



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Selección de métodos extractivos y su impacto en la productividad minera – estudio de caso en la minería de carbón colombiana

Jorge Ivan Romero Gelvez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Industrial
Bogotá, Colombia
2012

Selección de métodos extractivos y su impacto en la productividad minera – estudio de caso en la minería de carbón colombiana

Jorge Ivan Romero Gelvez

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Industrial

Director (a):

(MSc, Ing.) Héctor Cifuentes Aya

Línea de Investigación:

Ingeniería de la Productividad

Grupo de Investigación:

Productividad, Competitividad y Calidad

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Industrial

Bogotá, Colombia

2012

A Mariana y a quienes dentro del gremio minero desean una industria productiva, segura, sostenible y amigable con el ambiente.

“Cree a aquellos que buscan la verdad, duda de los que la han encontrado.”

André Gide

Agradecimientos

A mis padres. Al profesor Héctor Cifuentes Aya por su amistad, dedicación, paciencia y continua guía. Al personal de Asesorías Técnicas Geológicas ATG LTDA especialmente a Mauricio Alfonso Rubio y Jhony Ricardo Chavez. A los profesores de la Universidad Nacional que contribuyeron a este proceso investigativo y formativo, en especial al Profesor Félix Antonio Cortes Aldana. Al geólogo Álvaro Ponce Muriel, cuya guía y consejos permitieron enfocar gran parte de esta investigación.

Resumen

El objetivo de esta tesis es presentar un nuevo enfoque para la selección del método extractivo mediante una metodología fácilmente replicable; este enfoque puede ser usado en el proceso de planeación y diseño minero. Seleccionar el método extractivo es uno de los problemas de Decisión Multicriterio Discreta (DMD) donde los decisores han tenido problemas en la asignación de peso a cada criterio. Para resolver este problema, este documento aplica el método PAJ y propone una metodología de comprobación mediante la asignación de peso a los criterios con entropía y la selección del método mediante PRES. La selección de un modelo matemático basado en análisis de decisión multicriterio no es tarea fácil; el modelo presentado en este documento muestra su aplicación a un yacimiento de carbón localizado en el costado occidental del “Cerro Tasajero” en Norte de Santander, Colombia. Este documento identifica la necesidad de usar métodos multicriterio cuantitativos como ayuda para probar la exactitud del método PAJ.

Palabras clave: Proceso de análisis jerárquico, PRES, Análisis de decisión multicriterio, selección del método minero.

Abstract

The purpose of this document is to present a new approach to mining method selection by an easy replicable methodology; this approach can be used in the mine design process planning. Select the mining method is one of the problems of Discrete Multicriteria Decision (DMD) where decision makers have had problems in the assignment of weight to the criteria. To solve this problem, this article applies the AHP method and proposes a testing methodology by weighting the criteria variables with entropy and the selection of the method by PRES. The selection of a mathematical model based on MCDA is not an easy task; the model presented in this document shows its application to a coal reservoir located in the western side of “Cerro Tasajero” in Norte de

Santander, Colombia. This document identifies the need to use quantitative multicriteria methods as an aid to prove the accuracy of the AHP method.

Keywords: Analytic hierarchy process, PRES, Multiple criteria decision analysis, mining method selection

Contenido

	Pág.
Resumen	VII
Lista de figuras.....	XI
Lista de tablas	XIII
Introducción	1
Contexto de la tesis.....	2
Objetivos de la tesis.....	3
Estructura de la tesis	4
1. Antecedentes.....	5
1.1. Normatividad Minera Nacional	5
1.2. Generalidades del Sector Minero.....	5
1.3. Minería de hecho, minería tradicional y minería ilegal.....	7
1.4. Minería de carbón en Colombia	9
1.5. Distribución de la minería en Colombia.....	11
1.6. La política de productividad Minera Colombiana.....	12
1.6.1. Avances en la política de productividad minera	13
2. Aspectos teóricos Relacionados	16
2.1. Estudios previos en selección del método extractivo	16
2.1.1. Sistema de Clasificación de Boshkov y Wright.....	17
2.1.2. Sistema de Clasificación de Morrison.....	20
2.1.3. Sistema de Clasificación de Hartman.....	21
2.1.4. Sistema de Clasificación Nicholas.....	22
2.1.5. Sistema de Clasificación UBC.....	23
2.2. Técnicas de toma de decisión aplicadas a la actividad minera	26
2.3. Técnicas de medición de la productividad.....	26
2.3.1. Estudios sobre productividad en la actividad minera	30
2.4. Técnicas de toma de decisión.....	31
2.4.1. La decisión multicriterio discreta (DMD)	31
2.4.2. Proceso de análisis jerárquico (PAJ).....	33
2.4.3. Método de la Entropía	35
2.4.4. Método Pres.....	36
2.4.5. Análisis de dominancia y satisfacción	37

2.4.6.	Lógica difusa en la toma de decisiones	38
2.4.7.	Método Yaguer	38
3.	Metodología y desarrollo de la investigación	40
3.1.	Herramientas Metodológicas	40
3.2.	Metodología desarrollada	41
3.2.1.	Análisis de alternativas	44
3.2.2.	Selección de los criterios de decisión	52
3.3.	Estudio de caso.....	54
3.3.1.	Selección del método extractivo para un yacimiento de carbón.....	54
3.3.2.	Descripción del depósito.....	60
3.3.3.	Aplicación del método UBC	62
3.3.4.	Construcción de la estructura jerárquica.....	64
3.3.5.	Uso del expert choice ® para aplicar PAJ.....	64
3.3.6.	Cambios en índices de productividad	73
4.	Resultados	78
5.	Conclusiones, recomendaciones y futuros trabajos.....	79
5.1.	Conclusiones.....	79
5.2.	Recomendaciones y trabajos futuros.....	80
A.	Anexo A: Modelo Conceptual de la Política Nacional de Productividad Minera	82
B.	Anexo B: Ejemplos de Entropía, Pres y PAJ.....	84
C.	Anexo C: Columna estratigráfica.....	94
D.	Anexo D: Resultados Expert Choice	96
E.	Anexo E: Ponencia presentada a Enid	105
F.	Anexo F: Cuestionario para realizar análisis de comparación por pares	112
G.	Anexo G: Resultados del cuestionario.....	126
	Bibliografía	147

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Inversión extranjera en minería en Colombia – Construido a partir de series históricas (www.simco.gov.co)	6
Figura 1-2: Minerales explotados en la minería de hecho. (Adaptado de Defensoría del Pueblo 2010)	8
Figura 1-3: Zonificación del proceso de ordenamiento (Tomado de UPME 2012)....	12
Figura 2-1	20
Figura 2-2: Grafico de selección del método extractivo (Adaptado de Morrison1976)	21
Figura 2-3: Grafico para selección del método extractivo. (Adaptado de Hartman 1981)	22
Figura 2-4: Métodos de medición de la Productividad. (Construido a partir de Coelli 2005)	27
Figura 2-5: Fronteras de Producción y eficiencia técnica Tomado de Coelli (2005) .	28
Figura 2-6: Productividad y eficiencia técnica. (Adaptada de Coelli 2005)	29
Figura 2-7: Cambio técnico en dos periodos de tiempo. (Tomado de Coelli 2005)...	30
Figura 2-8: Matriz de decisión.....	32
Figura 3-1: Proceso de Toma de decisiones Tomado de (Belton y Stewart 2002) ...	40
Figura 3-2: Esquema general de solución.....	41
Figura 3-3: Propuesta metodológica para resolución del problema de selección del método extractivo	42
Figura 3-4: Explotación a cielo abierto. Tomado de Arteaga (1997).....	44
Figura 3-5: Explotación hundimiento por bloques. Tomado de Arteaga (1997)	45
Figura 3-6: Explotación por subniveles por el método de barrenos largos. Tomado de Arteaga (1997) 45	45
Figura 3-7: Explotación hundimiento por subniveles. Tomado de Arteaga (1997)....	46
Figura 3-8: Explotación por tajo largo. Tomado de Arteaga (1997)	47
Figura 3-9: Explotación por cámaras y pilares. Tomado de Arteaga (1997)	48
Figura 3-10: Explotación por cámaras almacén. Tomado de Arteaga (1997).....	49
Figura 3-11: Explotación por corte y relleno. Tomado de Arteaga (1997)	50
Figura 3-12: Distribución de la mina en superficie (diagrama desarrollado por el autor)	54
Figura 3-13: Explotación minera actual (Fotografías tomadas por el autor)	54
Figura 3-14: Proyecto Minero en Construcción. (Fotografías tomadas por el autor)...	55
Figura 3-15: Ubicación del nuevo proyecto minero (Tomado de Plan de trabajos y obras Oripaya 2012).....	56

Figura 3-16:	Carreteable La ilusión – La herradura, hacia la infraestructura minera..	57
Figura 3-17:	Recomendaciones para excavación y sostenimiento según Bieniawski (1989)	62
Figura 3-18:	Representación jerárquica de los criterios	64
Figura 3-19:	Criterios a considerar para PAJ.....	65
Figura 3-20:	Ponderación de los criterios	65
Figura 3-21:	Ponderación de los criterios	66
Figura 3-22:	Grafica de análisis de sensibilidad	66
Figura 3-23:	Resultados Técnica UBC	70
Figura 3-24:	Asignación de pesos mediante Entropía	71
Figura 3-25:	Comparación de pesos con AHP (PAJ) y entropía	71
Figura 3-26:	Comparación en consideraciones económicas de los métodos Tajo largo y Cámaras y pilares	76
Figura 3-27:	Comparación de los métodos Tajo largo y Cámaras y pilares mediante la matriz de decisión normalizada.....	76
Figura 3-28:	Productividad del trabajo en cada método extractivo.....	77
Figura 5-1:	Relación de orden entre el ordenamiento minero, territorial y ambiental	80

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Mayores Productores de carbón (Millones de Toneladas) Buenaventura (2002)	9
Tabla 1-2: Proyectos mineros de carbón próximos a entrar en ejecución. Ponce (2010)	10
Tabla 2-1: Aplicación de métodos mineros subterráneos, traducido de SME (1992)	17
Tabla 2-2: Criterios que componen el método UBC	23
Tabla 2-3: Pesos correspondientes a cada variable dentro del método UBC	25
Tabla 2-4: Escala de comparaciones binarias (Saaty, 1980)	34
Tabla 3-1: Parámetros técnicos del Manto 20. Tomado de Plan de trabajos y obras Oripaya (2012)	60
Tabla 3-2: RSS valor medio de la resistencia de la roca intacta por carga puntual. Tomado de Plan de trabajos y obras Oripaya (2012)	61
Tabla 3-3: RMR Tomado de Plan de trabajos y obras Oripaya (2012)	61
Tabla 3-4: Aplicación del método UBC al Manto 20 de Oripaya	62
Tabla 3-5: Matriz de decisión genérica cualitativa	67
Tabla 3-6: Matriz cuantitativa genérica	68
Tabla 3-7: Matriz de decisión final	69
Tabla 3-8: Matriz de dominancia y dominancia porcentual	72
Tabla 3-9: Calculo del índice Pres	73
Tabla 3-10: Matriz de decisión genérica normalizada por la suma	74

Introducción

En el sector minero la selección del método extractivo es uno de los problemas de Decisión Multicriterio Discreta (DMD) con más inconvenientes para los decisores por dificultades tales como inconsistencia, opiniones en conflicto, que no permiten tomar una decisión apropiada en un ambiente con criterios y alternativas múltiples. Actualmente las metodologías utilizadas en Colombia para la planificación de proyectos mineros en minería a pequeña y mediana escala, utilizan en algunos casos criterios geológicos relacionados con la geometría del yacimiento, en los mejores casos mecánica de rocas y en muchos otros únicamente criterios empíricos. Con base en la experticia de los decisores para la planificación del proyecto y la escogencia del tipo de extracción a realizar, lo anterior genera baja productividad y costos de oportunidad por elección de métodos extractivos inadecuados. Para seleccionar el método extractivo correcto se deben tener en cuenta un número muy amplio de criterios (geológicos, hidrogeológicos, geotecnia, económicos, tecnológicos y ambientales) lo que conlleva al aumento de la complejidad en la toma de esta decisión.

En este trabajo de investigación se desarrolla un modelo de toma de decisiones cuyo objetivo es ayuda al proceso de planeación y diseño minero, el cual esta basado en técnicas cualitativas y cuantitativas que permiten reflejar las preferencias de los diferentes grupos de interés y compararlas con valoraciones objetivas para su comprobación, adicionalmente puede ser utilizado como base para problemas mas complejos como la asignación de títulos mineros, o la generación de políticas en ordenamiento ambiental para nuestro país.

Contexto de la tesis

Actualmente, Colombia busca transformar la actividad minera en uno de los motores de desarrollo económico y social debido al aporte que genera esta actividad en materia de regalías a la nación, como también por la cantidad de trabajos que genera en poblaciones vulnerables. Para lograr un desarrollo de la actividad minera acorde con las necesidades sociales, económicas y ambientales se deben superar primero grandes problemas en las mismas temáticas, como por ejemplo: la asignación de títulos mineros sin un soporte técnico adecuado que garantice un aprovechamiento adecuado de los recursos minerales, problemas en legalización de la actividad minera ilegal, problemas en delimitación de áreas excluibles de la actividad minera, entre otros.

Esta tesis de investigación busca aportar a mejorar las practicas no técnicas en la actividad minera, tratando el principal problema en la planeación de proyectos mineros; la escogencia adecuada del método extractivo. El problema de selección del método extractivo se convierte en el aspecto más importante de la explotación minera, debido a que es necesario seleccionar el que mejor adapte los criterios únicos de cada yacimiento tales como características espaciales, condiciones geológicas, hidrogeológicas, geotecnia y otras consideraciones tales como aspectos económicos, factores tecnológicos y ambientales, para garantizar así un aprovechamiento razonable de los recursos naturales de nuestro país dentro de la normatividad ambiental actual.

Objetivos de la tesis

Objetivo General

Desarrollar una metodología a partir de herramientas de toma de decisión que permita seleccionar un método extractivo en un proyecto minero, considerando variables económicas y técnicas; estudiar el nivel de incidencia que tiene el método extractivo con la productividad industrial minera.

Objetivos específicos

- a) Recopilar los antecedentes de las herramientas de toma de decisión existentes y cuales se han aplicado a la minería.
- b) Recopilar los antecedentes de métodos de medición de la productividad existentes y cuales se han aplicado a la minería.
- c) Determinar que herramientas de toma de decisión son aplicadas para decidir el tipo de extracción se debe desarrollar en la planeación de un proyecto minero.
- d) Determinar que métodos de medición de la productividad pueden ser aplicados para evaluar la productividad de una empresa minera de carbón subterránea.
- e) En una mina de carbón subterránea activa medir la productividad industrial de la misma y basado en el planteamiento del proyecto minero inicial aplicar una herramienta de toma de decisión pertinente para el yacimiento antes de ser explotado y determinar que método extractivo es el más apto para este yacimiento.
- f) Desarrollar una metodología basada en selección de método extractivo por toma de decisiones y aplicarla en la mina de carbón evaluada.
- g) Mostrar las diferencias en productividad del proyecto minero en curso frente a un proyecto propuesto, generadas a partir de la aplicación de la metodología propuesta.

Estructura de la tesis

El primer capítulo de este documento muestra el panorama general de la actividad minera en Colombia, y centra su atención en la minería de carbón y su impacto en la economía nacional.

El segundo capítulo muestra los aspectos teóricos relacionados con la temática del presente documento. Se presentan primero estudios previos en la selección del método extractivo y posteriormente técnicas de toma de decisión y técnicas de medición de la productividad. Muestra también estudios previos en medición de productividad minera y en toma de decisiones multicriterio discretas aplicadas a la actividad minera.

El tercer capítulo correspondiente a la metodología y desarrollo de la investigación, aborda el desarrollo de la investigación como un problema de toma de decisiones grupales multicriterio – multidecisor; se plantea una metodología para ayudar a la solución del problema de selección del método extractivo con un gran número de criterios y un gran número de decisores que desarrollan estructuras jerárquicas independientes.

La metodología planteada en este capítulo consiste en una mejora a la propuesta por el autor en el Encuentro Nacional de investigación y desarrollo 2012. En la presente investigación se aplica el método PAJ a un caso en particular en minería de carbón en Norte de Santander y se realiza la comprobación de los resultados mediante PRES y ENTROPIA.

El cuarto capítulo relaciona como se logran los objetivos general y específicos en el desarrollo del documento.

Finalmente en el quinto capítulo, se muestran las conclusiones de la investigación y se relacionan trabajos que pueden ser realizados como continuación de esta investigación.

1. Antecedentes

Con el objetivo de mostrar la relevancia que tiene la selección del método extractivo y el alcance que toma dentro de la realidad nacional; como primera parte de este capítulo se muestra una introducción al panorama minero Colombiano, los tipos de minería y la legalidad de cada tipo de minería, también se muestran los esfuerzos más representativos en temas de productividad minera nacional. En la segunda parte de este capítulo se exponen los métodos de selección más conocidos en el ámbito minero y la aplicación que puede dársele a cada uno de ellos. Entrando en materia de la realidad Nacional del sector Minero, se quiere mostrar la creciente importancia de este sector para el desarrollo del país, que se ha trabajado, que se está trabajando y que se quiere trabajar en pro de este Sector por parte de las instituciones gubernamentales; comenzando por la reglamentación en materia de leyes establecidas, continuando con una conceptualización del sector minero, la minería de carbón y finalizando con su distribución en el territorio nacional.

1.1. Normatividad Minera Nacional

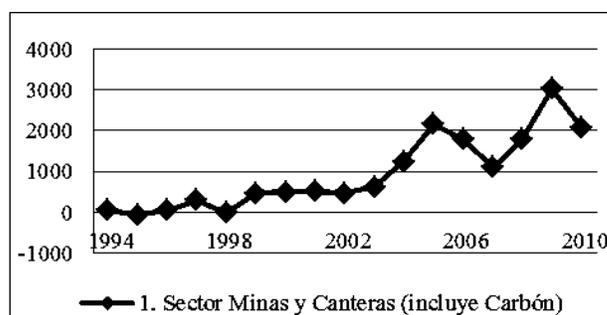
La minería en Colombia está reglamentada bajo la ley 685 (2001) mediante la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones, la cual es modificada por la ley 1382 (2010), mediante la que se abordan procedimientos para solicitud de áreas, la creación de un plan nacional de ordenamiento minero en los tres años posteriores, una evaluación ambiental del territorio nacional, la delimitación de áreas protegidas, zonas excluíbles de la actividad minera y se dictan otras disposiciones.

1.2. Generalidades del Sector Minero

La creciente actividad minera en el país se ve reflejada en el incremento de la inversión extranjeras en exploración y explotación, la cual se puede observar en la **Figura 1 -1** lo cual se puede constatar en Cárdenas y Reina (2008) quien centra su interés en la importancia de América Latina en el dinamismo de la inversión directa en exploración y explotación minera. Dicho auge comienza en 2001, recibiendo Latinoamérica el 30% de los flujos de inversión mundiales en el área; cifra que se duplica en el periodo 2001 – 2008 y que actualmente tiene un comportamiento similar con algunas fluctuaciones.

Aunque las opiniones más tradicionalistas de la escuela económica son críticas respecto a la actividad minera como fuente de desarrollo, hay posiciones alternativas que ganan credibilidad debido a casos en los que la actividad minera genera grandes aportes al desarrollo económico, según Cárdenas y Reina (2008) se destacan los casos de Canadá donde la minería representa el 5% del PIB y el 15% de las exportaciones y el de Australia donde la minería es responsable del 40% de las exportaciones totales y del 8% del PIB, igualmente presentan una teoría alternativa indicando que el aporte de la minería al crecimiento económico depende de variables internas de cada país, representadas por la capacidad de sus empresas, sus instituciones, su política macroeconómica y otras políticas gubernamentales que afectan el capital humano y tecnológico.

Figura 1-1: Inversión extranjera en minería en Colombia – Construido a partir de series históricas (www.simco.gov.co)



En nuestro país según Ponce (2010) los retos que afronta el sector minero actualmente son: la competencia entendida como jugar con reglas claras y establecidas en los temas minero, ambiental y fiscal. Donde Colombia un país relativamente nuevo en los negocios mineros, el factor que más afecta la toma de decisiones por parte de los empresarios, es la estabilidad gubernamental en términos políticos y normativos; puesto que son numerosas las instituciones gubernamentales con autoridad para expedir normas relacionadas directamente con áreas del negocio minero, no se puede garantizar una continuidad y estabilidad en la normativa y las reglas actuales.

El segundo reto que plantea Ponce (2010) es proyectar la imagen real de la minería, ya que se debe desarrollar una estrategia que permita atraer nueva inversión al sector, se debe proyectar a Colombia internacionalmente como un país minero. Para lograrlo se deben eliminar errores de comunicación como la divulgación “sin explicación” de los mapas de áreas concesionadas, los cuales corresponden a actividades de exploración y

no de explotación en su mayoría, por lo cual contrario al pensamiento de la sobre explotación minera lo que se debe es alentar el riesgo que están tomando las empresas que invierten en dicha exploración, que tiene una probabilidad de éxito de encontrar yacimientos bastante baja.

El tercer y último reto según Ponce (2010) es superar las prácticas no técnicas, se hace referencia a la asimilación en toda la actividad minera, de los costos ambientales y la responsabilidad social que conlleva una explotación minera. El no hacerlo genera grandes problemas ambientales, afectación social y dificulta en gran manera la consecución de la licencia ambiental por parte del gobierno. Conflictos que son descritos como una catástrofe. Rodado (2011)¹ El modelo de toma de decisiones para selección del método extractivo, propuesto en este documento busca aportar a la solución de este tercer gran reto presente en la minería colombiana.

1.3. Minería de hecho, minería tradicional y minería ilegal

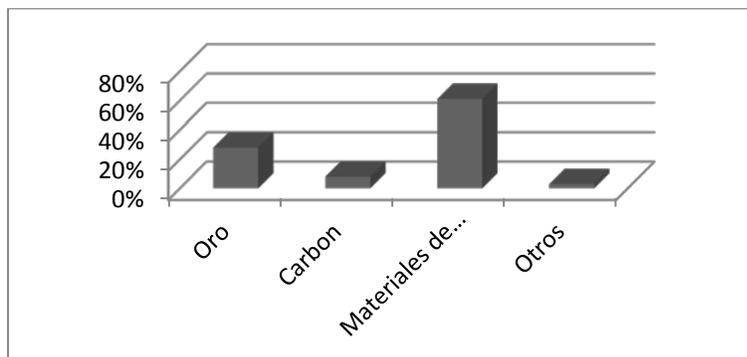
En nuestro país existen diferentes tipos de minería, minería legalmente constituida, minería de hecho, minería tradicional y minería ilegal. Segmentada de esta forma debido a problemas sociales y legales presentes hace tiempo en el territorio nacional. Según la Defensoría del Pueblo (2010) citando al Ministerio de Minas y Energía, la minería ilegal es “la que se desarrolla sin aparecer en el Registro Minero Nacional y por ende sin título minero”. El artículo 58 de la Ley 141 de 1994, vigente al año 2010, utiliza el concepto de minería de hecho en lugar del de minería ilegal, para referirse de igual forma, a las personas que sin título minero vigente llevan a cabo actividades mineras. Así que el concepto de minería de hecho refleja de mejor forma la implicación social de las personas que durante un largo tiempo se han dedicado a esta actividad como medio de subsistencia. Debido a que es requisito para optar a la licencia ambiental la posesión del título minero, se puede decir que la minería de hecho incluye la no tenencia de la licencia ambiental. (Defensoría del Pueblo 2010)

¹ <http://www.portafolio.co/economia/caos-titulacion-minera-denuncio-ministro-rodado>

En el Decreto 2715 de 2010 se crea el concepto de minería tradicional que se refiere a los mineros que ejercen la actividad sin el correspondiente registro minero, pero que se diferencia de las anteriores en que debe cumplir con dos requisitos: que los trabajos mineros se hayan adelantado en forma continua durante 5 años y una existencia mínima de 10 años anteriores a la vigencia de la Ley 1382 de 2010, es decir el 9 de febrero de 2010.

La solución social y legal a los problemas presentes en la minería de hecho en nuestro país se encuentra inmersa dentro del tercer gran reto de la minería colombiana “superar las practicas no técnicas” (Ponce 2010) discutido en el punto anterior. En la **Figura 1- 2**. se observa que el oro es el segundo mineral más extraído mediante minería de hecho, y con la generación de grandes problemas ambientales ocasionados por el uso de mercurio y otras substancias peligrosas.

Figura 1-2: Minerales explotados en la minería de hecho. (Adaptado de Defensoría del Pueblo 2010)



Además de los problemas ambientales, la minería de hecho genera problemas de índole social que involucran comunidades campesinas, indígenas, negritudes, informales y en otros casos grupos al margen de la ley. Si bien el modelo de toma de decisión generado en esta investigación se centra en apoyar el proceso de planeación y diseño minero, el análisis de decisión multicriterio también puede ser aplicado a procesos de ordenamiento minero (Ortega 2006), y se podría desarrollar igualmente un modelo como apoyo a la titulación minera que considere criterios presentes en los problemas legales y sociales de la minería de hecho descritos anteriormente.

1.4. Minería de carbón en Colombia

El análisis de caso nacional se aplicó en el sector minero de carbón colombiano. Por lo cual, es importante mostrar algunas generalidades de este sector para conocer la relevancia del mismo en el presente estudio investigativo. El carbón es hoy, la actividad minera que más aporta al producto interno bruto, para 2010 un PIB de minas y canteras del 11,5% solo superado por el sector hidrocarburos con un 16,87% (SIMCO 2011). Según Romero (1995) en Colombia existen explotaciones desde la época de la conquista, siendo el carbón la principal fuente energética y combustible de la industria nacional. La entrada de nuevos combustibles a lo largo del tiempo, desde los hidrocarburos hasta combustibles con mínimo impacto ambiental, ha generado que se centre el uso del carbón en actividades de generación de energía eléctrica y como materia prima en procesos metalúrgicos. El primero se debe a que su costo es menor al de otras alternativas y el segundo a que es un insumo que luego de ser coquizado se utiliza en el alto horno para la fabricación de acero. Según Buenaventura (2002) en el país, la evaluación, reservas, calidades y usos de la exploración carbonífera fue iniciada por INGEOMINAS, seguida por CARBOCOL, ECOCARBON, MINERCOL y empresas privadas bajo la administración y fiscalización del recurso minero por parte de INGEOMINAS. Este cambio constante de institución encargada de la administración del recurso minero en el país es uno de los problemas a superar para atraer inversión extranjera (Reina 2009). En la **Tabla 1-1** se muestra el lugar que ocupa Colombia en cuanto a producción y el cuarto lugar en exportación a nivel mundial. Según Buenaventura (2002) un porcentaje alrededor del 95% del carbón en Colombia se localiza en 7 zonas: La guajira, Cesar, Córdoba, Norte de Santander y Santander, Cundinamarca y Boyacá, Antioquia y el Valle del cauca y Cauca.

Tabla 1-1: Mayores Productores de carbón en MT (Tomado de Buenaventura 2002)

Países	2007	2008	2009
RP de China	2466.4	2734.4	2971.4
Estados Unidos	981.7	1007.2	918.7
India	454.4	488.6	526.1
Australia	324.6	325.4	335.2

Tabla 1-1

Continuación

Indonesia	223.8	235.1	263.3
Sur África	247.7	252.3	247.3
Federación Rusa	217.9	222.4	228.6
Kazakhstan	93.5	106.2	96.2
Polonia	88.3	84.3	78
Colombia	69.9	73.5	72.9
Ukrania	58.7	59.5	54.8
Vietnam	42.5	38.8	42.1
DPR de Korea	23.9	25.1	28.6
Canada	32.8	32.8	28
Reino Unido	17	18.1	18.4
Otros	98.4	90.3	80
Total	5441.5	5794	5989.6

Según Ponce (2010) los proyectos más importantes de explotación de carbón son en la actualidad, el proyecto de Cerro Largo Sur y el proyecto Galca los cuales se pueden observar en la **Tabla 1-2**, además de estos existe mucha actividad exploratoria que aún no se consolida ni se da a conocer al público como proyecto minero. Recientemente Drummond Coal decidió cesar operaciones en nuestro país debido al paro laboral en el ferrocarril que transporta el carbón hacia puertos del caribe Colombiano.

Tabla 1-2: Proyectos mineros de carbón próximos a entrar en ejecución. (Tomado de Ponce 2010)

Empresa	Proyecto	Etapas	Fecha de entrada
Vale Coal	El Hatillo	Expansión	2011
Carbones del Cerrejón Ltd.	Cerrejón Zona Sur	Factibilidad	Aplazado
Drummond Coal, Co. Inc	Descanso Sur-Similoa	Factibilidad	-
Drummond Coal, Co. Inc.	Cerro Largo Centro	Factibilidad	-
Carboandes	Rondón	Factibilidad	-
MPX	La Guajira	Factibilidad	2014

Tabla 1-2:

Continuación

Vale Colombia Ltda.	Cerro Largo Sur	Prefactibilidad	-
Galway Res.Ltd. – Prodeco	Galca	Prefactibilidad	-
Cerro Matoso S.A.	Puerto Libertador	Prefactibilidad	-
Geominas	Rio Oro	Prefactibilidad	-

1.5. Distribución de la minería en Colombia

Según Ponce (2005) en Colombia término “distrito minero” se ha manejado de manera informal para referirse a un municipio, o grupo de municipios, donde se reúne un número significativo de productores mineros. Estos distritos son un modelo de gestión minera adoptado para apoyar la política de productividad y competitividad en el sector, buscan encadenamientos que generen cooperación y desarrollo entre los actores que intervienen en la actividad minera de nuestro país. Estos distritos se clasifican de la siguiente forma: Grupo I distritos con volumen de producción superior a cinco millones de toneladas por año. Grupo II distritos con escalas medianas de producción, inferiores a cinco millones de toneladas por año. Grupo III distritos productores de metales preciosos y esmeraldas.

Según la UPME (2012) además de la distribución por distritos en nuestro país se adelanta el plan nacional de ordenamiento minero, dentro del cual se pretende zonificar el país como se muestra en la **Figura 1-3**, con el único objetivo de involucrar actores institucionales y privados con intereses definidos en el tema minero en su realidad específica, con su problemática particular que demanda de soluciones concretas y no generales. En la actualidad se cuenta para el proceso de ordenamiento con la siguiente información:

Cartografía geológica: El 38% del territorio cuenta con mapas geológicos a escala 1:100.000, el 9% está en proceso y el 53% carece de ella. Muchos de los existentes deben actualizarse.

Potencialidad minera: Los estudios de geología económica se han enfocado en su mayoría al carbón y es escaso el conocimiento sobre la potencialidad de otros minerales. Se cuenta con una evaluación del potencial de las doce zonas carboníferas del país, realizada por INGEOMINAS en 2004.

Titulación minera: Se cuenta con el dato de títulos mineros vigentes, pero el número de los que se encuentran en etapa de explotación es mayor que el reportado sobre los que cuentan con Licencia Ambiental.

Figura 1-3: Zonificación del proceso de ordenamiento (Tomado de UPME 2012)



1.6. La política de productividad Minera Colombiana

En materia de política minera, en nuestro país se plantea la “Política de mejoramiento de la productividad en el sector minero” (Duque y otros 2005) la cual se puede ver gráficamente en el **Anexo A**. Dicha política plantea objetivos como aumento de exportaciones, competitividad sectorial, diversificar los minerales que se extraen y aumentar su participación en la economía nacional, mejorar la rentabilidad social de la actividad minera y finalmente el aprovechamiento adecuado de los recursos naturales no renovables.

1.6.1. Avances en la política de productividad minera

Según (Duque y otros 2005) la política se divide en tres ramas de acción: estrategia de financiamiento, gestión de los distritos mineros y programa integral de control a la ilegalidad.

El informe más reciente sobre el avance de estas ramas se cita textualmente a continuación (Memorias al congreso 2010):

Agenda para la Modernización de la Minería Tradicional

Buscando el apoyo de las explotaciones mineras de mediana y pequeña escala existentes en el país, caracterizadas por presentar en sus operaciones debilidades en los órdenes técnico y económico, se ha propiciado la inclusión de la actividad minera dentro de los planes de ordenamiento departamentales y municipales y que la misma sea considerada como generadora de empleo, desarrollo regional y mejoramiento de la calidad de vida de sus pobladores y por supuesto, jalonar el mejoramiento de la productividad y por ende la competitividad de las explotaciones tradicionales legales existentes en el país.

Lo anterior, se ha logrado con la ejecución de la Política de Mejoramiento de la Productividad y Competitividad del Sector Minero Colombiano, la cual busca mejorar los niveles de productividad y rentabilidad social de la actividad minera a través de la implementación de estrategias focalizadas. Para lograrlo, además de la ejecución del censo minero durante el último año, se han puesto en ejecución tres estrategias, a saber: Programa de control integral a la ilegalidad, Estrategia de financiamiento y Modelo de gestión de los Distritos Mineros.

Modelo de Gestión de los Distritos Mineros

En el año 2009 y lo que va 2010, se ha consolidado el modelo de gestión de los Distritos Mineros, el cual, a través del programa de acompañamiento dirigido a los actores estratégicos de éstos, logró facilitar la gerencia de la productividad y la competitividad sostenible por parte de los mismos y agentes directos e indirectos de los encadenamientos productivos mineros, fortaleciendo su nivel

organizacional, su planeación estratégica y herramientas tecnológicas que incrementan su nivel de gestión y formulación de proyectos, que tienden a mejorar las condiciones de vida de los habitantes del territorio.

Proyectos de Fomento Minero

El grupo de Promoción Minera, a lo largo del periodo, trabajó en varios frentes; por un lado, continuó con la ejecución de los proyectos FNR aprobados en el periodo anterior, a los cuales se les hizo el respectivo seguimiento en términos de giros de recursos, interventoría a la ejecución de los proyectos, reuniones con los delegados de las entidades territoriales y Planeación Nacional, para dar los respectivos lineamientos en el continuo desarrollo de los mismos y realizar las respectivas actas de liquidación de la mayoría de estos proyectos.

Estrategia de Financiamiento para el Sector Minero

Para cumplir con este propósito, en diciembre de 2008 el Ministerio de Minas y Energía contrató, conjuntamente con la CAF, un estudio mediante el cual se pretenden identificar y poner en marcha las acciones para transformar el sistema financiero, a través del diseño y creación de instrumentos novedosos para hacer ágil y accesible el financiamiento e inversión para el sector minero.

Igualmente, el Ministerio de Minas y Energía creó líneas de crédito para financiar la exploración y explotación minera en el país, a través de créditos que se otorgarán con base en los méritos de los proyectos que aspiren a obtener recursos y que se realicen con los esfuerzos de pequeños empresarios nacionales que no cuenten con suficiente capital o que presenten dificultades para acceder a los mercados de capital y por lo tanto se les dificulta desarrollar empresas de importancia.

Estos créditos se otorgarán a través del FIMIN, fondo creado por la Financiera Eléctrica Nacional S.A., desde el pasado 5 de noviembre de 2008. Por otra parte, se suscribió un convenio con el SENA, con el propósito de brindar capacitación a los empresarios mineros en gerencia básica, buenas prácticas

empresariales y técnicas de mejoramiento continuo; y a los profesionales del sector minero, en la formulación de planes de negocios y financiamiento de pequeños y medianos proyectos mineros. También se busca llevar capacitación a los trabajadores mineros en lo relacionado con las operaciones unitarias mineras, a través de aulas móviles.

2. Aspectos teóricos Relacionados

En este capítulo mostraremos los aspectos teóricos utilizados para la construcción del modelo de toma de decisión que se desarrolla en el capítulo siguiente, se comienza mostrando algunos desarrollos previos en materia de selección del método extractivo, posteriormente se muestran las técnicas de toma de decisión que se han aplicado a la actividad minera, técnicas de medición de la productividad y finalmente se muestran algunas técnicas de toma de decisión multicriterio discreta a utilizar en el capítulo siguiente.

2.1. Estudios previos en selección del método extractivo

La selección de métodos extractivos en la minería es uno de los retos de selección más antiguos de la humanidad y ha sido estudiada ampliamente, la literatura científica más relevante al respecto inicia con uno de los primeros esquemas cualitativos de clasificación para selección de métodos extractivos (Boshkov y Wright 1973). En estudios posteriores se propone un sistema de clasificación el cual divide la minería subterránea en tres grupos basado en las condiciones del terreno asignando a cada uno el tipo de soporte requerido (Morrison 1976).

Laubsher (1981) propone una metodología de selección para el método de extracción subterránea basada en el sistema de clasificación R.M.R (por sus siglas en inglés rock mass rating). La primera aproximación a un método de selección cuantitativa se desarrolla cuando David E. Nicholas (1981) formuló una aproximación numérica para la selección de método extractivo con su trabajo (Selection Procedure - A Numerical Approach) donde se formula el uso de una escala para la ponderación de cada método extractivo. Posteriormente Hartman (1987) desarrolló un esquema de selección cualitativo basado en la geometría del yacimiento y las condiciones del terreno para escoger el método extractivo. Con el objetivo de utilizar una escala más exacta para valorar las alternativas de extracción, se modifica el método Nicholas (Miller y otros 1995).

En la actualidad existen algunos abordajes al problema de selección del método de explotación, mediante análisis de decisión multicriterio entre las cuales destacamos la aplicación de lógica difusa (Bitarafan y Ataei 2004 y Karadogan y otros 2008); adicionalmente se pueden encontrar variadas aplicaciones de AHP (Analitic hierarchy proces) o PAJ (análisis de procesos jerárquicos) aplicado en otros trabajos (Alpay y Yavuz 2009, Azadeh y otros 2010 y Bogdanovic y otros 2012). Una revisión de los principales métodos multicriterio puede consultarse en Figueira y otros (2005) y Romero y Pomerol (1997).

Se pueden utilizar gran cantidad de criterios para seleccionar un método extractivo en un proyecto minero, los cuales pueden variar según factores tecnológicos, ambientales, legales, geológicos y muchos más; los cuales varían para cada caso específico.

2.1.1. Sistema de Clasificación de Boshkov y Wright

Es uno de los primeros sistemas de clasificación cualitativa desarrollados. Este sistema se basa en los planteamientos de Peele (1941). Fue propuesto en 1973 y utiliza una descripción general del espesor del mineral, su inclinación, la resistencia del mineral y de los respaldos para identificar los métodos mas comunes que han sido aplicados bajo condiciones similares, esta técnica proporciona hasta cuatro métodos que pueden ser aplicados a una situación específica como puede verse en la **Tabla 2-1**.

Tabla 2-1: Aplicación de métodos mineros subterráneos. (Adaptado de SME 1992)

Tipo de deposito	Inclinación	Resistencia del mineral	Resistencia de las paredes	Métodos mineros aplicados comúnmente
Capas delgadas	Plano	Fuerte	Fuerte	Bancadas abiertas con pilares, Cámaras y Pilares, Tajo largo
		Débil o fuerte	Débil	Tajo largo

Tabla 2-2:

Continuación

Tipo de deposito	Inclinación	Resistencia del mineral	Resistencia de las paredes	Métodos mineros aplicados comúnmente
Capas gruesas	Plano	Fuerte	Fuerte	Bancadas abiertas con pilares, Cámaras y Pilares
		Débil o fuerte	Débil	Fajas descendentes, Hundimiento por subniveles
		Débil o fuerte	Fuerte	Underground Glory-hole
Capas muy gruesas				Igual que para masivos
Vetas muy estrechas	Inclinado	Fuerte o débil	Fuerte o débil	Labor de desanche
Vetas estrechas	Plano			Igual que para capas delgadas
	Inclinado	Fuerte	Fuerte	Bancadas abiertas, cámaras almacén, corte y relleno
			Débil	Entibación con cuadros
			Fuerte	Grada derecha sin relleno, pozo vertedero, cámaras almacén, cámaras por subniveles, fortificación con cuadros
			Débil	Fortificación con cuadros, fajas descendentes

Tabla 2-3:

Continuación

Tipo de deposito	Inclinación	Resistencia del mineral	Resistencia de las paredes	Métodos mineros aplicados comúnmente
Vetas amplias	Plano			Las mismas que capas gruesas o masivos
	Inclinado	Fuerte	Fuerte	Open hunderhand stopes
				Underground Glory hole
				Franja Almacen
				Sublevel stoping
				Corte y relleno
				Métodos combinados
			Débil	Corte y relleno
				Explotación por tramos horizontales con hundimiento
				Cámaras subnivel
				Entibación cuadrada
				Métodos combinados
		Débil	Fuerte	Grada derecha sin relleno
				Explotación por tramos horizontales con hundimiento
				Cámaras subnivel
				Cámaras por bloques
				Entibación cuadrada
				Métodos combinados
			Débil	Explotación por tramos horizontales con hundimiento

Tabla 2-4:

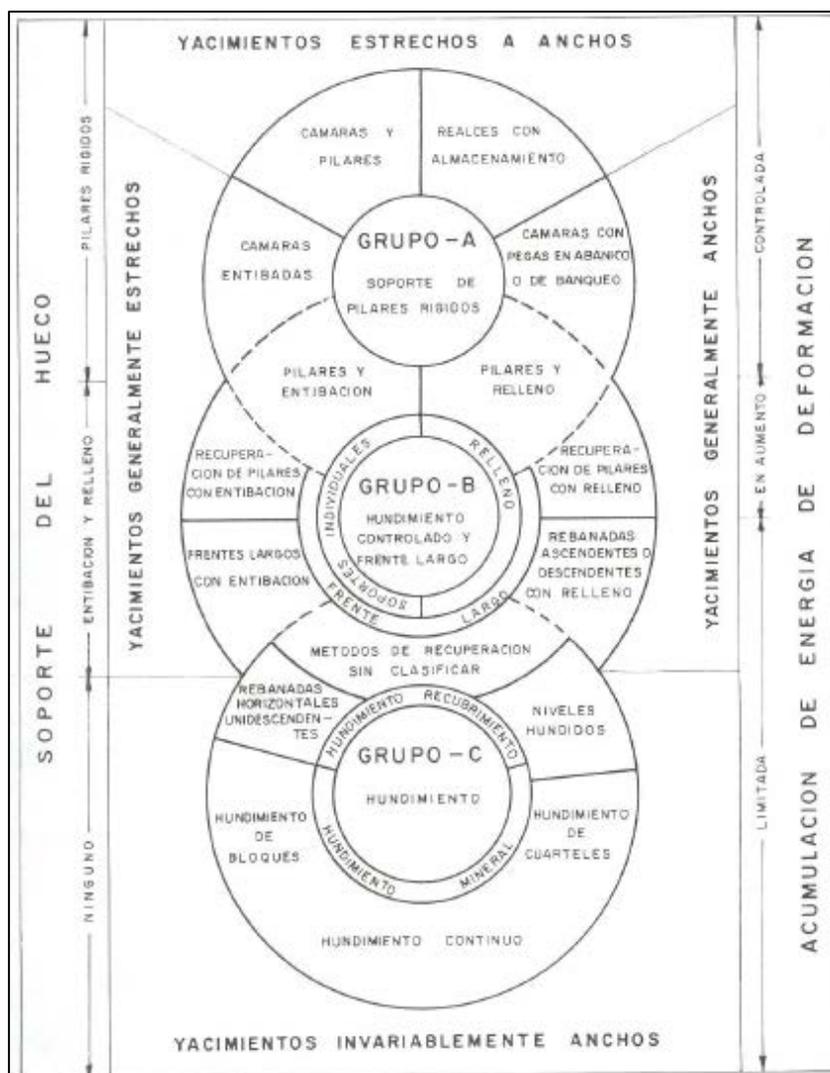
Continuación

Tipo de deposito	Inclinación	Resistencia del mineral	Resistencia de las paredes	Métodos mineros aplicados comúnmente
				Cámaras subnivel
				Entibación cuadrada
				Métodos Combinados
Masivos		Fuerte	Fuerte	Pozo vertedero
				Franja almacén
				Explotación por subniveles
				Corte y relleno
				Métodos combinados
		Débil	Débil o fuerte	Explotación por tramos horizontales con hundimiento
				Subniveles
				Bloques
				Métodos fortificación cuadrada
				Métodos combinados

2.1.2. Sistema de Clasificación de Morrison

Según el SME (1992) el gráfico de selección de Morrison clasifica en tres grupos los principales métodos de extracción subterránea: Soportes de pilares rígidos, Hundimiento controlado y frente largo y hundimiento. Variables como la anchura de mineral, el tipo de apoyo, y la acumulación de energía de deformación se utilizan como criterios para determinar un método extractivo. La elección de un método sobre otro se basa en las diversas combinaciones de condiciones del terreno. En este sistema, las condiciones del terreno ya han sido evaluadas para determinar el tipo de apoyo necesario. Tal como puede ser observado en la **Figura 2-1**

Figura 2-2: Grafico de selección del método extractivo (Adaptado de Morrison 1976)



2.1.3. Sistema de Clasificación de Hartman

Según el SME (1992) Hartman desarrollo en 1987 un diagrama de flujo de selección del método extractivo, basado en la geometría del depósito y las condiciones del depósito mineral. Este sistema es similar al propuesto por Boshkov and Wright (1973), pero esta dirigido a métodos específicos. Hartman sugiere que debido a ser cualitativo su método

debería ser usado como una primera aproximación. En la **Figura 2-2** se puede ver el sistema de clasificación propuesto.

Figura 2-3: Grafico para selección del método extractivo. (Adaptado de Hartman 1981)

Deposito	Profundidad	Resistencia de la roca y del mineral	Geometria	
METODO	LOCAL	CLASE	NOMBRE	
DEPOSITO	Superficial — SUPERFICIE	Cualquier resistencia, consolidada — Mecanica	Cualquier forma, cualquier inclinacion, espesor, tamaño largo	TAJO ABIERTO
			Tabular o masivo, cualquier inclinacion, espesor, tamaño moderado	CANTERAS
			Tabular, Poca Inclinacion, delgado, tamaño largo	CIELO ABIERTO
		Sin consolidar o permeable — Acuoso	Tabular, plano, delgado, remanente	BARRENADO
			Tabular, plano, delgado, tamaño reducido	LABOREO HIDRAULICO
			Tabular, plano	DRAGADO
			Cualquier forma, cualquier inclinacion, espesor, tamaño largo	MINERIA DE PERFORACION
	Profundo — SUBTERRANEO	Sin soporte	Cualquier forma, empinado, espeso, tamaño largo	LIXIVIACION
			Tabular, plano, delgado, tamaño largo	CAMARAS Y PILARES
			Tabular, plano, espeso, tamaño largo	STOPE AND PILLAR MINING
		Soportada	Tabular Inclinado, delgado, cualquier tamaño	SHRINKAGE STOPING
			Tabular, Inclinado, espeso, tamaño largo	SUBLEVEL STOPNG
			Forma variante, Inclinado, delgado, cualquier tamaño	CUT AND FILL STOPING
			Tabular, inclinado, delgado, tamaño reducido	STULL STOPING
Excavado	Cualquier forma, cualquier inclinacion, espeso, cualquier tamaño	SQUARE SET STOPING		
	Tabular Plano, delgado, de gran tamaño	TAJO LARGO		
		Tabular o masivo, inclinado, espeso, gran tamaño	SUBLEVEL CAVING BLOCK CAVING	

2.1.4. Sistema de Clasificación Nicholas

Este sistema de clasificación (Nicholas 1981) determina la factibilidad de los métodos extractivos mediante una clasificación numérica. Este método clasifica la geometría y la distribución de mineral; también examina las características de mecánica de rocas presentes en el manto y en los respaldos superior e inferior. Un valor de 3 o 4 indica que una característica se prefiere para el método de extracción. Un valor de 1 o 2 indica que una característica es probablemente adecuada, mientras que un valor de 0 indica que una característica probablemente no es adecuada para el método de extracción. Finalmente un valor de -49 indicaría que una característica elimina completamente a dicho método.

2.1.5. Sistema de Clasificación UBC

La técnica de selección UBC (por las siglas en ingles University of British Columbia) desarrollada por Miller y otros (1995) y publicado en la revista Mine Planning and Equipment Selection en el año de 1995. Este sistema es una versión modificada de la técnica Nicholas (1981). Como nuevo aporte se introduce un valor, -10 para dar un peso negativo sin eliminar un método completamente, tal como lo hacia la técnica de Nicholas con el valor de -49. El sistema de selección UBC, clasifica la mecánica de rocas dentro de dos parámetros: RMR (por sus siglas en ingles Rock mass rating) el cual consiste en el sistema de clasificación de Bienawski (1973); RSS (por sus siglas en ingles Rock substance strength. Las calificaciones de mecánica de rocas mejoran el sistema de Nicholas (1981) como se puede ver en la **Tabla 2-5**

Tabla 2-6: Criterios que componen el método (Adaptado de UBC 1995)

1. Forma general	
Equi-dimensional	Todas las dimensiones están en el mismo orden de magnitud
Platy-tabular	Dos dimensiones tienen muchas veces el mismo espesor, que no suele superar los 35m
Irregular	Las dimensiones varían en cortas distancias.
2. Espesor del manto	
Muy estrecho	<3m
Estrecho	3-10m
Intermedio	10-100m
Grueso	30-100m
Muy Grueso	>100m
3. Inclinación	
Plano	<20 grados
Intermedio	20-55 grados
Empinado	>55 grados

Tabla 2-7:

Continuación

4. Profundidad	
Superficial	0-100 m
Intermedio	100-600m
Profundo	>600m
5. Distribución	
Uniforme	El grado en cualquier punto del depósito no varía significativamente de la calificación media.
Gradacional	El grado tiene características zonales, y cambia gradualmente de un lugar a otro.
Erratico	El grado cambia radicalmente en cortas distancias.
6. Rock mass ratings. Puntuacion según Bieniawski (1989)	
Muy débil	0-20
Debil	20-40
Moderado	40-60
Fuerte	60-80
Muy Fuerte	80-100
7. Rock substance strength (Uniaxial strength/Principal stress) Resistencia a la Compresión Simple (MPa) / Presión del recubrimiento(MPa)	
Muy débil	<5
Débil	5-10
Moderado	10-15
Fuerte	>15

Ahora en función del criterio escogido de la **Tabla 2-2**, se asigna el peso correspondiente basado en la **Tabla 2-3**

Tabla 2-8: Pesos correspondientes a cada variable dentro del método UBC

Metodo	Forma			Posicion			Espesor					Grado distribucion			Profundidad		
	Equidimensional	Tabular	Irregular	Plano	Moderado	Empinado	M. Estrecho	Estrecho	Intermedio	Denso	M. Denso	OR	GRADACIONAL	ATC	<100m	100-600	>600m
Cielo Abierto	4	2	3	3	3	1	1	2	3	4	4	3	3	2	4	0	-49
Hundimiento de bloques	4	2	0	3	2	4	-49	-49	0	3	4	3	2	2	2	3	3
Hundimiento por subniveles	3	4	1	2	1	4	-10	1	3	4	3	4	4	3	3	4	2
Pisos de hundimiento	3	4	1	1	1	4	-49	-49	0	4	4	3	2	2	3	2	2
Tajo largo	-49	4	-49	4	0	-49	4	3	0	-49	-49	4	1	0	2	2	3
Camaras y pilares	0	4	2	4	0	-49	4	3	1	-49	-49	4	2	0	3	3	2
Minado por Almacenamiento provisional	0	4	2	-49	0	4	4	4	0	-49	-49	3	2	2	3	3	2
Corte y Relleno	1	4	4	1	3	4	3	4	4	1	0	2	3	4	2	3	4
Tramos horizontales	1	2	0	4	2	0	1	1	0	2	1	2	1	1	2	1	1
Con entibacion	0	1	4	2	3	2	4	3	2	0	0	0	1	3	1	1	2

RMR Dep Min					RMR Hanging Wall					RMR Footwall				
Muy debil	Debil	Moderado	Fuerte	Muy fuerte	Muy debil	Debil	Moderado	Fuerte	Muy fuerte	Muy debil	Debil	Moderado	Fuerte	Muy fuerte
3	3	3	3	3	2	3	4	4	4	2	3	4	4	4
4	3	2	0	-49	3	3	3	2	2	3	3	3	2	2
1	3	4	4	4	-49	0	3	4	4	0	0	2	3	3
3	4	3	1	0	4	4	3	2	2	1	2	3	3	3
6	6	4	2	2	6	5	4	3	3	0	0	0	0	0
-49	0	3	5	6	-49	0	3	5	6	0	0	0	0	0
0	1	3	3	3	0	0	2	4	4	0	0	2	3	3
0	1	2	3	3	3	5	4	3	3	3	3	2	2	2
3	2	1	1	0	0	0	2	3	3	0	0	1	2	2
4	4	1	0	0	4	4	1	0	0	3	1	0	0	0

RSS Dp Min				RSS Hanging Wall				RSS Footwall			
Muy debil	Debil	Moderado	Fuerte	Muy debil	Debil	Moderado	Fuerte	Muy debil	Debil	Moderado	Fuerte
4	3	3	3	3	3	4	4	3	3	4	4
4	2	1	0	4	3	2	0	4	3	2	1
0	2	4	4	0	1	4	5	0	1	3	3
2	3	3	2	4	3	2	1	1	2	2	2
6	5	2	1	6	5	2	2	0	0	0	0
0	0	3	6	0	0	2	6	0	0	0	0
0	1	3	4	0	1	3	4	0	2	3	3
0	1	3	3	3	5	4	2	1	3	3	2
3	2	1	0	3	2	2	2	2	2	1	1
4	3	1	0	4	2	1	0	3	2	0	0

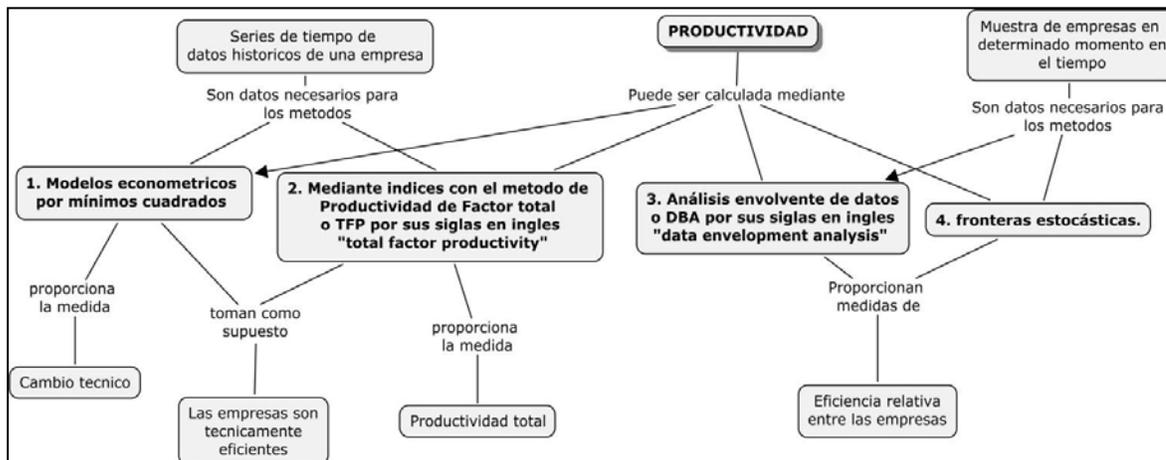
2.2. Técnicas de toma de decisión aplicadas a la actividad minera

Bascetin y Kesimal (1999) usaron el método Yager (ver acápite 2.4.7. método de yager) para la selección de un sistema óptimo de transporte. Karadogan y otros (2001) resolvieron el problema de selección del método extractivo mediante el método Yager y usaron procesos de análisis jerárquico (PAJ) como metodología para el mismo propósito. Elevli y otros (2002) seleccionan un nuevo sistema de rampas mediante ponderación de criterios para una mina subterránea en pequeña escala. Samanta y otros (2002) usaron el método PAJ para seleccionar el equipo minero para una mina a cielo abierto. Bitarafan y Ataei (2004) logran resolver un problema similar usando el método Yager con PAJ incluyendo el análisis de dominancia con lógica difusa. Elevli y Demirci (2004) seleccionan el sistema de transporte subterráneo más adecuado mediante el uso de toma de decisiones con atributos múltiples (MADM). Kazakidis y otros (2004) usan el método PAJ y analizan cinco diferentes escenarios tales como análisis de inversión en tecnología de perforación, diseño soportado, diseño de túneles, localización y aseguramiento de riesgos. Ataei (2005) utiliza el método PAJ para la localización de una nueva planta. Acaroglu y otros (2006) usan PAJ para selección de rozadoras en los túneles.

2.3. Técnicas de medición de la productividad

Con el objetivo de abordar las técnicas de medición de la productividad se debe dejar claros ciertos términos que muchas veces son tomados como sinónimos o son mal interpretados. Según Coelli y otros (2005) se define la productividad de una empresa como la razón de las salidas que producen las entradas que esta utiliza. Donde $\text{Productividad} = \text{Salidas} / \text{Entradas}$. Para un proceso productivo de una entrada y una salida, el cálculo de su productividad es algo muy sencillo, pero si las entradas son múltiples y las salidas son igualmente variadas, este cálculo se complica. En la **Figura 2-3** se puede observar las principales metodologías para calcular la productividad, sus requerimientos y los resultados que arroja cada método.

Figura 2-4: Métodos de medición de la Productividad. (Construido a partir de Coelli 2005)



Según Sumanth (1984) se puede calcular la productividad industrial parcialmente, de factor total o productividad total, donde la productividad parcial es la razón entre cantidad producida y un solo tipo de insumo. Productividad total = Producción total / insumo total, donde los insumos son: mano de obra + materiales + capital + energía + otros gastos. Por ejemplo, la productividad del trabajo (el cociente de la producción entre la mano de obra) es una medida de productividad parcial. De manera similar, la productividad del capital (el cociente de la producción entre el insumo capital) y la productividad de los materiales (el cociente de la producción entre el insumo de materias primas) son ejemplos de productividades parciales. La productividad de factor total es la razón de la producción neta con la suma asociada con los (factores de) insumos de mano de obra y capital. Por "producción neta" se entiende producción total menos servicios y bienes intermedios comprados. Donde el denominador de este cociente se compone solo de factores de insumo de capital y trabajo. Finalmente la productividad total es la adición entre la producción total y la suma de todos los factores de insumo. Así, la medida de productividad total refleja el impacto conjunto de todos insumos al fabricar los productos.

Para ilustrar este concepto se presenta el siguiente ejemplo: Una empresa manufactura tres productos P1, P2 y P3 para los cuales utiliza insumos Humanos (H), Capital (C), Material (M), Energéticos (E) y Otros gastos (X)

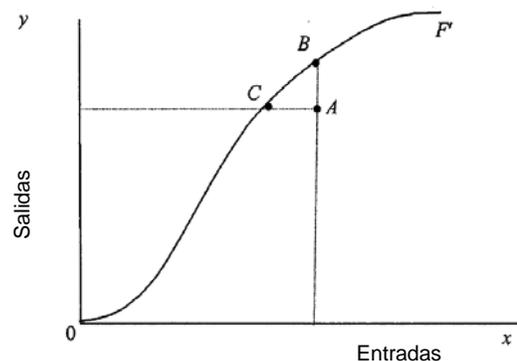
Tabla 2-4: Producción total y factores de insumo para tres productos

Producto	H	C	M	E	X	Produccion total
P1	14	12	8	9	6	60
P2	8	9	4	7	10	55
P3	18	21	16	10	9	49

Diferenciamos la eficiencia de la productividad (Coelli y otros 2005) con un proceso de producción simple de una entrada (X) y una Salida (Y), vemos en la **Figura 2-5** una línea que representa una frontera de producción que refleja la relación de entradas y salidas, mostrando el máximo rendimiento posible de cada nivel de la entrada. La forma mas general de esta expresión como función de productividad esta dada por:

$$Q = f(x_1 + x_2 + x_3, \dots, x_n) \quad (1)$$

Donde Q corresponde a la cantidad de salidas y $(x_1 + x_2 + x_3, \dots, x_n)$ corresponde a las entradas, las cuales pueden ser capital, trabajo, materiales entre otras. Esta relación puede usarse como referencia para las empresas, las cuales pueden saber por medio de este si son eficientes técnicamente (si están sobre la frontera, puntos B y C), si no lo son (si están por debajo de la frontera, punto A) y así tomar decisiones.

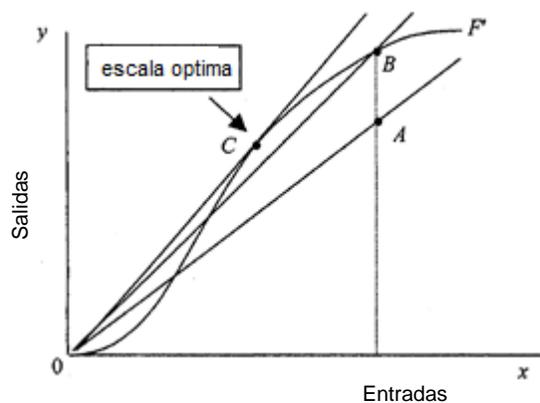
Figura 2-5: Fronteras de Producción y eficiencia técnica Tomado de Coelli (2005)

Por ultimo se debe diferenciar también la eficiencia técnica de la productividad, esto se indica en la **Figura 2-6** en la cual se traza una serie de rectas desde el origen hasta los puntos A, B y C y la medida de productividad será el resultado de la pendiente y/x . Si una empresa que opera en el punto A y pasa al punto B indica un crecimiento de su

productividad, y por tanto tendría en el punto C su productividad máxima. El punto C es el punto de una escala óptima de operación. Se define escala óptima, como el punto en que se logra la mayor producción con la menor cantidad de recursos. Puntualmente, en el área extractiva los minerales varían su precio con relación a variables externas que afectan el mercado, tales como políticas extractivas con relación a la velocidad de explotación de yacimientos, o cantidad de yacimientos presentes en mundo, entendidas como reservas medidas comprobables.

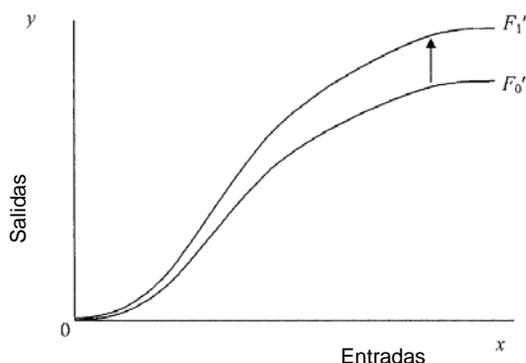
El desarrollo de cambios en estas políticas o en la tecnología para aumentar la capacidad extractiva de las empresas, generara variaciones en la escala óptima de productividad. Ahora cuando se toma en cuenta el tiempo en las consideraciones anteriores, nos encontramos con un cambio en la productividad que puede estar dado por una variación en la frontera de productividad, como producto de un avance tecnológico.

Figura 2-6: Productividad y eficiencia técnica. (Adaptada de Coelli 2005)



En la **Figura 2-7** se puede ver como mediante un cambio en la tecnología que afecta directamente el proceso productivo de una empresa, donde una variación en la frontera de producción de forma positiva desplaza condiciones limitantes de la tecnología usada anteriormente para producir.

Figura 2-7: Cambio técnico en dos periodos de tiempo. (Tomado de Coelli 2005)



2.3.1. Estudios sobre productividad en la actividad minera

Con el paso del tiempo se han realizado en el mundo una gran variedad de estudios en temas relacionados con medición de productividad minera, tanto a nivel sectorial y regional, como a nivel industrial. Para esta investigación se destacan las publicaciones que se consideran como las más representativas de la última década. Tilton (2001) analizó la productividad laboral minera en tiempos de recesión, se destaca igualmente a Kulshreshtha y Parikh (2002) quienes analizan la eficiencia y crecimiento productivo en la minería de carbón subterránea en la India mediante análisis envolvente de datos, Rodríguez (2002) publicó un estudio del comportamiento de la productividad global de la minería en España.

En Latinoamérica se publica en Colombia la Política nacional de productividad minera en 2005 (Duque y otros 2005). En Chile se publica un estudio sobre el análisis y la evolución de la productividad laboral minera realizado por Cochilco (2009). Finalmente Tsolas (2011) realiza una valoración del desempeño de las operaciones mineras mediante una aproximación al análisis envolvente de datos. Además de estudios sectoriales mostrados anteriormente, se pueden encontrar algunos desarrollos sobre medición de la productividad industrial como el realizado por Jimenez y Molina (2006) donde realizan una propuesta de medición de la productividad para la minería de oro y Rodríguez (2010) donde se propone un índice de productividad total para medir la sostenibilidad económica en las industrias mineras.

2.4. Técnicas de toma de decisión

A continuación se relacionan las técnicas de toma de decisión utilizadas en el modelo que se propone en el capítulo siguiente. También son descritas otras técnicas que se han utilizado para toma de decisiones en el sector minero. Se justificara por que no fueron utilizadas en el modelo propuesto en esta investigación. Un ejemplo de aplicación de las técnicas de Entropia, Pres y PAJ puede consultarse en el **Anexo B**.

2.4.1. La decisión multicriterio discreta (DMD)

Según Romero y Pomerol (1997) la toma de decisiones es un proceso mediante el cual individuos u organizaciones se ven enfrentados a decisiones difíciles por las consecuencias que puede generar el escoger una alternativa u otra; como también decisiones en las cuales influyen una variedad de criterios que apoyan o rechazan la escogencia de ciertas alternativas. Estas decisiones según García (2009) citando a León (2001) se caracterizan por: presentar intereses en conflicto, tener elementos de incertidumbre, involucrar distintas personas en la decisión y poseer elementos fácilmente valorables y elementos difícilmente valorables.

- **Agentes que intervienen en el proceso**

Los problemas de decisión multicriterio discreta principalmente presentan dos agentes, el analista y el decisor (Romero y Pomerol 1997). El primero es el encargado de realizar el modelo de todo el proceso de toma de decisiones y el segundo es aquel que toma la decisión, cuya opinión refleja las preferencias sobre los diferentes criterios de decisión. El decisor puede ser una persona o un grupo de personas, quienes influyen directamente sobre la decisión (en este caso sobre escoger un método extractivo) o se consideran expertos en la temática que quiere solucionar un problema.

- **Alternativas y criterios**

Según Romero y Pomerol (1997) y García (2009) el conjunto de alternativas se denomina también conjunto de elección y se define como el conjunto finito de proyectos, candidatos, ubicaciones, planes entre los cuales se piensa elegir. Conforman el conjunto opciones posibles sobre las que el decisor realiza una decisión. El conjunto de alternativas es designado por $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ donde A_i , $i = (1, \dots, m)$ son cada una de

las alternativas posibles y se da por supuesto que estas alternativas son diferentes, excluyentes y exhaustivas (Romero y Pomerol 1997). Los criterios por otra parte constituyen los ejes de evaluación sobre las diferentes alternativas, un criterio expresa las preferencias de los decisores. Siempre se supone que los criterios $C = \{C_1, C_2, \dots, C_j, \dots, C_n\}$ finito. Estos criterios pueden ser cualitativos o cuantitativos (Romero C. 1993).

- **La matriz de decisión**

Según Romero y Pomerol (1997) la matriz a_{ij} o matriz de decisión (ver **Figura 2-7**) expresa en sus filas las cualidades de la alternativa i con respecto a los n criterios considerados. Cada columna j muestra las evaluaciones hechas por el decisor de cada alternativa considerada con respecto al atributo j .

- **Asignación de Pesos**

Según García (2009) los pesos o ponderaciones son las medidas de la importancia relativa que los criterios tienen para el decisor. Asociado a los criterios, se asigna un vector de pesos $w = \{w_1, w_2, w_3, \dots, w_n\}$ siendo n el número de criterios. En Romero y Pomerol (1997) se puede encontrar los principales métodos de asignación de pesos a los criterios entre los cuales están la suma ponderada, el producto ponderado, la entropía, asignación directa y el método eigen pesos (el cual es la base para PAJ).

Figura 2-8: Matriz de decisión

		CRITERIOS					
		C1	C2	...	Cj	...	Cn
ALTERNATIVAS	A1	a11	a12	...	a1j	...	a1n
	A2	a21	a22	...	a2j	...	a2n

	Ai	ai1	ai2	...	aij	...	Ain

	Am	am1	am2	...	amj	...	Amn

2.4.2. Proceso de análisis jerárquico (PAJ)

Según Romero y Pomerol (1997) y García (2009) el PAJ se basa en el cálculo de los pesos propios de una matriz de valoración (eigen pesos). Los axiomas básicos sobre los cuales se fundamenta el PAJ son los siguientes:

Axioma de comparación recíproca: El decisor debe ser capaz de realizar comparaciones y establecer la fuerza de sus preferencias. La intensidad de estas preferencias debe satisfacer la condición recíproca: “Si A es x veces preferido que B , entonces B es $1/x$ veces preferido que A ”.

Axioma de homogeneidad: “Las preferencias se representan por medio de una escala limitada”

Axioma de independencia: “Cuando se expresan preferencias, se asume que los criterios son independientes de las propiedades de las alternativas”.

Axioma de las expectativas: “Para el propósito de la toma de una decisión, se asume que la jerarquía es completa”.

El método PAJ fue desarrollado por Saaty (1980) y es una herramienta útil para estructurar problemas complejos en los que influyen múltiples criterios y al mismo tiempo clasificar en orden de importancia un conjunto de alternativas.

La lógica del método es: Inicialmente se realiza una estructura jerárquica en donde se identifica el problema de decisión principal, luego se identifican los criterios y sub criterios que se tienen en cuenta para la toma de la decisión. Estos criterios se ponen en niveles de importancia que se denominan jerarquías. El último nivel corresponde al conjunto de alternativas que serán evaluadas respecto a cada uno de los criterios y sub criterios.

Esta evaluación se desarrolla mediante una serie de comparaciones binarias en una matriz $n \times n$, donde n es el número de elementos a ser comparados. Para poder realizar la comparación se requiere de una escala. Saaty (1980) propuso una escala entre 1 y 9 en donde cada valor intermedio tiene una interpretación para el decisor. (Ver **Tabla 2-4**)

Tabla 2-9: Escala de comparaciones binarias (Tomado de Saaty, 1980)

Intensidad Relativa	Definición
1	Igual importancia
3	Importancia moderada de un elemento sobre otro
5	Importancia fuerte de un elemento sobre otro
7	Importancia muy fuerte de un elemento sobre otro
9	Extrema importancia de un elemento sobre otro
2, 4, 6, 8	Valores intermedios

El siguiente paso es encontrar las prioridades relativas de los criterios y/o las alternativas. Este paso se basa en la teoría del eigenvector. Por ejemplo si una matriz de comparación es A , entonces

$$Aw = \lambda_{\max} w \quad (2)$$

Donde w corresponde al vector columna de los pesos relativos que se obtienen realizando el promedio de cada renglón de la matriz de comparación normalizada. La normalización de la matriz se realiza dividiendo cada uno de los elementos de cada columna por la suma de todos los elementos de la misma. El valor de λ_{\max} se obtiene al sumar el vector columna correspondiente a la multiplicación de la matriz de comparación original con el vector columna de pesos relativos.

$$\lambda_{\max} = \sum_i^n Aw \quad (3)$$

Debido a que las comparaciones se realizan subjetivamente, se requiere de un índice de consistencia para medir la coherencia de quien realiza las calificaciones. El índice de consistencia se calcula de la siguiente manera:

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

La relación de consistencia CR se calcula de la siguiente forma:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (5)$$

En donde el ratio de inconsistencia RI es igual a:

$$RI = \frac{1.98(n-2)}{n} \quad (6)$$

El ratio de consistencia también puede ser tomado como RI promedio tal como lo plantea Saaty (2000).

Order of matrix	1,2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI value	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Una regla general que se usa para decir que una matriz de comparación tiene un nivel de consistencia aceptable es que la relación de consistencia (CR) sea menor o igual a 0.1. Sin embargo en ocasiones se han aceptado relaciones de consistencia superiores.

2.4.3. Método de la Entropía

El método de la Entropía fue desarrollado por Zeleny (1982) como un método objetivo de asignación de los pesos en función de la matriz de decisión sin que afecte la preferencia del decisor. Según Romero y Pomerol (1997) la importancia relativa del criterio j en una situación de decisión, medida por su peso w_j , esta directamente relacionada con la cantidad de información intrínsecamente aportada por el conjunto de las alternativas respecto a dicho criterio. Cuanta mayor diversidad haya en las evaluaciones de las alternativas mayor importancia deberá tener dicho criterio.

La medida de esta diversidad se basa conceptualmente en el concepto de la entropía en un canal de información planteado por Shannon (1949).

El procedimiento es el siguiente:

- Tomamos las evaluaciones a_{ij} ($i=1,m$)($j=1,n$) ya normalizadas como fracción de la suma $\sum_i a_{ij}$ de las evaluaciones originales de cada criterio j .

- Se calcula la entropía (E_j).

$$E_j = -1/\log m \sum_i a_{ij} \log a_{ij} \quad (7)$$

donde m = Numero de alternativas en la matriz de evaluaciones normalizadas y a_{ij} = Criterios o atributos normalizados.

- Se calcula la diversidad del criterio (D_j).

$$D_j = 1 - E_j \quad (8)$$

- Se calcula el peso normalizado de cada criterio (W_j).

$$W_j = D_j / \sum_j D_j = 1.0 \quad (9)$$

2.4.4. Método Pres

El método Pres fue desarrollado por Gómez y otros (1991) y su objetivo es determinar la alternativa más favorable comparando las alternativas posibles. Establece las relaciones entre alternativas para todos y cada uno de los criterios establecidos para el estudio de soluciones. De esta manera el método promulga la elección óptima en aquella alternativa que es mejor que las demás en el mayor número posible de criterios y es la que tiene menores debilidades frente a las restantes. Su sencillo enfoque conceptual lo hace fácilmente replicable y su desarrollo es el siguiente:

- Establecer los criterios y pesos específicos: c_j y p_j .
- Valoración de criterios para cada una de las alternativas: x_{ij} .
- Determinación de la matriz de valoración

Criterio	C1	C2	(...)	C_j	(...)	C_N
PESO	P_1	P_2	...	P_j	...	P_N
Alternativa 1	$G_1(1)$	$G_2(1)$	...	$G_j(1)$	...	$G_N(1)$
(...)
Alternativa X	$G_1(x)$	$G_2(x)$	...	$G_j(x)$	...	$G_N(x)$
(...)

Alternativa M	$G_1(M)$	$G_2(M)$...	$G_j(M)$...	$G_N(M)$
---------------	----------	----------	-----	----------	-----	----------

- Se normalizan los valores de los pesos de los criterios

$$P_j = \frac{P_j}{\sum_{j=1}^N P_j} \quad (10)$$

- Se transforman las escalas de evaluación de los criterios para que sean comparables

$$g_j = \frac{G_j(x)}{G_{j\max}} \quad (11)$$

- Determinación de la matriz de dominancia. El método se basa en comparar cada iniciativa con todos los demás. La comparación binaria de una iniciativa "a" con otra "b" se realiza para cada criterio y se obtiene la Matriz de Dominación. La matriz responde a la siguiente expresión:

$$T_{(i,j)} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \in D}}^N P_k [g_{(i)} - g_{(j)}] \quad (12)$$

- Finalmente se calculan los valores D_i como la suma de las filas de la matriz de dominancia y d_i como suma de la columnas correspondientes. Se concluye determinando, para cada alternativa, de la relación entre D_i y d_i siendo la solución optima igual a la expresión:

$$Max \left[\frac{D_i}{d_i} \right]_{i=1}^{i=N} \quad (13)$$

2.4.5. Análisis de dominancia y satisfacción

Para el modelo presentado en el siguiente capítulo se realizará un pre análisis de dominancia en el cual se evaluará el porcentaje de dominancia que tiene cada alternativa A_i sobre las demás alternativas A_n en relación a cada criterio de decisión seleccionado

para el problema. Lo anterior con la intención de trabajar con óptimos de Pareto eliminando así la posibilidad de tomar en cuenta una alternativa dominada por una o más de sus alternativas pares. (Romero y Pomerol 1997)

2.4.6. Lógica difusa en la toma de decisiones

El concepto de difuso fue planteado por Zadeh (1965) y según García (2009) permite la pertenencia de un elemento a un conjunto de forma parcial, y no de manera absoluta como establece la teoría de conjuntos clásica, es decir, admitiendo pertenencias valoradas en el intervalo [0,1] en lugar de en el conjunto {0,1}. La lógica difusa se ha utilizado para resolver los problemas en la industria minera como puede consultarse en Bitarafan y Ataei (2004). En la construcción del modelo de toma de decisión descrito en el siguiente capítulo del presente documento, no se toma en cuenta la lógica difusa como solución al problema de selección del método extractivo, debido a que el modelo busca ser fácilmente entendible y replicable por parte de la institucionalidad minera y por parte de los empresarios de la pequeña y mediana minería, como segunda consideración el modelo plantea que la importancia en selección del método extractivo radica en la escogencia de los decisores ya que estos al final son quienes dan validez al modelo aplicado, por lo que se utiliza la agregación de juicios de valor mediante la media ponderada normalizada, la cual se aplica mediante el software expert choice ®.

2.4.7. Método Yager

Según Sousa y Kaymak (2002) en el año 1978, Yager, R. propuso un modelo multiatributo difuso de toma de decisiones, donde se tiene un conjunto de alternativas $A_i = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$ y un conjunto de criterios $Z = \{C_1, C_2, C_3, \dots, C_n\}$. En orden de comparar las alternativas, debe ser posible evaluarlas en diferentes criterios. Esto implica que una función g_j puede especificarse para cada criterio de tal forma que la ecuación 14 describe los valores que toman las alternativas para cada criterio.

$$\bar{g}_j: A \rightarrow x_j, \quad j = 1, \dots, n \quad (14)$$

La variable x , es el dominio sobre el cual se define la forma variable del criterio j . La selección de los criterios genera la estructura del problema de decisión y se debe

determinar cuidadosamente por el decisor mediante el estudio de los factores que tienen influencia sobre el resultado de la decisión. Los valores de pertenencia μ_{ij} para cada alternativa a_i y cada criterio C_j pueden ser obtenidos usando funciones de pertenencia que representan criterios difusos. Los valores de pertenencia indican en cuanto una alternativa satisface a un criterio particular. La información que refleja el juicio de valor se puede resumir en la matriz de evaluaciones:

$$\begin{matrix} a_1 & C_1 & \dots & C_n \\ \vdots & \left(\begin{matrix} \mu_{11} & \dots & \mu_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{m1} & \dots & \mu_{mn} \end{matrix} \right) & & \end{matrix} \quad (15)$$

Cuando una función de pertenencia no se puede especificar explícitamente debido a datos subjetivos o difíciles de medir, los valores de pertenencia μ_{ij} pueden ser determinados directamente por el decisor y se introducen en la matriz de evaluación.

Las funciones de pertenencia son dadas por la ecuación:

$$\mu_j: x_j \rightarrow [0,1], \quad j = 1, \dots, n. \quad (16)$$

Se evalúa la pertenencia de las alternativas al conjunto difuso; el conjunto difuso F_j se define en el conjunto A de alternativas. La función de pertenencia de F_j viene dada por:

$$\mu_{F_j}(a_i) = \mu_j(\bar{g}_j(a_i)) = \mu_{ij}, \quad i = 1, \dots, m. \quad (17)$$

Cada columna de la matriz de evaluación representa un conjunto difuso F_j . El problema de decisión es la agregación de los conjuntos difusos F_j , $j=1, \dots, n$ dentro del promedio de decisión difusa F . La matriz de evaluación fija la estructura del problema de decisión.

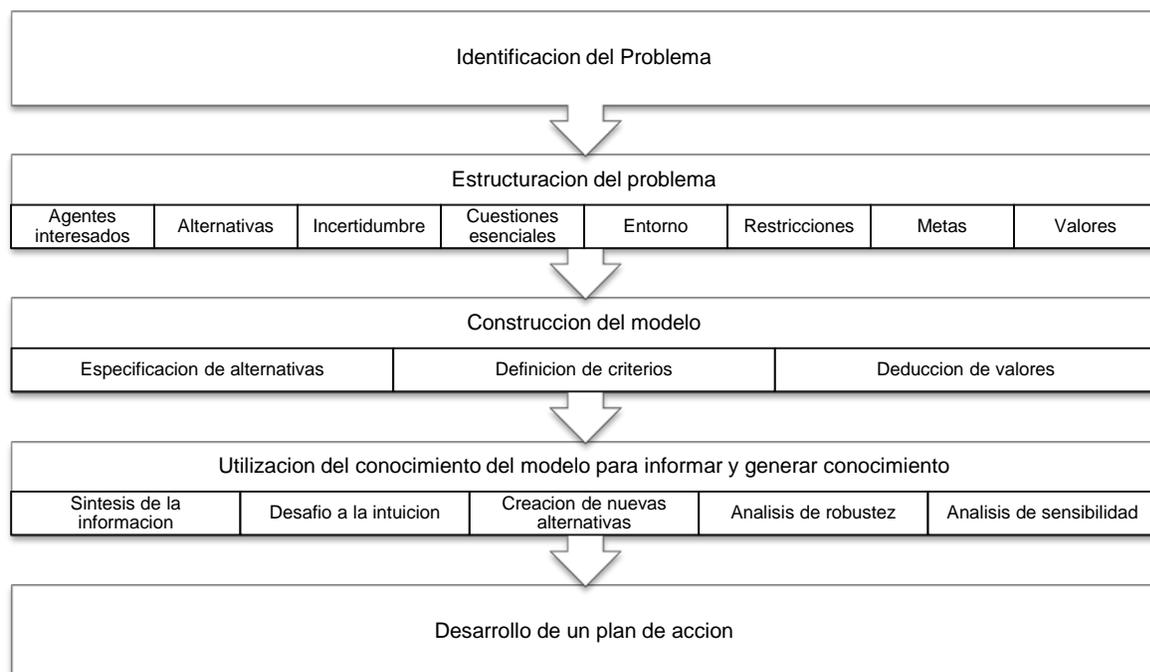
3. Metodología y desarrollo de la investigación

En este capítulo se describen las herramientas metodológicas utilizadas, el proceso de toma de decisión, el papel del analista y los decisores en cada etapa del proceso para al finalizar presentar un modelo de toma de decisión basado en procesos de análisis jerárquico, entropía y PRES.

3.1. Herramientas Metodológicas

Se toma como método de solución para el problema de decisión presente en la selección del método extractivo, la forma de solución general de MCDA según Belton y Stewart (2002) (**Figura 3-1**) que inicia con la etapa de identificación del problema a solucionar, donde se establece la meta o el objetivo que se persigue con el modelo a realizar, la segunda etapa consiste en la estructuración del problema, la tercera que consiste en la presentación de la información y finalmente el plan de acción.

Figura 3-1: Proceso de Toma de decisiones Tomado de (Belton y Stewart 2002)



3.2. Metodología desarrollada

La metodología propuesta como ayuda para toma de decisiones en la selección del método extractivo es basada en la propuesta metodológica planteada en Cortes y otros (2009), adaptada en Romero y otros (2012) (ver **Figura 3-3**) en la cual sigue la lógica de la **Figura 3-2**. Se propone el uso del método UBC desarrollado por Miller y otros (1995) para reducir las alternativas y utilizar solamente Alternativas viables técnicamente. Entendiendo la importancia que tiene esta decisión sobre todo el proyecto minero se plantea la utilización de un método basado en el criterio de expertos junto con otro método basado en información cuantitativa reflejada en una matriz de decisión. Para el método basado en el criterio de expertos se propone el uso de PAJ desarrollado por Saaty (1980) el cual se basa en el concepto de la asignación de pesos a los criterios mediante el cálculo del eigen vector dominante de una matriz de comparaciones binarias. Este método es ampliamente aceptado por contar con una solida fundamentación teórica la cual puede corroborarse en Harker y Vargas (1987). Por otra parte se plantea también el uso conjunto de la metodología de comprobación por entropía y Pres planteada por Romero y otros (2012) la cual permitirá evaluar las alternativas sin la variación que supone las preferencias de cada decisor.

Figura 3-2: Esquema general de solución

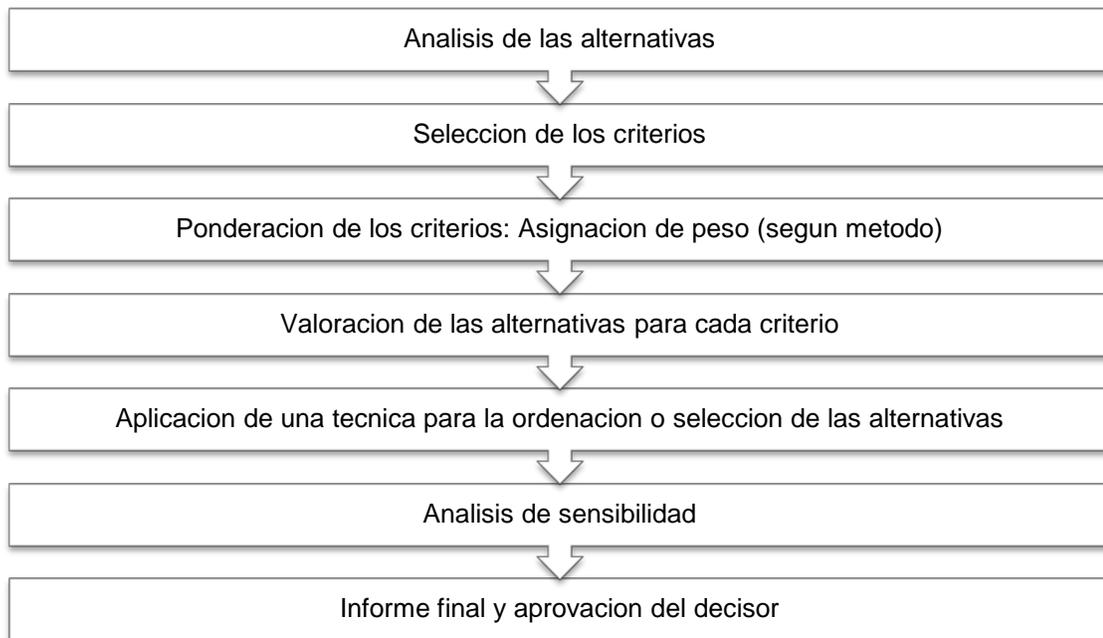
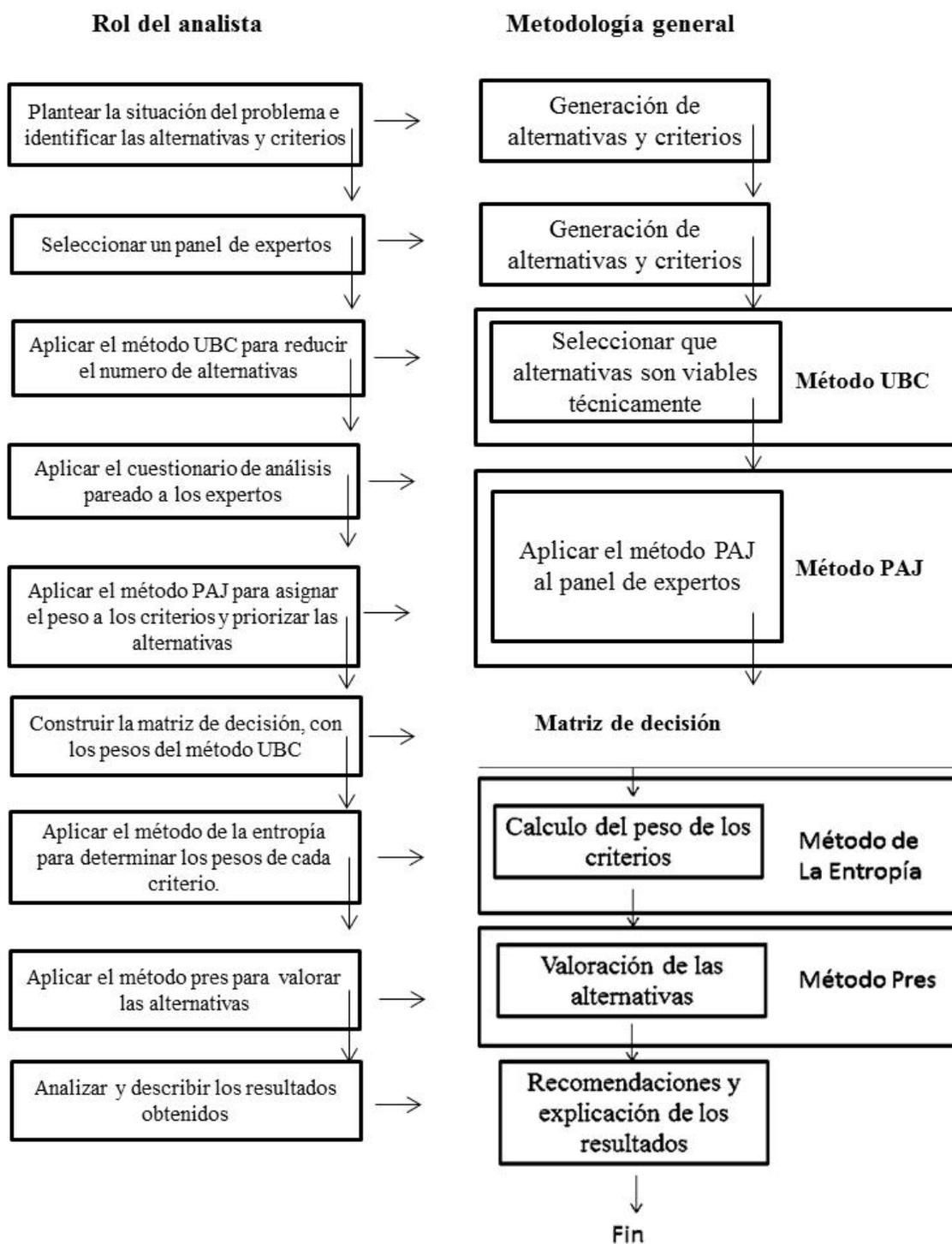


Figura 3-3: Propuesta metodológica para resolución del problema de selección del método extractivo

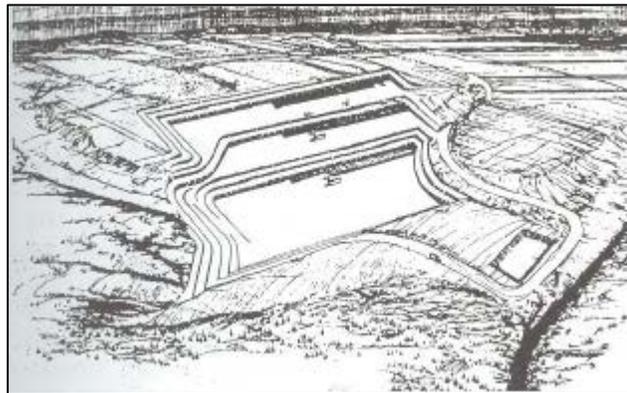


3.2.1. Análisis de alternativas

Se tomaran como alternativas validas las cuales den una ponderación positiva al aplicar la técnica UBC (1995) lo que permite eliminar alternativas que no son viables técnicamente y deja únicamente alternativas aplicables. Si bien hay una buena cantidad de métodos extractivos, solo se consideraran 9 de los 10 métodos descritos en Nicholas (1992) y en Hartman (1987). A continuación presentamos un resumen de las alternativas según Arteaga (1997), Hustrulid y Kuchta (2006), Botin, Guzman y Smith (2011), Darling (2011), Bise (2003), Ortiz (2001).

Alternativa 1 Cielo Abierto (*Open pit*): La técnica de explotación a cielo abierto es la más común dentro de los métodos de explotación superficial. Los parámetros de relación de descapote y ángulo del talud son críticos en la determinación de si es aplicable este método en particular. La explotación a cielo abierto por lo general se usa en minas de metales, de carbón y depósitos de materiales de construcción como de piedra caliza y granito.

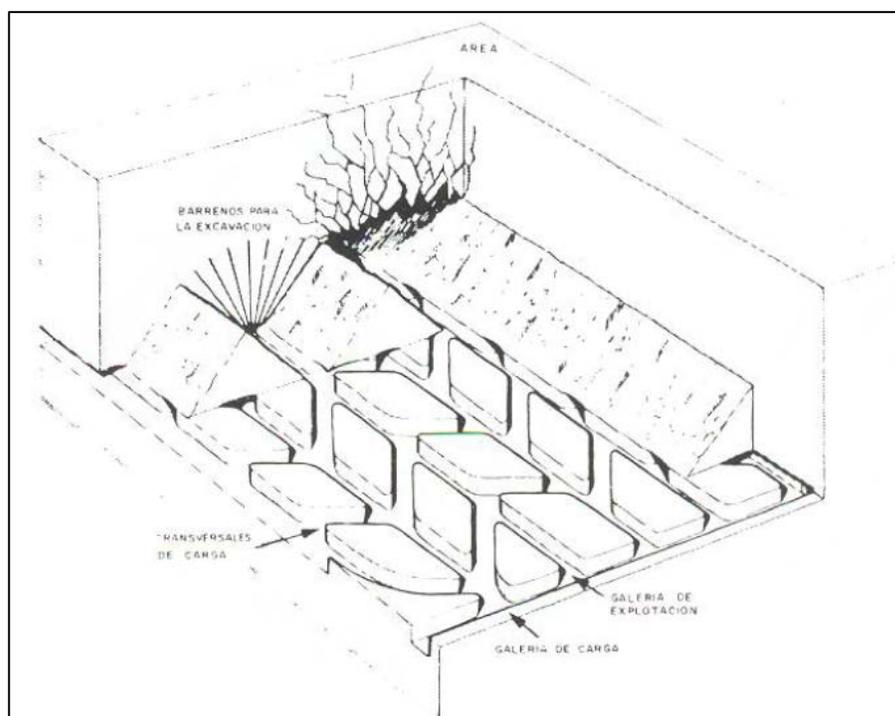
Figura 3-4: Explotación a cielo abierto. Tomado de Arteaga (1997)



Alternativa 2 Hundimiento de bloques (*Block caving*): Consiste en dividir el yacimiento en grandes bloques de sección cuadrangular de varios miles de metros cuadrados. Cada bloque se socava practicando una excavación horizontal con explosivos en su base. El mineral queda sin apoyo y se fractura gracias a las tensiones internas y efectos de la gravedad que actúan progresivamente afectando a todo el bloque. El mineral se extrae mediante conos tolva y piqueras, cargándose y transportándose

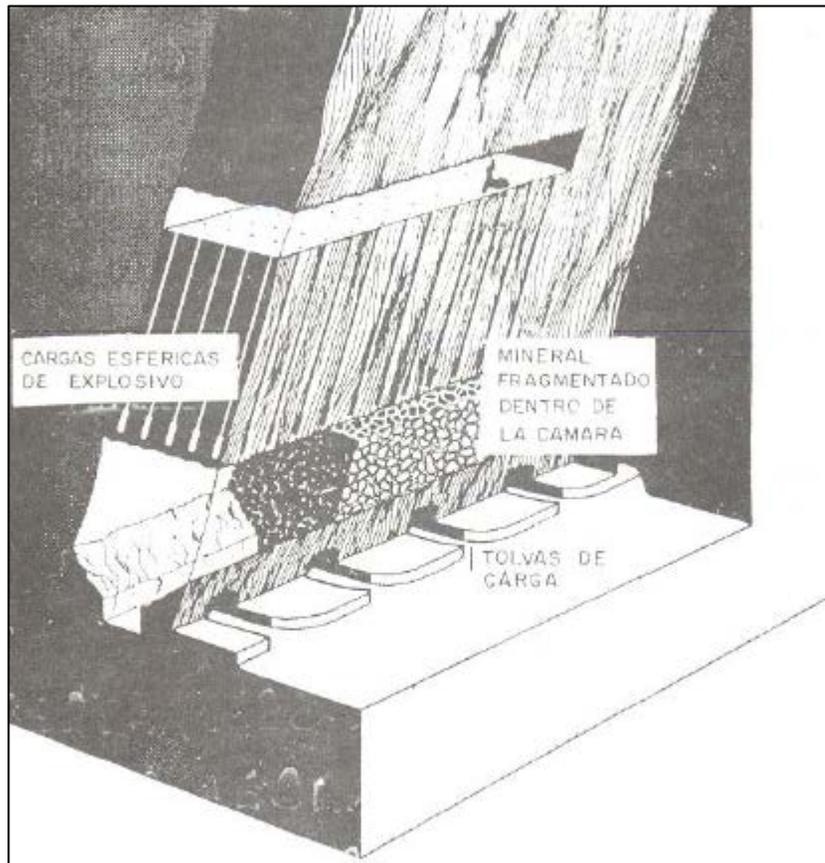
mediante palas de neumáticos a lo largo de las galerías de transporte inferiores. Los yacimientos donde se aplica deben ser de gran potencia y extensión, con pocas intercalaciones de estéril y ramificaciones. Este método debe presentar condiciones geomecánicas adecuadas para el hundimiento. Este método presenta ventajas económicas, pues los costes de arranque y sostenimiento son relativamente bajos y requiere poca mano de obra.

Figura 3-5: Explotación hundimiento por bloques. Tomado de Arteaga (1997)



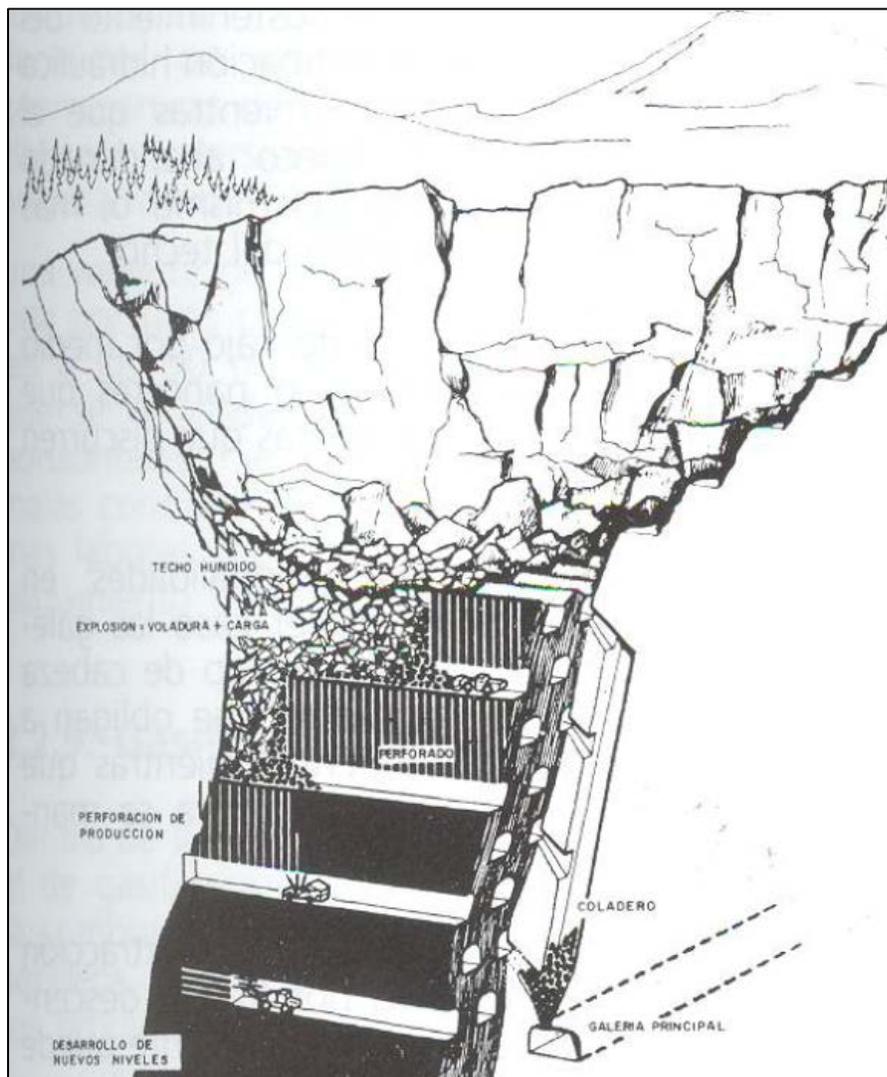
Alternativa 3 Cámaras por Subniveles (*Sublevel Stopping*) Se aplica a yacimientos verticales o con fuerte pendiente y que genéricamente se clasifican en cráteres invertidos, barrenos largos y barrenos de abanico. Todos estos métodos tienen en común realizar la explotación desde los subniveles y niveles horizontales a intervalos verticales fijos, abriendo los subniveles dentro del yacimiento entre los niveles principales.

Figura 3-6: Explotación por subniveles por el método de barrenos largos. Tomado de Arteaga (1997)



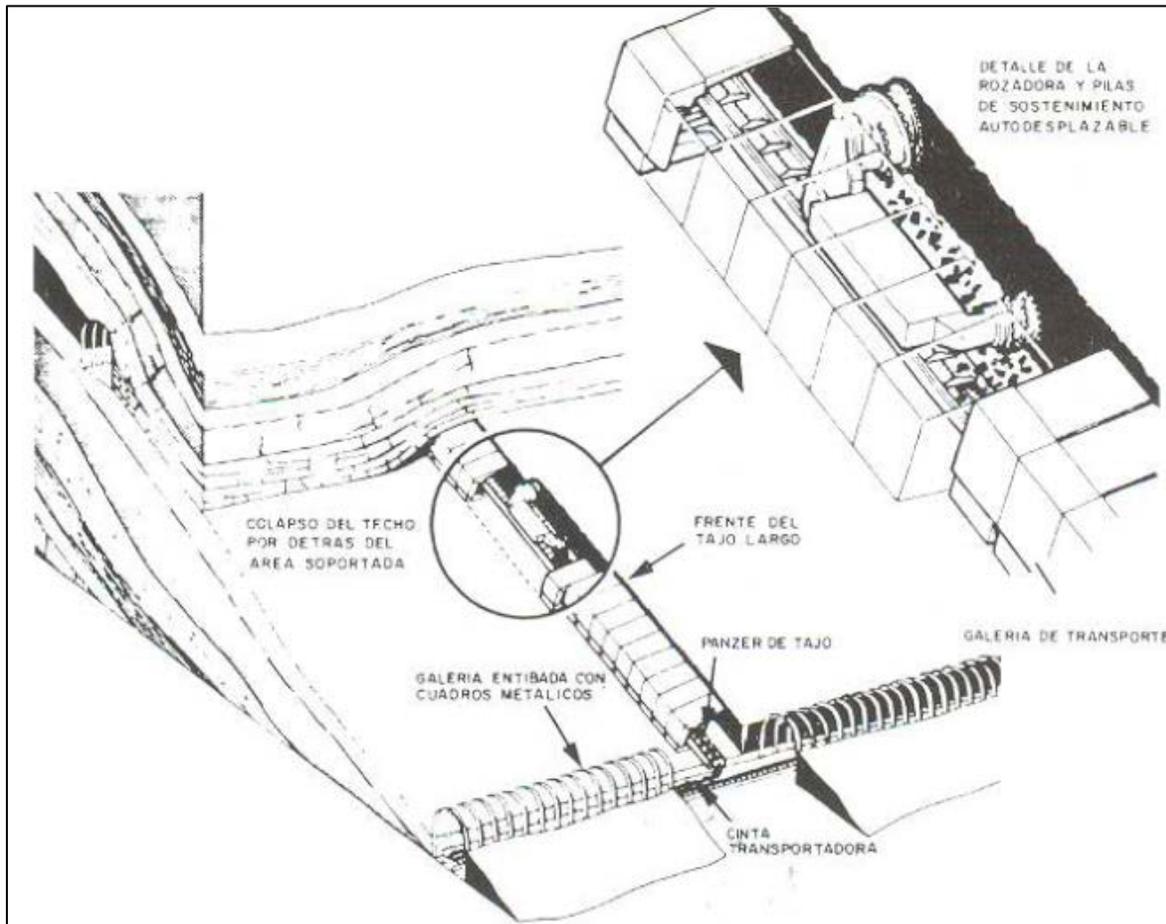
Alternativa 4 Hundimiento por subniveles (sublevel caving) Consiste en la división del yacimiento en niveles y estos a su vez, en subniveles que se van extrayendo en sentido descendente. La distancia entre subniveles oscila entre los 8 y 15 m y cada uno de ellos se conforma de conjunto de galerías que cubren la sección completa del mineral. Desde las galerías de nivel se perforan barrenos en abanico en sentido ascendente. Las secciones perforadas en las galerías adyacentes se vuelan de techo a muro constituyendo un frente recto. En los subniveles inferiores y superiores se trabaja de la misma manera, pero manteniendo un desfase entre los frentes. El mineral fragmentado cae por gravedad dentro de las galerías desde las cuales se carga y transporta hasta una piqueta que lo descarga sobre una galería principal. El techo estéril se fragmenta y se hunde de forma gradual dentro de los huecos dejados por el mineral. Este método se aplica en depósitos masivos, donde tanto el techo estéril como el mineral se fragmentan y hunden fácilmente.

Figura 3-7: Explotación hundimiento por subniveles. Tomado de Arteaga (1997)



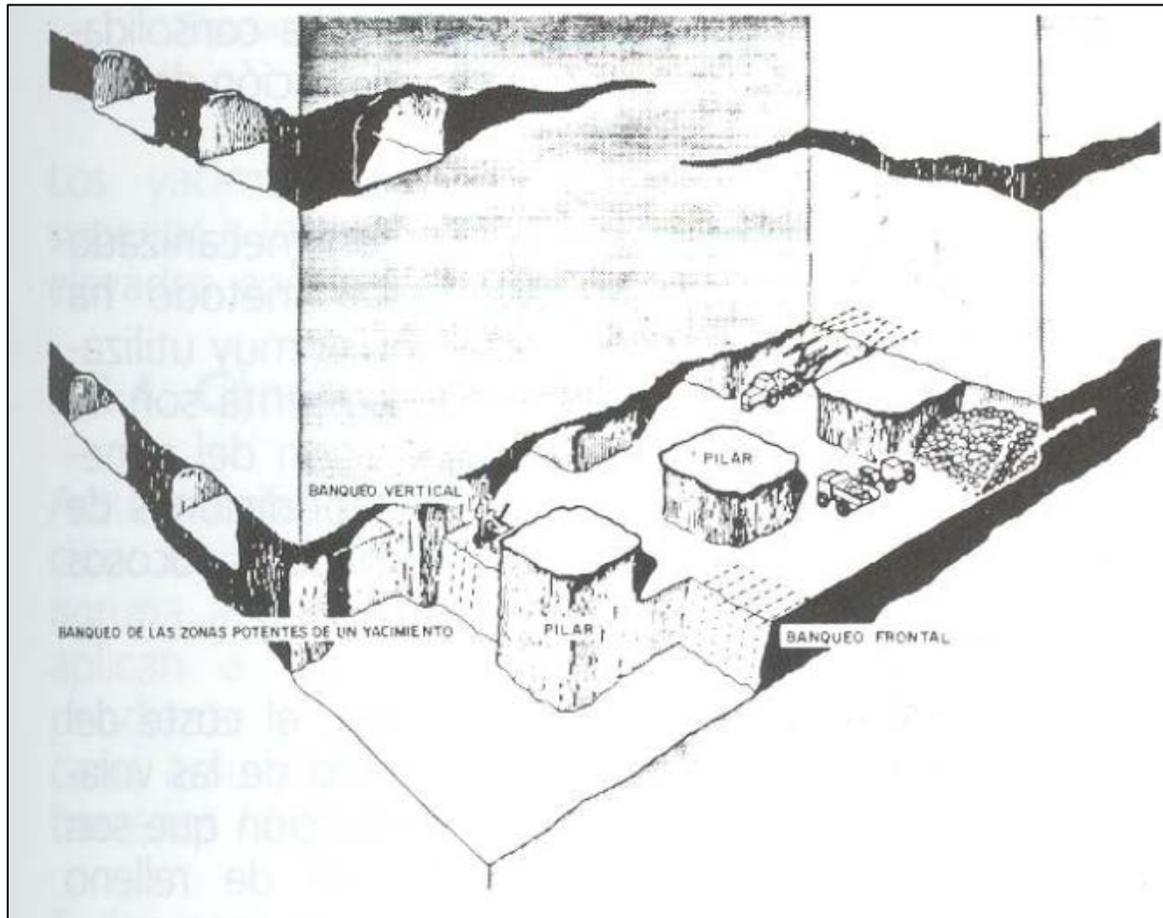
Alternativa 5 Tajos Largos (longwall) Este método puede utilizarse en la explotación de yacimientos estratificados delgados, de espesores uniformes e inclinaciones preferentemente de pequeñas a moderadas. Inicialmente se aplicó en carbón y, posteriormente se ha extendido a otros minerales duros como las vetas auríferas donde el arranque se efectúa por perforación y voladura. El mineral se extrae del tajo por medio de transportadores, cadenas o panceres que descargan en cintas transportadoras.

Figura 3-8: Explotación por tajo largo. Tomado de Arteaga (1997)



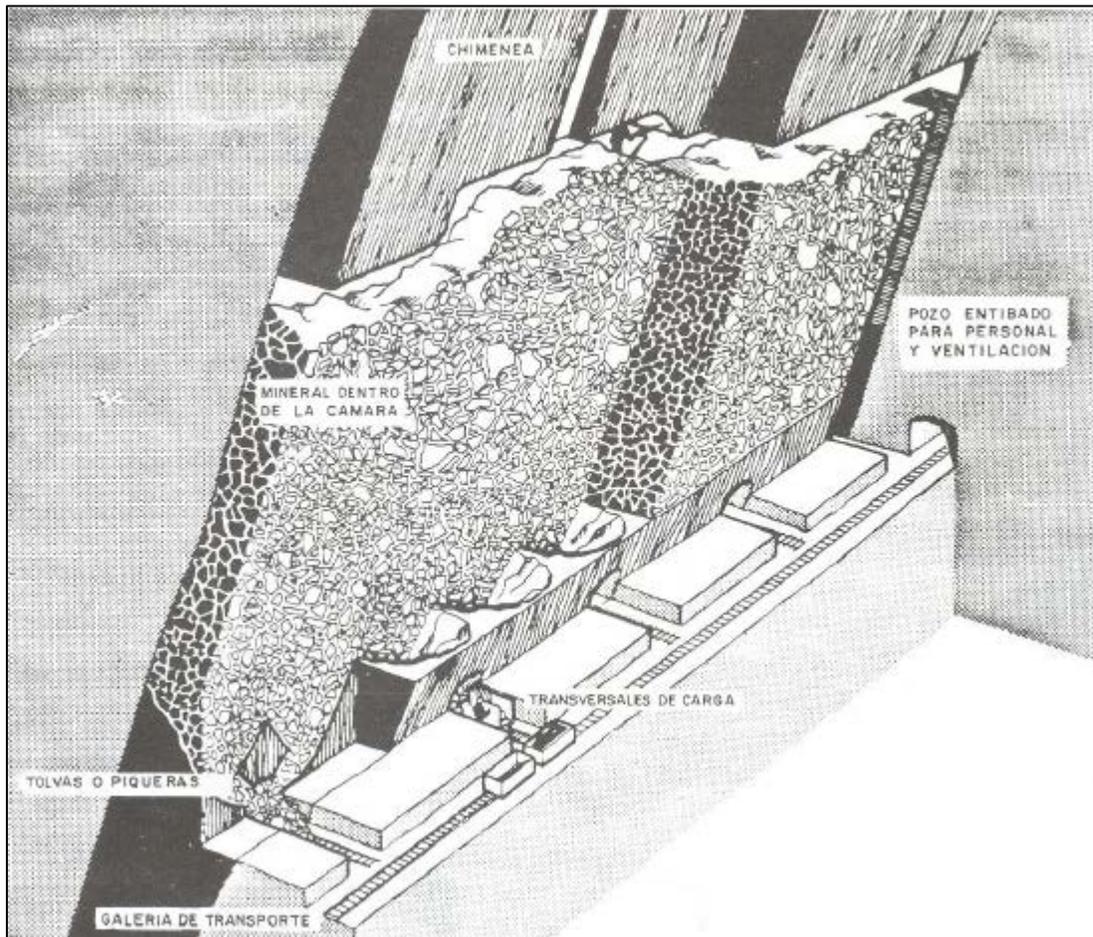
Alternativa 6 Cámaras y pilares (*room and pillar*): En este método se crea un conjunto de cámaras dejando pilares para sostener el techo. Las dimensiones de las cámaras y la sección de los pilares dependen de las características del mineral, de la estabilidad de los hastiales, del espesor de recubrimiento y de las tensiones sobre la roca. En este método los pilares de mineral pueden ser recuperados o ser simplemente abandonados. El depósito debe ser lo mas horizontal posible y el grosor del depósito no debe ser mayor a 150 pies (50 m), este es el principal factor que incide en la elección del método. El tamaño de las cámaras y de los pilares se determina basándose en la profundidad y la fuerza del suelo.

Figura 3-9: Explotación por cámaras y pilares. Tomado de Arteaga (1997)



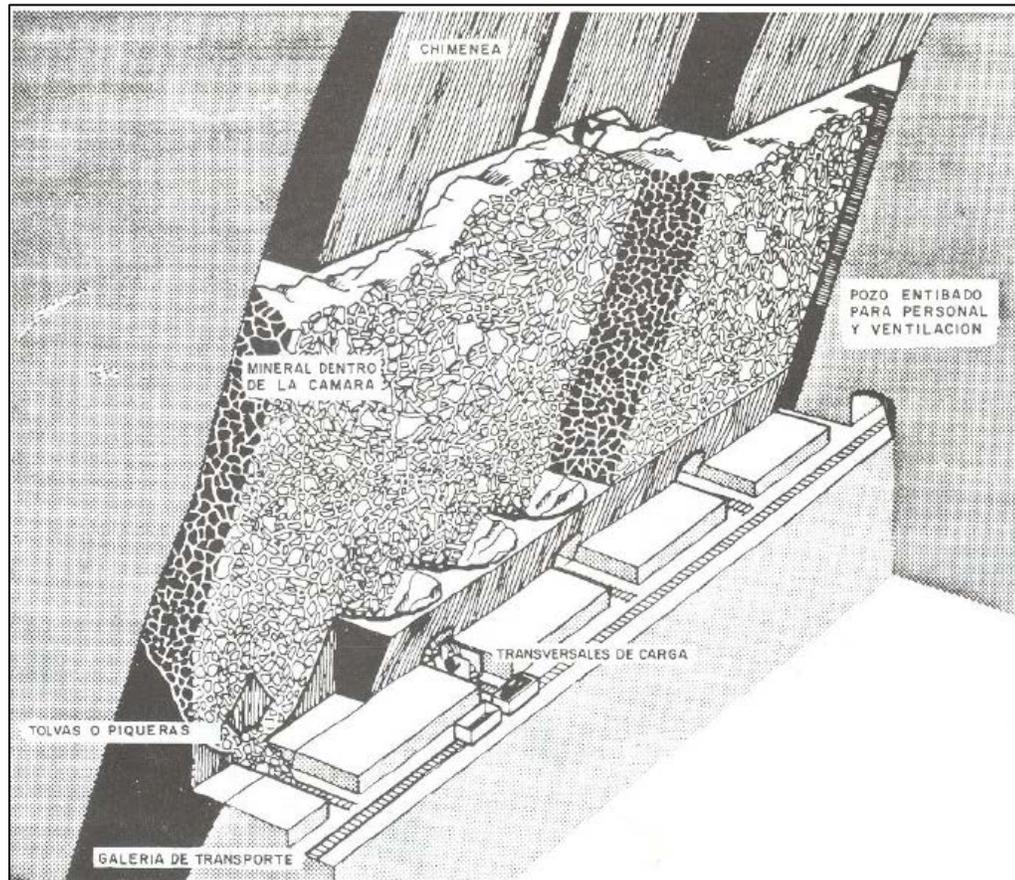
Alternativa 7 Cámaras almacén (*Shrinkage Stopping*): En el método de explotación por almacenamiento provisional o cámaras almacén, el mineral es cortado en tajos horizontales, comenzando de la parte baja y avanzando hacia arriba. El minado por almacenamiento provisional es un método bastante utilizado en vetas con buzamientos pronunciados donde el mineral es lo suficientemente resistente como para mantener sin soporte tanto las rocas encajonadas como el techo del tajeo. Para un minado eficiente el grado del depósito debe tener un ángulo de inclinación mayor de 60 grados.

Figura 3-10: Explotación por cámaras almacén. Tomado de Arteaga (1997)



Alternativa 8 Corte y Relleno: El mineral se arranca por rebanadas horizontales, en sentido ascendente, desde la galería de fondo. Una vez volado se extrae completamente de la cámara, a través de unos coladeros, efectuándose a continuación el relleno del hueco creado con estériles, con lo que se consigue crear una plataforma de trabajo estable y el sostenimiento de los hastiales.

Figura 3-11: Explotación por corte y relleno. Tomado de Arteaga (1997)



Alternativa 9 Método de Entibación con Cuadros. (Fortificación de madera):

Consiste en el sostenimiento con madera, disponiendo esta en forma de paralelepípedo rectos donde los elementos verticales o estemples soportan las presiones verticales, los horizontales o codales las presiones de los hastiales y los cuatro elementos de unión restantes rigidizan el conjunto. Esta técnica de fortificación se emplea preferentemente en yacimientos de rocas débiles e intensamente fracturadas, cuando el mineral se presenta con formas irregulares, con ramificaciones y contactos mas definidos. Si los esfuerzos que deben soportar estos elementos de madera son muy elevados, el sostenimiento se debe completar con un relleno, normalmente hidráulico, dejando pasos y huecos para la ventilación. Este método consume una gran cantidad de madera y requiere mucha mano de obra, por lo que actualmente casi esta en desuso y solo se justifica cuando el mineral es muy rico.

3.2.2. Selección de los criterios de decisión

La selección del método extractivo para un yacimiento difícilmente es igual a otro ya que las condiciones del depósito y el tipo de mineral necesita de un análisis particular, por esto mismo pueden ampliarse o reducirse los criterios y las alternativas en un caso específico. Se puede ver un análisis en detalle de cada alternativa y criterio en Hartman (1987) donde se exponen las diferentes alternativas de extracción y los criterios que influyen a favor y en contra de cada una de ellas. A continuación se resumen los planteamientos de Hartman (1987) y (2002) con respecto a cada uno de los criterios y sub criterios que se tendrán en cuenta en este caso de selección.

Criterio1. Características espaciales del depósito. Son probablemente los más determinantes, debido a que ellos deciden ampliamente si se escoge minería a cielo abierto o minería subterránea y la tasa de producción, el manejo del material y el diseño de la mina en el depósito.

Sc1. Tamaño (especialmente altura o espesor)

Sc2. Forma (tabular, lenticular, masivo, irregular)

SC3. Posición (Inclinación o caída)

Sc4. Profundidad

Criterio2. Condiciones geológicas e hidrogeológicas y propiedades Geotécnicas (Mecánica de rocas y suelos). Las características geológicas del depósito mineral y de los materiales adyacentes al depósito influyen la selección del método extractivo. Especialmente en los métodos subterráneos donde se necesitan parámetros de control de la excavación en el subsuelo. La hidrogeología afecta el drenaje y los requerimientos de bombeo en superficie y subterráneos. La mineralogía regula los requisitos de procesamiento del mineral. Las propiedades mecánicas de los materiales que comprimen el depósito y la roca in situ (y suelo si es considerable su espesor) son factores clave en la selección del equipo a utilizar en minería superficial y a su vez la cantidad de clases de métodos si esta es subterránea (auto soportada, no soportada, soportada y escavada). Una descripción detallada de los mismos puede encontrarse en Hartman y Mutmansky (2002).

- Sc5. Distribución
- Sc6. Rock mass ratings (RMR)
- Sc7. Rock substance strength (RSS)

Criterio 3 Consideraciones económicas. Al final, estas consideraciones determinan el éxito de una empresa minera. Estos factores gobiernan la elección del método minero porque afectan la salida de material, la inversión, el flujo de caja, el periodo de retorno de la inversión y de beneficio.

- Sc8. Tasa de desempeño
- Sc9. Producción (Producción por unidad de tiempo)
- Sc10. Inversión de Capital
- Sc11. Productividad (toneladas por turno de empleado)
- Sc12. Costos comparativos de los métodos de minería posibles.

Criterio 4. Factores Tecnológicos La mejor combinación entre el terreno y el método que se intenta escoger. El método escogido puede tener impactos negativos en el mineral extraído en cuanto a su uso posterior (procesamiento, fundición)

- Sc13. Recuperación de la mina (porción del depósito extraído actualmente)
- Sc14. Dilución (cantidad de desperdicios producidos con el mineral)
- Sc15. La flexibilidad del método con el cambio de condiciones
- Sc16. Selectividad del método para distinguir el mineral y los residuos

Criterio 5. Consideraciones ambientales ambientales no sólo el ambiente físico, sino el clima social, político, económico.

- Sc17. Estabilidad de las aberturas
- Sc18. Subsistencia, o efectos en la superficie de excavación
- Sc19. Condiciones de salud y seguridad

Al ser esta una propuesta académica se toman los criterios y subcriterios como los más importantes para la selección del método extractivo según Hartman y Mutmanský (2002), utilizados también por Alpay y Yavuz (2009). Sin embargo pueden ser agregados otros como compensaciones ambientales por ejemplo. Para más detalles puede consultar <http://www.elespectador.com/impreso/opinion/columna-325354-compensaciones->

3.3. Estudio de caso

3.3.1. Selección del método extractivo para un yacimiento de carbón

Se realizara un estudio de caso, para lo cual se selecciona una empresa minera ubicada en el departamento de Norte de Santander que actualmente desarrolla actividades extractivas en una zona conocida como Cerro Tasajero, ubicada entre los municipios de Cúcuta y San Faustino, la extracción se realiza mediante el método de cámaras y pilares junto con transporte mediante bandas transportadoras y panzers (**Figura 3-12**).

Dicha empresa contrata los servicios de una firma extranjera para desarrollar la etapa de planeación y diseño minero aplicado a un nuevo yacimiento, mediante un estudio detallado la firma determino que el método extractivo mas adecuado era Tajo Largo. Pueden observarse imágenes de los proyectos mineros en las **Figuras 3-14 y 3-15**. A continuación se comprobara este resultado mediante el modelo propuesto anteriormente.

Figura 3-12: Distribución de la mina en superficie (diagrama desarrollado por el autor)

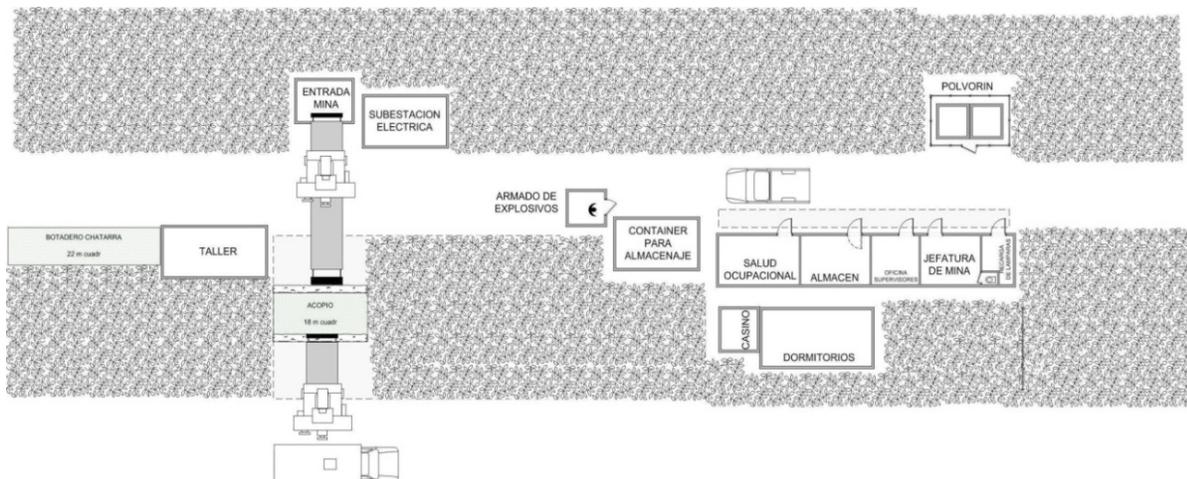


Figura 3-13: Explotación minera actual (Fotografías tomadas por el autor)

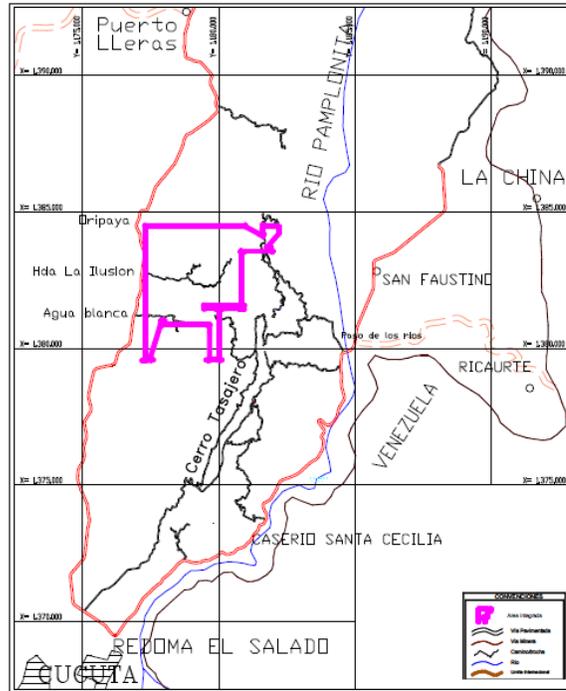


Figura 3-14: Proyecto Minero en Construcción. (Fotografías tomadas por el autor)



Se quiere escoger la alternativa de extracción mas adecuada para un yacimiento de carbón ubicado en el costado occidental del cerro Tasajero, departamento de Norte de Santander, Colombia (**Figura 3-15**). Este yacimiento fue estudiado detenidamente por un grupo interdisciplinar de Geólogos e Ingenieros (entre otros), por medio de estos se obtienen unos parámetros técnicos como resultado del estudio (**Tabla 3-1**).

Figura 3-15: Ubicación del nuevo proyecto minero (Tomado de Plan de trabajos y obras Oripaya 2012)



Según el Plan de trabajos y obras Oripaya (2012) El área integrada comprende una extensión superficial de 1387 Ha y 9.357 m², se localiza en las planchas IGAC 88-I-D, 88- I –C. Se localiza en el Municipio de Cúcuta, Corregimiento Buena Esperanza, veredas Oripaya y Agua Blanca, en el costado Occidental del denominado Cerro Tasajero al Norte de la ciudad de Cúcuta. El cerro Tasajero esta limitado al Oriente por el Río Pamplonita y al Occidente por la Quebrada La Floresta, cursos de agua que hacen parte de la vertiente hidrográfica del Río Catatumbo. Las corrientes que drenan el Cerro Tasajero confluyen sobre el Río Pamplonita y la Quebrada La Floresta.

Los caños y quebradas que confluyen sobre el Río Pamplonita muestran un marcado control estructural con dirección Oeste – Este, destacándose las quebradas La Rinconada, La Corralera, La Periquera, El Naranjito y la Palmita. El drenaje que confluye sobre la Quebrada La Floresta es de tipo dendrítico, destacándose las Quebradas La Curva, La Jabonosa, Oripayera, Agua blanca y La Bejuca. Los caños y quebradas permanecen secos la mayor parte del año con excepción de los periodos invernales.

El cerro Tasajero, y por tanto el área de integración, forma parte del flanco oriental de la cordillera oriental colombiana, presentando un relieve que va desde plano a abrupto, evidenciando el contraste litológico entre rocas duras y blandas; Las alturas varían desde los 125 m.s.n.m en el valle del Río Pamplonita y la Quebrada La Floresta, hasta los 800 m.s.n.m. en la cresta del cerro. En el área, las alturas varían desde los 125 m.s.n.m en el valle de la quebrada La Floresta hasta 650 m en la falda del Cerro tasajero.

Se accede al área por la carretera pavimentada Cúcuta – Puerto Santander; desde la glorieta El Salado en el Km. 15 en el sitio denominado Hacienda La ilusión parte un carreteable (Ver **Figura 3-16**) hacia el Este de 2.6 Km hasta la finca La Herradura, sitio de infraestructura minera. Ver **Figura 3-15**.

Figura 3-16: Carreteable La ilusión – La herradura, hacia la infraestructura minera



Los estudios del cerro Tasajero o zonas próximas y geológicamente relacionadas que pueden consultarse son los siguientes:

- Notestein (1944) describe la estratigrafía de las formaciones en el área de la Concesión Barco.

- Mejía (1980) en su informe “Áreas Carboníferas del departamento de Norte de Santander” describe de manera general la geología y los aspectos técnicos y económicos de cada una de las áreas.
- Geominas Ltda. (1974) en su informe “Estudio Geológico del Cerro Tasajero Cúcuta (Norte de Santander) definen los aspectos geológicos regionales para determinar su incidencia en la explotación.
- Ecocarbon Ltda. (1999) en su estudio “Normalización de reservas carboníferas del Departamento Norte de Santander” hace una actualización de la información geológica de las zonas carboníferas del Departamento, la cuantificación de las reservas y recursos y, complementa la caracterización de los carbones.

Los mapas geológicos de referencia para esta zona son los siguientes:

- El servicio Geológico Nacional (1967) Geología del cuadrángulo G-13 Cúcuta.
- Ingeominas (1994) Mapa Generalizado del Departamento de Norte de Santander.
- Ecopetrol (1995) Mapa Geológico Compilado de la cuenca del Catatumbo.

La descripción de la formación en la que se encuentra el manto analizado según el Plan de trabajos y obras Oripaya (2012) es la siguiente:

Formación Los Cuervos (Tplc): Las rocas predominantes hacia la base de esta formación son arcillolitas grises a oscuras que se interstratifican con areniscas grises claras finas y compactas, y donde se localizan las cintas y mantos de carbón que varían entre 0.10 y 2.0m de espesor. En la parte intermedia de la formación las arcillolitas pierden gradualmente su laminación y se interstratifican con limolitas arenosas; hacia el techo se presentan predominantemente areniscas finogranulares grises algo bandeadas de composición subarcósica y arcósica, intercaladas con limolitas.

Los carbones de esta formación no son de espesor ni continuidad lateral constante, por ello el espesor total de la formación es muy variable. Así mismo el número de mantos de carbón varía de un flanco a otro; Regionalmente, para el flanco Este del anticlinal se conoce la existencia hasta de cinco mantos de carbón, mientras que para el flanco Oeste

del anticlinal se conocen tres mantos, interpretando como mantos, los segmentos de carbón con espesor superior a 0.80m. El manto M20, en los dos flancos, ha sido intervenido por labores mineras, explotando gran parte de la línea de afloramiento. El espesor de esta formación es variable presentándose un mínimo observado de 140 metros hasta un máximo de 400 metros, siendo el espesor promedio de 300 metros. La columna estratigráfica regional puede verse en el **Anexo C**.

Algunas de las características del depósito pueden corroborarse en: Regiones y zonas con carbón en Colombia de Pulido y Mejía (1993) lo cual da validez a estos datos y permite su comprobación. Para la aplicación del método PAJ se contó con la participación de cinco decisores, dos de ellos geólogos y tres ingenieros de minas; con la finalidad de lograr una mayor consistencia en los resultados, se aceptan únicamente juicios de valor con un índice de inconsistencia menor al 10%, tal como sugiere Saaty (1980). Para la aplicación del método PAJ se utiliza el programa Expert Choice® el cual es ampliamente aceptado por la comunidad académica y ha sido utilizado para resolver variados problemas de decisiones utilizando este mismo método.

Para contar con la participación de los decisores se envía mediante correo electrónico una invitación a un panel de expertos conformado por veinte personas el cual cuenta con geólogos e ingenieros de minas expertos en diferentes temáticas de interés, tales como consideraciones ambientales, técnicas, geológicas, hidrogeológicas, diseño minero entre otras. Los decisores que participan en este estudio de caso son: *Jhony Ricardo Chavez*: Geólogo e Hidrogeólogo. Subgerente de la firma consultora ATG LTDA. *Mauricio Alfonso Rubio*: Geólogo y Magister en Gerencia de Proyectos Ambientales. Gerente de la firma consultora ATG LTDA. *Giovanni Franco Sepúlveda*: Ingeniero de minas, Doctor (c) en Ingeniería, Magister en Ciencias Económicas. Docente Facultad de Minas, Universidad Nacional Sede Medellín. *Jeison Alejandro delgado Jiménez*: Ingeniero de Minas Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. *Mario Fernando Quitian Hernandez*: Ingeniero de Minas Universidad Francisco de Paula Santander.

3.3.2. Descripción del depósito

La técnica de selección UBC se aplicara al Manto 20, el cual ha sido determinado anteriormente como el manto a explotar en el proyecto.

Manto M 20: Constituido por un segmento de carbón negro, fracturacubica a semiconcoidea, brillo vítreo, masivo; su espesor oscila entre 0.90 m y 2.10 m. Su respaldo inferior es una arcillolita carbonosa negra, masiva, moderadamente dura con espesor entre 0.7 m y 1.5 m; el respaldo superior es una arcillolita carbonosa negra, algo limosa con espesor entre 0.5 m y 0.70 m.

Vemos a continuación el resumen de los parámetros utilizados como criterios para aplicar esta técnica. (**Tabla 3-1**, **Tabla 3-2** y **Tabla 3-3**)

Tabla 3-1: Creado a partir de Plan de trabajos y obras Oripaya (2012)

PARAMETROS TECNICOS DEL MANTO 20 – ORIPAYA	
PARAMETRO	CALIDAD
Espesor	Entre 0.90 m y 2.10 m
Profundidad	600 m
Tipo	Tabular
Grado de distribución	Uniforme
Inclinación	Entre 12° y 20°
RSS General	Muy baja
RMR General	Entre 21 y 40

La litología contigua a M20 presenta una litología compuesta de arenisca, arcillolita y limolita, siendo su respaldo inferior una arcillolita carbonosa negra, masiva, moderadamente dura y su respaldo superior una arcillolita carbonosa negra, algo limosa se infiere de la **Tabla 3-2** que el valor de RSS en los dos casos es Muy Bajo, dato que se utilizara en la aplicación de la técnica UBC posteriormente.

Tabla 3-2: RSS valor medio de la resistencia de la roca intacta por carga puntual.
(Tomado de Plan de trabajos y obras Oripaya 2012)

RSS- Determinación del valor medio de resistencia de la roca intacta por carga puntual. Resistencia a la Compresión Simple (MPa) / Presión del recubrimiento (MPa)					
Litología	Promedio carga puntual Is(50) Kg/cm²	Promedio carga puntual Is(50) Mpa	Rango de comparación	Índice	Término descriptivo
General	16,5217	1,65217	<2	6	Resistencia muy baja
Arenisca	28,9062	2,89062	2 a 4	5	Resistencia baja
Arcillolita	9,307	0,9307	<2	6	Resistencia muy baja
Limolita	18,9224	1,89224	<2	6	Resistencia muy baja

Igualmente de la **Tabla 3-3** se extraen los valores de RMR para suelo y techo de M20 con una puntuación de 24, valor que según la clasificación de Be se entiende como Clase IV. Ver **Figura 3-17**

Tabla 3-3: RMR (Tomado de Plan de trabajos y obras Oripaya 2012)

RMR- Análisis de cada uno de los valores de acuerdo a su litología						
LITOLOGIA	VALORACION					Total
	Is(50)	RQD	Fisuras	Estado de las Fisuras	Presencia de agua	
General	4	13	5	4	0	26
Arenisca	7	13	5	4	0	29
Arcillolita	2	13	5	4	0	24
Limolita	4	13	5	4	0	26

Figura 3-17: Recomendaciones para excavación y sostenimiento según Bieniawski (1989)

CLASE	RMR	EXCAVACIÓN (PASE)	SOSTENIMIENTO		
			BULONES (Longitud en m)	HORMIGÓN PROYECTADO	CERCHAS METÁLICAS
I Muy buena	81-100	Sección completa (3 m)	Ocasionalmente	No necesario	No necesarias
II Buena	61-80	Sección completa (1-1.5 m). Sostenimiento terminado a 20 m del avance	Localmente en clave. L = 3 m. Espaciados a 2.5 m con mallazo ocasional	50 mm en clave donde sea necesario	No necesarias
III Media	41-60	Avance y destroza (1.5-3 m en avance) Sostenimiento empezado en el frente y terminado a 10 m del frente	Sistemáticamente en clave y hastial. L = 4 m. Espaciados 1.5 a 2.0 m. Mallazo en clave.	60-100 mm en clave. 30 mm en hastiales.	No necesarias
IV Mala	21-40	Avance y destroza (1.0-1.5 m en avance) Sostenimiento empezado simultáneamente con la excavación y hasta 10 m del frente	Sistemáticamente en clave y hastiales. L = 4 a 6 m. Espaciados a 1.0-1.5 m. Con mallazo.	100-150 mm en clave. 100 mm en hastiales.	Ugeras a medias, espaciadas a 1.5 m donde sea necesario
V Muy mala	1-20	Galeras múltiples. (0.5-1.5 m en avance) Sostenimiento simultáneo con la excavación. Hormigón proyectado inmediatamente después de la voladura.	Sistemáticamente en clave y hastiales. L = 5-6 m. Espaciados a 1.0-1.5 m. Con mallazo. Bulonar la contrabóveda.	150-200 mm en clave. 150 mm en hastiales. 50 mm en el frente.	Medias a pesadas, espaciadas a 0.75 m, con feno y longanizas donde sea necesario. Contrabóveda

3.3.3. Aplicación del método UBC

Basados en el resumen anterior, seleccionamos cada uno de los criterios de la técnica para asignar el peso numérico correspondiente (Tabla 3-4).

Tabla 3-4: Aplicación del método UBC al Manto 20 de Oripaya

1. Forma general	
Tabular	Dos dimensiones tienen muchas veces el mismo espesor, que no suele superar los 35m
2. Espesor del manto	
Muy estrecho	<3m
3. Inclinação	
Plano	<20 grados
4. Profundidad	
Profundo	>600m

5. Distribución	
Uniforme	El grado en cualquier punto del depósito no varía significativamente de la calificación media.
6. Rock mass ratings. Puntuacion según Bieniawski (1989)	
Débil	20-40
7. Rock substance strength (Uniaxial strength/Principal stress)	
Muy débil	<5

Habiendo determinado los criterios se le asigna a cada uno el peso correspondiente y se ordenan (**Tabla 3-5**). Para este propósito puede utilizarse la hoja de calculo MMS (Mining Method Selection) creada por el Grupo de investigación geo mecánica de University of British Columbia, disponible en <http://www.mining.ubc.ca/rock/activities.html>. Los valores de RMR y RMS para suelo y techo son extraídos de las **Tablas 3-2 y 3-3** como se explico anteriormente.

Tabla 3-5: Resultados del método UBC aplicado al Manto 20 de Oripaya aplicando la hoja de calculo MMS. Grupo de Investigación geo mecánica (2001)

Resultados Finales	
Cielo Abierto	-21
Tajo largo	42
Square Set	29
Cut and Fill	27
Top Slicing	20
Camaras y pilares	18
Tajeo por Subnivele	5
Block Caving	-17
Sublevel Caving	-22
Shrinkage Stopping	-35

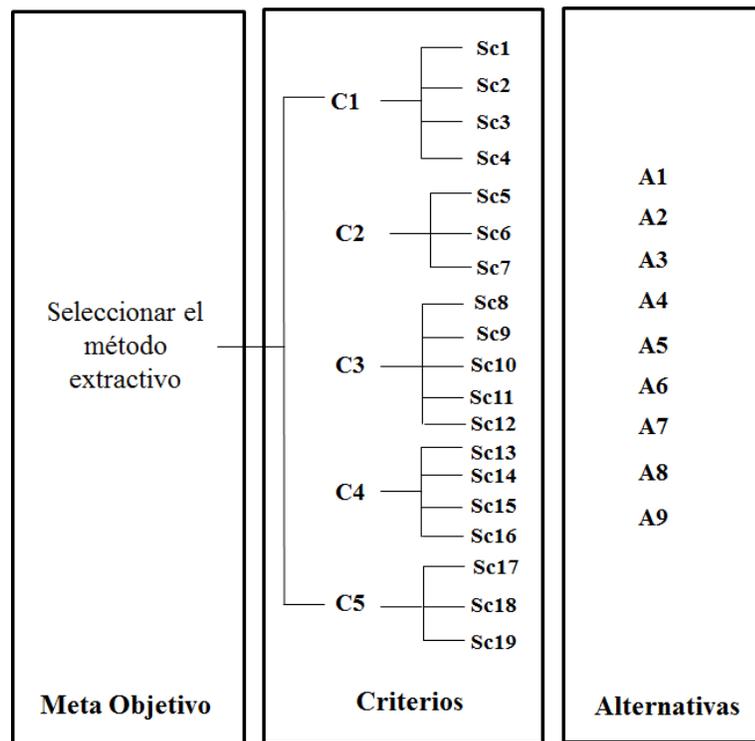
De acuerdo al ranking mediante la técnica UBC el mejor método de explotación es el Tajo largo o Longwall. Este método como se mostro anteriormente muestra la posibilidad

técnica de utilizar un método extractivo y se utiliza como etapa inicial de la metodología planteada para descartar algunas alternativas de extracción.

3.3.4. Construcción de la estructura jerárquica

La estructura jerárquica para la solución del problema de selección del método extractivo presenta 19 sub criterios agrupados en 5 criterios de selección, para la aplicación del método PAJ se usaran los 5 criterios de selección en los que se agrupan los sub criterios (Figura 3-18).

Figura 3-18: Representación jerárquica de los criterios

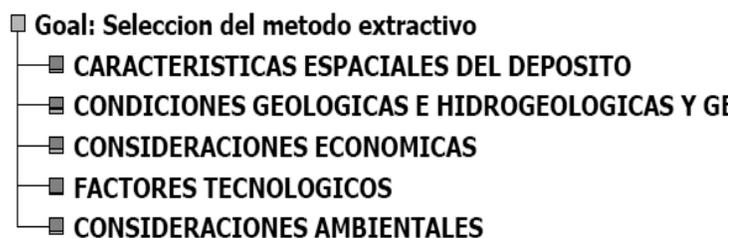


3.3.5. Uso del expert choice ® para aplicar PAJ

En primera instancia se envía a los decisores el cuestionario de análisis pareado el cual contiene preguntas con las cuales se puede identificar las preferencias de cada decisor. Las primeras preguntas de un total de 40 que se efectuaron pueden verse en el **Anexo D**. Ahora son ingresados los juicios de valor de cada decisor al programa Expert Choice

® el cual agrega automáticamente estos juicios en una sola matriz de decisión; la meta y los criterios considerados para la aplicación de PAJ pueden observarse en la **Figura 3-19**.

Figura 3-19: Criterios a considerar para PAJ

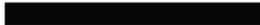
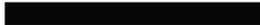
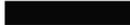
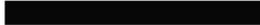


La ponderación de los criterios puede observarse en la **Figura 3-20** la cual muestra un índice de inconsistencia global para el problema de 0.08, lo cual indica que la información dada por los decisores puede ser aceptada.

Figura 3-20: Ponderación de los criterios

Priority Graphs

Priorities with respect to:
Goal: Selección del método extractivo

CARACTERISTICAS ESPACIALES DEL DEPOSITO	.143	
CONDICIONES GEOLOGICAS E HIDROGEOLOGICAS Y GEOTECNI	.269	
CONSIDERACIONES ECONOMICAS	.280	
FACTORES TECNOLOGICOS	.093	
CONSIDERACIONES AMBIENTALES	.215	
Inconsistency = 0.08		
with 0 missing judgments.		

La priorización de las alternativas da como resultado a la alternativa Tajo Largo como la mejor con un peso de 0,393 muy por encima de la siguiente la cual es Cámaras y pilares con 0.295, tal como se puede observar **Figura 3-21**.

Figura 3-21: Ponderación de los criterios

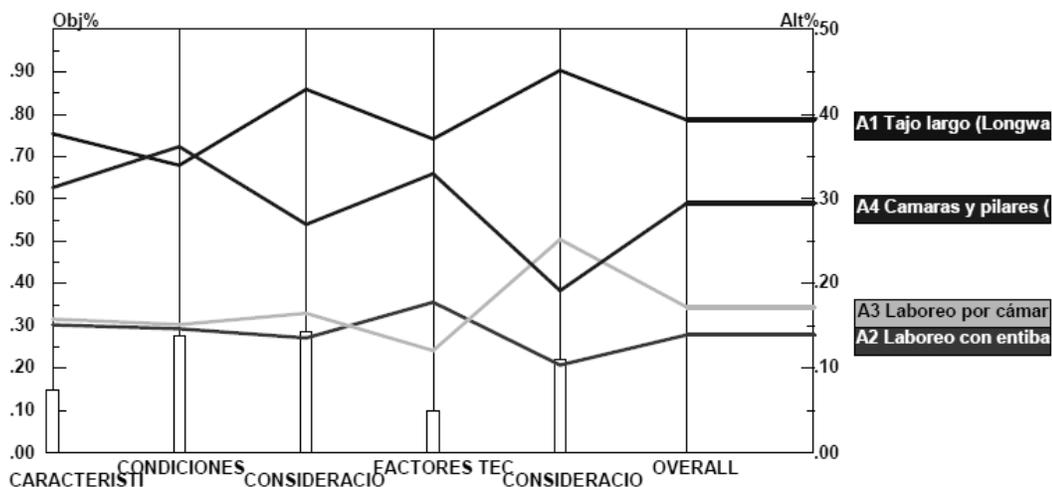
Alternatives

A1 Tajo largo (Longwall)	.393
A2 Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stopir	.140
A3 Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill)	.172
A4 Camaras y pilares (room and pillar)	.295

Como se puede observar en la **Figura 3-22** la alternativa Tajo largo tiene un desempeño superior en todos los criterios, exceptuando el criterio de Condiciones Geológicas hidrogeológicas y geotecnia, en el cual tiene un desempeño muy similar al de la alternativa Cámaras y Pilares.

Figura 3-22: Grafica de análisis de sensibilidad

Performance Sensitivity for nodes below: Goal: Selección del metodo extractivo



Dado que los contradictores de la teoría PAJ se centran en la subjetividad del decisor para desacreditar el mismo, realizaremos conforme a la metodología propuesta una comprobación propuesta por Romero y otros (2012) aplicando la teoría de la entropía para calcular los pesos de los criterios y el método Pres para ponderar las alternativas.

La construcción de la matriz de decisión se realiza basándose en la información contenida en las tablas de comparación de Hartman y Mutmanky (2002) las cuales comparan las ventajas y desventajas de los sub criterios 8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18 y 19 con cada una de las alternativas planteadas para resolver este problema de selección, por lo cual los valores asignados a cada uno de estos serán constantes en cualquier problema de selección del método extractivo. Por otra parte los sub criterios 1,2,3,4,5,6 y 7 variaran de acuerdo a los parámetros técnicos de cada situación específica y serán determinados con base a una modificación de la escala UBC.

Tabla 3-5: Matriz de decisión genérica cualitativa (Construcción propia basada en Hartman y Mutmanky 2002)

C	Sc	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
C1	Sc1									
	Sc2									
	Sc3									
	Sc4									
C2	Sc5									
	Sc6									
	Sc7									
C3	Sc8	Rapid	Slow	Moderate	Moderate	Moderate	Rapid	Rapid	Moderate	Slow
	Sc9	Large Scale	Large	Large	Large	Large	Large	Moderate	Moderate	Small
	Sc10	Large	High	Moderate	Moderate	High	High	Low	Moderate	Low
	Sc11	High	Low	Low	Moderate	High	High	Low	Moderate	Low
	Sc12	5	10	20	15	15	20	45	55	100
C4	Sc13	High	High	Moderate	High	High	Moderate	High	High	Highest
	Sc14	Moderate	High	Moderate	Moderate	Low	Moderate	Low	Low	Lowest
	Sc15	Moderate	Low	Low	Moderate	Low	Moderate	Moderate	Moderate	High
	Sc16	Low	Low	Low	Low	Low	Low	Moderate	High	High
C5	Sc17	High	Moderate	High	Moderate	High	Moderate	High	High	High
	Sc18	High	High	Low	High	High	Moderate	Low	Low	Low
	Sc19	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Moderate	Poor

La matriz de decisión genérica vista en la **Tabla 3-5**, se construye a partir de la conversión de las valoraciones mostradas en Hartman, y Mutmanky (2002). Todas las valoraciones dadas en la Tabla x4 a los criterios son cualitativas exceptuando el Sc12 la cual es porcentual, por lo que se remplaza cada valoración con un índice numérico dado en las siguientes escalas: Escala 1: Higest 5, High 4, Moderate 3, Low 2, Lowest 1; Escala 2: Good 3, Moderate 2, Poor 1; Escala 3: Large scale 4, Large 3, Moderate 2, Small 1; Escala 4: Large 4, High 3, Moderate 2 y Small 1. Dando como resultado la matriz genérica cuantitativa presente en la **Tabla 3-6**. Para terminar la matriz de decisión e incluir la información correspondiente a los Sub criterios 1,2,3,4,5,6 y 7 se utilizara la escala que propone el método UBC la cual plantea un intervalo entre -46 y 6 (**Tabla 3-7**) el cual considera valores negativos únicamente para mostrar que métodos no son viables técnicamente. Con el objetivo de trabajar únicamente con valores positivos se modificara dicha escala a valores positivos comenzando en 1 y terminando en 56 por lo cual -49 seria remplazado con 1 y el valor de 6 con 56.

Tabla 3-6: Matriz cuantitativa genérica (construcción propia)

C	Sc	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
C1	Sc1									
	Sc2									
	Sc3									
	Sc4									
C2	Sc5									
	Sc6									
	Sc7									
C3	Sc8	3	1	2	2	2	3	3	2	1
	Sc9	4	3	3	3	3	3	2	2	1
	Sc10	4	3	2	2	3	3	1	2	1
	Sc11	4	2	2	3	4	4	2	3	2
	Sc12	5	10	20	15	15	20	45	55	100
C4	Sc13	4	4	3	4	4	3	4	4	5
	Sc14	3	4	3	3	2	3	2	2	1
	Sc15	3	2	2	3	2	3	3	3	4
	Sc16	2	2	2	2	2	2	3	4	4
C5	Sc17	4	3	4	3	4	3	4	4	4
	Sc18	4	4	2	4	4	3	2	2	2
	Sc19	3	3	3	3	3	3	3	2	1

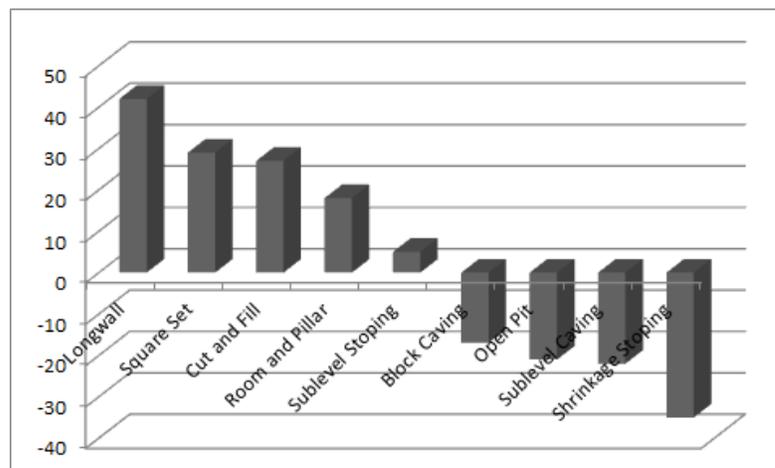
Se agrega la información geológica, hidrogeológica y geotécnica

Tabla 3-7: Matriz de decisión final, agregando la información geológica, hidrogeológica y geotécnica (construcción propia)

C	Sc	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	
C1	Sc1	52	52	54	54	54	54	54	54	51	max
	Sc2	53	53	52	51	54	54	1	51	52	max
	Sc3	51	1	40	1	54	54	54	53	54	max
	Sc4	53	53	54	53	54	54	53	52	50	max
C2	Sc5	1	53	52	52	53	52	52	54	52	max
	Sc6	59	59	3	60	61	50	51	59	59	max
	Sc7	60	62	50	57	62	50	50	54	61	max
C3	Sc8	3	1	2	2	2	3	3	2	1	max
	Sc9	4	3	3	3	3	3	2	2	1	max
	Sc10	4	3	2	2	3	3	1	2	1	min
	Sc11	4	2	2	3	4	4	2	3	2	max
	Sc12	5	10	20	15	15	20	45	55	100	min
C4	Sc13	4	4	3	4	4	3	4	4	5	max
	Sc14	3	4	3	3	2	3	2	2	1	min
	Sc15	3	2	2	3	2	3	3	3	4	max
	Sc16	2	2	2	2	2	2	3	4	4	max
C5	Sc17	4	3	4	3	4	3	4	4	4	max
	Sc18	4	4	2	4	4	3	2	2	2	min
	Sc19	3	3	3	3	3	3	3	2	1	max

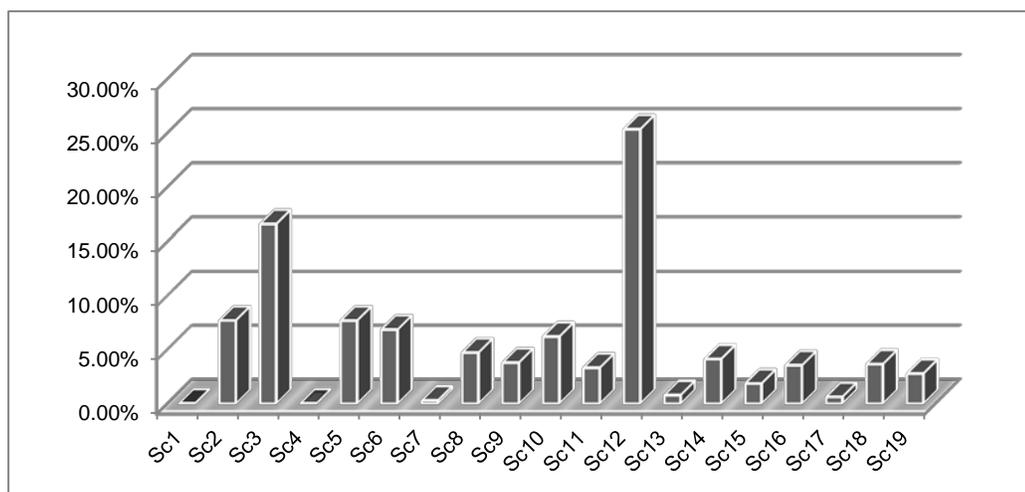
Al aplicar la técnica UBC reducimos las alternativas a tan solo cinco, las mismas tomadas en el método PAJ aplicado anteriormente. Se puede ver la aplicación del mismo en la Figura 8 Quedando como alternativas validas Alternativa 3 Cámaras por Subniveles (*Sublevel Stopping*), Alternativa 5 Tajos Largos (*longwall*), Alternativa 6 Cámaras y pilares (*room and pillar*), Alternativa 7 Cámaras almacén (*Shrinkage Stopping*) y Alternativa 8 Corte y Relleno (*Cut and Fill*). (Figura 3-23)

Figura 3-23: Resultados Técnica UBC



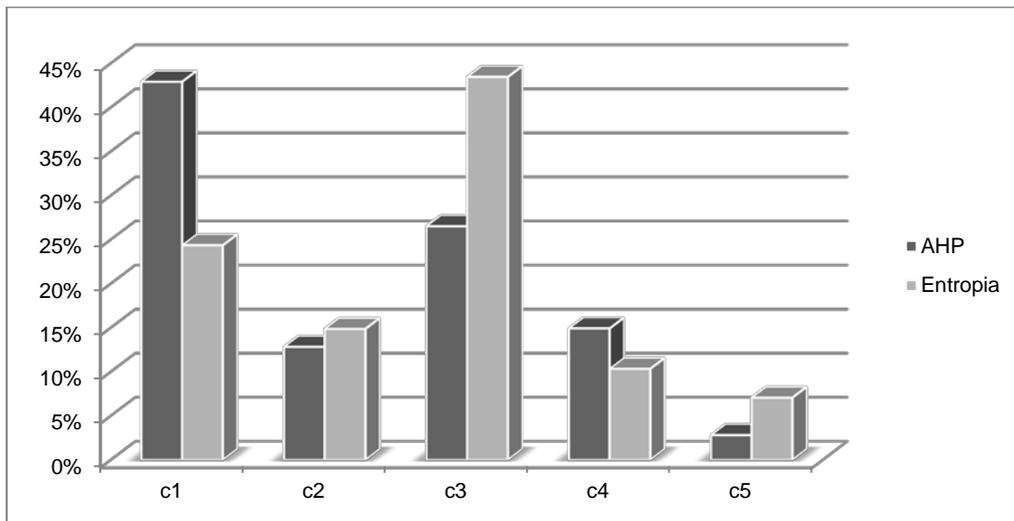
Con base a la matriz final presentada en la **tabla 3-7** realizamos la asignación de pesos mediante la entropía, la cual se puede observar en la **figura 3-24**.

Figura 3-24: Asignación de pesos mediante Entropía



Mediante una grafica de comparación se puede ver las diferencias en los dos métodos PAJ y Entropía para asignar los pesos de cada Criterio. (**Figura 3-25**).

Figura 3-25: Comparación de pesos con AHP (PAJ) y entropía



Se tienen los pesos mediante entropía y siguiendo la metodología presentada en el punto anterior se aplica el método Pres para valorar las alternativas. En primera instancia se debe indagar si alguna alternativa domina a las demás, para lo cual se construye la matriz de dominancia que puede observarse en la **Tabla 3-8**.

Tabla 3-8: Matriz de dominancia y dominancia porcentual

	A3	A5	A6	A7	A8		A3	A5	A6	A7	A8
A3	0	10	13	11	10	A3	0%	53%	68%	58%	53%
A5	17	0	16	14	14	A5	89%	0%	84%	74%	74%
A6	16	12	0	12	10	A6	84%	63%	0%	63%	53%
A7	15	11	14	0	13	A7	79%	58%	74%	0%	68%
A8	14	10	11	13	0	A8	74%	53%	58%	68%	0%

Como se puede observar en la anterior matriz de dominancia y dominancia porcentual ninguna alternativa domina a las demás en todos los criterios por lo cual se calcula el índice Pres para valorar las cinco alternativas. (**Tabla 3-9**)

Tabla 3-9: Calculo del índice Pres

Alternativa	Índice Pres
Alternativa 5 Tajos Largos (<i>longwall</i>)	3.05
Alternativa 6 Cámaras y pilares (<i>room and pillar</i>)	2.90
Alternativa 7 Cámaras almacén (<i>Shrinkage Stopping</i>)	2.00
Alternativa 3 Cámaras por Subniveles (<i>Sublevel Stopping</i>)	1.59
Alternativa 8 Corte y Relleno (<i>Cut and Fill</i>)	1.27

Como se puede observar en la **Tabla 3-9** y en la **Figura 3-25** los resultados de los métodos Pres y PAJ son consecuentes en indicar que las dos alternativas a considerar son Tajos largos y Cámaras y pilares.

3.3.6. Cambios en índices de productividad

Dadas las limitantes de acceso a información del desempeño financiero de la empresa no fue posible realizar mediciones en cuanto a índices de producción en los dos proyectos mineros, pero se realiza a continuación la comparación de los dos proyectos con base al tercer criterio del modelo de toma de decisión, las consideraciones económicas. Como se puede observar en nuestra matriz de decisión genérica (ver **Tabla 3-6**) construida a partir de estudios desarrollados por Hartman y Mutmanky (2002) sobre resultados de estudios comparativos en los principales métodos extractivos de Estados Unidos, se puede ver a

continuación el desempeño de los dos métodos extractivos con respecto a las consideraciones económicas antes planteadas.

Para lograr la comparación de los dos métodos extractivos, Cámaras y pilares que es el método actual de extracción y Longwall que es el método sugerido para el nuevo proyecto; se debe primero lograr que los valores dentro de la matriz de decisión genérica, sean comparables entre sí, por lo cual utilizaremos la técnica de normalización por la suma:

$$P_j = \frac{P_j}{\sum_{j=1}^N P_j} \quad (18)$$

Obteniendo así la siguiente matriz normalizada:

Tabla 3-10: Matriz de decisión genérica normalizada por la suma

	Open Pit	Block Caving	Sublevel Stopping	Sublevel Caving	Longwall	Room and Pillar	Shrinkage Stopping	Cut and Fill	Square Set
Forma general	0.140	0.139	0.134	0.144	0.123	0.128	0.139	0.114	0.101
Espesor del manto	0.137	0.003	0.099	0.003	0.123	0.128	0.139	0.114	0.107
Inclinación	0.142	0.142	0.129	0.136	0.123	0.128	0.003	0.108	0.103
Profundidad	0.003	0.142	0.129	0.139	0.120	0.124	0.134	0.114	0.103
Distribución	0.142	0.142	0.134	0.141	0.123	0.128	0.136	0.110	0.099
Rock mass ratings	0.159	0.158	0.132	0.160	0.139	0.119	0.131	0.125	0.117
Rock substance strength	0.161	0.166	0.124	0.152	0.141	0.119	0.129	0.135	0.121
Tasa de desempeño	0.008	0.003	0.005	0.005	0.005	0.007	0.008	0.004	0.002
Producción (Producción por unidad de tiempo)	0.011	0.008	0.007	0.008	0.007	0.007	0.005	0.004	0.002
Inversión de Capital	0.011	0.008	0.005	0.005	0.007	0.007	0.003	0.004	0.002
Productividad (toneladas por turno de empleado)	0.011	0.005	0.005	0.008	0.009	0.010	0.005	0.006	0.004

Tabla 3-11:

Continuación

Costos comparativos de métodos mineros adecuados	0.013	0.027	0.050	0.040	0.034	0.048	0.116	0.116	0.198
Recuperación de la mina (porción del depósito extraído actualmente)	0.011	0.011	0.007	0.011	0.009	0.007	0.010	0.008	0.010
Dilución (cantidad de desperdicios producidos con el mineral)	0.008	0.011	0.007	0.008	0.005	0.007	0.005	0.004	0.002
La flexibilidad del método con el cambio de condiciones	0.008	0.005	0.005	0.008	0.005	0.007	0.008	0.006	0.008
Selectividad del método para distinguir el mineral y los residuos	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.008	0.008	0.008
Estabilidad de las aberturas	0.011	0.008	0.010	0.008	0.009	0.007	0.010	0.008	0.008
Subsistencia, o efectos en la superficie de excavación	0.011	0.011	0.005	0.011	0.009	0.007	0.005	0.004	0.004
Condiciones de salud y seguridad	0.008	0.008	0.007	0.008	0.007	0.007	0.008	0.004	0.002
	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Siendo comparables se puede ver ahora en las **Figuras 3-26 y 3-27** el pico que diferencia el desempeño de los dos métodos en el sub criterio de costos comparativos, valorando de la misma forma el índice de productividad del trabajo, inversión de capital y tasa de producción. Adicionalmente se puede corroborar que el el segundo criterio de mayor importancia en este estudio son las consideraciones económicas (ver **Figura 3-25**).

Figura 3-26: Comparación en consideraciones económicas de los métodos Tajo largo y Cámaras y pilares

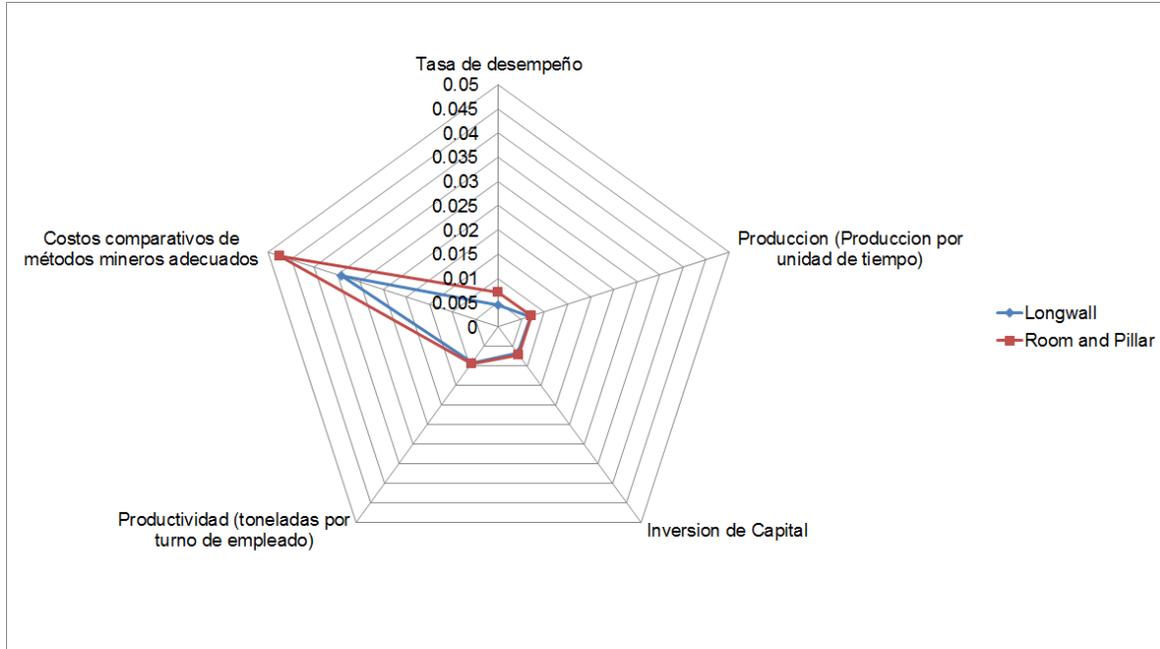
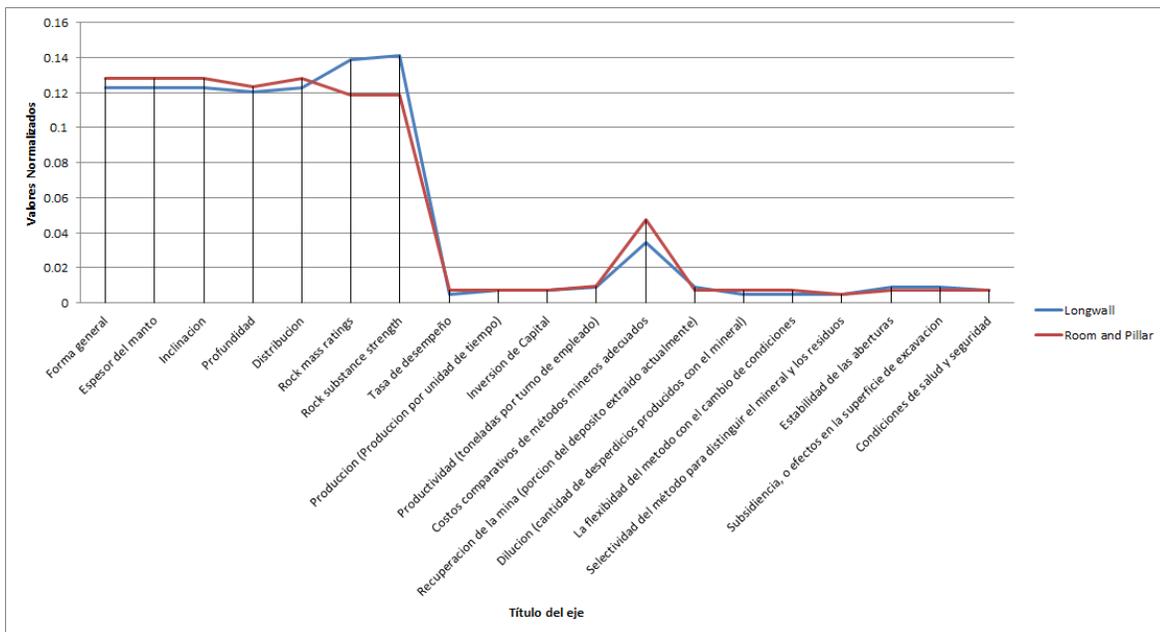
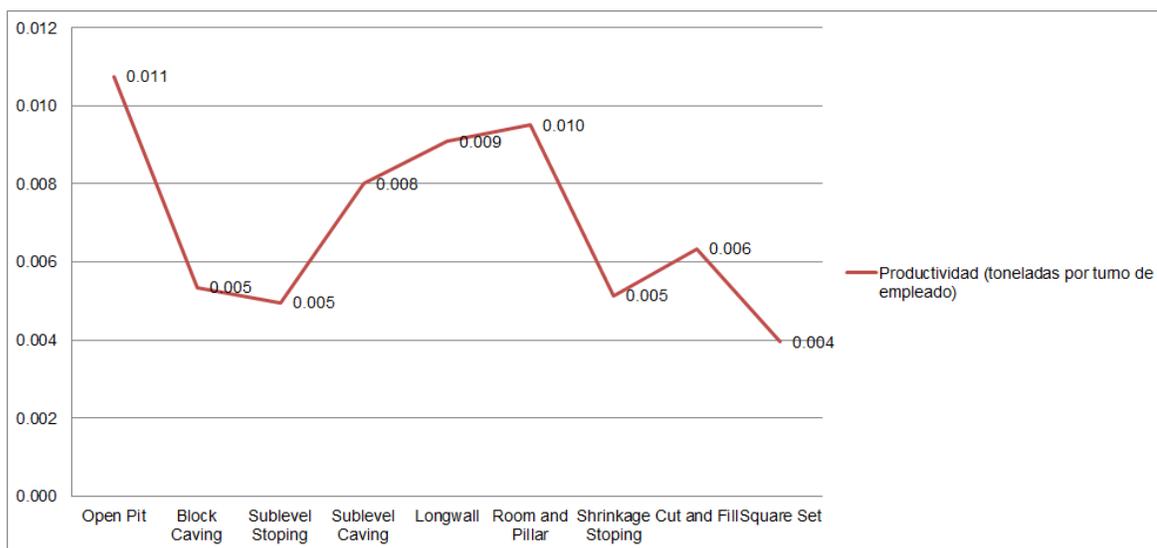


Figura 3-27: Comparación de los métodos Tajo largo y Cámaras y pilares mediante la matriz de decisión normalizada



Por lo anterior podríamos concluir que el nivel de incidencia de la productividad (del trabajo) como parte del índice de productividad total, es afectado directamente por la escogencia del método extractivo ya que si bien en este caso específico tienen un índice de productividad similar, en la **Figura 3-28** se puede observar los cambios del índice de productividad del trabajo en los diferentes métodos extractivos.

Figura 3-28: Productividad del trabajo en cada método extractivo



4. Resultados

- a) Se recopilaron y presentaron los antecedentes de las herramientas de toma de decisión más utilizadas en DMD y MCDA determinando cuáles se han aplicado a la actividad minera.
- b) Se recopilaron y presentaron antecedentes en métodos de medición de la productividad y se clasificaron de acuerdo a sus necesidades de información y a sus resultados. También se expone cuáles se han aplicado a la minería.
- c) Se recopilaron y presentaron los antecedentes en selección del método extractivo y en métodos de toma de decisión aplicados a la industria minera, determinando cuáles métodos son los más adecuados para prestar apoyo a la selección del método extractivo en la etapa de diseño minero dentro de un proyecto minero.
- d) Se determinaron y presentaron los métodos de medición de la productividad y sus antecedentes en actividades mineras.
- e) Se compararon los cambios en la productividad del trabajo en el proyecto minero en curso y en el proyecto en etapa de diseño minero.
- f) Se propone y aplica un modelo de toma de decisiones para seleccionar el método extractivo para un yacimiento de carbón en Norte de Santander y se compara con los resultados del Plan de trabajos y obras realizado por una firma extranjera.

Finalmente en base a los resultados parciales anteriores se realiza el planteamiento metodológico del modelo de decisión presente en el capítulo 3 de la presente investigación, generando como resultado de divulgación un ejercicio académico de aplicación del modelo (ver **Anexo E**) basado en información proveniente de literatura científica como base, con la intención de mostrar información comprobable. Adicional a esto se mejoró la construcción inicial de esta metodología de toma de decisión (ver **Figura 3-3**) y se aplicó a una empresa extractiva ubicada en el departamento de Norte de Santander, la discusión de los mismos puede consultarse en el apartado de conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.

5. Conclusiones, recomendaciones y futuros trabajos

5.1. Conclusiones

La identificación y definición de los criterios para el problema es una etapa crucial para la solución del problema de selección del método extractivo, esta investigación toma los principales criterios de la literatura científica consultada para resolver el problema, pero pueden incluirse mas criterios según sea el caso; los criterios económicos pueden ampliarse para considerar el valor del mineral y el volumen de reservas del mineral, por ejemplo: si quiere explotarse un manto de carbón, cualquier problema geotécnico complicado no hace posible llevar a cabo el proyecto. Por otro lado si lo que se quiere explotar es un manto de hierro es posible que se pueda asumir el costo de la solución del problema geotécnico sin que el proyecto deje de ser viable económicamente. Otro criterio que podría considerarse es el precio actual de cada mineral ya que este criterio afecta la viabilidad económica de cada manto.

El análisis de dominancia aplicado en este artículo como un paso del método Pres, permite analizar en primera instancia si una de las alternativas domina completamente a las demás, o si esta muy cerca de hacerlo; ya que si esto sucede se reduce el tiempo del proceso de toma de decisión y el número de alternativas.

El Análisis de Decisiones Multicriterio resulta una herramienta de ayuda muy útil para tomar decisiones en proyectos mineros. Además los encargados de tomar decisiones asumen grandes responsabilidades y la mayoría de las veces tienen que apoyarse en expertos que les asesoren. Muchas veces los decisores presentan intereses en conflicto las cuales deben conjugarse para lograr una solución.

Mediante el Análisis de Decisiones Multicriterio se puede reunir gran cantidad de información para generar análisis profundos en los cuales es posible evaluar la influencia que genera el cambio de los pesos en cada una de las variables sobre la preferencia de cada alternativa.

La asignación de peso a los criterios y la valoración de alternativas para el problema de decisión multicriterio “selección del método extractivo minero” mediante el método PAJ

puede ser comprobada mediante Entropía y Pres, logrando así evaluar este problema de decisión desde una perspectiva mas subjetiva como lo es el método PAJ y desde una perspectiva mas objetiva como lo es el método de la Entropía y Pres.

La metodología planteada en esta investigacion puede ser usada como ayuda en el proceso de diseño minero reduciendo la incertidumbre que genera tomar esta decisión, ya que cambiar el método extractivo podría suponer un costo mayor que la de todo el proyecto minero.

5.2. Recomendaciones y trabajos futuros

La presente investigación toma en cuenta los métodos extractivos más generales utilizados en la actualidad y citados en la bibliografía científica, pero hay que dejar claro primero que cada problema en particular tendrá un análisis acorde a lo que se quiera conseguir con el proyecto minero como se explica en el apartado “5.1. Conclusiones”. Pueden considerarse como alternativas Nuevos métodos de extracción minera como la gasificación para extracción de carbón en el subsuelo, o también pueden considerarse métodos mediante sistemas automatizados para la extracción; igualmente se pueden considerar una gran cantidad de criterios para seleccionar el metodo extractivo; lo que se quiere resaltar es que la cantidad de alternativas y criterios variara sustancialmente según cada problema de selección particular.

Según la UPME (2012) existe en el país la necesidad de realizar en primera instancia un proceso de ordenamiento ambiental a nivel nacional, un análisis de integración de los diferentes planes de ordenamiento territoriales del país en función del ordenamiento ambiental realizado anteriormente para finalmente determinar con base en lo anterior un plan nacional de ordenamiento minero como se puede observar en la **Figura 5-1**

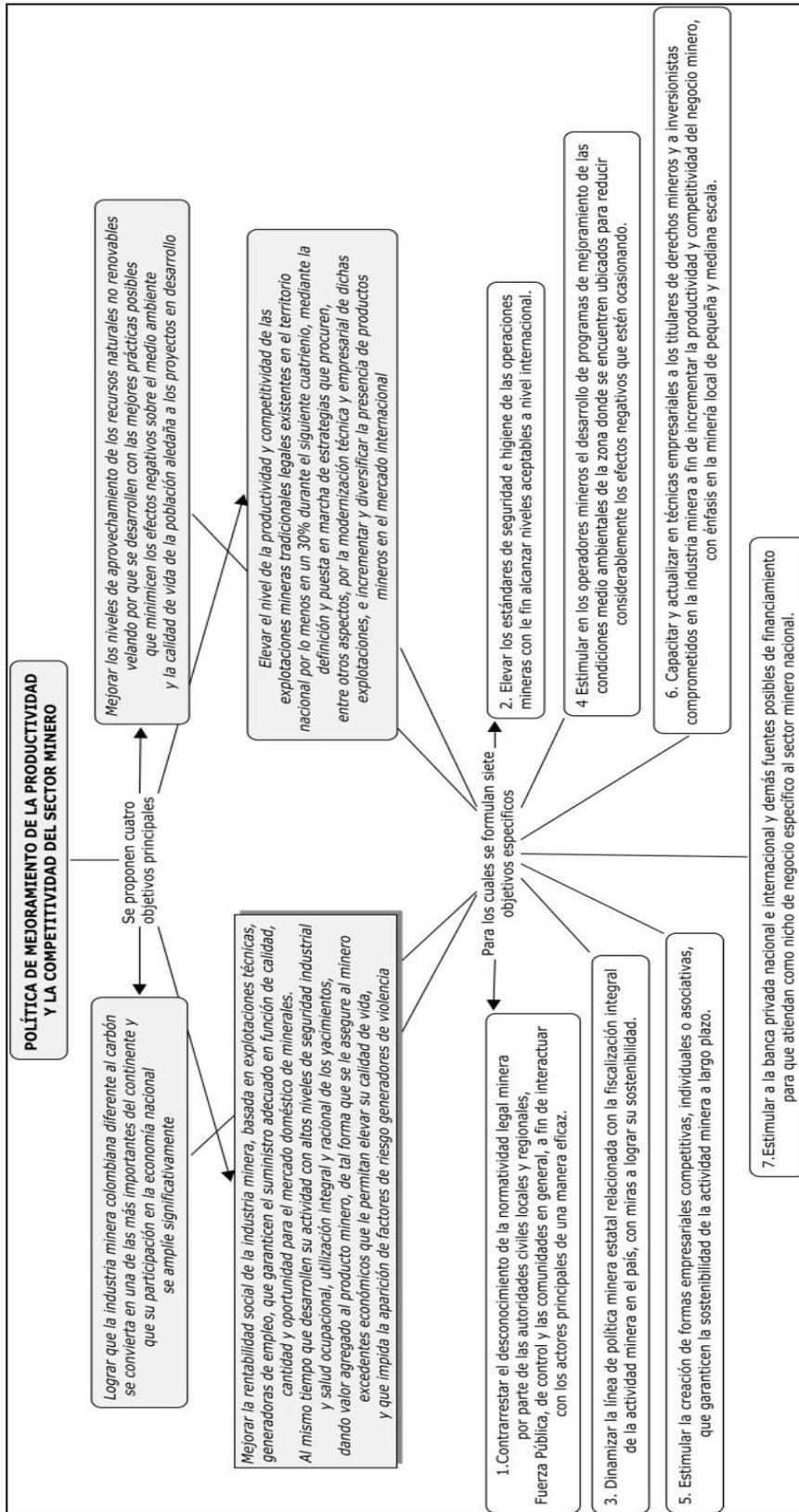
Figura 5-1: Relación de orden entre el ordenamiento minero, territorial y ambiental



Por lo anterior uno de los trabajos futuros como resultado de la presente investigación es el de la aplicación de AHP (Proceso de análisis jerárquico) y ANP (Proceso analítico por redes) Valoración económica de activos ambientales mediante procesos de análisis jerárquico. Una aproximación al uso de AHP para ordenamiento minero en nuestro país fue planteado por Ortega (2006).

A. Anexo A: Modelo Conceptual de la Política Nacional de Productividad Minera

El modelo conceptual muestra los objetivos que persigue la política nacional de productividad minera. Se construye a partir del documento publicado por la Unidad de Planeación Minero Energética en el 2005. Los avances sobre la misma pueden consultarse en las memorias al Congreso de la república 2009 -2010.



B. Anexo B: Ejemplos de Entropía, Pres y PAJ

El ejemplo de Entropía es tomado del apéndice A del Libro "Introduction to Sustainability: Road to a Better Future" de Nolberto Munier.(2006)

El ejemplo de Pres es tomado del libro "El proceso proyecto-construcción: aplicación a la ingeniería civil" Escrito por Eugenio Pellicer Pellicier, Sanz y Catala (2004)

El ejemplo de PAJ es tomado del libro "Investigación de Operaciones" de Taha Hamdy (2004)

A.1 The Zeleny method for determining weights

This method, developed by Milan Zeleny (Zeleny, 1982), can compute weights for criteria based on the data provided by the performance matrix. Zeleny's method considers both the weight derived from the values in the matrix, and those weights assigned by expert opinion, but the latter modified with the weights obtained from the matrix. To do this, Zeleny's method is based on Information Theory (see Glossary) to find out which criterion has the minimum **entropy** (see Glossary), that in this context has the meaning of 'discrimination'. The lower the entropy for a criterion, the better, because the greater the discrimination obtained between projects. According to Zeleny, **entropy of information** reflects, "...the average amount of intrinsic information conveyed by a given information source"

To understand this better, assume for instance the following example with five alternatives and only one criterion, such as aesthetics.

	Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3	Alt. 4	Alt. 5
Criterion					
Aesthetics	7	7	7	7	7

That is, all alternatives are evaluated as the same (on a 1-10 scale, and the higher the better) regarding the criterion 'aesthetics'.

Is it possible to select an alternative based on this criterion? Obviously not, since the value or appraisal that each alternative has regarding this criterion is the same for all alternatives. In other words, the amount of information obtained from this **criterion is zero**, that is a **minimum**, and consequently there is **maximum lack of knowledge** for the decision-maker. It also corresponds to the **maximum entropy**, and with a value of **1.61**.

Suppose now that there is another criterion such as durability, also measured on the 1-to-10 scale, but with these values:

	Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3	Alt. 4	Alt. 5
Criterion					
Durability	5	2	7	3	6

It is possible then to gauge again the alternatives but using this criterion now. Consequently, alternative 3 should be chosen, because it has the highest mark. Therefore, this criterion **does provide** some information that can be measured using its entropy, which value is **1.52**, which allows one to say that this criterion has a higher weighting than the aesthetic criterion.

Assume now that another criterion calls for expressing how people measure satisfaction, considering each alternative.

	Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3	Alt. 4	Alt. 5
Criterion					
People's satisfaction	3	3	3	3	10

Obviously, there is a marked preference for alternative number 5, and then the computed entropy of the criterion is **1.45**.

Finally, suppose that there is another criterion, such as the opinion from other communities with experience of the same five alternatives.

	Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3	Alt. 4	Alt. 5
Criterion					
People satisfaction	1	10	1	1	1

In this case, there is a unanimous rejection for all of them, but for number 2, so the entropy for this criterion is **0.99**. This is the **minimum entropy**, which gives us the **maximum of information**.

It can be seen how the entropy has been decreasing from the case where all the values were identical to the last one, where there is a large discrepancy, and this is the concept used to find weights for criteria.

Entropy is a notion that comes from Thermodynamics, and is loosely understood as 'disorder'. For instance, water with molecules at low speed, as in ice, has low entropy. When ice heats up, its water molecules increase their velocity and, as one bumps or collides into another, their disorder increases, liquid water is produced, and its entropy is augmented. If the heating continues, its water molecules will step up their velocity and more violent collisions will occur — leading to more disorder — the entropy is augmented, and steam is produced.

Information Theory (IT), developed by Claude Shannon (Shannon, 1948), relates to the amount of information in a message, which is measured in 'bits'. To quantify this amount of information he used the entropy concept and the following formula, where 'S' denotes entropy:

$$S = - \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i$$

Where:

p_i = Probability of occurrence

ln = Natural logarithm of the probability of occurrence

Social impact	19.01
Maintenance cost	0.002
Return on investment (ROI)	21.9
Sharing land with other uses	69.62
People's opinion	23

Table A.1.3 is the result of this division.

Table A.1.3 Criteria weights determination

	Solar based	Small hydro	Wind energy	Bio-mass	Entropy	Diversification	Weight	
	0.048	0.037	0.044	0.045	S_j	d_j	w_j	
Attributes								
Generation potential	0.19	0.21	0.36	0.24	1.58	-0.58	0.03	
Land use	0.34	0.03	0.25	0.38	2.78	-1.78	0.10	
Dependability	0.16	0.35	0.13	0.35	1.17	-0.17	0.01	
Environmental impact	0.08	0.13	0.26	0.53	2.07	-1.07	0.06	
Human impact	0.00	0.00	0.29	0.71	7.44	-6.44	0.37	
Social impact	0.11	0.00	0.26	0.63	6.99	-5.99	0.35	
Maintenance cost	0.22	0.09	0.36	0.34	2.27	-1.27	0.07	
Return on investment (ROI)	0.22	0.28	0.26	0.23	1.32	-0.32	0.02	
Sharing land with other uses	0.00	0.60	0.40	0.00	0.52	0.48	-0.03	
People's opinion	0.17	0.39	0.30	0.13	-1.08	-0.08	0.00	
	Sum diversification					17.20		

The values for entropy are found in the column "Entropy".

As an example of calculation, entropy is computed for the attribute 'Generation potential':

Entropy:

$$S = -(0.19 \times \ln(0.19) + 0.21 \times \ln(0.21) + 0.36 \times \ln(0.36) + 0.24 \times \ln(0.24)) = 1.58$$

A diversification is computed as follows:

$$D = 1 - s = -0.58$$

Then a weight is derived by dividing each value into the total value, i.e.

-17.20

Thus, the weight is:

$$W = -0.58 / -17.20 = 0.03$$

If expert opinion establishes cardinal preferences of alternatives in percentages, these subjective weights can then be multiplied by the objective weights found, and then one divides each product by the sum of the products for all criteria. In other words, it finds an average between the product of objective and subjective weights divided by the sum of these products.

EL PROCESO PROYECTO-CONSTRUCCIÓN

Por lo tanto, la prelación de alternativas es $B > C > A$.

El método PRES, desarrollado por el Departamento de Proyectos de Ingeniería de la Universidad Politécnica de Valencia, considera que la alternativa óptima es aquella que es superior a las demás desde el mayor número de puntos de vista, y no es bastante desaconsejable desde los demás criterios; su metodología se expuso en el capítulo anterior.

CRITERIOS		PESO (P)	A	B	C
1	Funcionalidad	3	5	7	8
2	Construcción	1	7	7	6
3	Conservación	2	6	7	6
4	Impacto ambiental	2	6	5	5
5	Estética	1	8	5	6
6	Economía	3	4	8	6

	1	2	3	4	5	6
P	3	1	2	2	1	3
A	5	7	6	6	8	4
B	7	7	7	5	5	8
C	8	6	6	5	6	6
X_{jmax}	8	7	7	6	8	8

La matriz de valoración es:

	1	2	3	4	5	6
A	1,88	1,00	1,71	2,00	1,00	1,50
B	2,63	1,00	2,00	1,67	0,63	3,00
C	3,00	0,86	1,71	1,67	0,75	2,25

La matriz de dominación es:

	A	B	C	D_i
A	0,00	0,70	0,72	1,42
B	2,54	0,00	1,18	3,72
C	1,87	0,49	0,00	2,36
d_i	4,41	1,19	1,90	0,00

$$T(1,2) = (1,00-1,00)+(2,00-1,67)+(1,00-0,63) = 0,70$$

$$T(1,3) = (1,00-0,86)+(1,71-1,71)+(2,00-1,67)+(1,00-0,75) = 0,72$$

$$T(2,1) = (2,63-1,88)+(1,00-1,00)+(2,00-1,71)+(3,00-1,50) = 2,54$$

$$T(2,3) = (1,00-0,86)+(2,00-1,71)+(1,67-1,67)+(3,00-2,25) = 1,18$$

$$T(3,1) = (3,00-1,88)+(1,71-1,71)+(2,25-1,50) = 1,87$$

$$T(3,2) = (3,00-2,63)+(1,67-1,67)+(0,75-0,63) = 0,49$$

$$I_A = 1,42/4,41 = 0,32$$

$$I_B = 3,72/1,19 = 3,13$$

$$I_C = 2,36/1,90 = 1,24$$

Por lo tanto, la prelación de alternativas es $B > C > A$.

Una vez aplicada la técnica multicriterio que se considere idónea, se poseen datos suficientes para optar por una de las alternativas planteadas; esta será la solución óptima a proyectar. En el anejo hay que enumerar las razones que dan lugar a decidirse por esta solución.

CAPÍTULO 14

Análisis de decisiones y juegos

En el análisis de decisiones se usa un proceso racional para seleccionar la mejor de varias alternativas. La "bondad" de una alternativa seleccionada depende de la calidad de los datos que se usen para describir el caso de la decisión. Desde este punto de vista, un proceso de toma de decisión puede caer en una de las tres categorías siguientes:

1. Toma de decisiones bajo certidumbre, en la que los datos se conocen en forma determinista.
2. Toma de decisiones bajo riesgo, en la que los datos se pueden describir con distribuciones de probabilidades.
3. Toma de decisiones bajo incertidumbre, en donde a los datos no se les puede asignar pesos o factores de ponderación que representen su grado de importancia en el proceso de decisión.

De hecho, bajo certidumbre, los datos están bien definidos y bajo incertidumbre, los datos son ambiguos. La toma de decisiones bajo riesgo representa entonces el caso de "la mitad del camino".

14.1 TOMA DE DECISIONES BAJO CERTIDUMBRE: PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA (AHP)

Los modelos de programación lineal presentados en los capítulos 2 al 8 son ejemplos de toma de decisión bajo certidumbre, en donde todas las funciones están bien definidas. El proceso de jerarquía analítica (AHP, por sus siglas en inglés) está diseñado para casos en los que las ideas, sentimientos y emociones se cuantifican con base en juicios subjetivos para obtener una escala numérica para dar prioridades a las alternativas de decisión.

Antes de presentar los detalles del proceso de jerarquía analítica usaremos un ejemplo que muestra la idea general del método.

Ejemplo 14.1-1

Martin Hans, un brillante egresado de preparatoria, ha recibido tres ofertas de beca completa en tres instituciones: U de A, U de B y U de C. Para seleccionar una universidad, Martin

504 Capítulo 14 Análisis de decisiones y juegos

enuncia dos criterios principales: ubicación y reputación académica. Como es un buen estudiante, juzga que la reputación académica es cinco veces más importante que el lugar, con lo que se tienen pesos aproximados de 17% de la ubicación y 83% de la reputación. A continuación usa un análisis sistemático (que detallaremos después) para categorizar las tres universidades desde el punto de vista del lugar y la reputación. La tabla siguiente clasifica los dos criterios para las tres universidades:

Criterio	Estimaciones de peso porcentual para		
	U de A	U de B	U de C
Ubicación	12.9	22.7	59.4
Reputación	54.5	27.3	18.2

La estructura del problema de decisión se resume en la figura 14.1. El problema implica una sola jerarquía (el nivel) con dos criterios (ubicación y reputación) y tres alternativas de decisión (U de A, U de B y U de C).

La calificación de las tres universidades se basa en calcular un factor de ponderación o peso *compuesto* para cada universidad, como sigue:

$$U \text{ de A} = 0.17 \times 0.129 + 0.83 \times 0.545 = \mathbf{0.4743}$$

$$U \text{ de B} = 0.17 \times 0.277 + 0.83 \times 0.273 = 0.2737$$

$$U \text{ de C} = 0.17 \times 0.594 + 0.83 \times 0.182 = 0.2520$$

Con base en estos cálculos, la U de A tiene el mayor peso compuesto y en consecuencia representa la mejor elección de Martín.

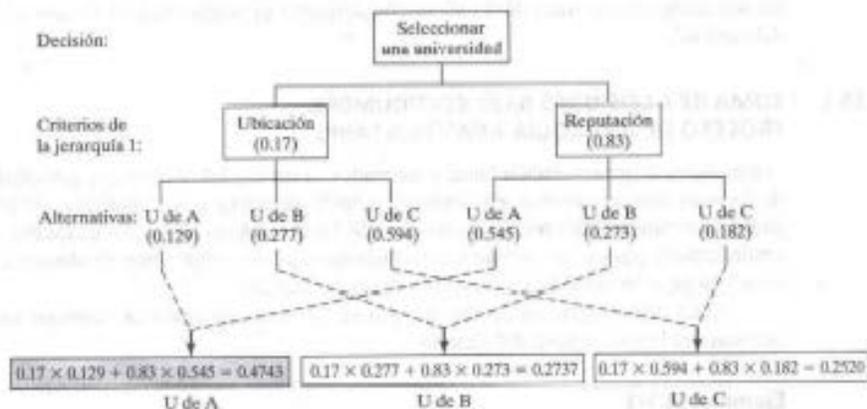


FIGURA 14.1
Resumen de cálculos del proceso de jerarquía analítica para el ejemplo 14.1-1

14.1 Toma de decisiones bajo certidumbre: proceso de jerarquía analítica (AHP) 505

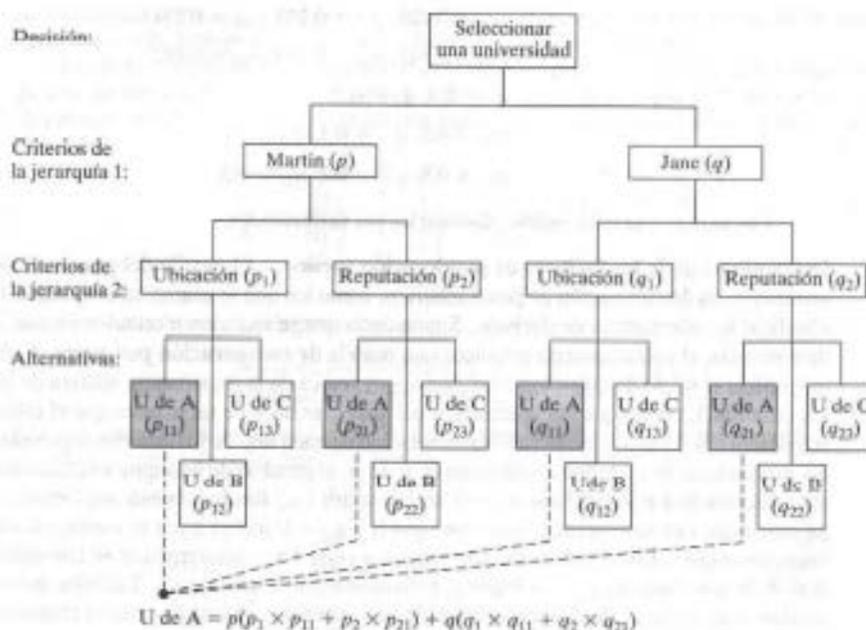


FIGURA 14.2

Refinamiento del problema de decisiones del ejemplo 14.1-1

La estructura general del proceso de jerarquía analítica puede comprender varias jerarquías de criterios. Supongamos que en el ejemplo 14.1-1, Jane, la hermana gemela de Martin, también fue aceptada con beca total en las tres universidades. Sin embargo, sus padres estipulan que los dos deben asistir a la misma universidad. La figura 14.2 muestra el problema de toma de decisiones, que ahora implica dos jerarquías de criterios. Los valores p y q (posiblemente iguales) en la primera jerarquía representan los pesos relativos asignados a las opiniones de Martin y de Jane acerca del proceso de selección. La segunda jerarquía usa los pesos (p_1, p_2) y (q_1, q_2) para reflejar las opiniones individuales de Martin y de Jane sobre los criterios de ubicación y reputación de cada universidad. El resto de la estructura de decisión se puede interpretar en forma parecida. Nótese que $p + q = 1$, $p_1 + p_2 = 1$, $q_1 + q_2 = 1$, $p_{11} + p_{12} + p_{13} = 1$, $p_{21} + p_{22} + p_{23} = 1$, $q_{11} + q_{12} + q_{13} = 1$, y $q_{21} + q_{22} + q_{23} = 1$. La determinación del peso compuesto de la U de A, que se ve en la figura 14.2, demuestra la manera en que se hacen los cálculos.

CONJUNTO DE PROBLEMAS 14.1A

1. Suponga que se asignan los pesos siguientes para el caso de Martin y Jane:

$$p = 0.5, q = 0.5$$

$$p_1 = 0.17, p_2 = 0.83$$

C. Anexo C: Columna estratigráfica

Columna estratigráfica regional.

COLUMNA ESTRATIGRAFICA REGIONAL						
AREA : TASAJERO						
SECTOR: ESTE (FLANCO INVERTIDO)						
Escala : 1:500						
PERIODO	EPOCA	FORMACION	ESPESOR DE CAPA	ESPESOR ACUMUL	LITOLOGIA	DESCRIPCION
T E R C I A R I O	E D C E N O	MIRADOR (Tem)	LOS CUERVOS (Tpic)	282.2		Lutitas carbonosas, limolitas silíceas y bancos de arenisca con estratificación cruzada
				60.0		Arcillolitas y limolitas de color amarillo gris y negras interstratificadas con algunos niveles arenosos hacia el techo
				232.2		Cinta de carbón
				25.0		Cinta de carbón de 0.35m.
				207.2		Secuencia de limolitas de grano fino gris claro a oscuro, intercaladas con limolitas y arcillolitas abigarradas
				186.5		MANTO DE CARBON M10 *
				20-25		Secuencia de areniscas de grano fino gris claro a oscuro intercaladas con limolitas y arcillolitas varicoloreadas.
				172.6	129-1.90	MANTO DE CARBON M15 *
				12-15		Areniscas de grano fino grises, duras intercaladas con limolitas y arcillolitas de color gris y amarillos
				172.6	129-1.90	MANTO DE CARBON M20 * 0.80-1.10C 0.05-0.40R 0.40-0.80C
				25-30		Secuencia estratigráfica conformada por limolitas compactas, arcillolitas grises y niveles de arenisca de grano fino a medio compactas
				145.8	120-1.90	MANTO DE CARBON M30* 0.60-0.80C 0.15-0.30R 0.20-0.40C 0.05-0.40R 0.40-0.80C
15-20		Arcillolitas grises y amarillas intercaladas con bancos de arenisca de grano fino a medio varicoloreada, areniscas arcillosas y algunas cintas de carbón				
130.0		MANTO DE CARBON M40 * Limolita arcillosa de color gris algo compacta				
130.0		Lutitas y limolitas riposas de color amarillo y gris intercaladas con niveles de arcillolitas grises compactas, y bancos de areniscas amarillas de grano fino a medio				
0.0		Areniscas claras fino a medio granulares con cuarzo, algo de feldspatos y con cemento silíceo				

Tomado de * Normalización de recursos y reservas Norte de Santander, Ecocarbon 1999
 * Modificada la nomenclatura estratigráfica de mantos para este estudio.

D. Anexo D: Resultados Expert Choice

07/06/2012 11:30:05 p.m.

Page 1 of 8

Model Name: SELECCIÓN DEL METODO EXTRACTIVO**Treeview**

- **Goal: Selecccion del metodo extractivo**
 - **CARACTERISTICAS ESPACIALES DEL DEPOSITO**
 - **CONDICIONES GEOLOGICAS E HIDROGEOLOGICAS Y GEOTECNIA**
 - **CONSIDERACIONES ECONOMICAS**
 - **FACTORES TECNOLOGICOS**
 - **CONSIDERACIONES AMBIENTALES**

Alternatives

A1 Tajo largo (Longwall)	.393
A2 Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stopir	.140
A3 Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill)	.172
A4 Camaras y pilares (room and pillar)	.295

List of Participants

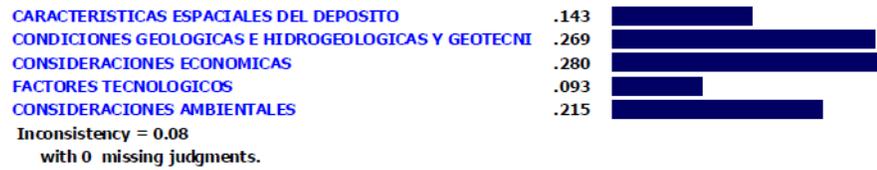
PID	PersonName	Combined	Email	Participating	Eval	Location	Weight	Keypad	Wave	Password
0	Facilitator	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>						
1	Combined	<input checked="" type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>						
2	P2	<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>				2	1	
3	P3	<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>				3	1	
4	P4	<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>				4	1	
5	P5	<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>				5	1	
6	P6	<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>				6	1	

PID	PersonName	ProgressStatus	EvalCluster	Organization	LastChanged
0	Facilitator				31/05/2012 10:12:42 p.m.
1	Combined				02/06/2012 06:53:04 p.m.
2	P2				30/05/2012 08:56:06 p.m.
3	P3				30/05/2012 09:57:03 p.m.
4	P4				31/05/2012 02:21:57 p.m.
5	P5				31/05/2012 06:39:32 p.m.
6	P6				31/05/2012 07:23:38 p.m.

Priority Graphs

Priorities with respect to:
Goal: Seleccion del metodo extractivo

Combined



Synthesis: Details

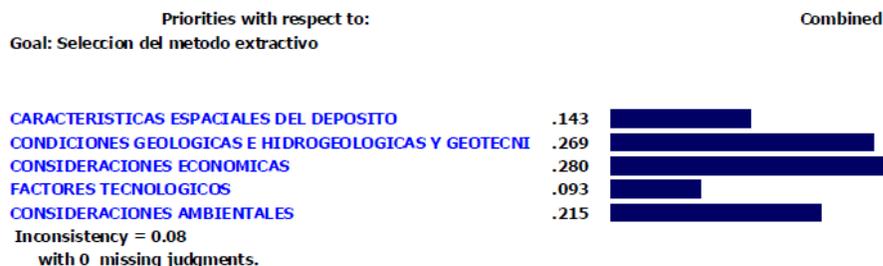
Level 1	Alts	Prtv
CARACTERISTICAS ESPACIALES DEL DEPOSITO (L: .143)	A1 Tajo la...	.057
	A2 Labor...	.023
	A3 Labor...	.024
	A4 Camar...	.048
CONDICIONES GEOLOGICAS E HIDROGEOLOGICAS Y GEOTECNIA (L: .269)	A1 Tajo la...	.101
	A2 Labor...	.044
	A3 Labor...	.045
	A4 Camar...	.108
CONSIDERACIONES ECONOMICAS (L: .280)	A1 Tajo la...	.112
	A2 Labor...	.035
	A3 Labor...	.043
	A4 Camar...	.070
FACTORES TECNOLOGICOS (L: .093)	A1 Tajo la...	.037
	A2 Labor...	.018
	A3 Labor...	.012
	A4 Camar...	.033
CONSIDERACIONES AMBIENTALES (L: .215)	A1 Tajo la...	.086
	A2 Labor...	.020
	A3 Labor...	.048
	A4 Camar...	.036

Compare the relative importance with respect to: Goal: Seleccin del metodo extractivo

Circle one number per row below using the scale:
 1 = Equal 3 = Moderate 5 = Strong 7 = Very strong 9 = Extreme

1	CARACTERISTICAS ES	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	CONDICIONES GEOLC
2	CARACTERISTICAS ES	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	CONSIDERACIONES EI
3	CARACTERISTICAS ES	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	FACTORES TECNOLOG
4	CARACTERISTICAS ES	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	CONSIDERACIONES AI
5	CONDICIONES GEOLO	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	CONSIDERACIONES EI
6	CONDICIONES GEOLO	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	FACTORES TECNOLOG
7	CONDICIONES GEOLO	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	CONSIDERACIONES AI
8	CONSIDERACIONES EI	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	FACTORES TECNOLOG
9	CONSIDERACIONES EI	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	CONSIDERACIONES AI
10	FACTORES TECNOLOG	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	CONSIDERACIONES AI

Priority Graphs

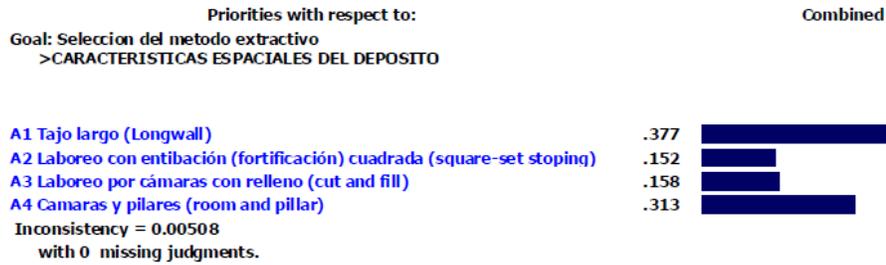


Compare the relative importance with respect to: CARACTERISTICAS ESPACIALES DEL DEPOSITO (L: .143)

Circle one number per row below using the scale:
 1 = Equal 3 = Moderate 5 = Strong 7 = Very strong 9 = Extreme

1	A1 Tajo larqo (Longwal	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A2 Laboreo con entibac
2	A1 Tajo larqo (Longwal	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A3 Laboreo por cámara
3	A1 Tajo larqo (Longwal	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A4 Camaras y pilares (r
4	A2 Laboreo con entibac	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A3 Laboreo por cámara
5	A2 Laboreo con entibac	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A4 Camaras y pilares (r
6	A3 Laboreo por cámara	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A4 Camaras y pilares (r

Priority Graphs

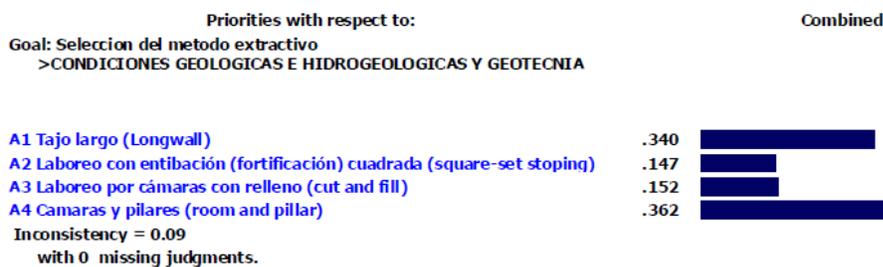


Compare the relative importance with respect to: CONDICIONES GEOLOGICAS E HIDROGEOLOGICAS Y GEOTECNIA (L: .269)

Circle one number per row below using the scale:
 1 = Equal 3 = Moderate 5 = Strong 7 = Very strong 9 = Extreme

1	A1 Tajo largo (Longwal)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A2 Laboreo con entibac
2	A1 Tajo largo (Longwal)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A3 Laboreo por cámara
3	A1 Tajo largo (Longwal)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A4 Camaras y pilares (r
4	A2 Laboreo con entibac	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A3 Laboreo por cámara
5	A2 Laboreo con entibac	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A4 Camaras y pilares (r
6	A3 Laboreo por cámara	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A4 Camaras y pilares (r

Priority Graphs



Compare the relative importance with respect to: CONSIDERACIONES ECONOMICAS (L: .280)

Circle one number per row below using the scale:
 1 = Equal 3 = Moderate 5 = Strong 7 = Very strong 9 = Extreme

1	A1 Tajo largo (Longwal)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A2 Laboreo con entibac
2	A1 Tajo largo (Longwal)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A3 Laboreo por cámara
3	A1 Tajo largo (Longwal)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A4 Camaras y pilares (r
4	A2 Laboreo con entibac	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A3 Laboreo por cámara
5	A2 Laboreo con entibac	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A4 Camaras y pilares (r
6	A3 Laboreo por cámara	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A4 Camaras y pilares (r

Priority Graphs

Priorities with respect to: Combined
 Goal: Seleccion del metodo extractivo
 >CONSIDERACIONES ECONOMICAS



07/06/2012 11:30:05 p.m.

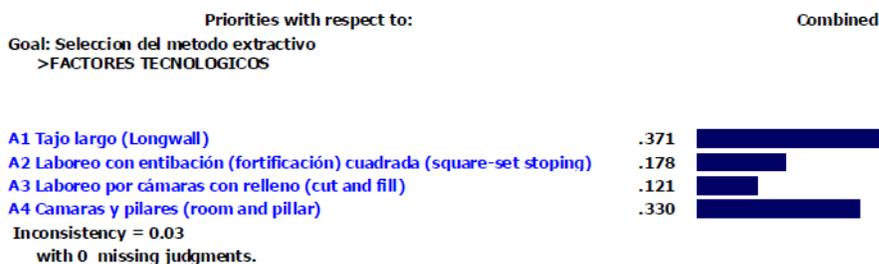
Page 7 of 8

**Compare the relative importance with respect to: FACTORES
TECNOLOGICOS (L: .093)**

Circle one number per row below using the scale:
1 = Equal 3 = Moderate 5 = Strong 7 = Very strong 9 = Extreme

1	A1 Tajo largo (Longwal)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A2 Laboreo con entibac
2	A1 Tajo largo (Longwal)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A3 Laboreo por cámara
3	A1 Tajo largo (Longwal)	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A4 Camaras y pilares (r
4	A2 Laboreo con entibac	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A3 Laboreo por cámara
5	A2 Laboreo con entibac	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A4 Camaras y pilares (r
6	A3 Laboreo por cámara	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A4 Camaras y pilares (r

Priority Graphs



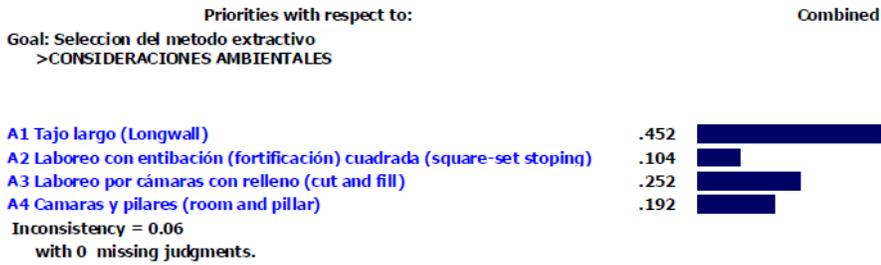
Compare the relative importance with respect to: CONSIDERACIONES AMBIENTALES (L: .215)

Circle one number per row below using the scale:

1 = Equal 3 = Moderate 5 = Strong 7 = Very strong 9 = Extreme

1	A1 Tajo largo (Longwal	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A2 Laboreo con entibac
2	A1 Tajo largo (Longwal	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A3 Laboreo por cámara
3	A1 Tajo largo (Longwal	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A4 Camaras y pilares (r
4	A2 Laboreo con entibac	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A3 Laboreo por cámara
5	A2 Laboreo con entibac	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A4 Camaras y pilares (r
6	A3 Laboreo por cámara	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A4 Camaras y pilares (r

Priority Graphs



E. Anexo E: Ponencia presentada a Enid

Artículo aceptado en calidad de presentación oral en el Encuentro Nacional de Investigación y Desarrollo ENID 2012, 29 de Agosto de 2012, Bogota D.C. Colombia.

ROMERO GELVEZ, Jorge Ivan, TRIANA, Leonardo Alfredo, CORTES Felix, Selección del método de explotación minera a partir de información cuantificada aplicando técnicas de decisión multicriterio

Selección del método de explotación minera a partir de información cuantificada aplicando técnicas de decisión multicriterio

Jorge Ivan Romero Gelvez, Leonardo Alfredo Triana y Felix Antonio Cortes Aldana

RESUMEN

El problema de selección del método extractivo se convierte en el aspecto más importante de la explotación minera, ya que se debe seleccionar el método que mejor encaje con los criterios únicos de cada yacimiento tales como son las características espaciales, condiciones geológicas, hidrogeológicas, geotecnia y otras consideraciones tales como las económicas, factores tecnológicos y ambientales. La selección del método extractivo es uno de los problemas de Decisión Multicriterio Discreta (DMD) en el cual los decisores han tenido inconvenientes para tomar la decisión apropiada en un ambiente multicriterio. Para resolver este problema se plantea la ponderación de variables mediante la entropía y la selección del método mediante PRES.

Palabras Clave— Análisis de decisión multicriterio, Selección del método de explotación minera.

I. INTRODUCCIÓN

Una explotación minera puede realizarse en superficie o debajo de ella, dependiendo de la profundidad del yacimiento y de otros parámetros técnicos, por lo cual las extracciones se clasifican principalmente en minería a cielo abierto y minería subterránea, cada una con diferentes métodos correspondientes a unos parámetros particulares; los métodos subterráneos se emplean cuando la profundidad del yacimiento es excesiva para llegar por explotación a cielo abierto. [1] La gran cantidad de criterios que pueden considerarse para seleccionar un método extractivo hace de esta una decisión bastante compleja para el decisor.

La selección de métodos extractivos en la minería es uno de los problemas de selección más antiguos de la humanidad, por tratarse de una actividad que tiene miles de años; la literatura científica más relevante al respecto comienza con Boshkov y Wright (1973) [2] quienes plantean uno de los primeros

esquemas cualitativos de clasificación para seleccionar los métodos extractivos. Un par de años después Morrison (1976) [3] propone un sistema de clasificación el cual divide la minería subterránea en tres grupos basado en las condiciones del terreno asignando a cada uno el tipo de soporte requerido. Laubscher (1981) [4] propone una metodología de selección para el método de extracción subterránea basada en el sistema de clasificación R.M.R por sus siglas en inglés (rock mass rating). La primera aproximación a un método de selección cuantitativo se da en el año de 1981 cuando David E. Nicholas [5] formula una aproximación numérica para la selección de método extractivo con su trabajo "Selection Procedure - A Numerical Approach" el cual formula el uso de una escala para la ponderación de cada uno de los métodos extractivos. Hartman (1987) desarrolla un esquema de selección basado en la geometría del yacimiento y las condiciones del terreno para escoger el método extractivo. Posteriormente Miller-Tait, L., Panalkis, R., Poulin, R., (1995) [6] de universidad de British Columbia modifican el método Nicholas y agregan nuevos valores a la escala. Finalmente en la actualidad existen algunos abordajes al problema de selección del método de explotación, mediante análisis de decisión multicriterio entre los cuales destacamos la aplicación de lógica difusa en los trabajos de Bitarafan, M.R., Ataei, M. (2004) [7] y también en Karadogan, A., Kahrman, A., & Ozer, U (2008) [8]; otro método de decisión multicriterio utilizado para resolver este problema ha sido AHP (Analytic hierarchy proces) o PAJ (análisis de procesos jerárquicos) [9]; aplicado en los trabajos de Alpay, S., & Yavuz, M. (2009) [10], Azadeh, A., Osanloo, M., & Ataei, M. (2010) [11] y Bogdanovic, D., Nikolic, D., & Ivana, I. (2012) [12]. Una revisión de los principales métodos multicriterio puede consultarse en Figueira, J., Greco, S., and Ehrgott, M., [13] y Barba Romero [14].

En el presente trabajo se ha empleado el método de asignación de peso mediante la entropía [15] junto con el método para la decisión multicriterio Pres: Programa de Evaluación de Proyectos Sociales [16] queriendo plantear un problema de decisión basado en información cuantitativa el cual puede ser replicado fácilmente, en el cual no sea necesario el criterio de expertos puesto que la gran cantidad de alternativas y criterios generan inconvenientes de disposición y consistencia de sus opiniones.

Para resolver este problema se genera una propuesta metodológica descrita en el punto IV y basada en la propuesta por Cortes (2007) [17] citando a (Henig y Buchanan, 1996)

Primer Autor: joimeroge@unal.edu.co, estudiante de Maestría en Ingeniería - Ingeniería Industrial, Universidad Nacional de Colombia.

Segundo Autor: latrianac@unal.edu.co, Estudiante de Ingeniería - Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia.

Tercer Autor: facortesa@unal.edu.co, Ph. D. en Proyectos de Ingeniería e Innovación, Universidad Politécnica de Valencia, España, M. Sc. en Ciencias Económicas, Universidad Santo Tomás, Ingeniero de Sistemas, Universidad Nacional de Colombia Profesor Asociado, Departamento Ingeniería de Sistemas e Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia.

[18] la cual consta de las siguientes etapas:

1. Análisis de las alternativas
2. Selección de los criterios de decisión
3. Ponderación de los criterios
4. Valoración de las alternativas según cada criterio
5. Cálculo de la prioridad global en el conjunto de alternativas
6. Análisis de resultados e informe final.

II. ANALISIS DE ALTERNATIVAS

Se tomarán como alternativas válidas las cuales den una ponderación positiva al aplicar la técnica UBC (1995) [6] lo cual permitirá eliminar alternativas que no son viables técnicamente y dejara solamente las cuales deben ser consideradas. Si bien hay una buena cantidad de métodos extractivos, solo se consideraran 9 de los 10 métodos descritos en Nicholas (1992) [5] y en Hartman (1987) [19], a continuación los presentamos según Arteaga (1997) [20] y [21].

- Alternativa 1 Cielo Abierto (*Open pit*)
- Alternativa 2 Hundimiento de bloques (*Block caving*)
- Alternativa 3 Cámaras por Subniveles (*Sublevel Stopping*)
- Alternativa 4 Hundimiento por subniveles (*sublevel caving*)
- Alternativa 5 Tajos Largos (*longwall*)
- Alternativa 6 Cámaras y pilares (*room and pillar*)
- Alternativa 7 Cámaras almacén (*Shrinkage Stopping*)
- Alternativa 8 Corte y Relleno (*Cut and Fill*)
- Alternativa 9 Método de Entibación con Cuadros. (Fortificación de madera)

III. SELECCIÓN DE LOS CRITERIOS DE DECISION

Hartman (1987) [19] plantea unos criterios y sub criterios necesarios para analizar el método extractivo que se usara para cada explotación minera, los cuales son reunidos dentro del método UBC (1995) [6]. Para este problema los criterios a tomar en cuenta para seleccionar un método extractivo basándonos en los planteados por Hartman (1989) [19] son:

Criterio1. Características espaciales del depósito. Son probablemente los más determinantes, debido a que ellos deciden ampliamente si se escoge minería a cielo abierto o minería subterránea y la tasa de producción, el manejo del material y el diseño de la mina en el depósito.

- Sc1. Tamaño (especialmente altura o espesor)
- Sc2. Forma (tabular, lenticular, masivo, irregular)
- Sc3. Posición (Inclinación o caída)
- Sc4. Profundidad

Criterio2. Condiciones geológicas e hidrogeológicas y propiedades Geotécnicas (Mecánica de rocas y suelos). Las características geológicas del depósito mineral y de los materiales adyacentes al depósito influyen la selección del método extractivo. Especialmente en los métodos subterráneos donde se necesitan parámetros de control de la excavación en

el subsuelo. La hidrogeología afecta el drenaje y los requerimientos de bombeo en superficie y subterráneos. La mineralogía regula los requisitos de procesamiento del mineral. Las propiedades mecánicas de los materiales que comprimen el depósito y la roca in situ (y suelo si es considerable su espesor) son factores clave en la selección del equipo a utilizar en minería superficial y a su vez la cantidad de clases de métodos si esta es subterránea (no soportada, soportada y escavada).

- Sc5. Distribución
- Sc6. Rock mass ratings (RMR)
- Sc7. Rock substance strength (RSS)

Criterio 3 Consideraciones económicas. Al final, estas consideraciones determinan el éxito de una empresa minera. Estos factores gobiernan la elección del método minero porque afectan la salida de material, la inversión, el flujo de caja, el periodo de retorno de la inversión y de beneficio.

- Sc8. Tasa de desempeño
- Sc9. Producción (Producción por unidad de tiempo)
- Sc10. Inversión de Capital
- Sc11. Productividad (toneladas por turno de empleado)
- Sc12. Costos comparativos de los métodos de minería posibles.

Criterio4. Factores Tecnológicos La mejor combinación entre el terreno y el método que se intenta escoger. El método escogido puede tener impactos negativos en el mineral extraído en cuanto a su uso posterior (procesamiento, fundición)

- Sc13. Recuperación de la mina (porción del depósito extraído actualmente)
- Sc14. Dilución (cantidad de desperdicios producidos con el mineral)
- Sc15. La flexibilidad del método con el cambio de condiciones
- Sc16. Selectividad del método para distinguir el mineral y los residuos

Criterio5. Consideraciones ambientales ambientales no sólo el ambiente físico, sino el clima social, político, económico.

- Sc17. Estabilidad de las aberturas
- Sc18. Subsistencia, o efectos en la superficie de excavación
- Sc19. Condiciones de salud y seguridad

IV. PROPUESTA METODOLOGICA

De acuerdo al planteamiento metodológico de Cortes (2007) [17] citando a (Henig y Buchanan, 1996) [18] y adaptando las fases del proceso de decisión multicriterio a este problema de selección el cual puede verse en la **Figura 1**, la primera y segunda etapa de resolución del problema están dadas en los puntos II y III, la posterior construcción de la matriz de decisión se realizó basándonos en la información contenida en las tablas de comparación 14.4 y 14.6 de Hartman, y

Mutmansky [1] (paginas 494 y 496) los cuales comparan las ventajas y desventajas de los sub criterios 8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18 y 19 con cada una de las alternativas planteadas para resolver este problema de selección, por lo cual los valores asignados a cada uno de estos serán constantes en cualquier problema de selección del método extractivo. Por otra parte los sub criterios 1,2,3,4,5,6 y 7 variaran de acuerdo a los parámetros técnicos de cada situación específica y serán determinados con base a una modificación de la escala UBC.

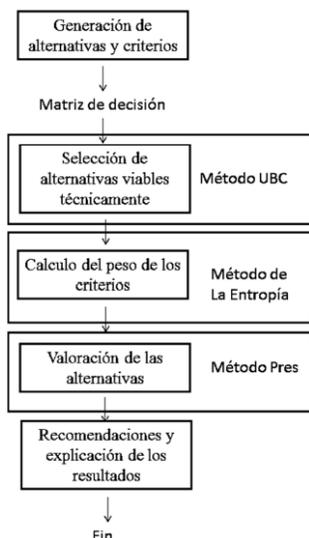


Fig. 1. Fases del proceso de decisión multicriterio planteado por los autores, adaptado de Romero (1997) [14] página 360

La matriz de decisión genérica vista en la **Tabla 1.** fue construida a partir de la conversión de las valoraciones dadas por Hartman, y Mutmansky.

Tabla 1. Matriz de decisión genérica cualitativa

C	Sc	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
C1	Sc1									
	Sc2									
	Sc3									
	Sc4									
C2	Sc5									
	Sc6									
	Sc7									
	Sc8	Rapid	Slow	Moderate	Moderate	Moderate	Rapid	Rapid	Moderate	Slow
C3	Sc9	Large Scale	Large	Large	Large	Large	Large	Moderate	Moderate	Small
	Sc10	Large	High	Moderate	Moderate	High	High	Low	Moderate	Low
	Sc11	High	Low	Low	Moderate	High	High	Low	Moderate	Low
	Sc12	5	10	20	15	15	20	45	55	100
C4	Sc13	High	High	Moderate	High	Moderate	High	High	High	Pigment
	Sc14	Moderate	High	Moderate	Moderate	Low	Moderate	Low	Low	Lowest
	Sc15	Moderate	Low	Low	Moderate	Low	Moderate	Moderate	Moderate	High
	Sc16	Low	Low	Low	Low	Low	Low	Moderate	High	High
C5	Sc17	High	Moderate	High	Moderate	High	Moderate	High	High	High
	Sc18	High	High	Low	High	Moderate	Low	Low	Low	Low
	Sc19	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Moderate	Poor

Todas las valoraciones dadas anteriormente a los criterios son cualitativas exceptuando el Sc12, por lo tanto se reemplaza cada valoración con un índice numérico dado en las siguientes

escalas: Escala 1: Highest 5, High 4, Moderate 3, Low 2, Lowest 1; Escala 2: Good 3, Moderate 2, Poor 1; Escala 3: Large scale 4, Large 3, Moderate 2, Small 1; Escala 4: Large 4, High 3, Moderate 2 y Small 1. Dando como resultado la matriz genérica cuantitativa presente en la **Tabla 2.**

Tabla 2. Matriz de decisión genérica cuantitativa

C	Sc	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
C1	Sc1									
	Sc2									
	Sc3									
	Sc4									
C2	Sc5									
	Sc6									
	Sc7									
	Sc8	3	1	2	2	2	3	3	2	1
C3	Sc9	4	3	3	3	3	3	2	2	1
	Sc10	4	3	2	2	3	3	1	2	1
	Sc11	4	2	2	3	4	4	2	3	2
	Sc12	5	10	20	15	15	20	45	55	100
C4	Sc13	4	4	3	4	4	3	4	4	5
	Sc14	3	4	3	3	2	3	2	2	1
	Sc15	3	2	2	3	2	3	3	3	4
	Sc16	2	2	2	2	2	2	3	4	4
C5	Sc17	4	3	4	3	4	3	4	4	4
	Sc18	4	4	2	4	4	3	2	2	2
	Sc19	3	3	3	3	3	3	3	2	1

Para terminar la matriz de decisión y agregar la información faltante correspondiente a los Sub criterios 1,2,3,4,5,6 y 7 utilizaremos la escala que propone el método UBC la cual plantea un intervalo entre -46 y 6 (podemos observar los valores en el Anexo 1) la cual considera valores negativos únicamente para mostrar que métodos no son técnicamente viables; para trabajar únicamente con valores positivos movimos dicha escala a valores positivos comenzando en 1 y terminando en 56 por lo cual -49 sería reemplazado con 1 y el valor de 6 con 56.

A. Método de Selección UBC

El método de selección UBC (Universidad de British Columbia) es una versión modificada de la técnica Nicholas. Como nuevo aporte se introduce un valor, -10 para dar un peso negativo sin eliminar un método completamente, tal como lo hacía la técnica de Nicholas con el valor de -49. Por otra parte, las calificaciones de mecánica de rocas fueron ajustadas. Puede consultar el método más a fondo en [6]

Tabla 3. Criterios del método UBC

1. Forma general	
Equi-dimensional	Todas las dimensiones están en el mismo orden de magnitud
Tabular	Dos dimensiones tienen muchas veces el mismo espesor, que no suele superar los 35m
Irregular	Las dimensiones varían en cortas distancias.
2. Espesor del manto	
Muy estrecho	<3m
Estrecho	3-10m
Intermedio	10-100m

Grueso	30-100m
Muy Grueso	>100m
3. Inclinación	
Plano	<20 grados
Intermedio	20-55 grados
Empinado	>55 grados
4. Profundidad	
Superficial	0-100 m
Intermedio	100-600m
Profundo	>600m
5. Distribución	
Uniforme	El grado en cualquier punto del depósito no varía significativamente de la calificación media.
Gradaciones	El grado tiene características zonales, y cambia gradualmente de un lugar a otro.
Errático	El grado cambia radicalmente en cortas distancias.
6. Rock mass ratings	
Muy débil	0-20
Débil	20-40
Moderado	40-60
Fuerte	60-80
Muy Fuerte	80-100
7. Rock substance strength (Fuerza uniaxial / Esfuerzo principal)	
Muy débil	<5
Débil	5-10
Moderado	10-15
Fuerte	>15

B. Método de la Entropía

El método de la Entropía fue desarrollado por Zeleny (1982) [15] como un método objetivo de asignación de los pesos en función de la matriz de decisión sin que afecte la preferencia del decisor, según Romero (1997) [14] la importancia relativa del criterio j en una situación de decisión, medida por su peso w_j , esta directamente relacionada con la cantidad de información intrínsecamente aportada por el conjunto de las alternativas respecto a dicho criterio. Cuanta mayor diversidad haya en las evaluaciones de las alternativas mayor importancia deberá tener dicho criterio.

La medida de esta diversidad esta basada conceptualmente en el sólido y aceptado concepto de la entropía en un canal de información planteado por Shannon (1949) [23].

El procedimiento es el siguiente:

- Tomamos las evaluaciones a_{ij} ($i=1,m$)($j=1,n$) ya normalizadas como fracción de la suma $\sum_i a_{ij}$ de las evaluaciones originales de cada criterio j .
- Se calcula la entropía (E_j).

$$E_j = -1/\log m * \sum a_{ij} * \log a_{ij} \quad (1)$$

- donde m = Numero de alternativas en la matriz de evaluaciones normalizadas y a_{ij} = Criterios o atributos normalizados.
- Se calcula la diversidad del criterio (D_j).

$$D_j = 1 - E_j \quad (2)$$

Se calcula el peso normalizado de cada criterio (W_j).

$$W_j = D_j / \sum_j D_j = 1.0 \quad (3)$$

C. Método Pres

El método Pres fue desarrollado por Gómez-Senent (1991) [16] y trata de determinar la alternativa más favorable comparando las alternativas posibles. Establece las relaciones entre alternativas para todos y cada uno de los criterios establecidos para el estudio de soluciones. De esta manera el método promulga la elección óptima en aquella alternativa que es mejor que las demás en el mayor número posible de criterios y es la que tiene menores debilidades frente a las restantes.

Su sencillo enfoque conceptual lo hace fácilmente replicable y su desarrollo es el siguiente:

- Establecer los criterios y pesos específicos: c_j y p_j .
- Valoración de criterios para cada una de las alternativas: x_{ij} .
- Determinación de la matriz de valoración

Criterio	C1	C2	(...)	C_j	(...)	C_N
PESO	P_1	P_2	...	P_j	...	P_N
Alternati va 1	$G_1(1)$	$G_2(1)$	...	$G_j(1)$	...	$G_N(1)$
(...)
Alternati va X	$G_1(x)$	$G_2(x)$	...	$G_j(x)$	...	$G_N(x)$
(...)
Alternati va M	$G_1(M)$	$G_2(M)$	...	$G_j(M)$	...	$G_N(M)$

- Se normalizan los valores de los pesos de los criterios

$$P_j = \frac{P_j}{\sum_{j=1}^N P_j} \quad (4)$$

- Se transforman las escalas de evaluación de los criterios para que sean comparables

$$g_j = \frac{G_j(x)}{G_{j\max}} \quad (5)$$

- Determinación de la matriz de dominancia. El método se basa en comparar cada iniciativa con todos los demás. La comparación binaria de una iniciativa "a" con otra "b" se realiza para cada criterio y se obtiene la Matriz de Dominación. La matriz responde a la siguiente expresión:

$$T_{(i,j)} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \in D}}^N p_k [g_{(i)} - g_{(j)}] \quad (6)$$

- Finalmente se calculan los valores D_i como la suma de las filas de la matriz de dominancia y d_i como suma de las columnas correspondientes. Se concluye

determinando, para cada alternativa, de la relación entre D_i y d_i siendo la solución optima igual a la expresión:

$$\text{Max} \left[\frac{D_i}{d_i} \right]_{i=1}^{i=N} \quad (7)$$

V. ESTUDIO DE CASO

A. Selección del método extractivo para una mina de cromo en Karaburun (Turquía)

Basados en [22], Tenemos en la **Tabla 4** los parámetros técnicos correspondientes a los criterios C1 y C2, los cuales replazamos mediante la conversión de la escala UBC plateada en la propuesta metodológica.

Tabla 4. Parámetros técnicos mina de cromo de Karaburun (Turquía)

Parámetro	Calidad
Inclinación	Promedio = 65 Grados NE
Espesor	Promedio = 2.7 metros
Tipo	Irregular
Buzamiento	N 80° W
Grado de distribución	Irregular
Profundidad	<100 metros
RMR (rock mass rating)	47, 53 y 34
RMS (rock substance strength)	18.63, 20 y 12.33

Tabla 4. Matriz de decisión Especifica

C	Sc	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
C1	Sc1	53	50	51	51	1	52	54	54	54
	Sc2	51	54	54	54	1	1	54	54	52
	Sc3	53	53	54	53	54	54	53	52	50
	Sc4	51	1	40	1	54	54	54	53	54
C2	Sc5	54	52	53	53	52	53	53	52	51
	Sc6	61	59	58	60	60	53	55	57	55
	Sc7	61	52	62	56	54	59	60	57	51
C3	Sc8	3	1	2	2	2	3	3	2	1
	Sc9	4	3	3	3	3	3	2	2	1
	Sc10	4	3	2	2	3	3	1	2	1
	Sc11	4	2	2	3	4	4	2	3	2
	Sc12	5	10	20	15	15	20	45	55	100
C4	Sc13	4	4	3	4	4	3	4	4	5
	Sc14	3	4	3	3	2	3	2	2	1
	Sc15	3	2	2	3	2	3	3	3	4
C5	Sc16	2	2	2	2	2	2	3	4	4
	Sc17	4	3	4	3	4	3	4	4	4
	Sc18	4	4	2	4	4	3	2	2	2
	Sc19	3	3	3	3	3	3	2	1	

Ahora aplicamos el método UBC para eliminar las alternativas que no son viables técnicamente dejando como alternativas viables Cielo Abierto (Open pit) valuado con 34, Alternativa 7 Cámaras almacén (Shrinkage Stopping) valuado con 31, Corte y Relleno (Cut and Fill) valuado con 29, Cámaras por Subniveles (Sublevel Stopping) valuado con 22 y Método de Entibación con Cuadros. (Square set stoping) valuado con 17.

Las valoraciones de los demás métodos son negativas por tanto no se toman como alternativas validas, lo cual podemos ver gráficamente en la **Figura 2** (ver a continuación).

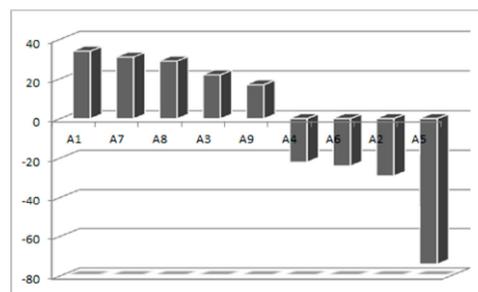


Fig. 2. Alternativas viables y no viables técnicamente, aplicando la metodología UBC.

Tomando entonces como alternativas viables las A1, A3, A7, A8 y A9 el siguiente punto en nuestro desarrollo metodológico es la asignación de peso a los criterios mediante la entropía.

Cabe resaltar que dicha ponderación se realiza con la información correspondiente a los todos métodos extractivos para considerar así los valores mínimos y máximos de cada escala.

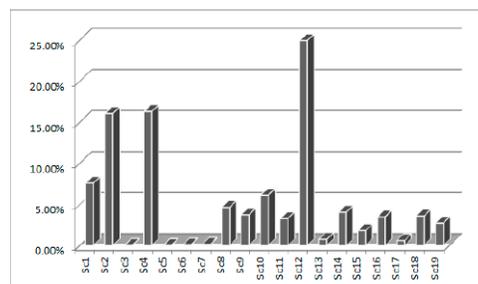


Fig. 3. Asignación de peso a los criterios mediante el método de la Entropía.

Como resultado tenemos lista nuestra matriz de valoración la cual observamos en la **Tabla 5** (ver a continuación).

Tabla 5. Matriz de decisión Especifica

Peso	C1			C2			C3			C4			C5						
	Sc1	Sc2	Sc3	Sc4	Sc5	Sc6	Sc7	Sc8	Sc9	Sc10	Sc11	Sc12	Sc13	Sc14	Sc15	Sc16	Sc17	Sc18	Sc19
a1	53	51	53	53	54	40	41	3	4	4	4	5	4	3	3	2	4	4	3
a3	51	54	54	54	54	60	60	3	3	2	2	20	3	3	2	2	4	4	3
a7	53	53	54	53	54	54	53	2	2	2	45	4	2	3	3	4	4	2	3
a8	51	1	40	1	54	54	54	3	2	2	1	55	4	2	3	4	4	2	3
a9	54	52	53	53	52	53	53	1	1	1	2	100	3	1	4	4	4	2	1

Como ya hemos eliminado las alternativas que no son viables mediante el método UBC, resta verificar si dentro de las alternativas seleccionadas existen alternativas que son dominadas por otras, lo cual podemos observar en la **Tabla 6** (ver a continuación).

Tabla 6. Matriz de dominancia

	A1	A2	A3	A4	A5
A1	0	14	13	12	10
A2	9	0	11	12	12
A3	12	14	0	15	14
A4	10	12	11	0	14
A5	10	10	11	9	0

Constatando mediante la matriz anterior definimos todas nuestras alternativas como óptimos de Pareto de las cuales ninguna alternativa es dominada por otra en todos los criterios aquí postulados.

Finalmente calculamos el índice Pres correspondiente a la Matriz de valoración normalizada el cual podemos observar en la **Tabla 7** lo que nos indica que la alternativa a escoger debería ser la Alternativa 1 (minería a cielo abierto) con un valor de 1.98 la cual supera por muy poco a la Alternativa 7 (Cámaras almacén).

Tabla 7. Cálculo del Índice Pres

Alternativa	Índice Pres
Alternativa 1 Cielo Abierto (<i>Open pit</i>)	1.98
Alternativa 7 Cámaras almacén (<i>Shrinkage Stopping</i>)	1.84
Alternativa 3 Cámaras por Subniveles (<i>Sublevel Stopping</i>)	1.15
Alternativa 8 Corte y Relleno (<i>Cut and Fill</i>)	0.94
Alternativa 9 Método de Entibación con Cuadros. (Fortificación de madera)	0.33

Pueden presentarse casos como el de la Anomalia No 3 al seleccionar el método extractivo para una mina de hierro en Gol Gohar (Iran) [26], donde el yacimiento está presente desde 90 a 700 metros de profundidad, en dichos casos los cuales nos pone en entredicho la escogencia de la profundidad dentro de la escala UBC, aplicamos la metodología dos veces, una con el valor mínimo y otra con el valor máximo del depósito, posteriormente tendremos que evaluar detalladamente hasta que punto es viable usar un método u otro, como también si es más viable un intercambio de un método al otro sobre el tiempo de vida de la mina.

VI. CONCLUSIONES

La selección del método extractivo puede realizarse mediante la entropía y Pres, usando así un gran número de criterios que no son tenidos en cuenta la mayoría de veces en este proceso de decisión tales como comprenden los criterios C3, C4 y C5.

En problemas de selección los cuales cuentan con gran número de criterios se pueden presentar inconvenientes al trabajar con expertos en cuanto a la disposición y consistencia de la participación de los mismos con el problema a resolver. En dados casos puede ser usada la metodología propuesta mediante la entropía y el método Pres, generando una forma sencilla y acertada para la resolución del problema.

REFERENCIAS

- Hartman, H.L., Mutmanský, J.M., 2002. *Introductory Mining Engineering*. John Wiley, New Jersey.
- Boshkov, S.H., Wright, F.D., 1973 (Basic and parametric criteria in the selection, design and development of underground mining systems). *SME Mining Engineering Handbook*. SME-AIME, New York.
- R.G.K. Morrison, A Philosophy of Ground Control, McGill University, Montreal, Canada, 1976, pp. 125-159
- D.H. Laubscher, Selection of Mass Underground Mining Methods, Design and Operation of Caving and Sublevel Stopping Mines, D. Stewart, SME-AIME, New York, 1981 (Chapter 3, pp. 23-38).
- D.E. Nicholas, Selection Procedure, *SME Mining Engineering Handbook*, second edition, Society for Mining Engineering, Metallurgy and Exploration, Inc., 1992, pp. 2090-2106.
- Miller-Tait, L., Panalkis, R., Poulin, R., 1995. UBC mining method selection. In: *Proceeding of the Mine Planning and Equipment Selection Symposium*, pp. 163-168. *Underground mining method selection by decision making tools*
- Bitarafan, M.R., Ataei, M., 2004. Mining method selection by multiple criteria decision making tools. *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.* 104, 493-498.
- Karadogan, A., Kahrman, A., & Ozer, U. (2008). Application of fuzzy set theory in the selection of underground mining method. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 108(2), 73-79.
- Saaty, The Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process. Pittsburgh: RWS Publications, 1994.
- Alpay, S., & Yavuz, M. (2009). Underground mining method selection by decision making tools. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(2), 173-184.
- Azadeh, A., Osanloo, M., & Ataei, M. (2010). A new approach to mining method selection based on modifying the nicholas technique. *Applied Soft Computing Journal*, 10(4), 1040-1061.
- Bogdanovic, D., Nikolic, D., & Ivana, I. (2012). Mining method selection by integrated AHP and PROMETHEE method. *Anais Da Academia Brasileira De Ciencias*, 84(1), 219-233.
- Figueira, J., Greco, S., and Ehrgott, M., (Eds.) *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, Springer, New York, 2005
- Barba Romero, S., & Pomerol, J., *Decisiones Multicriterio. Fundamentos Teóricos y Utilización Práctica.*, Universidad de Alcalá de Henares, 1997
- Zeleny M. (1982): *Multiple Criteria Decision Making*. Ed. Mc Graw Hill, New York
- Gómez-Senent, E.; Chiner, M.; Chiner, M.J. 1991. PRES: Programa de Evaluación de Proyectos Sociales. VII Congreso Nacional de Ingeniería de Proyectos. Zaragoza 26-28 Junio; pp.27-35
- Cortés Aldana, F. A., García Melón, M., Aragónés, P., Selección de una tecnología de banda ancha para la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, usando una técnica de decisión multicriterio, *Revista Ingeniería e Investigación*, Vol.27 No.1, 2007, pp. 132-137.
- Henig, M.I. and Buchanan, J., Solving MCDM problems: Process concepts, *J. Multi-Crit. Decis Anal.* 5, 1996, pp. 3-21.
- Hartman, H.L., 1987. *Introductory Mining Engineering*. John Wiley, New Jersey.
- Arteaga, R. *Manual de Evaluación Técnico-Económica de Proyectos Mineros de Inversión*. Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid, 1997.
- Manual de Minería, estudios mineros del Perú S.A.C. Disponible en: http://www.estudiosmineros.com/ManualMineria/Manual_Mineria.pdf
- Kahrman, A., Ceylanoglu, A., Demirci, A., Arpaz, E., Gorgulu, K., 1996. Selection of optimum underground mining method for Eskisehir-Karaburun chromite ore (in Turkish). In: *Proceeding of the 3rd National Rock Mechanics Symposium*, pp.47-60.
- Shannon, C. E. and W. WEAVER (1949), *The Mathematical Theory of Communication*, (University of Illinois Press, Chicago)
- H. Hamrin, *Choosing an Underground Mining Method*. *Underground Mining Methods Handbook*, AIME, New York, 1982.
- B.H.G. Brady, E.T. Brown, *Rock Mechanics for Underground Mining*. George Allen and Unwin, London, 1985.
- Ataei M. Study of anomaly No. 3 of Gol-Gohar iron mine of Iran, unpublished, 1998, pp. 1-54.
- Henig, M.I. and Buchanan, J., Solving MCDM problems: Process concepts., *J. Multi-Crit. Decis Anal.* 5, 1996, pp. 3-21.

F. Anexo F: Cuestionario para realizar análisis de comparación por pares

El siguiente cuestionario se aplicó a cinco decisores con el fin de recopilar sus opiniones en el ejercicio de aplicación del método PAJ proceso de análisis jerárquico.

SELECCION DEL METODO MINERO MEDIANTE EL USO DEL PROCESO ANALITICO JERARQUICO

1. OBJETIVO DE LA ENCUESTA

El objetivo de esta encuesta es llegar a seleccionar la alternativa de extracción minera mas adecuada basada en multiples criterios, como parte del desarrollo de una metodología que implica el uso de herramientas multicriterio para este proposito. Para ello se va a utilizar los conocimientos y la experiencia de un grupo de expertos entre los que se encuentra usted. A través de esta encuesta se le va a pedir su opinión sobre distintos aspectos, comparando cada alternativa con otras y utilizando una metodología que se explica en el punto 3. Mediante la agregación de los resultados obtenidos por los distintos expertos consultados se llegará finalmente a un valor final.

2. JUSTIFICACIÓN DE LA ENCUESTA

Esta metodología se justifica en aquellos casos como el que nos ocupa en que no existe una suficiente información cuantificada que nos permita aplicar otros métodos. La metodología utilizada con la información deducida de la encuesta permite cuantificar las variables y llegar al cálculo de un valor final.

3. METODOLOGÍA PROPUESTA

La metodología propuesta se basa en el método denominado Proceso Analítico Jerárquico y consiste en obtener unas matrices de comparaciones pareadas utilizando las comparaciones obtenidas entre distintos elementos.

Para esas comparaciones se utiliza la siguiente escala fundamental de comparaciones pareadas (Cortes 2007 citando a Saaty 1994).

- Cij = 1: se considera igualmente importante el criterio i que el criterio j
 - Cij = 3: se considera ligeramente más importante el criterio i que el criterio j
 - Cij = 5: se considera bastante más importante el criterio i que el criterio j
 - Cij = 7: se considera mucho más importante (o demostrablemente más importante) el criterio i que el criterio j
 - Cij = 9: se considera absolutamente más importante el criterio i que el criterio j
- Los valores 2, 4, 6, 8 pueden ser utilizados de considerarse necesario.

4. CRITERIOS Y SUBCRITERIOS

C1. CARACTERISTICAS ESPACIALES DEL DEPOSITO

- Sc1. Forma general
- Sc2. Espesor del manto
- Sc3. Inclinacion
- Sc4. Profundidad

C2. CONDICIONES GEOLOGICAS E HIDROGEOLOGICAS Y GEOTECNIA

- Sc5. Distribucion
- Sc6. Rock mass ratings (RMR)
- Sc7. Rock substance strength (RSS)

C3. CONSIDERACIONES ECONOMICAS

- Sc8. Tasa de desempeño
- Sc9. Produccion (Produccion por unidad de tiempo)
- Sc10. Inversion de Capital
- Sc11. Productividad (toneladas por turno de empleado)
- Sc12. Costos comparativos de métodos mineros adecuados

C4. FACTORES TECNOLOGICOS

- Sc13. Recuperacion de la mina (porcion del deposito extraido actualmente)
- Sc14. Dilucion (cantidad de desperdicios producidos con el mineral)
- Sc15. La flexibilidad del metodo con el cambio de condiciones
- Sc16. Selectividad del método para distinguir el mineral y los residuos

3. Entre el criterio C1:CARACTERISTICAS ESPACIALES DEL DEPOSITO y C4: FACTORES TECNOLOGICOS- ¿Qué criterio considera más importante? *

CARACTERISTICAS ESPACIALES DEL DEPOSITO

FACTORES TECNOLOGICOS

3. En que grado *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

4. Entre el criterio C1:CARACTERISTICAS ESPACIALES DEL DEPOSITO y C5: CONSIDERACIONES AMBIENTALES- ¿Qué criterio considera más importante? *

CARACTERISTICAS ESPACIALES DEL DEPOSITO

CONSIDERACIONES AMBIENTALES

4. En que grado *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

5. Entre el criterio C2:CONDICIONES GEOLOGICAS E HIDROGEOLOGICAS Y GEOTECNIA y C3: CONSIDERACIONES ECONOMICAS- ¿Qué criterio considera más importante? *

CONDICIONES GEOLOGICAS E HIDROGEOLOGICAS Y GEOTECNIA

CONSIDERACIONES ECONOMICAS

5. En que grado *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

6. Entre el criterio C2:CONDICIONES GEOLOGICAS E HIDROGEOLOGICAS Y GEOTECNIA y C4: FACTORES TECNOLOGICOS- ¿Qué criterio considera más importante? *

CONDICIONES GEOLOGICAS E HIDROGEOLOGICAS Y GEOTECNIA

FACTORES TECNOLOGICOS

6.En que grado *

1 2 3 4 5 6 7 8 9



7. Entre el criterio C2:CONDICIONES GEOLOGICAS E HIDROGEOLOGICAS Y GEOTECNIA y C5: FACTORES AMBIENTALES- ¿Qué criterio considera más importante? *

- CONDICIONES GEOLOGICAS E HIDROGEOLOGICAS Y GEOTECNIA
 FACTORES AMBIENTALES

7. En que grado *

1 2 3 4 5 6 7 8 9



8. Entre el criterio C3:CONSIDERACIONES ECONOMICAS y C4: FACTORES TECNOLOGICOS- ¿Qué criterio considera más importante? *

- CONSIDERACIONES ECONOMICAS
 FACTORES TECNOLOGICOS

8En que grado *

1 2 3 4 5 6 7 8 9



9. Entre el criterio C3:CONSIDERACIONES ECONOMICAS y C5: FACTORES AMBIENTALES- ¿Qué criterio considera más importante? *

- CONSIDERACIONES ECONOMICAS
 FACTORES AMBIENTALES

9.En que grado *

1 2 3 4 5 6 7 8 9



10. Entre el criterio C4:FACTORES TECNOLOGICOS y C5: FACTORES AMBIENTALES- ¿Qué criterio considera más importante? *

- FACTORES TECNOLOGICOS
 FACTORES AMBIENTALES

10.En que grado *

1 2 3 4 5 6 7 8 9



11. Tomando unicamente "C1 CARACTERISTICAS ESPACIALES DEL DEPOSITO" Entre las alternativas A1 Tajo largo (Longwall) y A2 Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping)- ¿Qué alternativa considera más importante? *

Tajo largo(Longwall)

Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping)

11.En que grado *

1 2 3 4 5 6 7 8 9



12. Tomando unicamente "C1 CARACTERISTICAS ESPACIALES DEL DEPOSITO" Entre las alternativas A1 Tajo largo (Longwall) y A3 Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill)- ¿Qué alternativa considera más importante? *

Tajo largo (Longwall)

Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill)

12. En que grado *

1 2 3 4 5 6 7 8 9



13. Tomando unicamente "C1 CARACTERISTICAS ESPACIALES DEL DEPOSITO" Entre las alternativas A1 Tajo largo (Longwall) y A4 Camaras y pilares (room and pillar)- ¿Qué alternativa considera más importante? *

Tajo largo (Longwall)

Camaras y pilares (room and pillar)

13. En que grado *

1 2 3 4 5 6 7 8 9



14.Tomando unicamente "C1 CARACTERISTICAS ESPACIALES DEL DEPOSITO" Entre las alternativas A2 Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping) y A3 Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill) - ¿Qué alternativa considera más importante? *

18. Tomando unicamente "C2 CONDICIONES GEOLOGICAS E HIDROGEOLOGICAS Y GEOTECNIA" Entre las alternativas A1 Tajo largo (Longwall) y A3 Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill)- ¿Qué alternativa considera más importante? *

- Tajo largo (Longwall)
- Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill)

18. En que grado *

1	2	3	4	5	6	7	8	9
<input type="radio"/>								

19. Tomando unicamente "C2 CONDICIONES GEOLOGICAS E HIDROGEOLOGICAS Y GEOTECNIA " Entre las alternativas A1 Tajo largo (Longwall) y A4 Camaras y pilares (room and pillar)- ¿Qué alternativa considera más importante? *

- Tajo largo (Longwall)
- Camaras y pilares (room and pillar)

19. En que grado *

1	2	3	4	5	6	7	8	9
<input type="radio"/>								

20. Tomando unicamente "C2 CONDICIONES GEOLOGICAS E HIDROGEOLOGICAS Y GEOTECNIA" Entre las alternativas A2 Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping) y A3 Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill) - ¿Qué alternativa considera más importante? *

- Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping)
- Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill)

20. En que grado *

1	2	3	4	5	6	7	8	9
<input type="radio"/>								

21. Tomando unicamente "C2 CONDICIONES GEOLOGICAS E HIDROGEOLOGICAS Y GEOTECNIA " Entre las alternativas A2 Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping) y A4 Camaras y pilares (room and pillar) - ¿Qué alternativa considera más importante? *

- Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping)
- Camaras y pilares (room and pillar)

21. En que grado *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

22. Tomando unicamente "C2 CONDICIONES GEOLOGICAS E HIDROGEOLOGICAS Y GEOTECNIA" Entre las alternativas A3 Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill) y A4 Camaras y pilares (room and pillar) - ¿Qué alternativa considera más importante? *

Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill)

Camaras y pilares (room and pillar)

22. En que grado *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

23. Tomando unicamente "CONSIDERACIONES ECONOMICAS" Entre las alternativas A1 Tajo largo (Longwall) y A2 Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping)- ¿Qué alternativa considera más importante? *

Tajo largo (Longwall)

Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping)

23. En que grado *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

24. Tomando unicamente "CONSIDERACIONES ECONOMICAS" Entre las alternativas A1 Tajo largo (Longwall) y A3 Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill)- ¿Qué alternativa considera más importante? *

Tajo largo (Longwall)

Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill)

24. En que grado *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

25. Tomando unicamente "CONSIDERACIONES ECONOMICAS" Entre las alternativas A1 Tajo largo (Longwall) y A4 Camaras y pilares (room and pillar)- ¿Qué alternativa considera

más importante? *

- Tajo largo (Longwall)
- Camaras y pilares (room and pillar)

25. En que grado *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

26. Tomando unicamente "CONSIDERACIONES ECONOMICAS" Entre las alternativas A2 Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping) y A3 Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill) - ¿Qué alternativa considera más importante? *

- Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping)
- Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill)

26. En que grado *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

27. Tomando unicamente "CONSIDERACIONES ECONOMICAS " Entre las alternativas A2 Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping) y A4 Camaras y pilares (room and pillar) - ¿Qué alternativa consdera más importante? *

- Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping)
- Camaras y pilares (room and pillar)

27. En que grado *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

28. Tomando unicamente "CONSIDERACIONES ECONOMICAS" Entre las alternativas A3 Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill) y A4 Camaras y pilares (room and pillar) - ¿Qué alternativa consdera más importante? *

- Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill)
- Camaras y pilares (room and pillar)

28. En que grado *

1 2 3 4 5 6 7 8 9



29. Tomando unicamente "FACTORES TECNOLOGICOS" Entre las alternativas A1 Tajo largo (Longwall) y A2 Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping)- ¿Qué alternativa considera más importante? *

- Tajo largo (Longwall)
- Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping)

29. En que grado *

1 2 3 4 5 6 7 8 9



30. Tomando unicamente "FACTORES TECNOLOGICOS" Entre las alternativas A1 Tajo largo (Longwall) y A3 Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill)- ¿Qué alternativa considera más importante? *

- Tajo largo (Longwall)
- Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill)

30. En que grado *

1 2 3 4 5 6 7 8 9



31. Tomando unicamente "FACTORES TECNOLOGICOS" Entre las alternativas A1 Tajo largo (Longwall) y A4 Camaras y pilares (room and pillar)- ¿Qué alternativa considera más importante? *

- Tajo largo (Longwall)
- Camaras y pilares (room and pillar)

31. En que grado *

1 2 3 4 5 6 7 8 9



32. Tomando unicamente "FACTORES TECNOLOGICOS" Entre las alternativas A2 Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping) y A3 Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill) - ¿Qué alternativa considera más importante? *

- Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping)
- Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill)

32. En que grado *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

33. Tomando unicamente "FACTORES TECNOLOGICOS" Entre las alternativas A2 Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping) y A4 Camaras y pilares (room and pillar) - ¿Qué alternativa considera más importante? *

Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping)

Camaras y pilares (room and pillar)

33. En que grado *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

34. Tomando unicamente "FACTORES TECNOLOGICOS" Entre las alternativas A3 Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill) y A4 Camaras y pilares (room and pillar) - ¿Qué alternativa considera más importante? *

Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill)

Camaras y pilares (room and pillar)

34. En que grado *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

35. Tomando unicamente "CONSIDERACIONES AMBIENTALES" Entre las alternativas A1 Tajo largo (Longwall) y A2 Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping)- ¿Qué alternativa considera más importante? *

Tajo largo (Longwall)

Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping)

35. En que grado *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

36. Tomando unicamente "CONSIDERACIONES AMBIENTALES" Entre las alternativas A1 Tajo largo (Longwall) y A3 Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill)- ¿Qué alternativa

considera más importante? *

- Tajo largo (Longwall)
- Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill)

36. En que grado *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

37. Tomando unicamente "CONSIDERACIONES AMBIENTALES" Entre las alternativas A1 Tajo largo (Longwall) y A4 Camaras y pilares (room and pillar)- ¿Qué alternativa considera más importante? *

- Tajo largo (Longwall)
- Camaras y pilares (room and pillar)

37. En que grado *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

38. Tomando unicamente "CONSIDERACIONES AMBIENTALES" Entre las alternativas A2 Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping) y A3 Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill) - ¿Qué alternativa considera más importante? *

- Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping)
- Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill)

38. En que grado *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

39. Tomando unicamente "CONSIDERACIONES AMBIENTALES" Entre las alternativas A2 Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping) y A4 Camaras y pilares (room and pillar) - ¿Qué alternativa considera más importante? *

- Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping)
- Camaras y pilares (room and pillar)

39. En que grado *

1 2 3 4 5 6 7 8 9



40. Tomando unicamente "CONSIDERACIONES AMBIENTALES" Entre las alternativas A3 Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill) y A4 Camaras y pilares (room and pillar) - ¿Qué alternativa considera más importante? *

- Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill)
- Camaras y pilares (room and pillar)

40. En que grado *

1 2 3 4 5 6 7 8 9



Submit

Powered by [Google Docs](#)

[Report Abuse](#) - [Terms of Service](#) - [Additional Terms](#)

G. Anexo G: Resultados del cuestionario

5 [responses](#)

Summary [See complete responses](#)

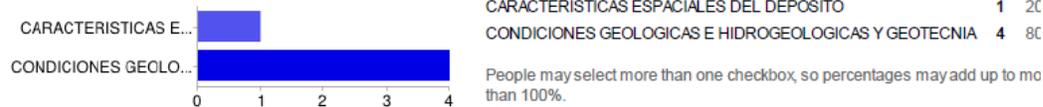
Digite su nombre por favor (Si desea permanecer anonimo no llene este recuadro)

johnny ricardo chaves MAURICIO ALFONSO Mario Quitian Jeison Alejandro Delgado Jiménez Giovanni Franco Sepúlveda

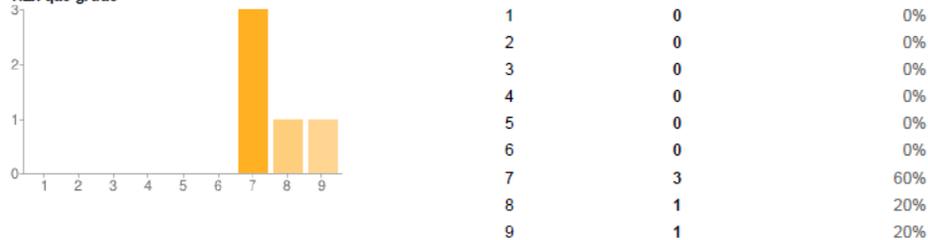
Digite su profesion

geologo GEOLOGO Ingeniero de Minas IMM Profesor - Facultad de Minas

1. Entre el criterio C1:CARACTERISTICAS ESPACIALES DEL DEPOSITO y C2: CONDICIONES GEOLOGICAS E HIDROGEOLOGICAS Y GEOTECNIA - ¿Qué criterio considera más importante?



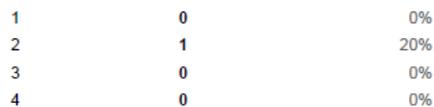
1. En que grado

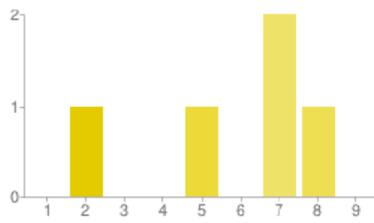


2. Entre el criterio C1:CARACTERISTICAS ESPACIALES DEL DEPOSITO y C3: CONSIDERACIONES ECONOMICAS - ¿Qué criterio considera más importante?



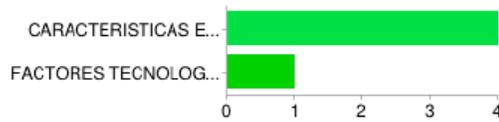
2. En que grado





5	1	20%
6	0	0%
7	2	40%
8	1	20%
9	0	0%

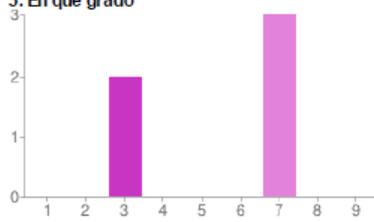
3. Entre el criterio C1:CARACTERISTICAS ESPACIALES DEL DEPOSITO y C4: FACTORES TECNOLOGICOS- ¿Qué criterio considera más importante?



CARACTERISTICAS ESPACIALES DEL DEPOSITO	4	80%
FACTORES TECNOLOGICOS	1	20%

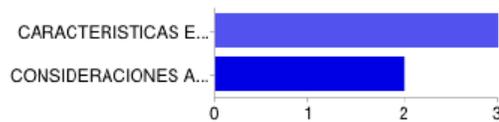
People may select more than one checkbox, so percentages may add up to more than 100%.

3. En que grado



1	0	0%
2	0	0%
3	2	40%
4	0	0%
5	0	0%
6	0	0%
7	3	60%
8	0	0%
9	0	0%

4. Entre el criterio C1:CARACTERISTICAS ESPACIALES DEL DEPOSITO y C5: CONSIDERACIONES AMBIENTALES- ¿Qué criterio considera más importante?



CARACTERISTICAS ESPACIALES DEL DEPOSITO	3	60%
CONSIDERACIONES AMBIENTALES	2	40%

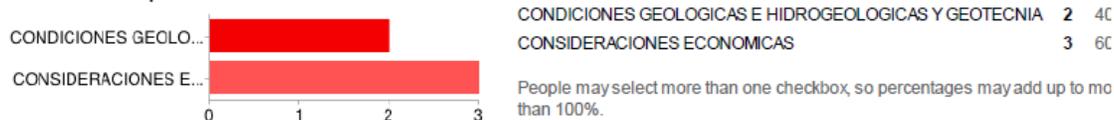
People may select more than one checkbox, so percentages may add up to more than 100%.

4. En que grado

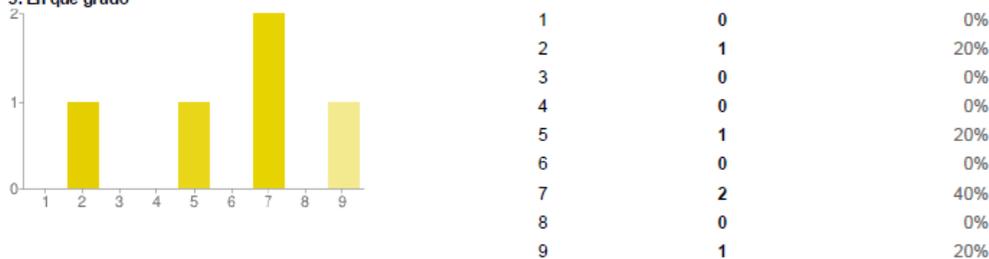


1	1	20%
2	1	20%
3	0	0%
4	0	0%
5	3	60%
6	0	0%
7	0	0%
8	0	0%
9	0	0%

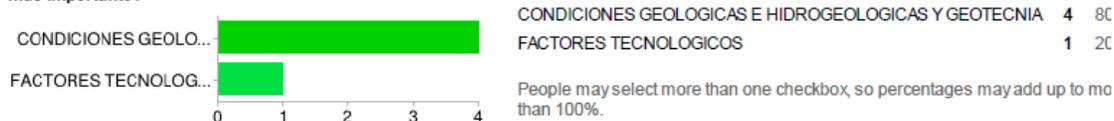
5. Entre el criterio C2:CONDICIONES GEOLOGICAS E HIDROGEOLOGICAS Y GEOTECNIA y C3: CONSIDERACIONES ECONOMICAS- ¿Qué criterio considera más importante?



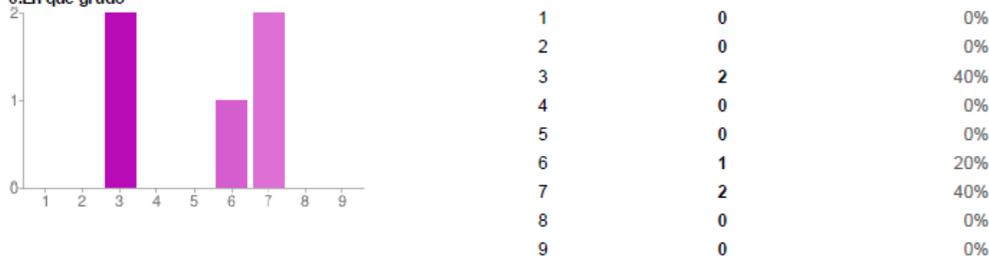
5. En que grado



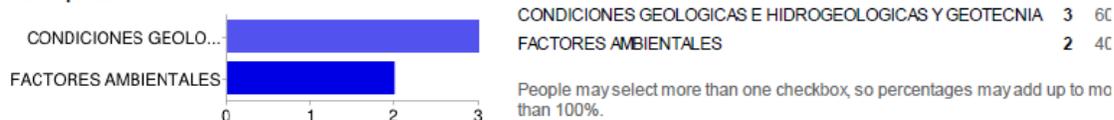
6. Entre el criterio C2:CONDICIONES GEOLOGICAS E HIDROGEOLOGICAS Y GEOTECNIA y C4: FACTORES TECNOLOGICOS- ¿Qué criterio considera más importante?



6. En que grado



7. Entre el criterio C2:CONDICIONES GEOLOGICAS E HIDROGEOLOGICAS Y GEOTECNIA y C5: FACTORES AMBIENTALES- ¿Qué criterio considera más importante?

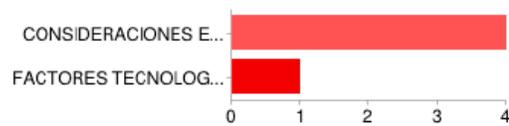


7. En que grado



1	2	40%
2	0	0%
3	0	0%
4	1	20%
5	0	0%
6	0	0%
7	1	20%
8	1	20%
9	0	0%

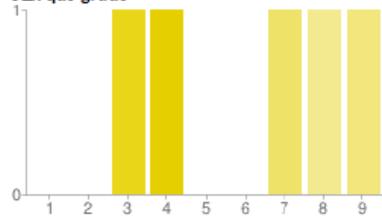
8. Entre el criterio C3:CONSIDERACIONES ECONOMICAS y C4: FACTORES TECNOLOGICOS- ¿Qué criterio considera más importante?



CONSIDERACIONES ECONOMICAS	4	80%
FACTORES TECNOLOGICOS	1	20%

People may select more than one checkbox, so percentages may add up to more than 100%.

8. En que grado



1	0	0%
2	0	0%
3	1	20%
4	1	20%
5	0	0%
6	0	0%
7	1	20%
8	1	20%
9	1	20%

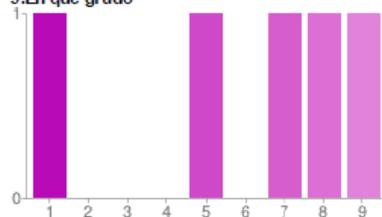
9. Entre el criterio C3:CONSIDERACIONES ECONOMICAS y C5: FACTORES AMBIENTALES- ¿Qué criterio considera más importante?



CONSIDERACIONES ECONOMICAS	4	80%
FACTORES AMBIENTALES	1	20%

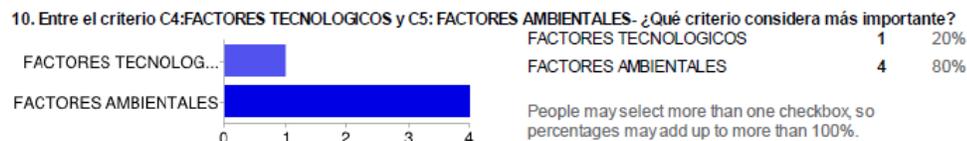
People may select more than one checkbox, so percentages may add up to more than 100%.

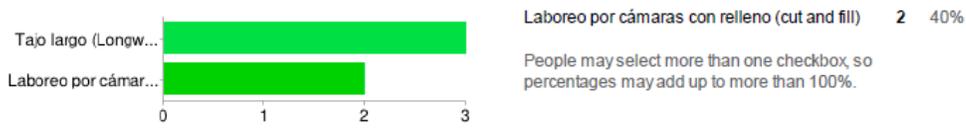
9. En que grado



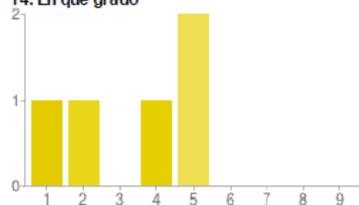
1	1	20%
2	0	0%
3	0	0%
4	0	0%
5	1	20%
6	0	0%
7	1	20%

8	1	20%
9	1	20%



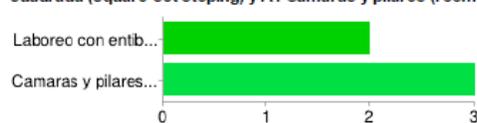


14. En que grado



1	1	20%
2	1	20%
3	0	0%
4	1	20%
5	2	40%
6	0	0%
7	0	0%
8	0	0%
9	0	0%

15. Tomando unicamente "C1 CARACTERISTICAS ESPACIALES DEL DEPOSITO" Entre las alternativas A2 Laboreo con entibación (fortificación cuadrada (square-set stoping) y A4 Camaras y pilares (room and pillar) - ¿Qué alternativa considera más importante?



Laboreo con entibación (fortificación cuadrada (square-set stoping)	2	40%
Camaras y pilares (room and pillar)	3	60%

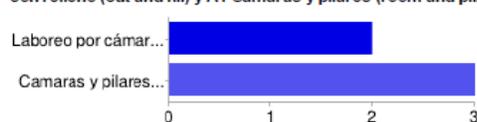
People may select more than one checkbox, so percentages may add up to more than 100%.

15. En que grado



1	1	20%
2	2	40%
3	1	20%
4	0	0%
5	0	0%
6	1	20%
7	0	0%
8	0	0%
9	0	0%

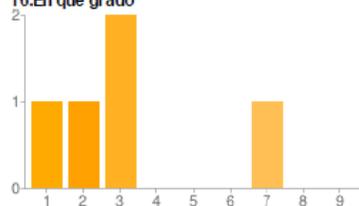
16. Tomando unicamente "C1 CARACTERISTICAS ESPACIALES DEL DEPOSITO" Entre las alternativas A3 Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill) y A4 Camaras y pilares (room and pillar) - ¿Qué alternativa considera más importante?



Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill)	2	40%
Camaras y pilares (room and pillar)	3	60%

People may select more than one checkbox, so percentages may add up to more than 100%.

16. En que grado

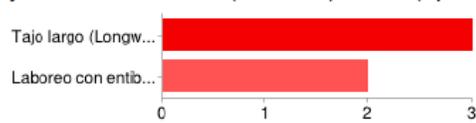


1	1	20%
2	1	20%
3	2	40%
4	0	0%
5	0	0%
6	0	0%
7	1	20%

8	0	0%
9	0	0%

17. Tomando unicamente "C2 CONDICIONES GEOLOGICAS E HIDROGEOLOGICAS Y GEOTECNIA " Entre las alternativas A1 Tajo largo (Longwall) y A2 Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping)- ¿Qué alternativa considera más importante?

Tajo largo (Longw...	3	60%
Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping)	2	40%



People may select more than one checkbox, so percentages may add up to more than 100%.

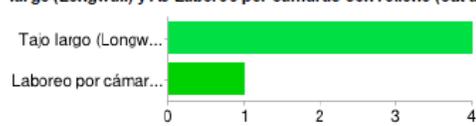
17. En que grado



1	1	20%
2	1	20%
3	1	20%
4	0	0%
5	0	0%
6	1	20%
7	0	0%
8	1	20%
9	0	0%

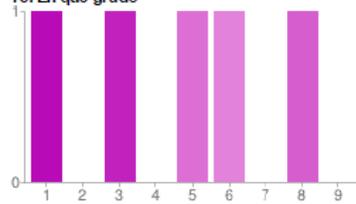
18. Tomando unicamente "C2 CONDICIONES GEOLOGICAS E HIDROGEOLOGICAS Y GEOTECNIA" Entre las alternativas A1 Tajo largo (Longwall) y A3 Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill)- ¿Qué alternativa considera más importante?

Tajo largo (Longw...	4	80%
Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill)	1	20%



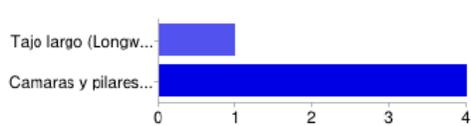
People may select more than one checkbox, so percentages may add up to more than 100%.

18. En que grado



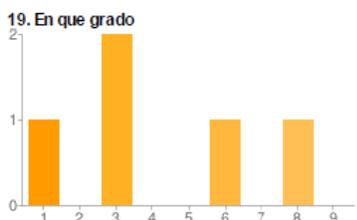
1	1	20%
2	0	0%
3	1	20%
4	0	0%
5	1	20%
6	1	20%
7	0	0%
8	1	20%
9	0	0%

19. Tomando unicamente "C2 CONDICIONES GEOLOGICAS E HIDROGEOLOGICAS Y GEOTECNIA " Entre las alternativas A1 Tajo largo (Longwall) y A4 Camaras y pilares (room and pillar)- ¿Qué alternativa considera más importante?



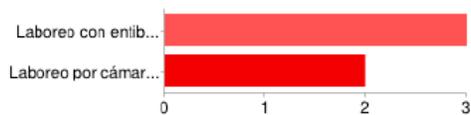
Tajo largo (Longwall) 1 20%
 Cámaras y pilares (room and pillar) 4 80%

People may select more than one checkbox, so percentages may add up to more than 100%.



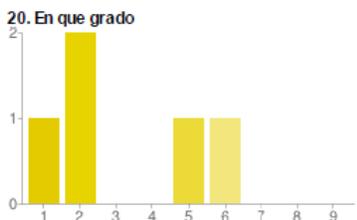
1	1	20%
2	0	0%
3	2	40%
4	0	0%
5	0	0%
6	1	20%
7	0	0%
8	1	20%
9	0	0%

20. Tomando unicamente "C2 CONDICIONES GEOLOGICAS E HIDROGEOLOGICAS Y GEOTECNIA" Entre las alternativas A2 Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping) y A3 Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill) - ¿Qué alternativa considera más importante?



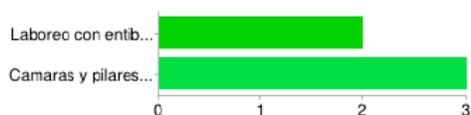
Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping) 3 60%
 Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill) 2 40%

People may select more than one checkbox, so percentages may add up to more than 100%.



1	1	20%
2	2	40%
3	0	0%
4	0	0%
5	1	20%
6	1	20%
7	0	0%
8	0	0%
9	0	0%

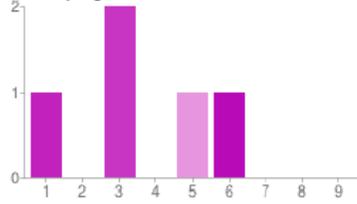
21. Tomando unicamente "C2 CONDICIONES GEOLOGICAS E HIDROGEOLOGICAS Y GEOTECNIA" Entre las alternativas A2 Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping) y A4 Cámaras y pilares (room and pillar) - ¿Qué alternativa considera más importante?



Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping) 2 40%
 Cámaras y pilares (room and pillar) 3 60%

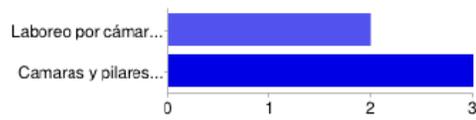
People may select more than one checkbox, so percentages may add up to more than 100%.

21. En que grado



1	1	20%
2	0	0%
3	2	40%
4	0	0%
5	1	20%
6	1	20%
7	0	0%
8	0	0%
9	0	0%

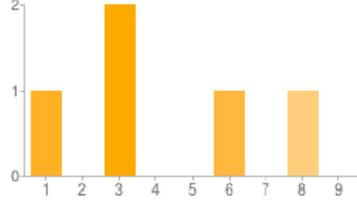
22. Tomando unicamente "C2 CONDICIONES GEOLOGICAS E HIDROGEOLOGICAS Y GEOTECNIA" Entre las alternativas A3 Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill) y A4 Camaras y pilares (room and pillar) - ¿Qué alternativa considera más importante?



Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill)	2	40%
Camaras y pilares (room and pillar)	3	60%

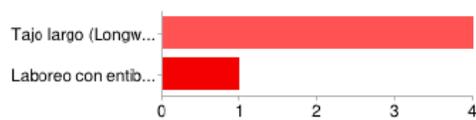
People may select more than one checkbox, so percentages may add up to more than 100%.

22. En que grado



1	1	20%
2	0	0%
3	2	40%
4	0	0%
5	0	0%
6	1	20%
7	0	0%
8	1	20%
9	0	0%

23. Tomando unicamente "CONSIDERACIONES ECONOMICAS" Entre las alternativas A1 Tajo largo (Longwall) y A2 Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping)- ¿Qué alternativa considera más importante?

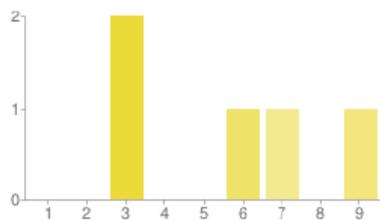


Tajo largo (Longwall)	4	80%
Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping)	1	20%

People may select more than one checkbox, so percentages may add up to more than 100%.

23. En que grado

1	0	0%
2	0	0%
3	2	40%
4	0	0%
5	0	0%
6	1	20%
7	1	20%



8	0	0%
9	1	20%

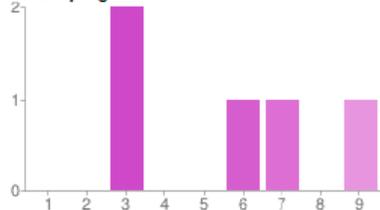
24. Tomando unicamente "CONSIDERACIONES ECONOMICAS" Entre las alternativas A1 Tajo largo (Longwall) y A3 Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill)- ¿Qué alternativa considera más importante?



Tajo largo (Longwall)	4	80%
Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill)	1	20%

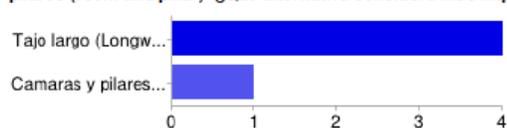
People may select more than one checkbox, so percentages may add up to more than 100%.

24. En que grado



1	0	0%
2	0	0%
3	2	40%
4	0	0%
5	0	0%
6	1	20%
7	1	20%
8	0	0%
9	1	20%

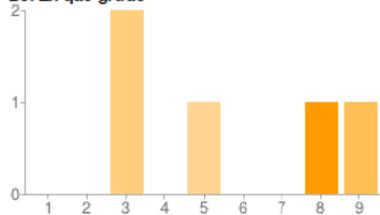
25. Tomando unicamente "CONSIDERACIONES ECONOMICAS" Entre las alternativas A1 Tajo largo (Longwall) y A4 Camaras y pilares (room and pillar)- ¿Qué alternativa considera más importante?



Tajo largo (Longwall)	4	80%
Camaras y pilares (room and pillar)	1	20%

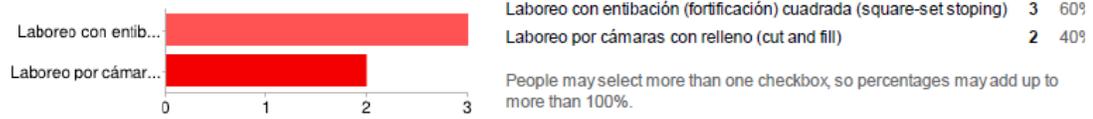
People may select more than one checkbox, so percentages may add up to more than 100%.

25. En que grado

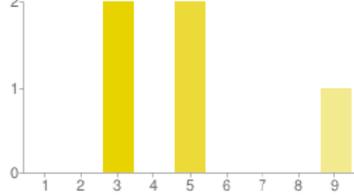


1	0	0%
2	0	0%
3	2	40%
4	0	0%
5	1	20%
6	0	0%
7	0	0%
8	1	20%
9	1	20%

26. Tomando unicamente "CONSIDERACIONES ECONOMICAS" Entre las alternativas A2 Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping) y A3 Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill) - ¿Qué alternativa considera más importante?

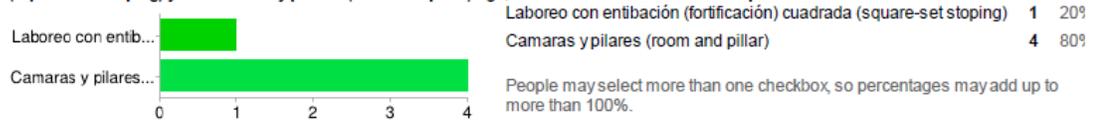


26. En que grado

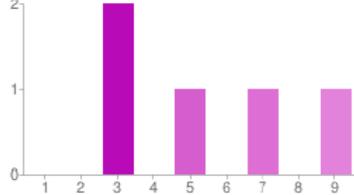


1	0	0%
2	0	0%
3	2	40%
4	0	0%
5	2	40%
6	0	0%
7	0	0%
8	0	0%
9	1	20%

27. Tomando unicamente "CONSIDERACIONES ECONOMICAS" Entre las alternativas A2 Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping) y A4 Camaras y pilares (room and pillar) - ¿Qué alternativa considera más importante?

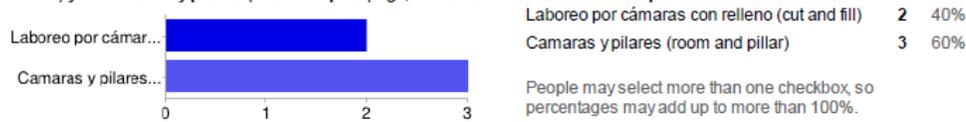


27. En que grado

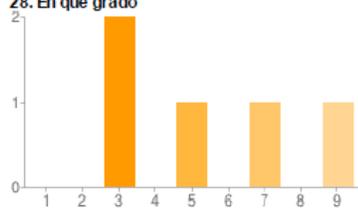


1	0	0%
2	0	0%
3	2	40%
4	0	0%
5	1	20%
6	0	0%
7	1	20%
8	0	0%
9	1	20%

28. Tomando unicamente "CONSIDERACIONES ECONOMICAS" Entre las alternativas A3 Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill) y A4 Camaras y pilares (room and pillar) - ¿Qué alternativa considera más importante?

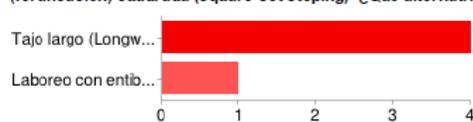


28. En que grado



1	0	0%
2	0	0%
3	2	40%
4	0	0%
5	1	20%
6	0	0%
7	1	20%
8	0	0%
9	1	20%

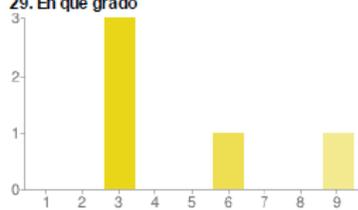
29. Tomando unicamente "FACTORES TECNOLOGICOS" Entre las alternativas A1 Tajo largo (Longwall) y A2 Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping)- ¿Qué alternativa considera más importante?



Tajo largo (Longwall)	4	80%
Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping)	1	20%

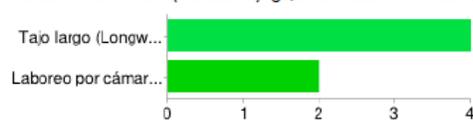
People may select more than one checkbox, so percentages may add up to more than 100%.

29. En que grado



1	0	0%
2	0	0%
3	3	60%
4	0	0%
5	0	0%
6	1	20%
7	0	0%
8	0	0%
9	1	20%

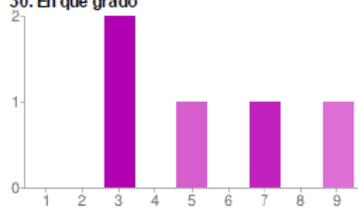
30. Tomando unicamente "FACTORES TECNOLOGICOS" Entre las alternativas A1 Tajo largo (Longwall) y A3 Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill)- ¿Qué alternativa considera más importante?



Tajo largo (Longwall)	4	80%
Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill)	2	40%

People may select more than one checkbox, so percentages may add up to more than 100%.

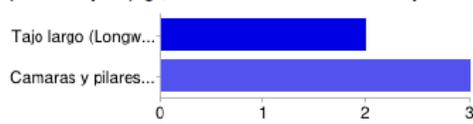
30. En que grado



1	0	0%
2	0	0%
3	2	40%
4	0	0%
5	1	20%
6	0	0%
7	1	20%

8	0	0%
9	1	20%

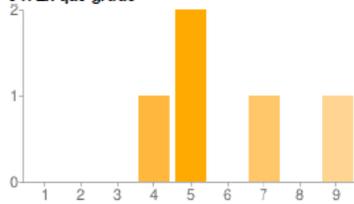
31. Tomando unicamente "FACTORES TECNOLOGICOS" Entre las alternativas A1 Tajo largo (Longwall) y A4 Camaras y pilares (room and pillar)- ¿Qué alternativa considera más importante?



Tajo largo (Longwall)	2	40%
Camaras y pilares (room and pillar)	3	60%

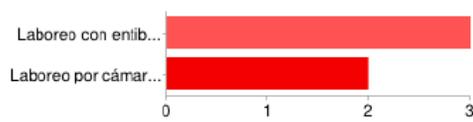
People may select more than one checkbox, so percentages may add up to more than 100%.

31. En que grado



1	0	0%
2	0	0%
3	0	0%
4	1	20%
5	2	40%
6	0	0%
7	1	20%
8	0	0%
9	1	20%

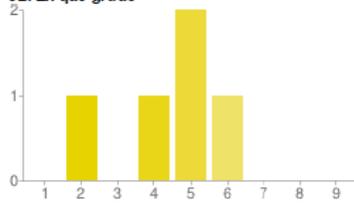
32. Tomando unicamente "FACTORES TECNOLOGICOS" Entre las alternativas A2 Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping) y A3 Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill) - ¿Qué alternativa considera más importante?



Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping)	3	60%
Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill)	2	40%

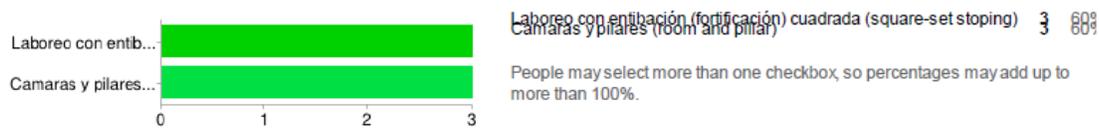
People may select more than one checkbox, so percentages may add up to more than 100%.

32. En que grado

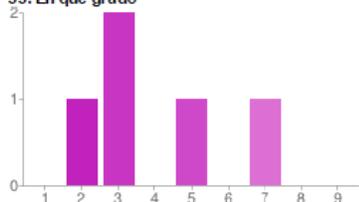


1	0	0%
2	1	20%
3	0	0%
4	1	20%
5	2	40%
6	1	20%
7	0	0%
8	0	0%
9	0	0%

33. Tomando unicamente "FACTORES TECNOLOGICOS" Entre las alternativas A2 Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping) y A4 Camaras y pilares (room and pillar) - ¿Qué alternativa considera más importante?

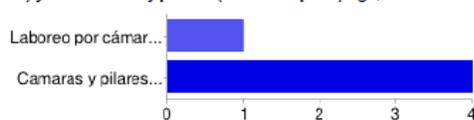


33. En que grado



1	0	0%
2	1	20%
3	2	40%
4	0	0%
5	1	20%
6	0	0%
7	1	20%
8	0	0%
9	0	0%

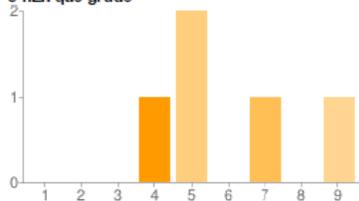
34. Tomando unicamente "FACTORES TECNOLOGICOS" Entre las alternativas A3 Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill) y A4 Cámaras y pilares (room and pillar) - ¿Qué alternativa considera más importante?



Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill)	1	20%
Cámaras y pilares (room and pillar)	4	80%

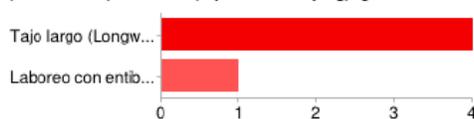
People may select more than one checkbox, so percentages may add up to more than 100%.

34. En que grado



1	0	0%
2	0	0%
3	0	0%
4	1	20%
5	2	40%
6	0	0%
7	1	20%
8	0	0%
9	1	20%

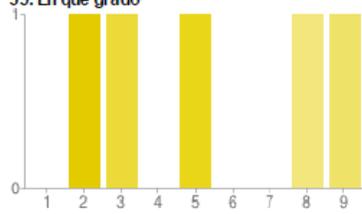
35. Tomando unicamente "CONSIDERACIONES AMBIENTALES" Entre las alternativas A1 Tajo largo (Longwall) y A2 Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping)- ¿Qué alternativa considera más importante?



Tajo largo (Longwall)	4	80%
Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping)	1	20%

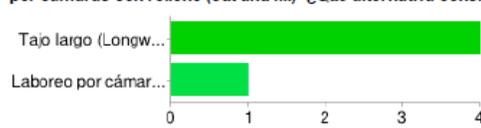
People may select more than one checkbox, so percentages may add up to more than 100%.

35. En que grado



1	0	0%
2	1	20%
3	1	20%
4	0	0%
5	1	20%
6	0	0%
7	0	0%
8	1	20%
9	1	20%

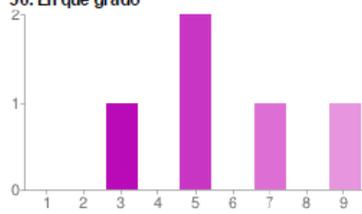
36. Tomando unicamente "CONSIDERACIONES AMBIENTALES" Entre las alternativas A1 Tajo largo (Longwall) y A3 Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill)- ¿Qué alternativa considera más importante?



Tajo largo (Longwall)	4	80%
Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill)	1	20%

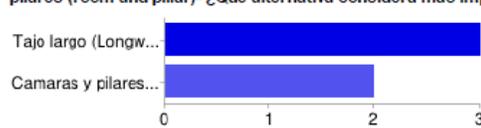
People may select more than one checkbox, so percentages may add up to more than 100%.

36. En que grado



1	0	0%
2	0	0%
3	1	20%
4	0	0%
5	2	40%
6	0	0%
7	1	20%
8	0	0%
9	1	20%

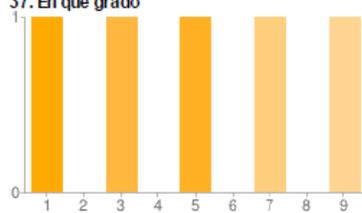
37. Tomando unicamente "CONSIDERACIONES AMBIENTALES" Entre las alternativas A1 Tajo largo (Longwall) y A4 Camaras y pilares (room and pillar)- ¿Qué alternativa considera más importante?



Tajo largo (Longwall)	3	60%
Camaras y pilares (room and pillar)	2	40%

People may select more than one checkbox, so percentages may add up to more than 100%.

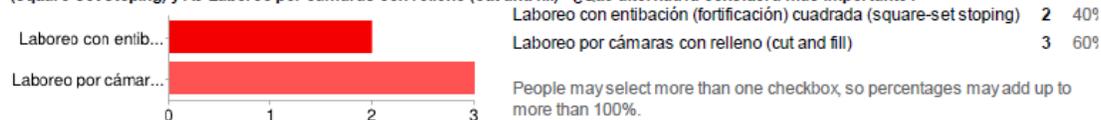
37. En que grado



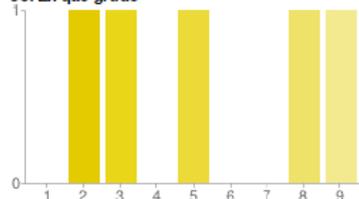
1	1	20%
2	0	0%
3	1	20%
4	0	0%
5	1	20%
6	0	0%
7	1	20%

8	0	0%
9	1	20%

38. Tomando unicamente "CONSIDERACIONES AMBIENTALES" Entre las alternativas A2 Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping) y A3 Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill) - ¿Qué alternativa considera más importante?

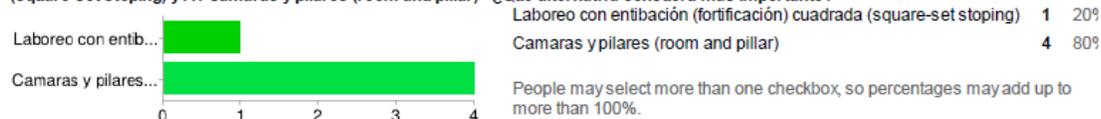


38. En que grado



1	0	0%
2	1	20%
3	1	20%
4	0	0%
5	1	20%
6	0	0%
7	0	0%
8	1	20%
9	1	20%

39. Tomando unicamente "CONSIDERACIONES AMBIENTALES" Entre las alternativas A2 Laboreo con entibación (fortificación) cuadrada (square-set stoping) y A4 Camaras y pilares (room and pillar) - ¿Qué alternativa considera más importante?

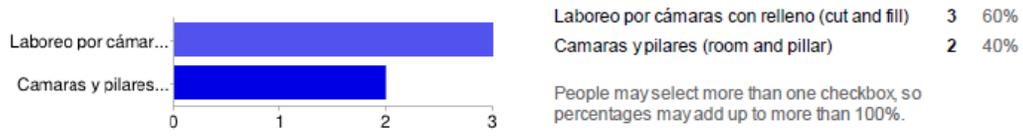


39. En que grado

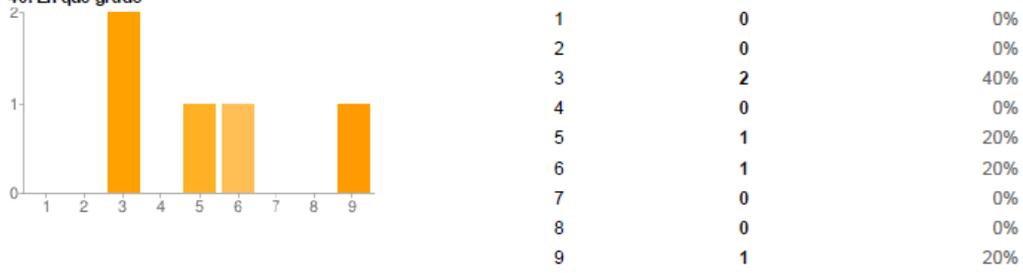


1	0	0%
2	0	0%
3	2	40%
4	0	0%
5	2	40%
6	0	0%
7	0	0%
8	1	20%
9	0	0%

40. Tomando unicamente "CONSIDERACIONES AMBIENTALES" Entre las alternativas A3 Laboreo por cámaras con relleno (cut and fill) y A4 Camaras y pilares (room and pillar) - ¿Qué alternativa considera más importante?



40. En que grado



Number of daily responses



Bibliografía

- [1] Ley 685, Código de Minas, Congreso de la Republica de Colombia, 2001. Disponible en <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=9202>
- [2] Ley 1382, Modificación al Código de Minas, Congreso de la Republica de Colombia, 2010 <http://www.boyaca.gov.co/?idcategoria=11966>
- [3] CÁRDENAS M, REINA M, RUBIANO E, ROZO S, BECERRA O. Informe final: la minería en Colombia: impacto socioeconómico y fiscal, Bogotá 2008. Disponible en <http://www.fedesarrollo.org.co/wp-content/uploads/2011/08/La-miner%C3%ADa-en-Colombia-Informe-de-Fedesarrollo-2008.pdf>
- [4] PONCE MURIEL A. Panorama del sector minero no. 59, 2010. Disponible en <http://www.simco.gov.co/LinkClick.aspx?fileticket=SW5htFa4evE%3D&tabid=289&mid=1438>
- [5] DEFENSORÍA DEL PUEBLO. La minería de hecho en Colombia. 2010. Disponible en <http://www.defensoria.org.co/red/anexos/publicaciones/mineriaColombia.pdf>
- [6] ORTEGA SEGURA D.A. La minería y el ordenamiento territorial estudio de caso. Área minera, empresa mineros s.a., el bagre. 2006 Disponible en http://www2.unalmed.edu.co/minas/index2.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=1209&Itemid=57
- [7] SIMCO, Actualización de PIB Minero 2000 - 2011. Disponible en <http://www.simco.gov.co/LinkClick.aspx?fileticket=RmmVnRRZ%2FPE%3D&tabid=110>
- [8] ROMERO J.A, Minerales Estratégicos para el Desarrollo de Colombia, INGEOMINAS, MME, Bogotá, 1995.

- [9] BUENAVENTURA ARANGO J, memoria explicativa del mapa de recursos minerales de Colombia: minerales metálicos, preciosos y energéticos a escalas 1:500.000 y 1:1'500.000, INGEOMINAS, MME, Bogotá, 2002.
- [10] PONCE MURIEL A., Distritos mineros: exportaciones e Infraestructura de transporte, Unidad de Planeación minero energética, Bogotá, 2005.
- [11] UPME. Plan nacional de ordenamiento minero. Congreso internacional de minería, minería con desarrollo sostenible Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 2012. Disponible en <http://www.uptc.edu.co/export/sites/default/eventos/2012/cim/documentos/pnom.pdf>
- [12] DUQUE MONTOYA B, PRECIADO RAMÍREZ L, SIERRA MONTES H.S., Política de mejoramiento de la productividad y la competitividad del sector minero, 2005. Disponible en <http://www.simco.gov.co/simco/portals/0/archivos/PRODUCTIVIDAD.pdf>
- [13] MEMORIAS AL CONGRESO DE LA REPUBLICA 2009 2010. Disponible en http://www.minminas.gov.co/minminas/index.jsp?cargaHome=3&id_categoria=44&id_sub_categoria=496
- [14] BOSHKOV, S.H., WRIGHT, F.D., (Basic and parametric criteria in the selection, design and development of underground mining systems). SME Mining Engineering Handbook. SME-AIME, New York. 1973
- [15] D.H. LAUBSCHER, Selection of Mass Underground Mining Methods, Design and Operation of Caving and Sublevel Stopping Mines, D. Stewart, SME-AIME, New York, (Chapter 3, pp. 23–38). 1981
- [16] R.G.K. MORRISON, A Philosophy of Ground Control, McGill University, Montreal, Canada, pp. 125–159.1976
- [17] D.E. NICHOLAS, Selection Procedure, SME Mining Engineering Handbook, second edition, Society for Mining Engineering, Metallurgy and Exploration, Inc., 1992, pp. 2090–2106.
- [18] HARTMAN, H.L., Introductory Mining Engineering. John Wiley, New Jersey. 1987.

- [19] MILLER-TAIT, L., PANALKIS, R., POULIN, R. UBC mining method selection. In: Proceeding of the Mine Planning and Equipment Selection Symposium, pp. 163–168. 1995
- [20] BITARAFAN, M.R., ATAEI, M. Mining method selection by multiple criteria decision making tools. *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.* 104, 493–498. 2004
- [21] KARADOGAN, A., KAHRIMAN, A., OZER, U. Application of fuzzy set theory in the selection of underground mining method. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 108(2), 73-79. 2008
- [22] ALPAY, S., & YAVUZ, M. Underground mining method selection by decision making tools. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(2), 173-184. 2009
- [23] AZADEH, A., OSANLOO, M., & ATAEI, M. A new approach to mining method selection based on modifying the nicholas technique. *Applied Soft Computing Journal*, 10(4), 1040-1061. 2010
- [24] BOGDANOVIC, D., NIKOLIC, D., & IVANA, I. Mining method selection by integrated AHP and PROMETHEE method. *Anais Da Academia Brasileira De Ciencias*, 84(1), 219-233. 2012
- [25] FIGUEIRA, J., GRECO, S., AND EHRGOTT, M., (Eds.) *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, Springer, New York, 2005
- [26] ROMERO Y POMEROL, S. POMEROL, J., *Decisiones Multicriterio. Fundamentos Teóricos y Utilización Práctica.*, Universidad de Alcalá de Henares, 1997
- [27] ROBERT PEELE. *Mining engineers handbook*. Jhon Wiley and Sons. New York 1941
- [28] SOCIETY FOR MINING ENGINEERING, METALLURGY AND EXPLORATION, INC., *SME Mining Engineering Handbook*, second edition, 1992.

- [29] D.E. NICHOLAS, Selection Procedure, SME Mining Engineering Handbook, second edition, Society for Mining Engineering, Metallurgy and Exploration, Inc., 1992, pp. 2090–2106.
- [30] BASCETIN, A., KESIMAL, A., The study of a fuzzy set theory for the selection of an optimum coal transportation system from pit to the power plant. *Int. J. Surf. Min. Reclam. Environ.* 13, 97–101. 1999
- [31] ELEVLI, B., DEMIRCI, A., DAYI, O., Underground haulage selection: shaft or ramp for a small-scale underground mine. *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.* 102, 255– 260. 2002
- [32] SAMANTA, B., SARKAR, B., MURHERJEE, S.K., Selection of opencast mining equipment by a multi-criteria decision-making process. *Trans. Inst. Min. Metall. A.* 111, A136–A142. 2002
- [33] BITARAFAN, M.R., ATAELI, M. Mining method selection by multiple criteria decision making tools. *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.* 104, 493–498. 2004.
- [34] ELEVLI, B., DEMIRCI, A. Multicriteria choice of ore transport system for an underground mine: application of PROMETHEE methods. *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.* 104, 251–256. 2004.
- [35] KAZAKIDIS, V.N., MAYER, Z., SCOBLE, M.J., Decision making using the analytic hierarchy process in mining engineering. *Trans. Inst. Min. Metall. A* 113, A30– A42. 2004.
- [36] ATAELI, M., Multicriteria selection for alumina-cement plant location in East-Azerbaijan province of Iran. *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.* 105, 507–514. 2005
- [37] ACAROGLU, O., ERGIN, H., ESKIKAYA, S. Analytical hierarchy process for selection of roadheaders. *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.* 106, 569–575. 2006
- [38] T. J. COELLI, D. S. P. RAO, C. J. O'DONNELL, AND G. E. BATTESE, an introduction to efficiency an introduction to efficiency Springer, Second. Springer, 2005
- [39] DAVID J. SUMANTH, Productivity engineering and management, McGraw Hill, 1984

- [40] J. TILTON, Labor productivity, costs, and mine survival during a recession, *Resources Policy*, vol. 27, no. 2, pp. 107-117, Jun. 2001.
- [41] M. KULSHRESHTHA AND J. K. PARIKH, Study of efficiency and productivity growth in opencast and underground coal mining in India: a DEA analysis, *Energy Economics*, vol. 24, no. 5, pp. 439-453, Sep. 2002.
- [42] X. A. RODRÍGUEZ, comportamiento de la productividad global en la minería española: una panorámica del periodo 1974-91, 2002
- [43] COCHILCO, con buenos yacimientos no alcanza: análisis y evolución de la productividad laboral en Chile, no. 185942, 2009.
- [44] I. E. TSOLAS, Performance assessment of mining operations using nonparametric production analysis: A bootstrapping approach in DEA, *Resources Policy*, vol. 36, no. 2, pp. 159-167, Jun. 2011.
- [45] INDHIRA M. JIMÉNEZ P. Y JORGE M. MOLINA E. Propuesta de medición de la productividad en minería de oro vetiforme y reconocimiento de estándares productivos sostenibles. *Boletín ciencias de la Tierra* no.19 Medellín. 2006.
- [46] XOSÉ A. RODRÍGUEZ. Un nuevo índice de productividad para medir la sostenibilidad económica en la minería. *Dyna*, Nro. 161, pp. 1120. Medellín, Marzo, 2010.
- [47] MARIA DEL SOCORRO GARCÍA CASCALES Métodos para la comparación de alternativas mediante un Sistema de Ayuda a la Decisión (S.A.D.) y "Soft Computing". 2009.
- [48] O. G. LEÓN, Tomar decisiones difíciles, Segunda Edición ed Universidad Autónoma de Madrid, 2001.
- [49] CARLOS ROMERO. Técnicas de Gestión de Empresas. (First Edition, 1977, with Ediciones Deusto, with the title: Modelos Económicos en la Empresa. Third edition revised and enlarged in 1993), Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, 306 pp. 1993.

- [50] SAATY., the Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation, ISBN 0-07-054371-2, McGraw-Hill. 1980.
- [51] ZELENY M., Multiple Criteria Decision Making. Ed. Mc Graw Hill, New York.1982.
- [52] SHANNON, C. E. , W. WEAVER, The Mathematical Theory of Communication, (University of Illinois Press, Chicago) 1949
- [53] GÓMEZ-SENENT, E.; CHINER, M.; CHINER, M.J., PRES: Programa de Evaluación de Proyectos Sociales. VII Congreso Nacional de Ingeniería de Proyectos. Zaragoza 26-28 Junio; pp.27-35.1991.
- [54] L. A. ZADEH., Fuzzy Sets, Information and Control, pp. 338-353, 1965.
- [55] BELTON V., STEWART T.J., Multi Criteria Decision Analysis: an integrated approach. Kluwer Academic Publishers, Boston, 2002.
- [56] CORTÉS-ALDANA, F.A., GARCÍA-MELÓN, M., FERNÁNDEZ-DE-LUCIO, I., ARAGONÉS-BELTRÁN, P., POVEDA-BAUTISTA, R. University objectives and socioeconomic results: A multicriteria measuring of alignment, European Journal of Operational Research, 199 (3), pp. 811-822, 2009.
- [57] ROMERO, J.I., TRIANA L.A., CORTÉS, F.A. Selección del método de explotación minera a partir de información cuantificada aplicando técnicas de decisión multicriterio. Bogotá. Encuentro Nacional de Investigación y Desarrollo, Enid, Agosto 2012.
- [58] HARKER, P. T. AND VARGAS V. G., The Theory of Ratio Scale Estimation: Saaty's Analytic Hierarchy Process," Management Science, 33, 1383-1403, 1987.
- [59] ARTEAGA, R. Manual de Evaluación Técnico-Económica de Proyectos Mineros de Inversión. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid, 1997.
- [60] HUSTRULID, W. Y KUCHTA, M. Open pit mine planning & design. Taylor & Francis plc., London, UK. 2006.

- [61] BOTÍN, J., GUZMÁN, R. Y SMITH, M. A methodological model to assist in the optimization and risk management of mining investment decisions. En: DYNA, year 78, Nro. 170, pp. 221-226. Medellín. 2011
- [62] DARLING, P. SME Mining engineering handbook. Third Edition. Volume One. 1031 p., 2011.
- [63] BISE, C. SME Mining engineering analysis. Second edition. 313 p., 2003.
- [64] ORTIZ, F. *et al.* Curso de evaluación y planificación minera. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela técnica superior de ingenieros de minas. 269 p., 2001.
- [65] HARTMAN, H.L., MUTMANSKY, J.M., Introductory Mining Engineering. John Wiley, New Jersey, 2002.
- [66] YAGER, R.R., 1978. Fuzzy decision making including unequal objectives. Fuzzy Set Syst. 1, 87–95.
- [67] BIENIAWSKI, Z.T. 1974. Geomechanics Classification of Rock Masses and the Application is Tunnelling. Proc. Third Intl. Congress on Rock Mechanics, ISRM, Denver, Vol 11A, pp. 27-32.
- [68] SAATY, T.L., 2000. Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process. RWS, Pittsburgh