



Selección multicriterio para el procesamiento de salmueras de litio en Argentina

Multi-criteria selection for the processing of lithium brines in Argentina

Martin Ignacio Thames Cantolla ^{I, II, III}

 <http://orcid.org/0000-0002-2229-2046>

Silvana Karina Valdez ^{I, II, III}

 <http://orcid.org/0000-0002-2379-1111>

Agustina Maria Orce Schwarz ^{I, II, III}

 <http://orcid.org/0000-0002-5640-2899>

^I Universidad Nacional de Salta, Argentina

correo electrónico: core.mtc@hotmail.com, skvaldez@gmail.com, agustina.orce@gmail.com

^{II} Instituto de Investigaciones para la Industria Química (INIQUI)

correo electrónico: core.mtc@hotmail.com, skvaldez@gmail.com, agustina.orce@gmail.com

^{III} Instituto de Beneficio de Minerales (INBEMI), Facultad de Ingeniería

correo electrónico: core.mtc@hotmail.com, skvaldez@gmail.com, agustina.orce@gmail.com

Recibido: 19 de julio del 2021.

Aprobado: 3 de septiembre del 2021.

RESUMEN

Uno de los pasos más críticos y complejos, en la minería, es seleccionar el método productivo apropiado, basándose en múltiples parámetros. Esto lo vuelve dificultoso y por ello la importancia de desarrollar una herramienta que facilite esta tarea. El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo para la toma de decisiones con múltiples criterios que permita seleccionar métodos apropiados de minería del litio en salmuera en el Noroeste Argentino con el Proceso Jerárquico de Análisis Difuso (FAHP). El modelo desarrollado considera cinco criterios y 27 subcriterios, para evaluar 6 métodos de extracción de litio de salmuera (alternativas). Se propone una estructura jerárquica con tres niveles para el análisis. Se estableció la mejor alternativa, a partir de las valoraciones globales. Esta herramienta puede ser aplicada para la toma de decisiones por parte de las nuevas empresas mineras en el sector.

Palabras claves: FAHP, Litio, Procesos, Noroeste Argentino.

ABSTRACT

One of the most critical and complex steps, in mining, is selecting the appropriate production method, based on multiple parameters. This makes it difficult and therefore the importance of developing and 27 sub-criteria, to evaluate 6 methods of extraction of lithium from brine (alternatives). A hierarchical structure with three levels is proposed for the analysis. The best alternative was obtained based on a tool that facilitates this task. The objective of this work is to use the Fuzzy Analysis Hierarchical Process (FAHP) to develop a model for decision making with multiple criteria that allow selecting appropriate lithium brine mining methods in Northwest Argentina. The model developed considers 5 criteria global evaluation. The best alternative was obtained based on global evaluation. This tool can be applied for decision-making by new mining companies in the sector.

Key words: FHAP, Lithium, Process, Argentine Northwest.

I. INTRODUCCIÓN

La elección del método de extracción es quizás una de las actividades más críticas y problemáticas en la minería. El objetivo de elegir un método de minería es maximizar las ganancias de la empresa y la recuperación de recursos minerales, y proporcionar un entorno seguro al elegir el método correcto con el menor número de problemas entre las alternativas factibles [1;2;3]. Elegir el método de minería correcto es una tarea compleja que requiere la consideración de muchos factores: técnicos, económicos, políticos, sociales e históricos. Podemos decir que un método de extracción adecuado es aquel técnicamente factible en términos económicos, geológicos, sociales y es una operación de bajo costo [4]. No existe un método adecuado para todos los yacimientos mineros. Particularmente, los salares en donde se encuentran concentraciones económicas de litio para su explotación, presentan propiedades y características diversas entre sí. Aspecto que es válido incluso en salares que pertenecen a una misma zona geográfica. Como lo expresado por Flexer et al. (2018), cada método tiene algunos problemas inherentes, tales como consumo energético, recuperación de agua procesos, generación de residuos, entre otros [5].

La estrategia de utilizar el mismo método de extracción que el salar más próximo no siempre es reproducible en el salar de interés. Sin embargo, esto no significa que no se pueda aprender comparando los planes mineros de operaciones existentes en la misma área o depósitos similares. Cada depósito tiene sus propios atributos únicos, y la selección del método correcto es una tarea de la persona o grupo que toman las dediciones operativas. Aunque la experiencia y el juicio de la ingeniería aún brindan información importante para elegir los métodos de extracción, generalmente solo a través de un análisis detallado de los datos disponibles se pueden distinguir los matices de cada depósito. La elección del mejor método productivo, debe garantizar que todos los factores se consideren con su correspondiente nivel de importancia, sin embargo, debe considerarse que algunas ocasiones no se cuenta con la persona o el grupo adecuado de especialistas para seleccionar el mejor método. Es allí donde la incertidumbre y la vaguedad entran en juego [6;7]. Esto se vuelve más complejo aún y un error puede ocasionar importantes pérdidas económicas. El objetivo de este trabajo es utilizar el Proceso Jerárquico de Análisis Difuso (FAHP) para desarrollar un modelo para la toma de decisiones con múltiples criterios que permita seleccionar métodos apropiados de extracción de litio en salmuera en el Noroeste Argentino (NOA). El modelo desarrollado considera 5 criterios y 27 subcriterios para evaluar 6 métodos de extracción de litio de salmuera. Se propone una estructura jerárquica con tres niveles para el análisis. Los criterios, subcriterios y métodos de extracción se enumeran en el primer, segundo y tercer nivel de la jerarquía, respectivamente. Este modelo puede ser empleado por las nuevas empresas mineras, para ayudarles a seleccionar el mejor método extractivo en ambientes que incluyen la incertidumbre y vaguedad del pensamiento humano.

Herramientas de decisión multicriterio

SELECCIÓN MULTICRITERIO PARA EL PROCESAMIENTO DE SALMUERAS DE LITIO EN ARGENTINA

La Toma de Decisión Multicriterio (MCDM, por sus siglas en inglés) se han utilizado en distintos ámbitos para seleccionar la mejor alternativa ante problema que presenta diversos criterios y un conjunto de alternativas. Normalmente, cuando se enfrenta un problema de toma de decisiones, se pueden realizar cuatro tipos análisis [8]:

Determinar la mejor opción o elegir el grupo con la mejor opción; determinar el orden de la mejor opción; clasificar alternativas en grupos homogéneos predefinidos; identificar las principales características distintivas de las alternativas y describirlas a continuación.

Desde 1960 se han realizado distintas investigaciones sobre este tema, proponiéndose diferentes técnicas para la resolución de este problema en distintos ámbitos. Entre ellas podemos mencionar de forma resumida [9;10;11;12]:

- Ponderación de criterios con una posterior multiplicación de ellos con respecto al desempeño de cada alternativa analizada y la alternativa seleccionada será la de mayor puntuación global.
- Relaciones de ponderaciones, los métodos: PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Methods for Enrichment for Enrichment Evaluation*) [13] y ELECTRE (Elimination et Choix Traduisat Réalité)[8;14] son los más utilizados. Estos métodos utilizan una función de utilidad que contiene criterios ponderados para determinar la cantidad de alternativas que superan a otras y de esta manera poder ordenarlas de acuerdo al orden de preferencia.
- Distancia al valor ideal, estas técnicas emplean valores ideales y anti-ideales de cada criterio. Luego se selecciona la mejor alternativa como aquella que se encuentre más cerca del valor ideal y más alejada del anti-ideal. Entre ellos encontramos a las técnicas TOPSIS [15] y programación de compromiso [16;17]
- Comparaciones por pares: consiste en comparar las alternativas o criterios de a pares, utilizando un nivel de importancia o valoración. Con las comparaciones se pueden obtener la la ponderación de los criterios, subcriterios y las puntuaciones de las opciones de decisión (alternativas). Entre ellas la técnica más popular y ampliamente utilizada es el proceso analítico jerárquico (AHP por sus siglas en inglés) [18].

Decisión multicriterio en minería

Diversos autores han aplicado las herramientas multicriterio para la toma de decisión en minería. Samimi Namin et al. (2008) propusieron el uso de TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) y el modelo integrado de TOPSIS difuso para seleccionar los mejores métodos de minería [20]. Naghadehi et al. (2009) desarrollaron un modelo de decisión que utiliza el proceso de jerarquía analítica difusa (FAHP) para seleccionar el mejor método de extracción para los depósitos de bauxita en Irán [21]. El estudio consideró 13 criterios para evaluar 6 métodos de minería subterránea. Mikaeil y col. (2009) desarrollaron modelos FAHP y TOPSIS para seleccionar métodos de extracción basados en 13 criterios para el mismo depósito (depósito de bauxita de Irán) [22]. Alpay y Yavuz (2009) desarrollaron un programa basado en los métodos AHP y Yager para seleccionar procesos extractivos en la minería subterránea para diferentes formas de depósito y cuerpos minerales [23]. De igual forma Gupta y Kumar (2012) propusieron un método AHP para analizar métodos de minería subterránea [24]. Cada uno de estos métodos ofrece sus ventajas y desventajas, sin embargo, hasta el momento no existe una herramienta que garantice una solución al problema de la selección del mejor método minero que sea 100% óptima.

En este trabajo se propone el uso del método FAHP para desarrollar un modelo que permita seleccionar el mejor proceso extractivo de litio de salmuera, en el Noroeste Argentino. La selección del mismo, radica en su sencillez matemática y a la utilización de índices de incertidumbre y óptimo, que permiten incorporar el nivel de seguridad e información con que cuentan los decisores.

Proceso De Jerarquía Analítica Difusa (FAHP)

El FAHP es una combinación del Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) [18] y la lógica difusa (*fuzzy logic*). Tiene sus orígenes en la década del 80 [25] y desde entonces, varios autores han realizado investigaciones sobre el tema, aplicándolo en diferentes situaciones [26;27;28]. Su empleo surge como una solución a la

metodología clásica cuyo enfoque es determinista y no puede reflejar la incertidumbre y ambigüedad de los tomadores de decisiones [29;30;31].

En el proceso de jerarquía analítica tradicional, las comparaciones por pares se realizan utilizando una escala de nueve puntos, que representa el juicio o la preferencia de la persona que toma la decisión entre diferentes opciones. Si bien la escala del 1 al 9 es simple y fácil de utilizar, no considera la incertidumbre asociada con el juicio humano. Los términos del lenguaje que las personas usan para expresar sus sentimientos o juicios son vagos y subjetivos, pueden ser inciertos debido a los niveles de preferencia, como a la información incompleta o la falta de conocimiento de los tomadores de decisiones. Por lo que AHP se combina con lógica difusa para expresar juicios lingüísticos, mientras que la teoría de conjuntos difusos se usa para tratar las ambigüedades en el sistema.

El FAHP se utiliza para determinar los pesos locales y globales de los criterios, subcriterios y alternativas (métodos de extracción de litio de salmuera) que intervienen en el modelo y de esta manera poder determinar, mediante su ponderación, la mejor alternativa a elegir [32,33].

II. METODOS

Existen diferentes metodologías de análisis multicriterio, tanto cualitativos como cuantitativos. Sin embargo, cuando los recursos son escasos para la investigación minera, se torna difícil encontrar expertos para resolver este problema. En un problema de este tipo, existen diversos factores relacionados con la elección de los métodos de extracción, como por ejemplo las propiedades geológicas y geográficas, el clima, el suelo, los parámetros económicos y la tecnología involucrada, entre otros.

El presente trabajo se lleva a cabo empleando el método FAHP para incorporar la actitud del o los decisores para determinar la selección del mejor método de extracción de litio de salmuera. La metodología de trabajo se muestra en la Fig. 1.

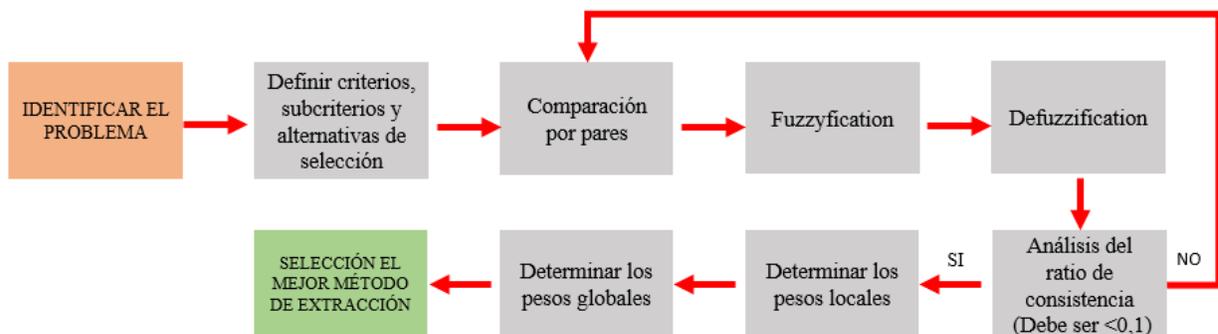


Fig. 1. Metodología de trabajo para el desarrollo del modelo

a. Definición de criterios, subcriterios y alternativas

El primer paso del trabajo propuesto es identificar el problema; solo entonces se pueden definir los criterios, subcriterios y alternativas. No todas las salmueras tienen las mismas características como por ejemplo concentración de iones, pH y densidad, entre otras; ni siquiera las salmueras de zonas vecinas [5]. En consecuencia, el mismo método de extracción que tuvo éxito en algunas de ellas no se puede aplicar de forma general sin realizar un análisis previo. Por ello, se establecieron criterios para la selección del mejor método, basados en los trabajos de diferentes autores, quienes estudiaron diversas técnicas de análisis multicriterio para la toma de decisiones en la industria minera [4;34;35;36]. Si bien la extracción de rocas es diferente a la extracción de salmuera, este análisis nos proporciona algunos factores a considerar que pueden ser útiles para el modelo propuesto. Entre los principales factores considerados tenemos:

SELECCIÓN MULTICRITERIO PARA EL PROCESAMIENTO DE SALMUERAS DE LITIO EN ARGENTINA

(1) Características físicas y químicas del depósito tales como concentración de iones, pH, turbiedad, temperatura, profundidad, distribución de leyes, calidad del recurso, etc. Entre los aspectos básicos que definen las condiciones del terreno podemos mencionar: resistencia, longitud, espaciado y ubicación de las principales estructuras geológicas, estrés in situ, condiciones hidrológicas, etc.

(2) Factores económicos tales como: inversión inicial, costo de capital, costo operativo, periodo de recuperación de la inversión, valor de mercado del mineral, productos y/o subproductos, etc.

(3) Factores técnicos tales como: grado de recuperación del mineral, flexibilidad de métodos, complejidad de la maquinaria, tasa de extracción, periodos de mantenimiento, etc.

(4) Factores de productividad tales como productividad anual, calidad del producto final, eficiencia y consideraciones ambientales (tasa de evaporación de la zona), etc.

(5) Factores del clima tales como la tasa de evaporación de la zona, precipitaciones anuales, etc.

De esta manera, para el modelo propuesto, se consideraron: 5 criterios, 27 subcriterios y 6 alternativas de extracción. Estos se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen de criterios, subcriterios y alternativas para el modelo de selección.

Criterios	Subcriterios	Alternativas
(ECO) Económicos	(INI) Inversión inicial (PRC) Periodo de recupero de capital (COP) Costos operativos	Alternativa 1
(TEC) Técnicos	(PRA) Producción anual /tasa de producción (PEM) Periodo de Mantenimiento (GRM) Grado de recuperación del mineral	
(PROD) Productivos	(CPF) Calidad del producto final (GSUB) Generación de subproductos (EFI) Eficiencia del proceso (CAL) Consumo de cal (AGUA) Consumo de agua (RESID) Generación de residuos	Alternativa 2 Alternativa 3
(SALMU) Salmueras	(LITB) Conc. Li Baja ($0 < [Li^+] \leq 0.06\%$) (LITI) Conc. Li Intermedia ($0.06\% < [Li^+] < 0.09\%$) (LITA) Conc. Li Alta ($0.09\% \leq [Li^+]$) (MAGB) Conc. de Mg Baja ($0 < [Mg^{2+}] \leq 0.18\%$) (MAGI) Conc. de Mg Intermedia ($0.18\% < [Mg^{2+}] < 0.27\%$) (MAGA) Conc. de Mg Alta ($0.27\% \leq [Mg^{2+}]$) (BORB) Conc. de Boratos Baja ($0 < [B] \leq 0.19\%$) (BORI) Conc. de Boratos Intermedia ($0.19\% < [B] < 2.45\%$) (BORA) Conc. de Boratos Alta ($2.45\% \leq [B]$) (SULFB) Conc. de Sulfatos Baja ($0 < [S] \leq 0.67\%$) (SULFI) Conc. de Sulfatos Intermedia ($0.67\% < [S] < 0.84\%$) (SULFA) Conc. de Sulfatos Alta ($0.84\% \leq [S]$)	Alternativa 4 Alternativa 5 Alternativa 6
(CLIM) Clima	(EVAPB) Tasa de evaporación Baja (entre 1000 y 1500 mm/año) (EVAPI) Tasa de evaporación Interm. (entre 1501 y 2500 mm/año) (EVAPA) Tasa de evaporación Alta (más de 2500 mm/año)	

Se debe realizar la siguiente consideración:

Las Alternativas 1 a 3, corresponden a los métodos extractivos que actualmente llevan a cabo las principales empresas mineras que se encuentran en funcionamiento en el NOA. Al tratarse de información confidencial, no es posible detallar cada una de ellas. Por otro lado, las Alternativas 4 a 6, corresponden a modificaciones que los autores realizaron sobre las Alternativas 1 a 3, considerando, por ejemplo: mayor inversión inicial

pero menores costos operativos; mayor eficiencia, pero solo en una salmuera pobre; mayor periodo de mantenimiento, pero con menor tasa de producción; entre otros.

b. Estructura jerárquica del problema

La estructura jerárquica del modelo de decisión se muestra en la Figura 2. El primer nivel define los criterios a considerar al elegir un método extracción de litio de salmuera. Todos los criterios tienen diferentes grados de influencia en los métodos de extracción individuales, por lo que es importante determinar la importancia relativa de cada factor. En segundo nivel se definen los subcriterios para cada uno de los niveles. Cada criterio tiene entre 3 y 12 subcriterios. Finalmente, el último nivel define las alternativas que se consideran, es decir, los métodos de extracción de litio de salmuera.

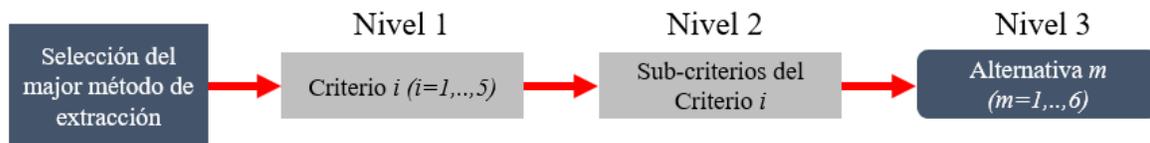


Fig.2. Estructura jerárquica del modelo propuesto.

c. Evaluación criterios, subcriterios y alternativas

En la metodología propuesta, el nivel de importancia relativa de criterios y subcriterios, y la valoración de las alternativas ante los diferentes subcriterios, se determinó mediante la comparación por pares siguiendo el método FAHP. Las matrices de comparación por pares para cada nivel se construyeron según la escala que se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. Nivel de importancia/valoración de Saaty.

Escala de importancia/ valoración	Definición
1	Igual importancia/valor
3	Importancia/valor débil
5	Importancia/valor moderado
7	Importancia/valor fuerte
9	Importancia/valor muy fuerte
2, 4, 6, 8	Importancia/valor intermedio entre 2 valores adyacentes.

De esta manera se realiza la comparación por pares para los 5 criterios, los 27 subcriterios y las 6 alternativas, siguiendo la metodología tradicional de AHP. Esto se observa en la Fig. 2. Luego, los elementos de las matrices de comparaciones por pares son convertidos de un valor nítido a un valor difuso (procedimiento denominado en la bibliografía como *fuzzyfication*) [26;27;29;30]. Para ello, se emplea el índice α que varía entre 0 y 1, tal como se aprecia en la Tabla 3, e introduce el nivel de incertidumbre en el que se encuentran él o los decisores [36;37].

Tabla 3. Escala de valores del índice α

Escala del índice α	Definición
0	Incertidumbre nula

SELECCIÓN MULTICRITERIO PARA EL PROCESAMIENTO DE SALMUERAS DE LITIO EN ARGENTINA

0,5	Incertidumbre moderada
1	Incertidumbre elevada

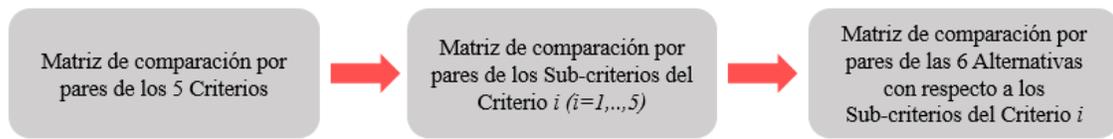


Fig. 2. Orden de las comparaciones por pares para el modelo

Este debe aplicarse a todas las matrices calculadas previamente. Para este trabajo se consideró un valor de $\alpha = 1$ para representar el caso extremo de incertidumbre. Se utiliza la Ecuación 1 para determinar los nuevos valores de las matrices y de esta manera se obtiene un valor inferior y otro superior [31;36;38].

$$x_a = [x - \alpha, x + \alpha]; \frac{1}{x_a} = \left[\frac{1}{x + \alpha}, \frac{1}{x - \alpha} \right] \quad (1)$$

Donde: x es el valor actual de cada uno de los elementos de la matriz.; x_a es el nuevo valor de cada uno de los elementos de la matriz. En la Fig. 3 se presenta la matriz resultante.

1	X_{a12}	$X_{a1...}$...	X_{a1j}
$1 / X_{a12}$	1	$X_{a2...}$...	X_{a2j}
$1 / X_{a1...}$	$1 / X_{a2...}$	1	...	X_{ajj}
...
$1 / X_{a1j}$	$1 / X_{a2j}$	$1 / X_{ajj}$...	1

Fig. 3. Matriz resultante de convertir los valores nítidos a valores difusos

Una vez obtenidas las matrices difusas, se debe determinar el ratio de consistencia de cada una de ellas. Previamente es necesario, volver a convertir los valores difusos de las matrices a valores nítidos (procedimiento denominado en la bibliografía como *defuzzification*) [26;27;29;30]. Para ello se emplea el índice λ que varía entre 0 y 1, que introduce el nivel de optimismo al que se encuentran el o los decisores. Los valores que puede tomar este índice se representan en la **Tabla 4** [36;37]. En este trabajo se consideró un valor de $\lambda = 0,5$ para adoptar una posición intermedia.

Tabla 4. Escala de valores del índice λ

Escala del índice λ	Definición
0	Optimismo nulo
0,5	Optimismo moderado
1	Optimismo elevado

Al igual que en el caso anterior, se emplea la Ecuación 2 para determinar los nuevos valores de las matrices [31,36,38].

$$x_{ij} = \lambda x_{ij-\dot{i}} + (1-\lambda)x_{ij-\dot{i}\dot{i}} \quad (2)$$

Donde: $x_{ij-\dot{i}}$ valores inferiores para cada x_{ij} ; $x_{ij-\dot{i}\dot{i}}$ valores superiores para cada x_{ij}

d. Análisis de consistencia

Los valores de las matrices de comparación por pares pueden ser inconsistentes debido al grado de preferencia o información incompleta o ignorancia del tomador de decisiones. Antes de la evaluación final, se debe verificar la consistencia de la matriz de comparación por pares. Para ello se emplea el ratio de consistencia propuesto por Saaty (1980). Este debe ser menor a 0,1 para evitar la inconsistencia de las comparaciones realizadas [18;39]. De acuerdo a esto, se emplean la Ecuación 3 y la Ecuación 4. El cálculo se aplica a las matrices cuyos valores han sido convertidos de difusos a nítidos.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

Donde: CR es el ratio de consistencia; CI es el índice de consistencia; RI es el índice aleatorio que depende del tamaño de la matriz. Se encuentra tabulado y se utilizaron los valores de Piantanakulchai y Saengkhaio, (2003) [40]; n es el tamaño de la matriz; λ_{max} es el autovalor máximo de cada matriz.

e. Determinación de los pesos locales y globales

Una vez verificado el ratio de consistencia, es posible determinar los pesos locales y globales difusos para cada uno de los criterios, subcriterios y alternativas. Para ello se empleó el método de la media geométrica, cuyo cálculo se realiza con la Ecuación 5 [31,36,37].

$$GM_i = \left[\prod_{j=1}^E b_{ij} \right]^{\frac{1}{E}} \quad (5)$$

Donde: GM_i es la media geométrica de la fila i en la matriz cuyos valores han sido convertidos a nítidos; b_{ij} es el valor ubicado en la fila i columna j ; E es el número de elementos en la fila.

Luego, el peso w_i del parámetro i se calcula con la Ecuación 6 [31,36,37].

$$w_i = \frac{GM_i}{\sum_{i=1}^N GM_i} \quad (6)$$

Donde: N es el número de medias geométricas que se tiene por matriz.

Finalmente, se determina la importancia relativa de cada elemento con respecto al nivel superior, para ello se observan los pesos w_i calculados. Para obtener el peso global difuso de importancia, se realiza la multiplicación del peso difuso de cada elemento con respecto al criterio y subcriterio que lo contiene. Se emplea la Ecuación 7 [31,36,37].

$$W_k = w_k * W_{k-1} \quad (7)$$

Donde: W_k es el peso global difuso del elemento en el nivel k ; w_k es el peso local del elemento en el nivel k ; W_{k-1} es el peso global difuso del elemento en el nivel $k-1$.

III. RESULTADOS

Se realizaron 32 matrices de comparación por pares para cada uno de los criterios, subcriterios y alternativas analizadas. Los componentes de cada una de ellas, fueron convertidas, en primer lugar, a

SELECCIÓN MULTICRITERIO PARA EL PROCESAMIENTO DE SALMUERAS DE LITIO EN ARGENTINA

valores difusos mediante el índice α y luego convertidas a valores nítidos mediante el índice λ . En total se calcularon 99 matrices para el modelo planteado. Para aprovechar el espacio y considerando que para todas las matrices debió realizarse el mismo tratamiento, solo se presentan las matrices para los criterios, subcriterios y de comparación de alternativas para algunos subcriterios. En la Fig. 4 se presentan las matrices para los criterios y subcriterios. De igual forma en la Fig. 5 se presentan las matrices de comparación de alternativas para los primeros subcriterios de cada criterio.

CRITERIOS					SUBCRITERIOS PRODUCTIVOS						SUBCRITERIOS SALMUERA														
ECO	TEC	PROD	SALMU	CLIM	CPF	GSUB	EFI	CAL	AGUA	RESID	LITB	LITI	LITA	MAGB	MAGI	MAGA	BORB	BORI	BORA	SULFB	SULFI	SULFA			
ECO	1	2	3	1/5	3	1	2	1	1/3	1/3	1	1	1	1	3	3	3	4	4	4	4	4	4		
TEC	1/2	1	3	1/5	2	1/2	1	2	1/3	1/3	1	1	1	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4		
PROD	1/3	1/3	1	1/5	1	1	1/2	1	1/3	1/3	2	1	1	1	3	3	4	4	4	4	4	4	4		
SALMU	5	5	5	1	7	3	3	3	1	1	2	1/3	1/3	1/3	1	1	1	3	3	3	3	3	3		
CLIM	1/3	1/2	1	1/7	1	1	1	1/2	1/2	1/4	1	1/4	1/4	1/3	1/3	1/3	1	1	1	3	3	3	3		
SUBCRITERIOS ECONOMICOS					SUBCRITERIOS TECNICOS			SUBCRITERIOS CLIMA																	
INI	PRC	COP				PRA	PEM	GRM	EVAPB	EVAPI	EVAPA														
INI	1	2	5				PRA	1	4	5	EVAPB	1	1	1											
PRC	1/2	1	2				PEM	1/4	1	2	EVAPI	1	1	1											
COP	1/5	1/2	1				GRM	1/5	1/2	1	EVAPA	1	1	1											

Fig. 4. Matrices de comparación por pares para criterios y subcriterios

(INI) Menor inversión inicial						(PRA) Mayor producción anual/tasa de producción						(EVAPB) Tasa de evaporación baja								
A1	A2	A3	A4	A5	A6	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A1	A2	A3	A4	A5	A6			
A1	1	5	4	1/2	3	4	A1	1	2	3	2	5	3	A1	1	2	2	1/2	1	1
A2	1/5	1	1/2	1/6	1/3	1/2	A2	1/2	1	2	1	4	2	A2	1/2	1	1	1/3	1/2	1/2
A3	1/4	2	1	1/5	1/2	3	A3	1/3	1/2	1	1/2	3	1	A3	1/2	1	1	1/3	1/2	1/2
A4	2	6	5	1	4	7	A4	1/2	1	2	1	4	2	A4	2	3	3	1	2	2
A5	1/3	3	2	1/4	1	4	A5	1/5	1/4	1/3	1/4	1	1/3	A5	1	2	2	1/2	1	1
A6	1/4	2	1/3	1/7	1/4	1	A6	1/3	1/2	1	1/2	3	1	A6	1	2	2	1/2	1	1
(CPF) Mayor calidad del product final						(LITB) Concentración Li baja														
A1	A2	A3	A4	A5	A6	A1	A2	A3	A4	A5	A6									
A1	1	1/3	1/2	2	1/6	1/3	A1	1	2	3	1	3	2							
A2	3	1	2	4	1/4	1	A2	1/2	1	2	1/2	2	1							
A3	2	1/2	1	3	1/5	1/2	A3	1/3	1/2	1	1/3	1	1/2							
A4	1/2	1/4	1/3	1	1/7	1/4	A4	1	2	3	1	3	2							
A5	6	4	5	7	1	4	A5	1/3	1/2	1	1/3	1	1/2							
A6	3	1	2	4	1/4	1	A6	1/2	1	2	1/2	2	1							

Fig. 5. Matrices de comparación por pares de las Alternativas para los primeros subcriterios de cada criterio.

Por otro lado, en la Fig. 6 se presentan las matrices cuyos valores han sido convertidos en difusos (*fuzzification*) y cuyos valores han sido convertidos en nítidos (*defuzzification*), para cada uno de los criterios. Entendiéndose que el cálculo debió realizarse para todas las matrices de comparación realizadas previamente.

Matriz de criterios con valores difusos					Matriz de criterios con valores nítidos				
ECO	TEC	PROD	SALMU	CLIM	ECO	TEC	PROD	SALMU	CLIM
ECO	1,00	1,00	3,00	2,00	4,00	0,17	0,25	2,00	4,00
TEC	0,33	1,00	1,00	2,00	4,00	0,17	0,25	1,00	3,00
PROD	0,25	0,50	0,25	0,50	1,00	0,17	0,25	0,00	2,00
SALMU	4,00	6,00	4,00	6,00	4,00	6,00	1,00	6,00	8,00
CLIM	0,25	0,50	0,33	1,00	0,00	2,00	0,13	0,17	1,00

Fig. 6. Matrices de comparación por pares de criterios con valores difusos (izquierda) y con valores nítidos (derecha).

Luego, se calculó el ratio de consistencia para verificar los valores de las matrices. En todos los casos, el ratio fue menor a 0,1, satisfaciendo los requerimientos de la metodología. De esta manera, se pudieron

obtener los pesos locales y globales para el modelo, que se presenta en la tabla 5 los pesos locales y en la Tabla 6 los pesos globales.

Tabla 5. Pesos locales de subcriterios y alternativa

Criterios				Pesos locales					
	Pesos de los criterios			A1	A2	A3	A4	A5	A6
ECO	0,1821	INI	0,5710	0,2714	0,0496	0,0907	0,4017	0,1348	0,0519
		PRC	0,2917	0,2561	0,1551	0,1551	0,0888	0,2561	0,0888
		COP	0,1373	0,0769	0,2870	0,1195	0,2870	0,1930	0,0365
TEC	0,1348	PARA	0,6713	0,3176	0,1983	0,1191	0,1983	0,0478	0,1191
		PEM	0,2006	0,2113	0,2113	0,1220	0,1220	0,2113	0,1220
		GRM	0,1281	0,2164	0,3323	0,0614	0,2164	0,1415	0,0320
PROD	0,0690	CPF	0,1132	0,0668	0,1615	0,1075	0,0439	0,4587	0,1615
		GSUB	0,1058	0,4226	0,0665	0,2307	0,0665	0,0456	0,1682
		EFI	0,1058	0,1325	0,0394	0,3949	0,0891	0,2855	0,0586
		CAL	0,2719	0,2631	0,0370	0,0541	0,2631	0,2631	0,1195
		AGUA	0,3052	0,1519	0,0565	0,2343	0,0886	0,2343	0,2343
		RESID	0,0980	0,0565	0,2343	0,0886	0,1519	0,2343	0,2343
SALA	0,5420	LITB	0,1698	0,2561	0,1551	0,0888	0,2561	0,0888	0,1551
		LITI	0,1698	0,1788	0,1024	0,0646	0,2759	0,1024	0,2759
		LITA	0,1698	0,1612	0,0615	0,0615	0,2509	0,3643	0,1006
		MAGB	0,0874	0,1135	0,2122	0,1135	0,1135	0,3339	0,1135
		MAGI	0,0874	0,1142	0,1940	0,1940	0,1142	0,3141	0,0693
		MAGA	0,0874	0,2380	0,1310	0,1310	0,1310	0,2380	0,1310
		BORB	0,0477	0,2608	0,1611	0,0594	0,2608	0,1611	0,0967
		BORI	0,0477	0,3928	0,1686	0,0636	0,1032	0,1032	0,1686
		BORA	0,0477	0,3433	0,1109	0,0675	0,0675	0,0675	0,3433
		SULFB	0,0284	0,0693	0,1142	0,1940	0,1940	0,3141	0,1142
		SULFI	0,0284	0,0772	0,0772	0,2160	0,2160	0,3363	0,0772
		SULFA	0,0284	0,0616	0,0616	0,2324	0,2324	0,3503	0,0616
CLIM	0,0721	EVAPB	0,3333	0,1692	0,0996	0,0996	0,2931	0,1692	0,1692
		EVAPI	0,3333	0,0772	0,0772	0,0772	0,2160	0,2160	0,3363
		EVAPA	0,3333	0,1142	0,1142	0,0693	0,1940	0,1940	0,3141

SELECCIÓN MULTICRITERIO PARA EL PROCESAMIENTO DE SALMUERAS DE LITIO EN ARGENTINA

Tabla 6. Pesos globales de subcriterios y alternativas

Criterios			Pesos globales						
	Pesos de los criterios		A1	A2	A3	A4	A5	A6	
ECO	0,1821	INI	0,1040	0,0282	0,0052	0,0094	0,0418	0,0140	0,0054
		PRC	0,0531	0,0136	0,0082	0,0082	0,0047	0,0136	0,0047
		COP	0,0250	0,0019	0,0072	0,0030	0,0072	0,0048	0,0009
TEC	0,1348	PARA	0,0905	0,0287	0,0179	0,0108	0,0179	0,0043	0,0108
		PEM	0,0270	0,0057	0,0057	0,0033	0,0033	0,0057	0,0033
		GRM	0,0173	0,0037	0,0057	0,0011	0,0037	0,0024	0,0006
PROD	0,0690	CPF	0,0078	0,0005	0,0013	0,0008	0,0003	0,0036	0,0013
		GSUB	0,0073	0,0031	0,0005	0,0017	0,0005	0,0003	0,0012
		EFI	0,0073	0,0010	0,0003	0,0029	0,0007	0,0021	0,0004
		CAL	0,0188	0,0049	0,0007	0,0010	0,0049	0,0049	0,0022
		AGUA	0,0211	0,0032	0,0012	0,0049	0,0019	0,0049	0,0049
		RESID	0,0068	0,0004	0,0016	0,0006	0,0010	0,0016	0,0016
SALA	0,5420	LITB	0,0920	0,0236	0,0143	0,0082	0,0236	0,0082	0,0143
		LITI	0,0920	0,0165	0,0094	0,0059	0,0254	0,0094	0,0254
		LITA	0,0920	0,0148	0,0057	0,0057	0,0231	0,0335	0,0093
		MAGB	0,0474	0,0054	0,0101	0,0054	0,0054	0,0158	0,0054
		MAGI	0,0474	0,0054	0,0092	0,0092	0,0054	0,0149	0,0033
		MAGA	0,0474	0,0113	0,0062	0,0062	0,0062	0,0113	0,0062
		BORB	0,0259	0,0067	0,0042	0,0015	0,0067	0,0042	0,0025
		BORI	0,0259	0,0102	0,0044	0,0016	0,0027	0,0027	0,0044
		BORA	0,0259	0,0089	0,0029	0,0017	0,0017	0,0017	0,0089
		SULFB	0,0154	0,0011	0,0018	0,0030	0,0030	0,0048	0,0018
		SULFI	0,0154	0,0012	0,0012	0,0033	0,0033	0,0052	0,0012
		SULFA	0,0154	0,0009	0,0009	0,0036	0,0036	0,0054	0,0009
		CLIM	0,0721	EVAPB	0,0240	0,0041	0,0024	0,0024	0,0070
EVAPI	0,0240			0,0019	0,0019	0,0019	0,0052	0,0052	0,0081
EVAPA	0,0240			0,0027	0,0027	0,0017	0,0047	0,0047	0,0075
SUMA TOTAL DE PESOS GLOBALES			0,2096	0,1326	0,1090	0,2149	0,1934	0,1405	

De la suma total de pesos globales, se obtiene que la Alternativa 4 (21,49%) que es la de mayor valoración con respecto a los criterios y subcriterios consideradores. De esta manera, es el mejor método de extracción a elegir por los decisores.

IV. DISCUSIÓN

El resultado final puede variar al modificarse el nivel de importancia que los decisores asignen a cada uno de los criterios y subcriterios, en las matrices de comparación por pares, como así también de los valores que se tomen para los índices α y λ .

Adicionalmente, el modelo puede aplicarse en situaciones en las cuales solo se deseen considerar algunos subcriterios para resolver el problema de decisión. Por ejemplo, seleccionar el mejor proceso con: la menor Inversión Inicial (INI), menores Costos Operativos (COP), para ponerse en marcha en un salar con una concentración baja de litio (LITIB) y con una tasa de evaporación alta (EVAPA). Con eso, solo hará falta buscar los valores globales para cada alternativa con respecto a cada subcriterio considerado y sumarlos. La alternativa con mayor valor total, es la más adecuada para seleccionarse. De la búsqueda bibliográfica realizada, no se ha encontrado un modelo para la selección de procesos en la industria del lito, con lo cual,

al entender de los autores, este sería el primero de su tipo. Cabe destacar que, el modelo puede incorporar más criterios y subcriterios, logrando así un modelo que permita considerar otros aspectos que no se tuvieron en cuenta en este trabajo; el desarrollo del modelo sería similar al planteado.

V. CONCLUSIONES

1. El modelo propuesto se desarrolló utilizando el método FAHP ya que permite considerar la falta de información o conocimiento, como así también la incertidumbre y ambigüedad del pensamiento humano, al que se pueden enfrentar el o los decisores del problema. Con 5 criterios, 27 subcriterios y 6 alternativas diferentes de extracción de litio de salmuera, se calcularon en total 99 matrices. Como resultado, el modelo considera como criterio de mayor ponderación a la salmuera (54.20%), seguido de los criterios económico (18.21%), técnicos (13,48%), clima (7,21%) y producción (6.90%).
2. De los subcriterios, el de mayor relevancia para el modelo es la inversión inicial (10,40%). La preferencia de una alternativa se determina en función de las ponderaciones globales de los subcriterios considerados.
3. De acuerdo a los pesos globales, la Alternativa cuatro es la que mejor valoración obtiene, y por ello es el mejor método de extracción de litio de salmuera.
4. El modelo de decisión multicriterio propuesto, puede ser empleado para analizar diferentes escenarios y servir como complemento los diferentes análisis geológicos, geográficos y de ingeniería al que se debe incurrir al momento de seleccionar el mejor método de extracción en minería. 

VI. REFERENCIAS

1. Bitarafan MK, Ataei M. Mining method selection by multiple criteria decision making tools, Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy. 2004; 104: 493-498. ISSN 2411-9717.
2. Ochante V. Criterios de diseño para la toma de decisiones en la evaluación de alternativas de minado en Empresas Mineras de la Región Central del Perú, Prospectiva Universitaria. 2017; 9. ISSN 1990-2409.
3. Dehghani H, Siami A, Haghi P. A new model for mining method selection based on grey and TODIM methods, Journal of Mining and Environment. 2017; 8 (1): 49-60. ISSN 2251-8592.
4. Sitorus F, Cilliers J, Brito-Parada PR. Multi-criteria decision making for the choice problem in mining and mineral processing: Applications and trends, Expert Systems with Applications. 2019; 121: 393-417. ISSN 0957-4174.
5. Flexer V, Baspineiro CF, Galli CI. Lithium recovery from brines: A vital raw material for green energies with a potential environmental impact in its mining and processing, Science of The Total Environment. 2018; 639: 1188-1204. ISSN 0048-9697.
6. Bazzazi AA, Osanloo M, Karimi B. Deriving preference order of open pit mines equipment through MADM methods: Application of modified VIKOR method, Expert Systems with Applications. 2011; 38 (3): 2550-2556. ISSN 0957-4174.
7. Saki F, Dehghani H, Jodeiri Shokri B, Bogdanovic D. Determination of the most appropriate tools of multi-criteria decision analysis for underground mining method selection—a case study, Arab J. Geosci. 2020; 13. ISSN 1866-7538.
8. Roy B. Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode ELECTRE), La Revue d'Informatique et de Recherche Opérationnelle (RIRO). 1968; 8: 57-75. ISSN 0399-0559.
9. Hajkowicz S, Collins K. A Review of Multiple Criteria Analysis for Water Resource Planning and Management, Water Resources Management. 2006; 21:1553-1566. ISSN 0920-4741.
10. Toloie-Eshlaghy A, Homayonfar M. MCDM methodologies and applications: a literatura review from 1999 to 2009, Computer Science. 2011; 21. ISSN 1453-212X.
11. Velasquez M, Hester P. An analysis of multi-criteria decision-making methods, International Journal of Operations Research. 2013; 10: 56-66. ISSN 1745-7645.

SELECCIÓN MULTICRITERIO PARA EL PROCESAMIENTO DE SALMUERAS DE LITIO EN ARGENTINA

12. Zavadskas EK, Turskis Z, Kildienė S. State of art surveys of overviews on MCDM/MADM methods, Technological and Economic Development of Economy. 2014; 20 (1):165-179. ISSN 2029-4913.
13. Brans JP, Vincke PH, Marshal B. How to select and how to rank projects: the PROMETHEE method, European Journal of Operational Research. 1986; 24: 228–238. ISSN 0377-2217.
14. Figueira J, Mousseau V, Roy B. ELECTRE methods. Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys, in: J. Figueira, G. Salvatore, M. Ehrgott (eds.), Springer Science Business Media, Inc., Boston. 2005; 133–162.
15. Lai YJ, Liu TY, Hwang CL. TOPSIS for MODM, European Journal of Operational Research. 1994; 76(3): 486–500. ISSN 0377-2217.
16. Zeleny M. Compromise programming. Multiple criteria decisions making, in: Cocharane JL., Zeleny M. (eds), University of Southern Carolina Press, Columbia, SC. 1973; 262–301.
17. Abrishamchi A, Ebrahimian A, Tajrishi M, Marino MA. Case study: application of multicriteria decision making to urban water supply, Journal of Water Resources Planning and Management. 2005; 131 (4): 326–335. ISSN 0733-9496.
18. Saaty TL. The Analytic Hierarchy Process, McGraw Hill International Publication, New York. 1980.
19. Zadeh LA. Fuzzy sets, Information and Control. 1965; 8: 338-353. ISSN 0890-5401.
20. Samimi Namin F, Shahriar K, Ataee-Pour M, Dehghani H. A new model for mining method selection of mineral deposit based on fuzzy decision making, Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2008; 108 (7):385–395. ISSN 2225-6253.
21. Naghadehi MZ, Mikaeil R, Ataee-Pour M. The application of fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) approach to selection of optimum underground mining method for Jajarm Bauxite Mine, Iran, Expert Systems with Applications. 2009; 36 (4): 8218–8226. ISSN 0957-4174.
22. Mikaeil R, Naghadehi MZ, Ataee-Pour M, Khalokakaie R. A decision Support system using fuzzy analytical hierarchy process (FAHP) and TOPSIS approaches for selection of the optimum underground mining method, Archives of Mining Sciences. 2009; 54 (2): 349–368. ISSN 0860-7001.
23. Alpay S, Yavuz M. Underground mining method selection by decision making tools, Tunnelling and Underground Space Technology. 2009; 24 (1): 173–184. ISSN 0886-7798.
24. Gupta S, Kumar U. An analytical hierarchy process (AHP)-guided decision model for underground mining method selection. International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2012; 26 (4): 324–336. ISSN 1748-0930.
25. van Laarhoven PJM, Pedrycz W. A fuzzy extension of Saaty's priority theory, Fuzzy Sets and Systems. 1983; 11: 199–227. ISSN 0165-0114.
26. Buckley JJ. Fuzzy hierarchical analysis, Fuzzy Sets and Systems. 1985; 17 (3): 233–247. ISSN 0165-0114.
27. Boender CGE, de Graan JG, Lootsma FA. Multi-criteria decision analysis with fuzzy pairwise comparisons, Fuzzy Sets and Systems. 1989; 29 (2): 133–143. ISSN 0165-0114.
28. Chang DY. Application of the extent analysis method on fuzzy AHP, European Journal of Operational Research. 1996; 95 (3): 649–655. ISSN 0377-2217.
29. Cheng CH. Evaluating weapon systems using ranking fuzzy numbers, Fuzzy Sets and Systems. 1999; 107 (1): 25–35. ISSN 0165-0114.
30. Kubler S, Robert J, Derigent W, Voisin A, le Traon Y. A state-of-the-art survey & testbed of fuzzy AHP (FAHP) applications, Expert Systems with Applications. 2016; 65: 398–422. ISSN 0957-4174.
31. Liu Y, Eckert CM, Earl C. A review of fuzzy AHP methods for decision-making with subjective judgements, Expert Systems with Applications. 2020; 161. ISSN 0957-4174.
32. Umaña M, Osorio J. Modelo para la gestión de proveedores utilizando AHP difuso, Estudios Gerenciales, 99. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=21209903>. 2006 (Accedido el 2 Febrero 2021). ISSN 0123-5923.
33. Noor AZ, Bin Fauadi MHF, Jafar F, Nordin MH, Yahaya S, Ramlan S, Aziz MA. FUZZY analytic hierarchy process (FAHP) integration for decision making purposes: A review, Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017; 11: 139-154. ISSN 0268-3768.

34. Shariati S, Yazdani Chamzini A. Mining method selection by using integrated model, International research journal of applied and basic sciences. 2013; 6 (2): 199-214. ISSN 2251-838x.
35. Gelvez J, Cortes Aldana F. Mining Method Selection Methodology by Multiple Criteria Decision Analysis - Case Study in Colombian Coal Mining, International Journal of the Analytic Hierarchy Process. 2014. ISSN 1936-6744.
36. Balusa B, Gorai A. Design of a multi-criteria decision making model using fuzzy-AHP for selection of appropriate underground metal mining method, International Journal of Mining and Mineral Engineering. 2018; 9 (4): 259-301. ISSN 1754-890X.
37. Gorai AK, Upadhyay A, Tuluri F, Goyal P, Tchounwou PB. An innovative approach for determination of air quality health index, Science of the Total Environment. 2015; 533 (22): 495-505. ISSN 0048-9697.
38. Lee AR. Application of Modified Fuzzy AHP Method to Analyse Bolting Sequence of Structural Joints. UMI dissertation services, A Bell & Howell Company. 1999.
39. Saaty TL. Theory and applications of the analytical network process: decisionmaking with benefits, opportunities, costs, and risk, RWS Publications, University of Pittsburgh, Pittsburgh. 2005.
40. Piantanakulchai M, Saengkhaio N. Evaluation of Alternatives in Transportation Planning Using Multi-Stakeholders Multi-Objectives AHP Modeling, Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. 2003; 4: 1613-1628. ISSN 1881-1132.

Los autores declaran que no hay conflicto de intereses.

Contribución de cada autor:

Martin Ignacio Thames-Cantolla: búsqueda bibliográfica, desarrollo de la metodología de investigación, cálculo de matrices y redacción del trabajo. Análisis e interpretación de resultados y conclusiones.

Silvana Karina Valdez: búsqueda bibliográfica, selección de criterios y subcriterios. Dirección, coordinación y supervisión. Revisión y edición del trabajo. Análisis e interpretación de resultados y conclusiones.

Agustina Maria Orce-Schwarz: búsqueda bibliográfica, selección de criterios y subcriterios. Diseño de alternativas de selección. Revisión y edición del trabajo. Análisis e interpretación de resultados y conclusiones.