con la metodología es el que presenta el mejor indicador en el criterio de entrega a tiempo (C₄), lo cual implica para la empresa minera G.G. que se garantizará un abastecimiento continuo, a tiempo y con las cantidades correctas de ácido sulfúrico.

Con los resultados obtenidos, se valida la metodología de selección de proveedores sostenibles en el sector minero, considerando múltiples criterios de sostenibilidad. De esta forma, se mejora la calidad en la toma de decisiones, y se contribuye al aumento de la productividad y eficiencia de la cadena de suministro de la minería del cobre en Chile.

5. Conclusiones

A partir del desarrollo del artículo, se obtiene una metodología para la selección de proveedores sostenibles que considera los factores cuantitativos y cualitativos en la toma de decisiones, lo cual permite a las empresas del sector de la minería del cobre alinearse con sus proveedores, generando relaciones colaborativas que disminuyen los costos de la operación y compras, además de facilitar el logro de los objetivos y metas de la organización, y agregar valor a la gestión de la cadena de suministro. La metodología descrita desarrolla un modelo de selección de proveedores conformado por criterios de selección basados en las dimensiones de sostenibilidad, e incluye un modelo de ponderación de factores con base en comparaciones ordenadas, permitiéndole a las empresas mineras conocer las

características relevantes de sus proveedores y los niveles de importancia que tienen estas características para la organización. Entre los beneficios de la metodología se resalta la capacidad de adaptarse a empresas mineras de la industria del cobre, ajustando en cada compañía las ponderaciones asignadas a cada variable o criterio, al igual que las escalas numéricas de las definiciones lingüísticas.

Para el caso de aplicación de la metodología desarrollada, se destaca el aporte del modelo cuantitativo para mejorar la capacidad de toma de decisiones, reducir la subjetividad y satisfacer los requerimientos establecidos en el proceso de compras de la empresa minera. De esta forma se garantiza a la empresa minera G.G. un abastecimiento continuo, con productos y servicios de calidad, y en los tiempos de entrega pactados para el buen desempeño de la operación minera de cobre. Finalmente, los resultados obtenidos contribuyen a la literatura en selección de proveedores sostenibles para la minería, tema que ha sido poco investigado en el ámbito nacional e internacional.

Por último, como futura investigación relacionada a este tema, se considera el desarrollo de un modelo de evaluación del desempeño de proveedores sostenibles, que permita contribuir al aumento de la productividad de las empresas mineras del cobre.

Referencias bibliográficas

Amindoust A, Ahmed S, Saghafinia A, Bahreininejad A. (2012). Sustainable supplier selection: A ranking model based on fuzzy inference system. *Appl Soft Comput*, 12(6), 1668–77. <https://doi.org/10.1016/j>

[asoc.2012.01.023](#)

- Arias, M., Atienza, M. y Cademartori, J. (2014). Large mining enterprises and regional development in Chile: Between the enclave and cluster. *Journal of Economic Geography*, 14(1), 73-95. <https://doi.org/10.1093/jeg/lbt007>
- Bustos-Gallardo, B. y Prieto, M. (2019). Nuevas aproximaciones teóricas a las regiones commodity desde la ecología política. *EURE (Santiago)*, 45(135). <http://doi.org/10.4067/S0250-71612019000200153>
- COCHILCO (2020). Mercado chileno del ácido sulfúrico al año 2029. <https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/20201123%20Mercado%20chileno%20del%20C3%A1cido%20sulf%20C3%BArico%20al%20a%C3%B1o%202029.pdf>
- Dickson, G. (1966). An analysis of vendor selection systems and decisions. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 2(1), 5-17. <https://doi.org/10.1111/j.1745-493X.1966.tb00818.x>
- Gahona, O. (2021). Selection Criteria for Sustainable Suppliers in the Supply Chain of Copper Mining in Chile. *Ingeniería e Investigación*, 41(2). <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v41n2.89641>
- Gahona-Flores, O. (2020). Gestión de Proveedores en la Cadena de Suministro de la Minería del Cobre en Chile. *Revista Venezolana De Gerencia*, 25(92), 1671-1683. <https://doi.org/10.37960/rvg.v25i92.34288>
- Ghayebloo, S., Tarokh, M.J., Venkatadri, U., y Diallo, C. (2015). Developing a bi-objective model of the closed-loop supply chain network with green supplier selection and disassembly of products: the impact of parts reliability and product greenness on the recovery network. *J Manuf Syst*, 36, 76–86. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.02.011>
- Govindan, K., Rajendran, S., Sarkis, J. y Murugesan, P. (2015). Multi criteria decision making approaches for green supplier evaluation and selection: a literature review. *J Clean Prod.*, 98, 66–83. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.046>
- Grzybowska, K. y Gajdzik, B. (2014). Logistic strategies in purchasing process of metallurgical companies. *Metallurgija*, 43(1), 127-130. <https://hrcak.srce.hr/104393>
- Hanlin, R. y Hanlin, Ch. (2012). The view from below: Lock-in and local procurement in the African gold mining sector. *Resources Policy*, 37(4), 468-474. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2012.06.005>
- Hwang, C.L. and Yoon, K. (1981). *Multiple Attributes Decision Making Methods and Applications*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9_3
- Korinek, J. (2013). *Mineral Resource Trade in Chile: Contribution to Development and Policy Implications*. OECD Trade Policy Papers, 145, OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/18166873>
- Mentzer, J.T., DeWitt, W., Keebler, J.S., Min, S., Nix, N.W, Smith, C.D. & Zacharia, Z.G. (2016). Définir Le Supply Chain Management. *Logistique & Management*, 23(4), 7-24. <https://doi.org/10.1080/12507970.2015.11758619>
- Pedrosa, A., Blazevic, V., & Jasmand, C. (2015). Logistics innovation development: A micro-level perspective. *International Journal of Physical Distribution*

- & *Logistics Management*, 45(4), 313-332. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-12-2014-0289>
- Rivera, N. & Aroca, P. (2014). Escalas de producción en economías mineras: El caso de Chile en su dimensión regional. *EURE (Santiago)*, 40(121), 247-270. <https://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612014000300012>
- Saaty, T. (1989). Decision Making, Scaling, and Number Crunching. *Decision Sciences Journal*, 20(2), 404-409. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1989.tb01887.x>
- Vahidi, F., Torabi, S.A. y Ramezankhani, M. (2018). Sustainable supplier selection and order allocation under operational and disruption risks. *J Clean Prod.*, 174, 1351-65. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.012>
- Zimmer, K., Fröhling, M., y Schultmann, F. (2016). Sustainable supplier management—a review of models supporting sustainable supplier selection, monitoring and development. *Int J Prod Res.* 54(5), 1412-42. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1079340>