

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

Facultad de ingeniería

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesor Patrocinante

Sr. Roberto Fustos Toribio

**CAPACIDAD DE MECANIZACIÓN DE VETAS DE CARBÓN
DE BAJA POTENCIA POR MEDIO DE LÓGICA DIFUSA EN
MATLAB**



JUAN GABRIEL FREDES TAPIA

Informe de Memoria de Título

para optar al Título de

Ingeniero Civil de Minas

Noviembre 2020

Resumen

El objetivo de este trabajo fue estudiar las variables de aquellos yacimientos de carbón que presentan potencias bajas con el fin de determinar su capacidad de mecanización por el método de extracción longwall mining. Junto con la potencia de la veta se estudiaron un conjunto de variables mineras que influyen directamente en la mecanización, siendo las más sensibles las perturbaciones geológicas y el buzamiento del manto de carbón. Estas variables fueron analizadas por lógica difusa en el software de Matlab, para determinar la capacidad de mecanización del manto. Como análisis de estudio por medio de la aplicación de Matlab programada para estudiar la mecanización del manto de carbón, se analizaron sondajes en el sector de Curanilahue, Región del Bio Bio, Chile. Debido a la falta de información se propusieron escenarios, que en este caso el mejor escenario posible presentó un 59.0% de capacidad de mecanización, categorizado como **Media** capacidad. El resto de los escenarios presentaron capacidades **Bajas** y **Muy Bajas**. Sin embargo, la máxima capacidad calculada se presenta en un escenario difícil de lograr producto de las condiciones geológicas de la zona.



Abstract

The goal of this work was to study the variables of those coal deposits that present thin seams in order to determine their mechanization capacity by the longwall mining extraction method. Together with the thickness of the seam, a set of mining variables that directly influence mechanization were studied, the most sensitive being geological disturbances and the dip of the coal seam. These variables were analyzed by fuzzy logic in Matlab software to determine the mechanization capacity of the coal seam. As a study analysis through the application of Matlab programmed to study the mechanization of the coal seam, drillings in the Curanilahue sector, Bio Bio Region, Chile were analyzed. Due to the lack of information, scenarios were proposed, which in this case the best possible scenario presented a 59.0% mechanization capacity, categorized as **Medium** capacity. The rest of the scenarios presented **Low** and **Very Low** capacities. However, the maximum calculated capacity is presented in a scenario that is difficult to achieve as a result of the geological conditions of the area.



Índice de contenidos

1	Introducción	1
2	Descripción del problema	2
3	Hipótesis	4
4	Objetivos generales y específicos	5
4.1	Objetivos generales	5
4.2	Objetivos específicos	5
5	Metodología	6
6	Marco teórico	8
6.1	Producción del carbón actual	8
6.1.1	El carbón.....	9
6.1.2	Minería del carbón	10
6.1.3	Método de explotación superficial-subterráneo	11
6.1.4	Método de explotación subterráneo	11
6.1.5	Mecanización de vetas de carbón por <i>longwall mining</i>	14
6.1.6	Limitaciones y observaciones	17
6.2	Variables que influyen en la mecanización de minería del carbón	19
6.2.1	Variables mineras	20
6.2.2	Potencia o ancho de veta	20
6.2.3	Calidad del piso	21
6.2.4	Calidad del techo.....	25
6.2.5	Grado de liberación de metano	27
6.2.6	Dureza y grado de impureza	27
6.2.7	Profundidad de la veta	28

6.2.8	Cantidad de agua presente	29
6.2.9	Otras variables mineras por considerar en la mecanización por <i>longwall mining</i>	29
6.3	Determinación del grado de mecanización por lógica difusa	31
6.3.1	Lógica difusa	31
6.3.2	Conjunto difuso	32
6.3.3	Operaciones conjuntos difusos	34
6.3.4	Propiedades de los conjuntos difusos	35
6.3.5	Reglas difusas	36
6.3.6	Inferencia difusa.....	36
6.3.7	Defuzzificación	38
6.4	<i>Software</i> para procesos de lógica difusa	39
6.4.1	Softwares	39
6.4.2	Matlab	41
6.4.3	Inferencia difusa en Matlab	42
6.4.4	Desfuzzificación en Matlab	43
6.5	Proceso de análisis jerárquico	44
6.5.1	Proceso de prioridades en el análisis jerárquico	44
6.5.2	Matriz de comparación	44
6.5.3	Vector de prioridades	45
6.5.4	Consistencia del análisis de prioridades	46
6.6	Comentarios generales	48
7	Simulación en Matlab de la mecanización de minas de carbón	51
7.1	Marco metodológico para el proceso de simulación	51
7.1.1	Fuzzificación de variables mineras	52
7.1.2	Establecer las reglas difusas	55

7.1.3	Grado de mecanización.....	62
7.2	Aplicación del método	64
7.2.1	Variables mineras para vetas de estudio	65
7.2.2	Resultados	65
7.2.3	Análisis de resultados	65
8	Caso real de análisis de mecanización	68
8.1	Descripción geológica del área de estudio	68
8.2	Análisis descriptivo preliminar	70
8.3	Aplicación FIS en Matlab	74
8.3.1	Calidad de la mena	74
8.3.2	Calidad de la roca	76
8.3.3	Mecanización	79
8.4	Análisis de resultados	82
9	Discusión y conclusiones	83
10	Referencias	87
11	Anexos	91

Índice de figuras

Figura 1. Producción mundial total (Mt).....	8
Figura 2. Esquema de Room & Pillar con equipos mineros de extracción y transporte.	12
Figura 3. Desarrollo del método por longwall mining representando la dirección de extracción y elementos propios del método Fuente: (Peng, 2006)	13
Figura 4. Cepillo minero Cat-GH800, Caterpillar	15
Figura 5. Cizalladora Cat-EL3000, Caterpillar.....	16
Figura 6. Correa blindada Cat-PF3, Caterpillar (izquierda) y soporte de techo, Caterpillar (derecha)	17
Figura 7. Clasificación y principal uso del carbón en el mundo.....	28
Figura 8. Conjunto difuso normal (izquierda) y conjunto difuso subnormal (derecha) (Introducción to fuzzy logic using Matlab, 2007)	33
Figura 9. Conjunto difuso convexo (izquierda) y conjunto difuso no convexo (derecha) (Introducción to fuzzy logic using Matlab, 2007)	33
Figura 10. Esquema del proceso para el tratamiento de variables por lógica difusa	39
Figura 11. Herramientas del sistema de inferencia de Matlab. FIS.....	42
Figura 12. Funciones de membresía propuestas para ancho de veta (superior izquierda), índice de uniformidad (superior derecha), extensión de la veta (inferior izquierda) e inmersión de la veta (inferior derecha).....	54
Figura 13. Funciones de membresía propuestas para calidad del piso (superior derecha), calidad del techo (superior izquierda) y cantidad de agua (abajo)	55
Figura 14. Reglas difusas para la calidad de la mena.....	59
Figura 15. FIS para la calidad de la mena.....	60
Figura 16. Gráfico para la capacidad de carga y carga vertical sobre equipos de soporte de techo	

Figura 17. FIS para la calidad de la roca.....	62
Figura 18. Reglas difusas para la mecanización.....	63
Figura 19. Herramienta Surface Viewer Matlab para la mecanización en función de las variables de calidad de mena y roca	64
Figura 20. Nivel de mecanización en función del ángulo de inmersión	67
Figura 21. Sistema de acarreo de mina artesanal en Curanilahue (provincia de Arauco) formada por un winche y carros.....	68
Figura 22. Ambiente geológico de la provincia de Arauco	69
Figura 23. Columna estratigráfica del sondaje completo primer pozo de análisis	71
Figura 24. Columna estratigráfica para segundo pozo (izquierda) y tercero (derecha).....	72
Figura 25. Ubicación de los sondajes registrados durante el periodo de abril 2019	73
Figura 26. Esquema geológico estructural, sector ríos, Trongol - Pilpilco [39]	86



Índice de tablas

Tabla 1. Cizalladoras de fabricación rusa utilizadas en Ucrania para vetas de bajo perfil.....	18
Tabla 2. Cizalladoras de fabricación ucraniana y checa utilizadas en Ucrania para vetas de bajo perfil.....	18
Tabla 3. Cizalladoras desarrolladas para vetas de bajo perfil que se disponen actualmente ..	19
Tabla 4. Valores de los coeficientes de diferentes tipos de roca	26
Tabla 5. Clasificación del techo expuesto en términos de su índice de calidad	27
Tabla 6. Clasificación en base al índice de desplazamiento [14]	30
Tabla 7. Software de uso abierto, nombre (name), año (year), lenguaje de programación (Language), breve descripción (description), número de funciones de pertenecía que soporta (MF), nombre*: el paquete es mantenido, se compila correctamente y tiene funciones extensivas.....	41
Tabla 8. Escala relativa de importancia para AHP	45
Tabla 9. Consistencia aleatoria para diferentes tamaños de matriz.	48
Tabla 10. Clasificación del ancho de veta	52
Tabla 11. Clasificación de la calidad del piso en base a la capacidad de carga	52
Tabla 12. Clasificación de la calidad del techo.....	52
Tabla 13. Clasificación de la cantidad de agua en base a su entrada a las labores.....	53
Tabla 14. Clasificación de la extensión de la veta.....	53
Tabla 15. Clasificación de la inclinación de la veta	54
Tabla 16. Intensidad de prioridad para las variables mineras.....	56
Tabla 17. Importancia ponderada para las variables mineras.....	58
Tabla 18. Ponderaciones para las variables lingüísticas (V.L.) asociada a las variables mineras	58
Tabla 19. Ponderación para la calidad de la mena	59

Tabla 20. Ponderaciones para las variables lingüísticas de las variables mineras calidad roca 60	
Tabla 21. Ponderaciones para las variables lingüísticas de las variables de entrada involucradas en la mecanización.....	62
Tabla 22. Grado de mecanización para las reglas difusas	63
Tabla 23. Variables mineras de las vetas en estudio	65
Tabla 24. Resultados de las vetas en Matlab (FIS).....	65
Tabla 25. Variaciones en el ángulo de inmersión de vetas de estudio.....	67
Tabla 26. Descripción de sondaje y contenido litológico primer pozo de análisis	70
Tabla 27. Descripción de sondaje y contenido litológico segundo pozo de análisis	72
Tabla 28. Descripción de sondaje y contenido litológico tercer pozo de análisis	73
Tabla 29. Análisis de la calidad de la mena para vetas de 0,6 m de potencia.....	75
Tabla 30. Análisis de la calidad de la mena para vetas de 0,9 m de potencia.....	75
Tabla 31. Cohesión y ángulo de fricción de rocas sedimentarias [40]	76
Tabla 32. Capacidad de carga para sondajes.....	76
Tabla 33. Parámetros resistencia de roca intacta.....	77
Tabla 34. Calidad del techo de los pozos en estudio	77
Tabla 35. Calidad de la roca para pozo #15 con ancho de veta de 0,6 m	78
Tabla 36. Calidad de la roca para pozo #15 con ancho de veta de 0,9 m y pozo #13 con veta 0.6 m	78
Tabla 37. Calidad de la roca para pozo #11 con ancho de veta de 0,9 m	79
Tabla 38. Escenarios para los sondajes de pozo #15 y pozo #13	79
Tabla 39. Escenarios para los sondajes de pozo #15 y pozo #11	80
Tabla 40. Escenarios calidad de la roca para sondaje de pozo #15.....	80
Tabla 41. Escenarios calidad de la roca para sondajes de pozo #15 y pozo #13.....	80

Tabla 42. Escenarios calidad de la roca para sondaje de pozo #11.....	81
Tabla 43. Mecanización en base a los escenarios propuestos para los sondajes	81
Tabla A - 44. Reglas difusas para la calidad de la mena, regla 1 a la 30	91
Tabla A - 45. Reglas difusas para la calidad de la mena, regla 31 a la 80	92
Tabla A - 46. Reglas difusas para la calidad de la mena, regla 81 a la 130	93
Tabla A - 47. Reglas difusas para la calidad de la mena, regla 131 a la 180.....	94
Tabla A - 48. Reglas difusas para la calidad de la mena, regla 181 a la 230.....	95
Tabla A - 49. Reglas difusas para la calidad de la mena, regla 231 a la 280.....	96
Tabla A - 50. Reglas difusas para la calidad de la mena, regla 281 a la 330.....	97
Tabla A - 51. Reglas difusas para la calidad de la mena, regla 331 a la 375.....	98
Tabla B - 52. Intensidad de prioridad para las variables mineras de calidad de roca	99
Tabla B - 53. Ponderaciones para las variables mineras de calidad de la roca	100
Tabla B - 54. Calidad de la roca en base al porcentaje obtenido por las variables lingüísticas	101
Tabla B - 55. Reglas difusas para la calidad de la roca, regla 1 a la 30	101
Tabla B - 56. Reglas difusas para la calidad de la roca, regla 31 a la 70	102
Tabla B - 57. Reglas difusas para la calidad de la roca, regla 71 a la 100	103
Tabla C - 58. Reglas difusas para la capacidad de mecanización.....	104
Tabla C - 59. Intensidad de prioridad para las variables lingüísticas de calidad de la mena ..	104
Tabla C - 60. Intensidad de prioridad para las variables lingüísticas de calidad de la roca....	105
Tabla C - 61. Ponderaciones de acuerdo con las variables lingüísticas de la calidad de la mena	107
Tabla C - 62. Ponderaciones de acuerdo con las variables lingüísticas de la calidad de la roca	108

Índice de anexos

Anexo A. Aplicación AHP a Calidad de la Mena.....	91
Anexo B. Aplicación AHP a calidad de la roca.....	99
Anexo C. Reglas difusas para la capacidad de mecanización	104



1 Introducción

Actualmente, las vetas de carbón de potencia baja, es decir, todas aquellas con un grosor inferior o igual a 1,3 metros, tienen un gran atractivo económico [2]. El método de explotación de mayor uso en minería subterránea del carbón es el conocido como *room & pillar*, que consiste en generar caserones de extracción sustentado por pilares de la misma veta de carbón [6]. Sin embargo, dichas vetas se presentan en un ambiente en el cual, por problemas técnicos, resulta difícil explotarlo debido a la estabilidad que deben tener los pilares empleados. Además, dicho método presenta una recuperación inferior al 75 % con una baja dilución.

Por tal motivo, este informe se enfoca en el método de explotación por *longwall mining*, que básicamente consiste en retirar la veta de carbón usando equipos mineros de corte, transporte y soporte de techo, que avanzan en dirección de la veta y van dejando caer el techo a su paso. De esta forma se mejora la recuperación y el yacimiento se hace más rentable económicamente [2]. La disposición de los equipos para explotar por *longwall mining* requiere de un estudio técnico asociado con variables principalmente geológicas, las cuales son un factor principal para determinar la capacidad de mecanización de la veta [17].

El estudio de estas variables geológicas se hace por medio de lógica difusa y procesos de análisis jerárquico, complementados con la teoría sobre los rangos admisibles para lograr una buena mecanización. Una vez analizada la contribución de cada variable, se programa en el *software* de Matlab todo lo concerniente a la lógica difusa [34] para calcular la capacidad de la veta carbón según la condición geológica presente. Al final del informe se presentan casos de estudio para aplicar el modelo obtenido en Matlab y se analizan una serie de sondajes realizados en el sector de Curanilahue para proponer escenarios en los que se pueda valorar su capacidad de mecanización.

Debido a la falta de información se proponen escenarios de estudios para ser contratados con las condiciones geológicas de la zona de Arauco [39], con esto se obtienen las capacidades de mecanización de los sondajes mostrando las condiciones favorables para la lograr una mecanización del lugar por medio del método de extracción *longwall mining*.

2 Descripción del problema

La explotación del carbón ha sido uno de los recursos más importantes para la generación de energía y, por qué no decirlo, para el desarrollo de la humanidad. No es de sorprender la longevidad de esta actividad en diferentes partes del mundo y tampoco que, así como ha avanzado a lo largo de los años, también cada vez ofrezca nuevos desafíos para seguir ofreciendo utilidades económicas y sociales [42]. Muchos países que han explotado el carbón durante un largo periodo se han visto obligados a lidiar con inconvenientes como la escasez de vetas de carbón subterráneas que tengan las potencias ideales para ser mecanizadas [7]. Al agotarse este tipo de yacimientos empiezan a llamar la atención aquellas vetas que han sido descartadas en un principio por presentar potencias muy delgadas, valga decir, del orden de los 1,3 metros o inferior.

Países como Rusia, Ucrania, Polonia y, en años más recientes, China, han sido pioneros en la aplicación y desarrollo de tecnologías que permitan explotar las vetas de carbón de baja potencia con éxito [9]. Sin embargo, basarse solamente en la potencia de la veta para ser mecanizada no es factible bajo ningún criterio. Varios factores influyen en llevar a cabo un proyecto de mecanización de una veta de carbón para un método de explotación por *longwall mining*; la pregunta es cuáles garantizan el proceso.

Bajo este contexto, resulta necesario separar las variables en categorías, de lo contrario se genera un gran número de variables que requieren de un análisis más complejo y en muchas ocasiones poco económico desde el punto de vista de tratamiento de datos [32]. Estas categorías pueden ser de tipo económica, social, ambiental y técnico, y permiten estudiar de mejor manera la factibilidad de un proyecto. Para este caso fueron las variables técnicas las que garantizaron la aplicación del método seleccionado con el objetivo de encontrar un análisis sencillo y económico para estimar la capacidad de mecanización de la veta.

Una vez encontradas las variables que influyen en el análisis técnico, se deben establecer las reglas que permitan estimar el impacto que genera la conjugación de estas sobre la veta. Este análisis debe estar basado en una teoría sólida de tratamiento de datos que en muchas ocasiones pueden presentar niveles de incertidumbre importantes [33], dada su vinculación con las características

geológicas del yacimiento. Por eso, se necesita un método y un modelo de análisis que trabaje tanto con características cualitativas como cuantitativas.

El tratamiento de estas variables es clave para poder determinar si una veta de carbón presenta las condiciones necesarias para llevar a cabo su mecanización y ser explotada de manera segura a la vez que se mejora la tasa de producción [13]. Por otro lado, al no presentarse las condiciones técnicas para aplicar un método de mecanización por *longwall mining*, estas vetas de carbón de baja potencia difícilmente serían extraídas por algún otro método de explotación mecanizado que presente una alta productividad y seguridad.

Por otro lado, programar un modelo que permita describir la capacidad de la veta para ser mecanizada, requiere de la recopilación de información de experiencias anteriores para definir las variables de manera correcta o, mejor dicho, describir su comportamiento frente a las condiciones que favorezca la mecanización. De acuerdo con un estudio realizado sobre métodos sencillos para estudiar la mecanización de la veta [14], es posible simplificar la conjugación de las variables mediante un análisis de jerarquización [36] y de esta forma, establecer las reglas que permitan estimar la capacidad de mecanización de la veta.

Como último punto, la extracción en el sector de Arauco de carbón se realiza de manera artesanal, lo que conlleva a bajas tasa de producción y seguridad. Por ello es importante generar un sistema que pueda realizar un estudio de manera económica, y determinar la factibilidad técnica de mecanizar dichas zonas de explotación. El mayor desafío es sobrellevar la falta de información, producto de los requerimientos económicos que estos conllevan el poder realizar sus estudios respectivos. El pilar de esta información serán los sondeos entregados por el PAMA y el estudio de las condiciones geológicas del lugar desarrolladas por O. Wenzel [40].

3 Hipótesis

Es posible determinar la capacidad de mecanización de una veta de carbón con base en la teoría de lógica difusa respaldada por procesos de análisis jerárquico sobre las potencias de vetas que se consideraban no explotables por ser muy delgadas. La potencia de las vetas ya no es un desafío desde el punto de vista técnico debido al desarrollo de nuevos equipos que son capaces de explotar este tipo de vetas [9]. Además, el cálculo de su capacidad se puede simplificar y agilizar con la información acotada de datos, y así crear un modelo eficiente de estimación. El modelo, al centrarse en variables acotadas que solo influyen en la capacidad de mecanización, economiza los datos que se computan, lo cual permite desarrollar escenarios de análisis con facilidad.

Al lograr un modelo de análisis de mecanización sencillo y simple, en base a las variables mineras que entran en juego, entonces se pueden acotar el contenido de información necesaria para lograr un estudio de mecanización que respalde la toma de decisiones a la hora de llevar a cabo un proyecto minero que involucre la aplicación de un método de extracción por *longwall mining*. Junto con lo anterior es evidente lograr economizar los recursos destinados para tales estudios, como tiempos de procesamiento, gastos de prospección, entre otros.

4 Objetivos generales y específicos

4.1 Objetivos generales

A grandes rasgos se busca determinar la capacidad de mecanización de una veta de carbón de baja potencia de acuerdo con las variables mineras involucradas en la explotación por medio del *longwall mining*. Se propone encontrar un modelo sencillo y rápido para mejorar el respaldo en la toma de decisiones a la hora de realizar un proyecto que involucre una alta seguridad y producción de un manto de carbón por mecanizarse.

4.2 Objetivos específicos

- Respaldar la mecanización de la veta con base en el desarrollo de equipos mineros capaces de explotar vetas de baja potencia.
- Determinar las variables mineras involucradas en el proceso de mecanización de la veta.
- Desarrollar un modelo mediante lógica difusa capaz de calcular la capacidad de mecanización que puede presentar una veta.
- Validar el modelo de la capacidad de mecanización mediante la teoría desarrollada respecto al impacto de las variables mineras en el proceso.
- Determinar la capacidad de mecanización en el sector de Curanilahue por medio de los sondeos facilitados por PAMA.
- Proponer escenarios de mecanización ante la falta de información geológica de las formaciones de carbón en la zona carbonífera de Arauco.

5 Metodología

Los procedimientos y planteamientos realizados consistieron en buscar aquellas variables que desempeñan un rol fundamental en la mecanización de los mantos de carbón [17]. En particular, se escogió el método de *longwall mining* para aprovechar su capacidad de producción de vetas, por ende, las variables identificadas tienen relación con las condiciones de la mena y de la roca de caja [13]. Se estudiaron las condiciones de cada una de ellas en relación con el impacto que tienen en la mecanización de la veta bajo el sistema de explotación presentado y los equipos necesarios para llevar a cabo su ejercicio. De acuerdo con las condiciones ideales de aplicación de mecanización se categorizaron las variables mineras que la favorecen desde lo más alto hasta una condición nula.

En este contexto se propuso la aplicación de la teoría de lógica difusa para el tratamiento de los rangos propuestos, los cuales posteriormente se trataron bajo etiquetas que se utilizaron para describir las reglas de conjugación necesarias para la mecanización. Las variables mineras involucradas en la calidad de la mena se trabajaron de manera independiente de aquellas asociadas a la calidad de la roca, pero la mecanización de la veta se calculó con base en ambas. La base de las reglas necesarias para calcular tanto las calidades como la capacidad de mecanización se centran en la experiencia y la teoría que se maneja con respecto a las variables mineras [8,13,18-24]. No obstante, debido a la falta de datos concretos, se propuso la aplicación del método de proceso de análisis jerárquico (AHP) para sostener las reglas para las categorizaciones de las variables mineras. El propósito de esto fue obtener matrices de prioridades que en todo momento se mantuvieran dentro del rango de consistencia [36], es decir, bajo el 10 %.

Así, se desarrolló un total de 500 reglas, 375 para la calidad de la mena, 100 para la calidad de la roca y 25 para la capacidad de mecanización. Con respecto a las reglas de calidad de la mena solo se consideraron aquellas relacionadas con las potencias de vetas delgadas y medias, a saber, de 2,5 metros o inferiores hasta un mínimo de 0,4 metros. Para estos procedimientos se utilizó la herramienta Matlab con su aplicación *Fuzzy Logic Designer*. En esta aplicación se programaron las reglas desarrolladas, pero como no se contaba con información para describir la función de pertenencia, se propusieron e implementaron funciones básicas descritas por trapecios y triángulos, cuya función en Matlab fue *trapmf* y *trimf* respectivamente. Para determinar los niveles de

pertenencia de cada categoría se relacionó el valor central con el máximo valor de pertenencia, el resto de los valores del rango presentaron valores de pertenencia en conjunto con la categoría adyacente. De esta forma se programó el sistema de inferencia difusa, con base en la inferencia de Mamdani [34].

El modelo se validó utilizando dos casos de vetas de carbón de los cuales ya se conocían sus variables mineras y su influencia en la mecanización [13]. El análisis permitió demostrar que los valores obtenidos por el modelo no están lejos de la teoría propuesta en este trabajo. Por último, se analizó un conjunto de sondajes facilitados por PAMA en el sector de Curanilahue. La dificultad de conocer la continuidad del manto y otras variables necesarias para llevar a cabo la aplicación del método, llevaron a proponer diversos escenarios bajo los cuales se aplicó el análisis por lógica difusa de la capacidad de mecanización posible. Las variables vinculadas a la litología del sondaje se trataron con valores medios o típicos de acuerdo con sus características geomecánicas [39-41]. Los resultados de la capacidad de mecanización se contrastaron con la teoría y el conocimiento geológico de la zona carbonífera de Arauco para verificar la concordancia que tienen con la situación real de la zona de estudio.

Al final de este trabajo se presenta las reglas difusas que fueron obtenidas mediante un análisis jerárquico AHP, estas reglas fueron realizadas considerando un nivel de pertenencia máximo en la variable lingüística para cada uno de los casos. Estos pesos de importancia fueron en base a estudios realizados en variables mineras para medir su mecanización en vetas de carbón [14] y la teoría antes presentada con respecto a las variables mineras para lógica difusa. Este conjunto de reglas fue programado en Matlab, para utilizar las herramientas para lógica difusa y así se determinó la capacidad de mecanización de vetas de carbón por medio de los sondajes y escenarios propuestos.

6 Marco teórico

6.1 Producción del carbón actual

La producción del carbón a nivel mundial no ha presentado grandes bajas, pese a que actualmente exista en una mayor conciencia hacia el cuidado del medio ambiente que favorece la generación de energía a partir de recursos renovables. El punto fuerte de la generación de energía a partir del carbón es que sigue siendo una alternativa bastante económica. A partir del año 2014 la producción de carbón disminuyó por primera vez en este siglo y continuó hasta el año 2016 de forma abrupta. En el año 2017 se reflejó una mejora en la producción con 225 millones de toneladas (Mt) más con respecto al año anterior, esto es un 3,1 % de crecimiento; sin embargo es inferior al mayor crecimiento en la producción de carbón que ocurrió en el 2013 con 426 Mt (5,3 %) [1]. Estas cifras reflejan la necesidad que tienen muchos países (Figura 1) de continuar con su producción de carbón aun con el impacto negativo que causa la generación de energía con él comparada con las energías renovables.

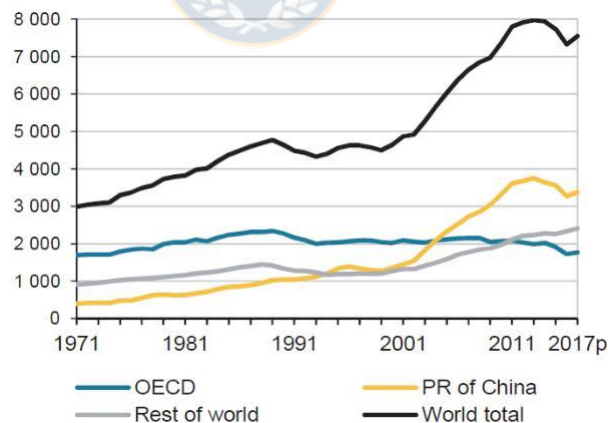


Figura 1. Producción mundial total (Mt)

Fuente: (IEA-Coal information, 2018)

El carbón enfrenta un desafío importante pues al ser un recurso no renovable, desde el punto de vista humano, sus reservas se van agotando a medida que la explotación avanza y las demandas energéticas se incrementan. Mientras el carbón se explota y se agota, con las condiciones geológicas

y mineras, se hace más difícil encontrar yacimientos explotables, se encarecen los costos de extracción y surgen mayores amenazas tanto para los equipos mineros como para los operadores. Por eso, países como China, Rusia, Alemania, Polonia y Ucrania se han visto en la necesidad de desarrollar tecnologías que puedan sobrellevar la adversidad que presentan los yacimientos de carbón en este último tiempo. Una característica de estos es la baja potencia de las vetas que se producen y la profundidad a la que se encuentran, por lo que tiempo atrás eran descartados para ser explotados. Sin embargo, en la última década, gracias al desarrollo de equipos mineros que puedan extraer las vetas, estas han adquirido un peso económico importante, sobre todo para países como Polonia y Ucrania [2] que deben, en gran parte, sostener su generación de energía eléctrica a partir del carbón.

Los yacimientos de carbón son explotados mediante varios métodos mineros. Este trabajo se enfoca en analizar el método de explotación por tajo largo o *longwall mining*, que presenta mayor factibilidad para explotar las vetas más complicadas, es decir, aquellas que se encuentran a mayor profundidad y tiene espesores más bajos de extracción, con una alta productividad y seguridad.

6.1.1 El carbón

Actualmente, el carbón sigue siendo un recurso importante en la industria de generación de energía convencional en el mundo, por eso, su explotación no ha cesado a pesar de que existen nuevas tecnologías que favorecen el uso de recursos renovables. Hoy en día el carbón proporciona el 29,9 % de las necesidades mundiales de energía primaria y genera el 41 % de la electricidad mundial, por lo cual se constituye en un recurso valioso en la columna vertebral de la civilización industrial moderna [3]. Este se forma a partir de material orgánico en descomposición el cual es sometido a un proceso denominado carbonificación, que está compuesto por dos etapas principales, la diagénesis y el metamorfismo. Al ser sometidos a los procesos geológicos de compresión y alteración por un periodo de miles a millones de años los restos vegetales provocan un aumento en el contenido de carbono y transforman el material en carbón.

La carbonificación comienza con el proceso bioquímico de turbificación de los materiales vegetales muertos. Luego se pasa por un proceso geoquímico complejo cuando la turba ha cesado y se ha cubierto con otros sedimentos. Esta carbonificación puede ocurrir bajo distintos ambientes de

temperatura, presión y tiempo de procesamiento, y así genera diferentes tipos de carbón en su contenido volátil, humedad, contenido de oxígeno y contenido de hidrógeno, principalmente. Este proceso, acompañado del tiempo y la acumulación de material orgánico, da lugar a la formación de yacimientos de carbón. Según el tiempo, la tasa de acumulación y el hundimiento de las cuencas formadoras de carbón se define el espesor del manto. A medida que avanza el proceso de formación, la pérdida de agua y la compactación, el volumen del carbón disminuye, lo cual implica una reducción de la humedad en su contenido y un aumento en la relación metano-dióxido de carbono, que llevan al aumento del enriquecimiento del carbón [3]. Por lo tanto, en los mantos más pequeños existe una mayor concentración de gases producto del proceso de formación descrito y también una mayor cantidad de ceniza.

6.1.2 Minería del carbón

Los métodos de extracción de los yacimientos del carbón dependen de las condiciones y fenómenos geológicos dominantes durante la formación del yacimiento. Los afloramientos de los mantos dan lugar a explotaciones de tipo superficiales, como *open cast* o minería a cielo abierto, que se caracterizan por usar equipos de gran tamaño y capacidad, que tienen un alto grado de recuperación y productividad. Cuando el hundimiento genera la formación de mantos bajo la superficie, la profundidad de las vetas desempeña un rol importante para determinar si aplicar un método superficial o uno subterráneo. Como regla general para los mantos bajo los 50 metros de profundidad es más factible aplicar un método de extracción subterráneo. En este la potencia del manto y características como el ángulo de inmersión o manto del yacimiento definen cuál de todos los métodos subterráneos aplicar.

Por lo general, los equipos utilizados en minería subterránea del carbón son de bajo perfil, y la recuperación y selectividad dependen del método aplicado. Por ejemplo, los métodos autosoportados tendrán una menor recuperación que los métodos con soportes de techo que provocan el hundimiento del material sobre la veta. Además, existen métodos de extracción que pueden definirse como superficiales y subterráneos, es decir, los equipos extraen bajo la superficie, pero el transporte del mineral fracturado es muy cercano a ella.

6.1.3 Método de explotación superficial-subterráneo

Pese a que en el presente estudio se busca hacer énfasis en los equipos de mecanización para minería subterránea por *longwall mining*, existen también métodos utilizados hoy en día para explotar yacimientos de carbón de baja potencia que combinan la extracción superficial con la subterránea. Dentro de estos se encuentran el *auger mining*, el *continuous highwall mining* y el *punch longwall mining* [4], que se caracterizan por el uso de equipos de alta capacidad, lo que implica una alta producción en comparación con los métodos netamente subterráneos. Para estos resulta importante el ambiente topográfico en que la veta de carbón se encuentra, dado que con frecuencia la extracción se realiza por una ladera, es posible sacar directamente el material cortado hacia la superficie.

6.1.4 Método de explotación subterráneo

Cuando los mantos de carbón superan en gran medida los 50 m profundidad, lo más apropiado es un método de extracción subterráneo. En estos casos se han aplicado diferentes técnicas a lo largo de la historia, se han usado desde equipos sencillos como pala y pica hasta los equipos de arado y corte que surgieron a partir de la década de los 40 y todavía se utilizan [5]. La eficiencia de mejores rendimientos, velocidad y potencia de corte han sido el objetivo principal de las empresas fabricantes. Actualmente, los métodos subterráneos más utilizados en la explotación del carbón son el *board and pillar*, el *room and pillar* o el *pillar and stall* [6], su diferencia radica en el tamaño del pilar y si este es extraído parcial o totalmente. El *longwall mining* es aplicable para vetas de carbón de bajo perfil, pues ofrece una alta mecanización y seguridad del proceso de extracción.

6.1.4.1 Room and pillar/board and pillar

El método de *room and pillar* o *board and pillar* consiste en desarrollar pilares como sistema de autoaporte del yacimiento (Figura 2), entre estos se dejan caserones que son extraídos por equipos mineros de bajo perfil como cargadores o equipos continuos. Es un método que permite un cierto grado de selectividad y dependiendo de la estabilidad del yacimiento los pilares son extraídos total o parcialmente; esto define de forma directa el grado de recuperación del yacimiento, que por lo general no supera el 75 %. En la mayoría de los casos los pilares no son extraídos lo que quiere

decir que la planificación y desarrollo de estos debe considerar una baja ley, sin dejar de lado la estabilidad del caserón planificado. Se aplican normalmente para yacimientos de baja potencia, con espesores de 2 a 20 m y con una disposición de manto de tipo tabular horizontal de gran extensión en el mismo plano., pero existen variaciones que permiten explotar el yacimiento con ángulos de inmersión entre 30° y 40°.

En Ucrania el 60 % de la explotación se realiza por *board and pillar* en combinación con equipos mineros continuos y complejos que extraen largas paredes de carbón, que en este caso corresponden a los pilares del método. En este país el 90 % de la extracción del carbón se realiza en vetas que van desde los 0,2 metros a los 1,5 metros con tasas de producción que han alcanzado las 4500 toneladas por día [7]. De esta forma, es evidente que se pueden combinar métodos de extracción para mejorar los índices de producción a pesar de las condiciones adversas que presenta el yacimiento.



Figura 2. Esquema de Room & Pillar con equipos mineros de extracción y transporte.

6.1.4.2 Longwall mining

El método de extracción por *longwall mining* es de tipo subterráneo y se caracteriza por generar hundimiento a medida que la veta de carbón es extraída. Este método es aplicable para vetas de carbón horizontales o subhorizontales, cuya potencia sea superior a 0,6 metros y no supere los 3 metros; a partir de dicho valor la mecanización del yacimiento es favorable [8]. Sin embargo, debido a la necesidad de extraer vetas más delgadas se han desarrollado equipos que pueden

extraer vetas ultrafinas, es decir, del orden de los 0,38 metros de potencia [9]. Con respecto a la extensión del yacimiento, lo ideal es que sea de 3 a 4 km y que cuente con frentes de extracción que pueden variar entre los 250 y 300 metros o los 400 y 500 metros, dependiendo del complejo de extracción [10].

Este método consiste en crear las galerías de accesos y ventilación en conjunto con la galería de transporte que tendrá como fin extraer el carbón desde la veta hacia afuera de la mina. Para minimizar los costos el desarrollo de las galerías principales se realiza en el mismo manto de carbón y se deja un pilar tipo barrera para proteger las galerías principales. Después de tener las galerías principales y los pilares de seguridad, se inicia el proceso de desarrollo de paneles que se extraen por medio de equipos de corte y acarreo; para eso es necesario desarrollar a lo largo del manto dos galerías, denominadas cabeza y cola, que se unen en el final de este. Estas permiten la instalación de los equipos de extracción y soporte; dicha extracción comienza desde el fondo del panel hasta el pilar de protección de la galería principal, como se muestra en la Figura 5. A medida que los equipos de corte van extrayendo el panel y depositándolo en equipos de transporte (correas blindadas), el carbón extraído es transportado a través de las galerías longitudinales hacia las galerías principales. Por otro lado, los equipos de soporte de techo avanzan en conjunto con el equipo de corte y dejan caer el techo detrás del frente de avance.

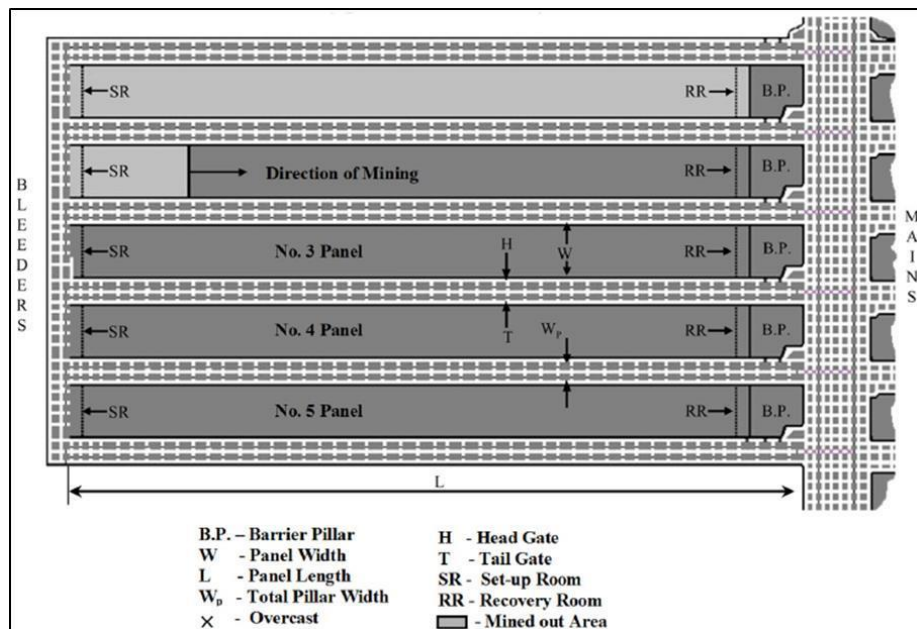


Figura 3. Desarrollo del método por longwall mining representando la dirección de extracción y elementos propios del método Fuente: (Peng, 2006)

En el caso de que haya más de un panel de extracción, las galerías longitudinales van cambiando su función a medida que los paneles se extraen. En la galería cabeza se instala el equipo de transporte para extraer el carbón desde el frente de extracción hacia las galerías principales de la mina, la galería de cola cumple una función más de acceso libre y ventilación del frente de trabajo. Luego de extraer todo el panel hasta el pilar barrera se define el nuevo panel de extracción, se desarrolla una nueva galería cabeza y esta se une a la antigua galería cabeza del panel adyacente ya extraído, por lo que se convierte en la galería cola del nuevo panel que se va a extraer. Para proteger la estabilidad de las galerías del derrumbe propio del método se dejan pilares de tipo barrera de un ancho entre 60 a 150 m en el sentido de avance en ambos extremos del frente de extracción. Además, las entradas al panel se mantienen mediante bulonado, se ponen una o dos filas de llaves o castilletes a lo largo de 30 a 150 m [11].

6.1.5 Mecanización de vetas de carbón por *longwall mining*

El *longwall mining* es el método más favorable para la explotación de minas de carbón de baja potencia por la alta productividad y nivel de seguridad que ofrece un sistema mecanizado de este tipo. Muchos factores influyen la aplicación de este método, en especial la longitud del frente de extracción y el largo del panel. Tiempo atrás la explotación de mantos de carbón inferiores a 1,3 metros eran descartados para ser mecanizados debido que no existían equipos que pudieran extraer este tipo de vetas, pero como los yacimientos superiores a esta potencia se agotan la tecnología ha tenido que avanzar. Ucrania y Polonia [2] han sido pioneros en el desarrollo y la aplicación de equipos para el *longwall mining* de potencia baja, igual que la República Popular de China, país que produce alrededor de 3300 Mt de carbón al año, que sigue avanzando en la creación de herramientas para la extracción de vetas de carbón que no superen los 1,3 metros de potencia [12].

Los equipos de minado para *longwall mining* son principalmente cuatro: cepillo, rozadora, correa blindada y soportes de techo. Igualmente, los equipos de ventilación son fundamentales para poder realizar las obras de extracción en cualquier mina subterránea por la alta posibilidad de presencia de metano.

6.1.5.1 Cepillos o arados mineros (*plow system*)

El cepillo o arado minero consiste en un cuerpo compuesto por cinceles (Figura 4) que tienen como objetivo arrancar el carbón del frente de extracción. Esto lo hace un sistema de arranque compuesto por cadenas que se encargan de desplazar el equipo sobre la cara del manto de carbón y que regulan la profundidad de corte de la pasada. Estos equipos se usan, de preferencia, para potencias de mantos bajas, entre 0,6 y 1,5 m con ángulos de inclinación ligeros de no más de 40°.



Figura 4. Cepillo minero Cat-GH800, Caterpillar

6.1.5.2 Rozadora o cizalladora (*shearer system*)

La rozadora es el equipo de corte más utilizado en la actualidad en la minería de carbón subterránea. Existen de varios tipos de rozadoras, la de doble tambor articulado, la de tambor simple articulado y la de tambor simple fijo. La más utilizada es la de doble tambor articulado (Figura 5) que permite realizar el corte en una o dos direcciones [11]. El principio de corte de las cizalladoras de doble tambor es simple; el mecanismo de cadenas, al igual que en los equipos de arado, arrastra la rozadora sobre la cara del manto de carbón y genera cortes en cada pasada. Si la pasada es en una sola dirección el tambor de cabeza se deja fijo y elevado, mientras que el de cola queda libre o corta en conjunto con el primero para definir un mejor corte de pasada sobre la potencia del manto. Luego de la pasada de corte el mecanismo de cadenas arrastra el equipo de tambores en la dirección

contraria con el objetivo de limpiar y cargar con el carbón cortado la correa transportadora blindada. Los cortes en ambos sentidos solo se logran cuando la automatización de la rozadora es alta.



Figura 5. Cizalladora Cat-EL3000, Caterpillar

6.1.5.3 Correas blindadas o transportadores de frente de avance blindado

Las correas blindadas o los transportadores de frente de avance blindado se encargan principalmente de transportar el carbón cortado hacia la correa transportadora ubicada en la galería de cabeza. Estos pueden ser de cadena simple o doble (Figura 6) dependiendo de las exigencias de corte y transporte de material desde el frente de extracción. Estos equipos se acoplan a la rozadora o cepillo para formar el conjunto del sistema de corte de extracción del frente.

6.1.5.4 Soportes de techo

Los equipos de soporte de techo (Figura 6) pueden ser tanto hidráulicos como electrohidráulicos, estos últimos son los que presentan mayor automatización de los sistemas de soporte. Estos equipos brindan protección al sistema de corte y transporte en el frente de extracción, una vez realizado el corte avanzan en conjunto con el sistema de corte para seguir extrayendo el panel y van dejando caer el techo, con lo que generan una zona de subsidencia en las zonas donde

el panel ya ha sido extraído. Los equipos de soporte tienen la ventaja de ser ajustables, por lo cual se puede graduar la altura de protección desde los 0,6 m a los 6,1 m con hasta 111 ton/m² de densidad de protección.



Figura 6. Correa blindada Cat-PF3, Caterpillar (izquierda) y soporte de techo, Caterpillar (derecha)

6.1.6 Limitaciones y observaciones

Mecanizar vetas de carbón de baja potencia se ha convertido en un desafío importante para los países cuya economía y generación de energía dependen aún de este recurso. No obstante, la potencia de las vetas no es el único inconveniente, se debe considerar también la cantidad de metano producido y confinado producto del tamaño de las áreas de extracción, así como el contenido de ceniza en el carbón, las condiciones geológicas y del yacimiento que desempeñan un papel importante en los esfuerzos. Todo lo anterior impacta directamente en la tasa de producción, que puede llevar en últimas a que la mecanización de dichas vetas se vuelva inviable.

Puede decirse que el método de extracción adecuado para este tipo de vetas de carbón es el *longwall mining*, que es el que concierne al presente estudio, sin descartar métodos como el *board and pillar* o una combinación de ambos, que en Donbas occidental, Ucrania, ha mantenido y mejorado la producción promedio de cada mina a pesar del conflicto político y militar sufrido en el país [7]. Para lograr una adecuada mecanización de vetas de carbón delgadas es importante tener en cuenta los equipos de los que se dispone hoy en día. En la Tabla 1 se muestran algunas cizalladoras de fabricantes rusos que extraen vetas con un grosor mínimo de 0,7 metros.

Tabla 1. Cizalladoras de fabricación rusa utilizadas en Ucrania para vetas de bajo perfil

Shearer type	1K101	K103	KA90	MK67
Production capacity, t/min	1,2 - 1,8	2,0 - 3,2	2,2 - 3,3	2,0 - 2,5
Extracting sean thickness, m	0,75 - 1,2	0,7 - 1,4	0,8 - 1,25	0,7 - 1,3
Nominal web width, m	0,63 / 0,8	0,8	0,8	0,8
Maximal intake velocity, m/min	4,4	5,0	5,0	1,27
Weight, t	10,4	17,5	12,8	8,4

Tabla 2. Cizalladoras de fabricación ucraniana y checa utilizadas en Ucrania para vetas de bajo perfil

Shearer type	UKD 200	UKD 200- 250	UKD 300	UKD 400	KA 200	MB 410E	MB 444 P
Production capacity, t/min	3,0 – 5,0	3,3 – 5,5	4,0 – 8,0	5,5 – 12,0	5,0	3,0 – 9,0	6,0 – 7,0
Extracting sean thickness, m	0,8 – 1,3	0,85 – 1,3	0,85 – 1,3	0,85 – 1,5	0,8 – 1,25	0,9 – 1,8	0,88 – 1,3
Nominal web width, m	0,63 / 0,8	0,63 / 0,8	0,7 / 0,8	0,7	0,8	0,8	0,7 / 0,9
Maximal intake velocity, m/min	5,0	5,0	12,0	12,0	5,0	12,0	11,5
Weight, t	14.5	14.4	18.2	21.0	13.0	18.0	22.0

En la Tabla 2 se muestran equipos de cizalladoras fabricados por la empresa ucraniana Corum Group y T Machinery de fabricación checa, el ancho de veta mínimo alcanzado por estos equipos es de 0,8 metros [2]. Sin embargo, estos no son los únicos países que han desarrollado equipos de cizalladoras para vetas de bajo perfil; empresas como Beijing HOT Mining Tech Co. Ltd. (China), Mackina-Westfalia S. A. (España), Kopex Machinery S. A. (Polonia) y Eickhoff Bergbautechnik GmbH (Alemania) también han desarrollado algunos (Tabla 3) que pueden operar con ángulos longitudinales de veta entre 30° a 85° [9].

Tabla 3. Cizalladoras desarrolladas para vetas de bajo perfil que se disponen actualmente

Equipo	Ancho de veta, m	Angulo Longitudinal, °
Kopex KSW-460NE1	1,35 – 2,40	
Eickhoff SL 300 L	1,20 – 2,00	
Kopex GUL-500	1,10 – 1,70	
Corum KBT 200	0,80 – 1,25	
Mackina PMAP	1,25 – 2,50	35°-85°
Mackina RPB60	0,38 – 0,85	35°-85°
Mackina PMA80	1,10 – 2,50	30°-85°
Mackina TEMP-H	0,65 – 1,20	
HOT HMG100/111- TWD	0,75 – 1,20	
HOT HMG100-TP	0,44 – 0,90	

Para estudiar la mecanización de una veta de carbón también es necesario tener en cuenta la longitud que esta presenta. En el *longwall mining* la longitud mínima es de 100 metros, cuando se está por debajo de esta medida existe una variación del método conocida como *shortwall mining* [11]. A medida que la longitud de extracción del frente aumenta, mayor es la mecanización requerida, esto permite reducir los tiempos de ciclos e impacta positivamente en la tasa de producción y los costos de extracción [10]. Ahora bien, al momento de aumentar el largo de extracción es importante considerar que las exigencias energéticas de la correa aumentan para que pueda realizar las labores de acarreo, lo cual por lo general se convierte en un factor limitante, sin contar con las restricciones geológicas.

6.2 Variables que influyen en la mecanización de minería del carbón

Actualmente se cuenta con más de un método para determinar si un yacimiento de carbón puede ser mecanizado o en qué grado lo puede ser [13-16]. Estos métodos involucran variables mineras que se conjugan para poder estimar la favorabilidad de las condiciones para aplicar el sistema de extracción de carbón por *longwall mining*. De esta forma se busca encontrar de forma

rápida y sencilla criterios que ayuden en la toma de decisiones de mecanizar o no un proyecto minero. A continuación, se presentan las variables mineras que deben ser consideradas para determinar la mecanización de un yacimiento de carbón, las cuales están estrechamente vinculadas con algunas variables geológicas y con las características técnicas necesarias para que los equipos mecanizados puedan ser utilizados bajo dichas condiciones.

6.2.1 Variables mineras

Las variables mineras definen cualquier método de explotación y las operaciones auxiliares posteriores, como la ventilación, el control de estabilidad, el transporte, etc. Es necesario saber cómo las características deposicionales de los mantos de carbón impactan en las decisiones de diseño y selección del método de explotación. Estas características o consecuencias del proceso de formación pueden tratarse como variables independientes que afectan las variables dependientes en el potencial de producción [17], además, pueden generar dependencia entre ellas mismas, por lo que cuando se habla de independencia se relaciona con el grado de libertad que tienen para afectar las variables dependientes. Dentro de estas se encuentran, excluyendo el elemento humano, la potencia o el ancho de la veta, la calidad del piso, la calidad del techo, el grado de liberación de metano, la dureza y grado de impureza, la profundidad de la veta, y la cantidad de agua presente.

Las variables independientes afectan en conjunto el método de explotación y los planes mineros, y es muy probable que también definan una segunda variable del mismo tipo. Por ejemplo, la calidad del piso se puede ver afectada por la cantidad de agua presente en el yacimiento o la calidad del techo se puede ver afectada por la profundidad a la cual se encuentre la veta.

6.2.2 Potencia o ancho de veta

La potencia de la veta es primordial a la hora de definir si un yacimiento de carbón puede ser mecanizado. La altura de corte determina los equipos de soporte necesarios para efectuar las labores en el frente de extracción, así como los equipos de corte, que para el caso del método de extracción por tajo largo son la rozadora o el cepillo minero. En la actualidad, el rango de trabajo va desde los 0,6 a los 5 metros, sin embargo, son los yacimientos entre 1 y 3 metros los que presentan una mecanización favorable, fuera de este rango la mecanización es muy reducida [13]. Sumado a la potencia de la veta se debe considerar el ángulo de inmersión de la veta.

La mecanización de vetas con una potencia alta, es decir, sobre 3 metros o más, no se ve tan afectada cuando se presenten ángulos de inmersión superiores a 40°, el impacto de estos es mayor con potencias más bajas, lo cual muestra una relación inversa entre el grado de mecanización y el ángulo de inmersión. Para efectos ideales el ángulo de inmersión de la veta debe ser lo más cercano a 0 para ser explotado por el método de tajo largo. De acuerdo con el estudio de mecanización según la inmersión de la veta [8] se presenta la siguiente función de inmersión.

$$f(\alpha) = \begin{cases} 11 & 0 < \alpha \leq 5^\circ \\ 0 & 40^\circ < \alpha \leq 90^\circ \end{cases} \quad (1)$$

Esta función de inmersión otorga un valor máximo de 11 para indicar que la mecanización es bastante favorable para la veta de carbón y un valor de 0 para indicar lo contrario. Entonces, se concluye que la mecanización es más favorable para vetas de carbón horizontales o subhorizontales y que a partir de 5° el valor de mecanización cae abruptamente hasta los 40°, cuando se vuelve nula.

6.2.3 Calidad del piso

Una calidad del piso buena debe ser capaz de soportar el material producto del efecto de subsidencia que genera el *longwall mining*. Este requiere de una calidad buena del piso para permitir que los soportes de techo avancen en dirección de la veta y que estos vayan dejando caer el techo a medida que avanza la explotación del carbón. Los soportes ayudan a mantener uniformes los esfuerzos y las deformaciones a lo largo del frente de avance, al presentarse una pobre competencia del piso, estos fallan o no pueden avanzar en el frente de extracción. Por ende, la calidad del piso debe soportar la presión ejercida sobre los soportes de techo para favorecer la aplicación y mecanización del método por *longwall mining*.

Uno de los pioneros en estudiar la capacidad de carga del piso fue el ingeniero y físico alemán Ludwig Prandtl (1921), cuya teoría suponía un comportamiento plástico del piso producto del contenido de materiales arcillosos en él. Sus estudios, en conjunto con el estudio de la influencia de los parámetros de mecanización [8], han indicado que para cuantificar la capacidad de carga de la

roca del piso, además de la relación de tensión-esfuerzo (ecuación 2), requieren de una tercera ecuación para poder analizar las características de falla del material. En consecuencia, se utilizaron los criterios de falla de Morh-Coulomb (ecuación 3) para llegar a un modelo que determinara la capacidad de soporte de la roca del piso y analiza sus criterios de falla (ecuación 4). La ecuación 5 proporciona los valores aproximados para la capacidad de carga de la roca del piso.

$$\frac{\sigma_x}{\sigma_y} + \frac{\tau_{xy}}{\sigma_y} = 0 \quad (2)$$

Donde σ_x : la componente horizontal, σ_y : la componente vertical, ρ : la densidad de la roca de piso.

$$\tau = \sigma \cdot \tan \phi + c \quad (3)$$


Donde τ : esfuerzo cortante antes de la falla (ton/m^2), σ : esfuerzo normal antes de la falla (ton/m^2), c : cohesión en el plano de falla (ton/m^2), ϕ : ángulo de fricción interna de la roca de piso (radianes).

$$Q = \frac{1}{2} \cdot \frac{c}{\tan \phi} + \frac{1}{2} \cdot \frac{c}{\tan \phi} \quad (4)$$

Donde Q : capacidad de carga de la roca del piso (ton/m^2), q : la carga uniforme en ambos lados de la base (ton/m^2).

Al agregar un nuevo parámetro a la ecuación 4, el efecto de las dimensiones base de la unidad de soporte motorizada, se produce un nuevo modelo (ecuación 5).

$$= (1 - \frac{1}{2}) \cdot \frac{1}{2} + (1 - 0,2) \cdot \frac{1}{2} \quad (5)$$

Donde : el ancho de la base de la unidad de soporte motorizada (m), : la longitud de la base de la unidad de soporte motorizada (m), , y : factores de capacidad de carga adimensional (Ecuaciones 6 a 9).

$$= \tan \cdot 2 \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{2} \right) \quad (6)$$

$$= (- 1) \cdot \cot \quad (7)$$

$$= 2(+ 1) \cdot \tan \quad (8)$$



$$\frac{1}{2} \quad (9)$$

Otro parámetro importante que se debe considerar es la inmersión del manto, que se introduce a través de la siguiente ecuación.

$$= \frac{\sin}{\cos} + \cos \quad (10)$$

Donde : inmersión aparente de la cara, : inmersión del manto de carbón, : ángulo de fricción interna de la roca del techo.

El efecto de la calidad del techo frontal debe incluirse idealmente en el modelo. Para ello se introduce el factor de seguridad (), cuyo valor depende del tipo de roca presente en el techo; para el caso de arenisca resistente el valor es de 1,5 y para otros tipos de roca es igual a 1,2. De esta forma se obtiene la siguiente ecuación del modelo.

$$=1,15 \cdot \dots \dots \dots \quad (11)$$

Donde : la carga vertical en una unidad de soporte motorizada (ton/m²), : el tramo del techo que carga una unidad de soporte motorizada (m), : ancho de la unidad de soporte motorizada (m), : densidad de la roca del techo (ton/m³), : el coeficiente de efecto de inmersión, : máximo de la altura del anillo de tensión (m), : factor de seguridad del soporte motorizado.

El efecto de la altura máxima del anillo de tensión sobre las caras del carbón también se debe tener en cuenta, como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\dots \dots \dots \frac{1,5}{\dots} \dots \dots \quad (12)$$

Donde : es la potencia del manto de carbón (m), : densidad de la roca del techo (ton/m³), : densidad de la roca quebrada de estéril (ton/m³).

Cuando la carga ejercida sobre el techo de la unidad de soporte motorizada es igual a la capacidad de carga de la roca de piso, comienza a producirse una falla de roca. Cuando esta carga se incrementa en 1,4 toneladas por metro cuadrado, la roca de piso se rompe y las patas de los soportes se hunden hacia el piso [18]. La siguiente ecuación muestra el efecto de la calidad de la roca del piso sobre la mecanización del manto de carbón.

$$\frac{1}{100} \left(\frac{100}{100} - \frac{100}{100} \right) - \geq 0 \tag{13}$$

Donde : índice de calidad de la roca de piso (ton/m²).

6.2.4 Calidad del techo

El método por *longwall mining* requiere que el techo se derrumbe a medida que los soportes avanzan con la extracción del carbón; sin embargo, de acuerdo con los cambios litológicos que puedan existir en el yacimiento las cualidades del techo pueden variar. Un techo de calidad muy pobre requiere que se deje parte del mineral para poderse sostener durante la extracción, lo cual disminuye la recuperación del carbón, pero favorece la estabilidad del proceso de minado. Cuando la calidad del techo es media, por lo general las condiciones de estabilidad varían según la carga de esfuerzos, lo que genera situaciones de inestabilidad que deben ser estudiadas por modelos predictivos e implica la aplicación de soportes adecuados con la capacidad de adaptarse a estas condiciones variables. Con respecto a los techos estables, es decir, aquellos que no se derrumban, se tendrán que desarrollar labores mineras que permitan derribarlo de forma inducida, pero se debe recordar que esto puede generar colgadura. Por eso, el *longwall mining* sugiere que la estabilidad del techo sea la necesaria para hundirse de forma gradual, es decir que su calidad debe ser moderadamente débil a moderadamente fuerte.

La ecuación 14 [19] muestra el índice de calidad de la roca de techo que permite clasificar la roca de acuerdo con su resistencia a la compresión *in situ* y el espesor del techo inmediato.

$$= 0,016 \cdot \cdot \tag{14}$$

Donde : índice de calidad de la roca (Kg/cm), : resistencia a la compresión *in situ* del techo inmediato (Kg/cm²), : grosor del techo inmediato, cm. Para el cálculo de se sugiere la siguiente ecuación.

$$= \cdot 1 \cdot 2 \cdot 3 \tag{15}$$

Donde : resistencia a la compresión uniaxial de la roca inmediata del techo (Kg/cm²), 1: coeficiente de resistencia in situ, 2: coeficiente de deformación, 3: coeficiente de humedad. Cada uno de estos coeficientes se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 4. Valores de los coeficientes de diferentes tipos de roca

Coeficiente	Arcilla y Limo	Esquisto	Arenisca
1	0,50	0,42	0,33
2	0,60	0,65	0,70
3	0,40	0,50	0,60

Para el caso del factor se utiliza la siguiente ecuación para calcularlo.

$$= \frac{\quad}{\quad} \tag{16}$$

Donde : espesor de la capa de carbón en metros, : factor de esponjamiento de la roca de techo. En la siguiente tabla se clasifican los tipos de techos con base en los valores aproximados de los índices de calidad.

Tabla 5. Clasificación del techo expuesto en términos de su índice de calidad

Descripción roca de techo	(Kg/cm)	Calidad
Cae inmediatamente cuando es expuesto	0-18	Débil
Dificultades para controlar	18-35	Bastante estable
Se derrumba fácilmente	35-60	Semiestable
Buenas características de derrumbe	60-130	Estable
Requiere de sistemas para iniciar derrumbe	>130	Muy firme
No apto para derrumbe	>250	Inadecuado para derrumbe

6.2.5 Grado de liberación de metano

El metano es un gas de tipo anóxico que presenta características de tipo explosivo e inflamable, esta última es la de mayor amenaza en las labores mineras. Un gas anóxico se caracteriza por su capacidad de desplazar el oxígeno del aire y generar una atmósfera no apta para la respiración. Aunque estos tipos de gases no producen un daño directo sobre la salud de los operadores en los frentes de trabajo, puede generar dolores de cabeza cuando en el volumen de la mezcla de aire hay 80 % metano y 20 % oxígeno. Más de un factor influye en el aumento de concentración de metano en el frente de trabajo, uno de ellos es la emisión del gas desde labores ya explotadas, lo cual conlleva una serie de posibles eventos que impactan negativamente en las condiciones seguras de las labores de extracción [20]. Existen varios métodos para poder diluir y drenar el metano [21] en los cuales la ventilación y el buen control de la emisión de las labores ya extraídas cumplen un rol fundamental.

6.2.6 Dureza y grado de impureza

La ceniza que se genera tras la combustión del carbón es producto de la materia mineral o inorgánica que este contiene. Se presenta en forma predominante como fases minerales definidas, como elementos químicos combinados con la materia orgánica o como elementos disueltos en el agua intersticial. En promedio, el carbón explotado contiene entre 5 % y 15 % de materia mineral. Entonces, un carbón tendrá mayor pureza cuando su contenido de ceniza sea menor. Por otro lado,

su dureza está vinculada con el contenido de carbón y ceniza, y con la capacidad calorífica. En la Figura 7 se muestra una clasificación con base en el rango del carbón y sus principales usos industriales según el tipo que se extrae [22].

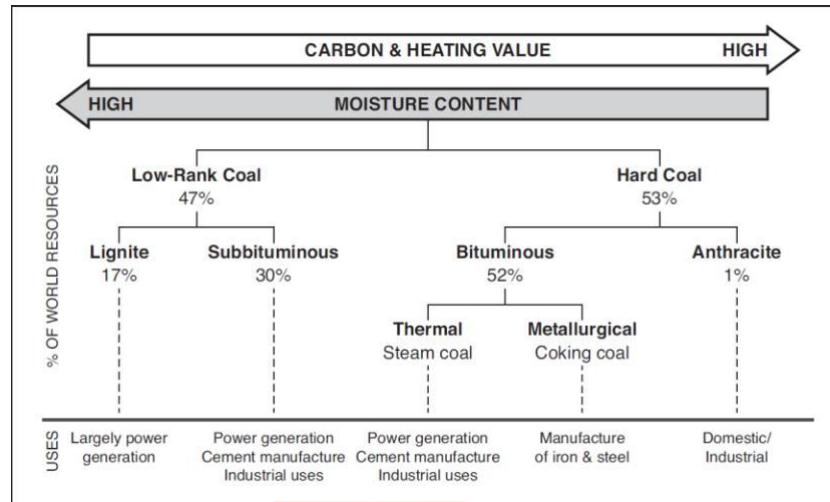


Figura 7. Clasificación y principal uso del carbón en el mundo

Fuente: (Bise, 2013)

6.2.7 Profundidad de la veta

Es indudable que la profundidad de cualquier yacimiento subterráneo tiene un efecto directo sobre los esfuerzos en las rocas *in situ*. Por lo general, en los yacimientos de carbón las rocas componentes del terreno son pizarras y areniscas, y no presentan una alta competencia o tenacidad para que se puedan mantener abiertos los vacíos dejados por la explotación o para que sobrevenga una interrupción del hundimiento. No obstante, en lo que se refiere a las galerías, estas pueden mantenerse abiertas por un largo periodo. La probabilidad de que ocurra un hundimiento en la superficie producto de una galería es mayor cuando esta se sitúa a escasa profundidad que cuando está a profundidades medias o grandes [23]. Los esfuerzos verticales (ecuación 17) son directamente proporcionales a la profundidad y dependen del peso específico del material.

= .

(17)

Donde : esfuerzo vertical, : peso específico del material saturado, : profundidad vertical. El esfuerzo vertical actúa principalmente en la capa inferior del techo, pero para el caso de la minería del carbón explotada por tajo largo se busca el hundimiento de este de forma controlada, por lo que la profundidad puede ayudar en este proceso siempre y cuando no genere un derrumbe descontrolado a medida que los soportes avanzan en la explotación.

6.2.8 Cantidad de agua presente

La presencia de agua en las labores subterráneas puede afectar de diferentes maneras la explotación del recurso al ocasionar una entrada repentina del líquido, la entrada de barro, un cambio en la estabilidad de los desarrollos o la subsidencia, entre otros [24]. Fernández Rubio et al. (2012) sugirieron que la entrada de agua, de acuerdo con un estudio de 2600 minas de carbón en la antigua URSS en 1979 (Gazizov, 1983), se puede clasificar en pequeña si son menos de 5 m³/hora, media si entran entre 5 y 10 m³/hora, alta si hay entre 10 y 15 m³/hora, y muy alta si sobrepasa los 15 m³/hora [24].

6.2.9 Otras variables mineras por considerar en la mecanización por *longwall mining*

Para realizar un estudio del grado de mecanización [13] que puede alcanzar un yacimiento de carbón para ser explotado por tajo largo también es importante considerar las perturbaciones geológicas y la extensión de la veta de carbón.

6.2.9.1 Perturbaciones geológicas

Para determinar si un yacimiento admite un grado de mecanización es primordial contar con un índice práctico que permita integrar el efecto que tienen en este las perturbaciones geológicas. La siguiente ecuación, propuesta por un estudio de mecanización [14], introduce un índice de desplazamiento producto de fallas.

Donde : corresponde al desplazamiento de la veta producto de la falla (m), : grosor de la veta (m). El fin de este índice es identificar cuán uniforme es la veta en presencia de una falla, los valores cercanos a 0 implican que no existe un gran desplazamiento debido a una falla, y los valores superiores a 2 o 3 indican que existe un desplazamiento considerable de la veta que dificulta la explotación del muro de carbón. La siguiente tabla muestra una clasificación propuesta para medir la uniformidad de la veta de carbón con base en el índice de desplazamiento.

Tabla 6. Clasificación en base al índice de desplazamiento [14]

Seam uniformity condition ()				
2,25 – 3,0	1,5 – 2,25	1,0 – 1,5	0,5 – 1,0	0–0,5
Very low uniform	Low uniform	Semi uniform	High uniform	Very high uniform

6.2.9.2 Extensión de la veta de carbón

La extensión de la veta de carbón debe ser suficiente para asegurar el buen funcionamiento de los soportes de techo. El método requiere del desarrollo de paneles de extracción en los que se puedan utilizar los equipos de soportes, correas y el equipo cortador de la veta de carbón. En la actualidad los paneles pueden variar en distancias desde los 2500 hasta los 6500 metros (Fiscor, 2012). El proceso de instalación de los equipos de tajo largo puede tomar entre unos días y varias semanas para poder comenzar con la extracción de la veta. Se sugiere que la extensión optima de la veta, en cuanto a panel de extracción, debe estar entre los 800 y los 1000 m [13]; una veta muy extensa puede generar costos más altos en la extracción por tonelada de carbón, lo cual disminuye el costo de la mina en el corto y mediano plazo.

6.3 Determinación del grado de mecanización por lógica difusa

Uno de los principales objetivos de la mecanización es brindar mayor seguridad a la vez que aumenta la productividad de extracción. Entre los parámetros que deben medirse a la hora de determinar si un yacimiento de carbón es apto para ser mecanizado se encuentran primordialmente las variables mineras asociadas con las condiciones geológicas del lugar. El análisis de esta factibilidad puede involucrar costosos estudios y tiempos de toma de decisiones más prolongados. El uso de la lógica difusa ayuda a reducir estas implicaciones, sobre todo la última, es una herramienta adicional para poder comprender de mejor manera la naturaleza del yacimiento para un eventual proyecto de mecanización. En este apartado se presenta la definición y la teoría que enmarcan esta herramienta, así como su aplicabilidad en la actualidad, sobre todo en la minería del carbón.

6.3.1 Lógica difusa

El concepto de lógica difusa fue utilizado por primera vez por el catedrático Lofti A. Zadeh de la Universidad de Berkeley, California. En un principio este tipo de lógica fue establecida como una forma de procesamiento de información en la cual los datos pueden asociarse con un grado de pertenencia a cierto conjunto [25]. La lógica difusa permite proporcionar una herramienta de inferencia dentro de un marco matemático, que permite modelar los procedimientos de razonamiento humano en sistemas basados en la experiencia y/o el conocimiento de forma que puedan ser tratados en un computador. A diferencia de la lógica clásica, que categoriza los eventos como verdaderos o falsos, la lógica difusa permite ubicar dichos eventos en categorías intermedias, como “altamente falso”, “medianamente falso”, entre otros. Por lo tanto, es una lógica multivaluada que permite representar de forma matemática la incertidumbre y la vaguedad, y proporciona herramientas formales para su tratamiento [26].

El principio de incompatibilidad [27] explica que “conforme la complejidad de un sistema aumenta, nuestra capacidad para ser precisos y construir instrucciones sobre su comportamiento disminuye hasta el umbral más allá del cual, la precisión y el significado son características excluyentes”. Con base en este concepto se pretende encontrar un método que pueda recibir variables de entradas y salidas que entreguen un significado y no solo precisión; en otras palabras,

no es relevante indicar a un peatón que un vehículo se aproxima a una velocidad determinada con cierta dirección cuando lo importante es dar una voz de alerta que evite que este sea atropellado.

6.3.2 Conjunto difuso

Los conjuntos difusos son la clave para diferenciar la lógica clásica de la difusa. Estos no presentan una frontera definida, más bien las variables se presentan con un cierto grado de pertenencia o no al conjunto difuso [27], como se presenta a continuación es el universo de discurso, y sus elementos y son un conjunto con fronteras definidas sobre , que se definen como la función característica de como .

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & x \in A \\ 0 & x \notin A \end{cases}$$

En la lógica clásica la función característica toma valor 1 cuando el elemento pertenece al conjunto y valor 0 en el caso contrario. Para la lógica difusa se considera una función de pertenencia aquella que toma valores continuos entre 0 y 1 en una variable cualquiera sobre un conjunto difuso. La función de pertenencia que define un conjunto difuso es:

$$\mu: X \rightarrow [0,1]$$

De esta forma para $\mu(x) = 1$, la función indica una total pertenencia del elemento en el conjunto difuso, $\mu(x) = 0$, el elemento no pertenece a , y cualquier valor en el intervalo $]0,1[$ que tome la función indica que el elemento se encuentra parcialmente en el conjunto difuso .

Otras de las características de la función de pertenencia es que por medio de ella se pueden clasificar los conjuntos difusos. Por ejemplo, las funciones de pertenencia que alcanzan un valor máximo de 1, implican que existe al menos un elemento que se encuentra totalmente en el conjunto difuso caracterizado por la función de pertenencia; estos son llamados conjuntos difusos normales. Cuando la función no alcanza en ninguno de los elementos mapeados un valor de pertenencia igual a 1, dicho conjunto es clasificado como un conjunto difuso subnormal (Figura 8). Adicionalmente, los conjuntos difusos pueden clasificarse como convexos y no convexos (Figura 9), su diferencia

radica en la forma de la curva de la función de pertenencia. Para el caso de los conjuntos convexos la curva es monótona creciente hasta su punto máximo, también conocido como la altura de la función, a partir de entonces se vuelve monótona decreciente. Los no convexos presentan una función de pertenencia que no es estrictamente monótona creciente o decreciente, o no presentan ninguna de estas situaciones al mismo tiempo en ninguno de los elementos.

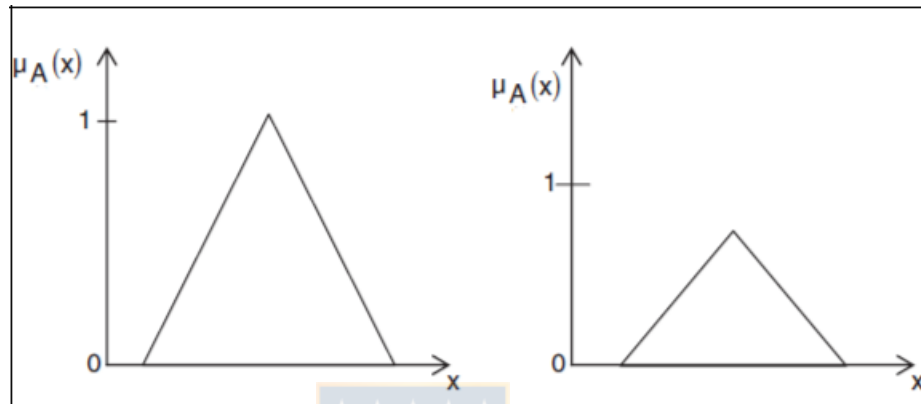


Figura 8. Conjunto difuso normal (izquierda) y conjunto difuso subnormal (derecha)
(Introducción to fuzzy logic using Matlab, 2007)

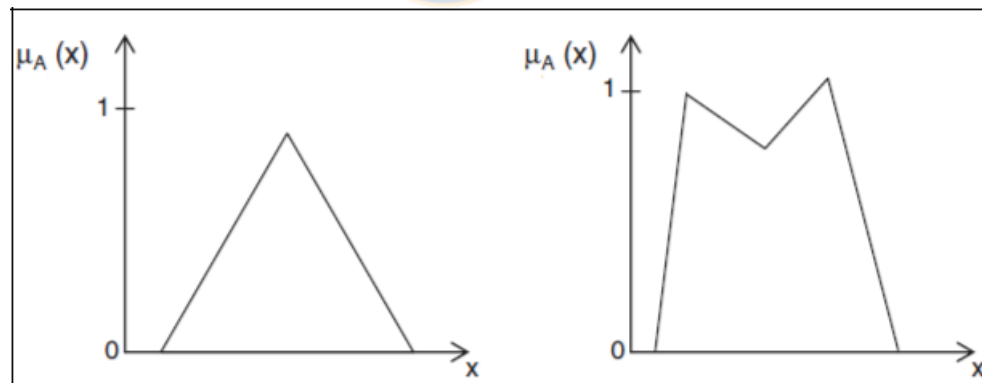


Figura 9. Conjunto difuso convexo (izquierda) y conjunto difuso no convexo (derecha)
(Introducción to fuzzy logic using Matlab, 2007)

En las figuras anteriores se presentan como ejemplo funciones de pertenencia conformadas por rectas, conocidas como triangulares, pero existen más tipos de formas que representan esta función, como aquellas con curvas de tipo Gaussiana o sigmoidales, o las de tipo trapezoidal. La

complejidad de la curva se relaciona con la inferencia difusa y en muchos casos las curvas sencillas obtienen mejores resultados o iguales que los sistemas complejos de caracterización.

6.3.3 Operaciones conjuntos difusos

Unión: definida por la T-conorma como sigue:

$$\perp: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$$

$$\perp(x,y) = \max\{x,y\}$$

Intersección: denominada T-norma, con la función de la forma:

$$T: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$$

$$T(x,y) = \min\{x,y\}$$

Complemento: para el complemento del conjunto difuso del tipo $\bar{\mu}$, se denota como la función definida:

$$\bar{\mu}: [0,1] \rightarrow [0,1]$$

La cual satisface las siguientes condiciones:

- I. Condición de límite o frontera, es decir, que para los valores extremos de la función de complemento los valores para esta son: $\mu(0) = 1$ y $\mu(1) = 0$.
- II. Monotonicidad: $\forall x, y \in [0,1]$ si $x < y$ entonces $\bar{\mu}(x) \geq \bar{\mu}(y)$.
- III. es una función continua.
- IV. es una función involutiva es decir aplicar el complemento a la función complemento su valor presentara al elemento del conjunto difuso, $\bar{(\bar{\mu}(x))} = \mu(x)$.



Del complemento clásico se tiene la clase del complemento de la siguiente forma:

$$\bar{A} = 1 - A \tag{19}$$

Sin embargo, existen otros tipos como el de Sugeno y el de Yager que se presentan a continuación, respectivamente:

$$\bar{A} = \frac{1 - A}{1 + A} \quad A \in (-1, \infty) \tag{20}$$

$$\bar{A} = \frac{1}{1 + A} \quad A \in (0, \infty) \tag{21}$$



Para ambos casos al considerar un valor para $A = 1$ la ecuación representa el complemento de un conjunto clásico.

6.3.4 Propiedades de los conjuntos difusos

Un conjunto clásico puede ser considerado un subconjunto de un conjunto difuso [26] que solo acepta los valores 1 y 0 como grados de pertenencia. Por lo tanto, las propiedades de un conjunto de este tipo se aplican sin problema a las propiedades de los conjuntos difusos:

- Conmutatividad: $A \cap B = B \cap A$
- Asociatividad: $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap C$
- Distributiva: $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$
- Idempotencia: $A \cup A = A$
- Involución: $\neg(\neg A) = A$
- Transitividad: $(A \cap B) \cap C = A \cap (B \cap C)$

- Leyes de Morgan: $\neg(\neg A) = A$ y $\neg(A \wedge B) = \neg A \vee \neg B$

6.3.5 Reglas difusas

Las reglas difusas son del tipo $A \rightarrow B$ para las cuales existen proposiciones difusas que permiten desarrollar lógicas difusas con base en variables de la misma naturaleza.

$$A \rightarrow B \quad \text{ó} \quad A \wedge B$$

La ecuación anterior presenta la composición sencilla de las reglas difusas; sin embargo, estas pueden ser más complejas y estar compuestas por más de una proposición lógica. Por ejemplo:

$$A \rightarrow B \quad \text{ó} \quad A \wedge C \rightarrow D$$

Con A y B , que son conjuntos difusos, se tiene que la variable difusa x , definida por la función de pertenencia $\mu_A(x)$, y la variable y , definida por la función de pertenencia $\mu_B(y)$, tienen una relación del tipo $A \rightarrow B$, conocida como implicancia lógica. En la lógica clásica para este tipo de implicancia con un antecedente verdadero el consecuente necesariamente sería verdadero, para el caso de la lógica difusa se deben considerar los grados de pertenencia de estas variables, es decir, si el antecedente posee un grado de pertenencia en el conjunto difuso, el consecuente también lo hace en cierto grado.

6.3.6 Inferencia difusa

Los valores de salida se obtienen a partir de la inferencia difusa de las entradas sujetas a la teoría de conjuntos difusos. El bloque de inferencia es aquel en el cual se realiza la traducción matemática de las reglas difusas que modelan el sistema, para poder trabajar con ellas y extraer un resultado se debe de evaluar matemáticamente la información que reflejan [28]. Estas interpretaciones se aplican sobre las reglas difusas y las relaciones que estas generan sobre el consecuente.

$$\langle 1 \rangle \quad \langle 2 \rangle \quad \langle 3 \rangle \dots \langle h \rangle$$

$$\rightarrow (x) \quad = (1, 2, 3, \dots)$$

Al haber más de un antecedente la función característica del conjunto difuso se define así:

$$\mu_{A \cap B \cap C \dots} = \mu_A * \mu_B * \dots * \mu_C \quad (22)$$

Con * como una T-norma.

Al existir varias reglas que determinan el conjunto de salida difuso, que resulta de la composición:

$$\mu_{A \circ B} = \mu_A \circ \mu_B \quad (23)$$

La función característica del conjunto de salida queda definida así:

$$\mu_{A \circ B} = \mu_A \circ \mu_B = \max_i \{ \mu_{A_i} * \mu_{B_i} \} \quad (24)$$

De esta forma, el conjunto difuso de salida se obtiene de la composición de todas las reglas difusas con todos los conjuntos de las variables de entradas. En otras palabras, el conjunto de salida resulta de la combinación de los conjuntos al considerar todas las reglas por medio de una T-conorma. Existen diversos métodos de inferencia, el de mayor uso es el desarrollado por Mamdani en 1975, del cual se procede con la fuzzificación de las variables de entrada, luego con la evaluación de las reglas difusas y la agregación de las salidas de las reglas para terminar con la defuzzificación. El modelo desarrollado por Takagi, Sugeno y Kang es similar al de Mamdani, pero debido a la poca

eficiencia de este, producto del proceso de defuzzificación, desde el punto de vista computacional, el modelo de TSK propone una función de salida matemática que permite evitar el costo de procesamiento de esta última etapa.

6.3.7 Defuzzificación

La defuzzificación es el proceso inverso de la fuzzificación, cuyo objetivo es entregar un significado o unos valores concretos para los cuales el sistema de fuzzificación ha sido creado. Los valores de salida entregan grados de pertenencia producto de los conjuntos difusos involucrados; sin embargo, la mayor parte de las veces se pretende encontrar un significado a los valores y no estimar un grado de pertenencia asociado a un conjunto de salida. Por eso, es necesario defuzzificar las variables de salida, lo cual se puede hacer mediante varios métodos, como el del máximo, el del centroide y el de la altura.

- El método del máximo: como su nombre lo indica toma como respuesta el mayor valor obtenido del conjunto de salida. El problema de este método ocurre cuando varias variables de salida alcanzan el mismo valor máximo.
- Método del centroide: aplicación de la teoría del centro de gravedad que queda definido por la siguiente ecuación matemática.

$$z = \frac{\int f(x)}{f(x)} \quad (25)$$

- Método de la altura: este método se aplica a cada conjunto de salida según su centro de gravedad y luego se obtiene la media ponderada del conjunto a partir de la ecuación siguiente.

$$z = \frac{\int f(x)}{f(x)} \quad (26)$$

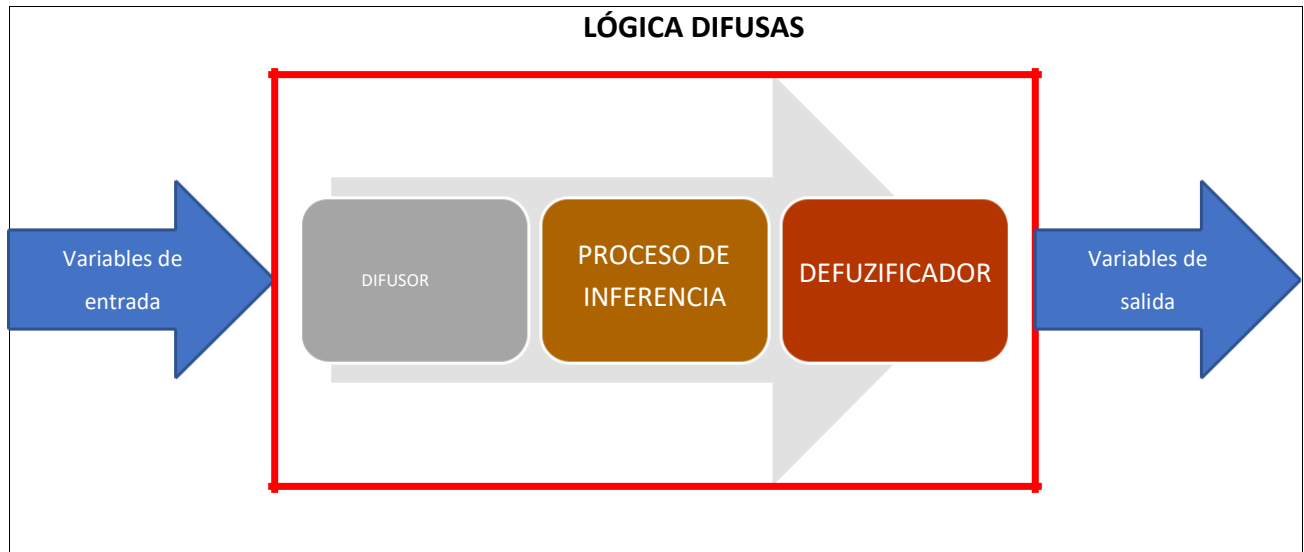


Figura 10. Esquema del proceso para el tratamiento de variables por lógica difusa

El proceso de la lógica difusa queda definido como se muestra en la figura anterior; las variables de entrada son tratadas a través de las reglas difusas para luego obtener un valor de salida que dé solución o respuesta a un problema que no puede ser tratado de forma sencilla con la lógica clásica. El objetivo de este tipo de lógica es introducir la experiencia de expertos para tratar problemas que no se resuelven por medio de un modelo matemático o tratar variables que no son prácticas de abarcar mediante un modelo cuantitativo, sino que necesitan uno más bien cualitativo.

6.4 Software para procesos de lógica difusa

Los *softwares* son un conjunto de componentes lógicos cuya ejecución permite desarrollar tareas para la resolución de problemas específicos. El propósito de utilizar componentes lógicos es simplificar el lenguaje de programación del hardware y que, así, los programadores utilicen un lenguaje más natural para su ejecución. En este apartado se presentan los softwares disponibles que son utilizados con conjuntos difusos y permiten la aplicación de reglas de la lógica difusa en sistemas de control.

6.4.1 Softwares

En primer lugar, fuzziTECH es una herramienta que desarrolla sistemas con estructuras difusas siguiendo variables lingüísticas. Este *software* permite diseñar funciones de membresía por medio

del cursor del ratón al utilizar los editores de variables lingüísticas. Las reglas de lógica difusa utilizadas en fuzzyTECH son tratadas por tres tipos de editores de bloques de regla. El editor de hoja de cálculo sigue el estilo familiar de una tabla, el de reglas de matriz para bloques de reglas complejas es mayormente utilizado por usuarios más experimentados y por último se introducen las reglas en formato de FTL (Fuzzy Technology Language) que permiten escribir las reglas de manera más flexible (29). Este *software* permite conjugar con otro de simulación estándar como Matlab/Simulink, MatrixX y la mayoría de otros simuladores. Además, permite visualizar los analizadores de 2D y 3D de los sistemas de control, por lo que se convierte en una herramienta visual interactiva para el desarrollo de soluciones.

Por otro lado, jFuzzyLogic [30] es un *software* de código abierto y estandarizado para sistemas difusos. Las ventajas de este, aparte de que no es comercializado, son su estandarización, que reduce el trabajo de programación y curvas de aprendizaje; su extensibilidad, que permite ampliar la gama de aplicaciones; y la independencia de la plataforma que permite desarrollar y ejecutar cualquier configuración de *hardware* y sistema operativo que admita Java. El *software* permite la aplicación de cinco lenguajes de programación a parte del lenguaje de control difuso, estos son: lista de instrucciones, textos estructurados, diagrama de escalera, diagrama de bloques de funciones y diagrama de funciones secuenciales.

La última versión de Xfuzzy [31] incluye un lenguaje de programación de especificaciones, que permite la aplicación de modificadores lingüísticos a la función de pertenencia, los cuales modifican la forma del conjunto difuso; existen de tres tipos: concentración, dilatación e intensificación. Cabe señalar que dichos modificadores se asocian con adverbios como “ligeramente”, “bastante”, “muy”, entre otros, y se aplican sobre el lenguaje lingüístico de las reglas difusas. Al igual que otros *softwares*, Xfuzzy permite la salida gráfica en 2D y 3D para monitorear el proceso de inferencia. En la Tabla 7 se presenta una serie de *softwares* de uso abierto que pueden utilizar lógica difusa, en ella se especifican el nombre del proyecto, el año de lanzamiento, el lenguaje de programación, una breve descripción y el número de funciones de pertenencia que soporta el *software* (máximo 14 sin considerar la extensión de tal programa).

6.4.2 Matlab

Originalmente, Matlab fue escrito por el científico jefe Dr. Cleve Moler [32] de la corporación MathWorks Inc., con el objetivo de ofrecer un *software* de fácil acceso matricial. La primera versión fue escrita a finales de la década de 1970 para su uso en cursos de teoría de matrices, algebra lineal y análisis numérico. El programa estándar de Matlab comprende una serie de funciones a modo de herramientas que pueden ser utilizadas para resolver problemas comunes; sin embargo, incorpora otras librerías específicas, llamadas *toolboxes* [33], dentro de las cuales se encuentran los problemas enfocados en sistemas de control asociados a aplicaciones de lógica difusa.

Tabla 7. Software de uso abierto, nombre (name), año (year), lenguaje de programación (Language), breve descripción (description), número de funciones de pertenencia que soporta (MF), nombre*: el paquete es mantenido, se compila correctamente y tiene funciones extensivas

Name	Year	Language	Description	MF
Akira	2007	C++	Framework for complex AI agents	4
Awifuzz	2008	C++	Fuzzy logic expert system	2
DotFuzzy	2009	C#	.NET library for fuzzy logic	1
FFLL	2003	C++	Optimized for speed critical applications	4
Fispro	2010	C++/Java	Fuzzy inference design and optimization	6
FLUtE	2004	C#	A generic Fuzzy Logic Engine	1
FOOL	2002	C	Fuzzy engine	5
FRBS	2011	C++	Fuzzy Rule-Based Systems	1
funzy	2007	Java	Fuzzy Logic reasoning	2*
Fuzzy Logic Tools*	2011	C++	Framework fuzzy control systems	12
FuzzyBlackBox	-	-	Implementing fuzzy logic	-
FuzzyClips	2004	C/Lisp	Fuzzy logic extension of CLIPS	3+2*
FuzzyJ ToolKit	2006	Java	Fuzzy logic extension of JESS	15
FuzzyPLC*	2011	Java	Fuzzy controller for PLC Siemens s226	11+14*
GUAJE*	2011	Java	Development environment	-
javafuzzylogicctrltool	-	Java	Framework for fuzzy rules	-
JFCM	2011	Java	Fuzzy Cognitive Maps (FCM)	-
Jfuzzinator	2010	Java	Type-1 Fuzzy logic engine	2
jFuzzyLogic*	2011	Java	FCL and Fuzzy logic API	11+14*
jFuzzyQt*	2011	C++	jFuzzyLogic clone	8
libai	2010	Java	AI library, implements some fuzzy logic	3
libFuzzyEngine	2010	C++	Fuzzy Engine for Java	1
nxtfuzzylogic	2010	Java	For Lego Mindstorms NXT	1
Octabe FLT*	2011	Octave	Fuzzy logic for Toolkit	11
XFuzzy3*	2003	Java	Development environment	6

Fuente: (Cingolani, 2012)

En particular, SIMULINK es un *toolbox* de Matlab diseñado para la simulación dinámica de sistemas lineales y no lineales, así como de sistemas continuos y de tiempo discreto. También puede mostrar información gráficamente [32]. Otras *toolboxes* disponibles de Matlab son: *control system*, *communications*, *signal processing*, *system identification*, *robust control*, *neural network* y *fuzzy logic*. Al ofrecer herramientas de simulación y entrenamiento del sistema difuso a través de las herramientas de redes neuronales y la aplicación de técnicas de inferencia difusa al modelo de datos, sobre todo cuando la función de pertenencia de los conjuntos difusos es arbitraria, Matlab se convierte en una herramienta importante en el desarrollo de estos sistemas.

6.4.3 Inferencia difusa en Matlab

La inferencia difusa involucra todo el proceso desde que se ingresan los valores de entrada hasta que se tiene un valor de salida defuzzificado, incluye la definición de las reglas difusas en conjunto con los operadores lógicos que generan una implicancia en el consecuente, y si es necesario conlleva la aplicación de la agregación difusa cuando las decisiones se basan en la combinación de varias reglas difusas, con esto se genera un único valor de salida. El conjunto completo del proceso descrito es conocido como un sistema de inferencia difusa (FIS) [34]. Matlab cuenta con dos tipos de inferencia difusa, la de Mamdani y la de Sugeno. La de uso más común es la de Mamdani, puesto que es aplicable a todo proceso, sea de carácter lineal o no; mientras que la de Sugeno es aplicable cuando el problema es de carácter lineal, debido a que sus salidas son funciones, que, en consecuencia, disminuyen el costo de procesamiento del proceso de inferencia. Por ende, el método de Sugeno resulta más eficiente en ese sentido que el de Mamdani.

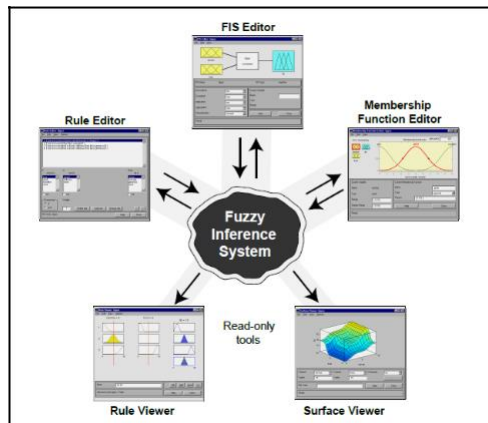


Figura 11. Herramientas del sistema de inferencia de Matlab. FIS

Las herramientas que utiliza Matlab (Figura 11) para un sistema de inferencia difusa son:

- **FIS Editor.** Principalmente para administrar la cantidad de variables y editar sus nombres. La complejidad del problema depende de ellas al igual que su procesamiento en el *hardware*.
- **Membership Function Editor.** Esta herramienta sirve principalmente para definir la forma de función.
- **Rule Editor.** Sirve para la edición de las reglas involucradas en el sistema y los operadores lógicos.
- **Rule Viewer.** Es una herramienta útil para observar de forma gráfica la implicancia de las variables en el sistema de inferencia difusa. Cabe destacar que esta funcionara solo para un determinado número de reglas y variables; para ser precisos, en un sistema con hasta 30 reglas y hasta 6 o 7 variables.
- **Surface Viewer.** Esta herramienta grafica una superficie de salida con una o dos variables de entrada.

Dentro del *software* se tienen dos funciones para cada uno de los operadores lógicos, los ya mencionados y , a los que se suman para el operador lógico y para . En cuanto al proceso de agregación difusa, cuando se tiene más de un valor de salida y se busca una única respuesta, el sistema trunca todas las funciones de salida y, por medio de un método que puede ser , o , entrega un único conjunto difuso de salida con su respectiva función de pertenencia, el cual luego es defuzzificado por alguno de los procesos que se describen en el siguiente apartado.

6.4.4 Defuzzificación en Matlab

Cabe recordar que el proceso de defuzzificación permite transformar los valores de salida difusos a un solo número como salida. De esta forma el sistema de inferencia difusa termina su proceso y el último valor puede ser analizado para dar respuesta al problema o ayudar en la toma de decisiones del proceso sometido a la inferencia difusa. Los métodos de defuzzificación [34] incorporados en Matlab son:

- Centroide
- Bisectriz
- Medio del máximo
- Mayor del máximo
- Menor del máximo

6.5 Proceso de análisis jerárquico

En el año 1980 Thomas Saaty, académico de la Universidad de Pittsburgh, estableció las bases del proceso de análisis jerárquico (AHP). Este consiste en un proceso sistemático que representa cada uno de los elementos del problema de forma jerárquica, es decir, cada uno de ellos toma un nivel de importancia o prioridad dentro de la toma de decisión u objetivo principal [35]. Este nivel se establece de manera subjetiva con respecto a otro elemento en forma de comparación en pares. Este proceso permite identificar las preferencias cuando se estudian las alternativas de decisiones y, así, determinar la que mejor peso tenga con base en los criterios establecidos.

6.5.1 Proceso de prioridades en el análisis jerárquico

Para comenzar con el proceso de prioridades es necesario realizar comparaciones pareadas de cada uno de los criterios que influyen en la toma de la decisión u objetivo principal. Estas comparaciones están sujetas a una escala de valores del 1 al 9 para expresar el peso que tiene un elemento respecto a otro según los criterios en cuestión (ver Tabla 8).

6.5.2 Matriz de comparación

La matriz de comparación contiene todos los valores de comparaciones realizadas entre pares de criterios o alternativas. Donde corresponde a la matriz de comparación de dimensión $n \times n$, es el número de criterios o alternativas y cada elemento de a_{ij} , con $i = 1, 2, \dots, n$ y $j = 1, 2, \dots, n$ representa la intensidad relativa de importancia. Dado que cada alternativa tiene la misma importancia consigo misma se tiene que $a_{ii} = 1$, como el recíproco de la alternativa es de la forma $a_{ji} = 1/a_{ij}$.

$$= \left(\begin{matrix} 1 & & & & \\ & 1/2 & & & \\ & & \dots & & \\ & & & & 1 \end{matrix} \right)$$

Tabla 8. Escala relativa de importancia para AHP

Significado Verbal	Intensidad relativa de importancia
Extremadamente importante	9
Demostrada importancia	7
Esencial o fuertemente importante	5
Moderadamente importante	3
Igual importancia	1
Valores intermedios entre dos importancias	2,4,6,8



6.5.3 Vector de prioridades

Para dichas comparaciones es necesario calcular una serie de vectores propios de cada matriz con el fin de normalizar el resultado para obtener el vector de prioridades. Calcular los vectores propios no suele ser difícil, pero puede consumir tiempo. Afortunadamente, hay formas fáciles para obtener una buena aproximación de las prioridades [36], por ejemplo, se puede normalizar la matriz de comparación, es decir, los elementos de la misma columna son divididos por la suma total de esta y luego se pondera cada fila para obtener el vector de prioridades. En este caso, \bar{w} es el vector de prioridades ponderado y los elementos de la matriz normalizada de \bar{w} , por ende:

$$\begin{matrix}
 1 & & \frac{1}{2} & \dots & \frac{1}{3} \\
 \frac{2}{1} & & 1 & & \frac{2}{3} \\
 \frac{3}{1} & & \frac{3}{2} & & 1
 \end{matrix}$$

Entonces, es consistente si se cumple $\lambda_{max} = 3$, y si $w = (1/3, 1/3, 1/3)$ es el vector de prioridades ponderado:

Siempre se cumple que $\lambda_{max} \geq n$, donde n es el número de elementos comparados [36]. Cuanto más cercanos sean estos valores, mayor es la consistencia de la matriz. La razón de consistencia (RC) se define de la siguiente forma:

$$RC = \frac{\lambda_{max} - n}{n(\lambda_{max} - 1)} \tag{28}$$

$$RC = \frac{3 - 3}{3(3 - 1)} = 0 \tag{29}$$

$$RC = \frac{1,98 - 3}{3(1,98 - 1)} \tag{30}$$

La consistencia aleatoria también puede ser obtenida con base en el promedio de consistencia según el orden de matriz aleatoria (Saaty, 1985), como se puede ver en la Tabla 9.

Tabla 9. Consistencia aleatoria para diferentes tamaños de matriz.

Tamaño de matriz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Consistencia aleatoria	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Si se divide el índice de consistencia por el número de consistencia aleatorio para la misma matriz de tamaño se obtiene la λ_{CI} , cuyo valor debe ser de alrededor 10 % o menos para ser aceptable; en algunos casos se puede tolerar el 20 %, pero nunca más [36]. Si el valor obtenido en la λ_{CI} está fuera de estos rangos, se deben replantear los valores de las intensidades relativas de importancia de los criterios involucrados. Ahora bien, se obtiene así:

$$\lambda_{CI} = \frac{\sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^n a_{ij})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}}, \quad i=1,2,\dots$$

Dado que $\sum_{j=1}^n a_{ij} = 1$, lo cual corresponde a la suma de los elementos del vector columna i .

6.6 Comentarios generales

La minería del carbón sigue siendo hoy en día un importante factor económico para algunos países por su explotación y su comercialización alrededor del mundo. Como todo yacimiento, al ser explotado en el largo plazo, se genera la disminución de reservas y por ello empiezan a vislumbrarse desafíos que en un principio no eran considerados. De ahí, el surgimiento de numerosas ideas de innovación y avances tecnológicos que buscan lograr la explotación de manera viable de yacimientos diferentes a los habituales.

Los métodos de explotación más utilizados en la minería del carbón son los de cielo abierto *open cast* que, a diferencia de otros tipos de explotaciones a cielo abierto, presentan ciertas singularidades producto del proceso de formación del carbón como veta, por ejemplo, los bancos son más pequeños, existe control de explosivos en tronadura, etc. También se utilizan métodos de tipo superficial-subterráneo, como lo es la minería por barrenos. Sin embargo, el desafío de la minería de carbón se presenta en la minería subterránea, en la cual se encuentran los métodos *room and pillar*, *board and pillar* y *longwall mining*, los primeros son métodos autosoportados mientras que el último genera subsidencia. El *longwall mining* es ideal para ser aplicado sobre vetas de carbón delgadas que en la actualidad interesan a países como China, Polonia, Rusia, por nombrar algunos, que buscan explotar yacimientos con un alto nivel de productividad y de seguridad.

Los yacimientos de carbón de potencia delgada antes no eran considerados para ser explotados, pero debido al agotamiento de aquellos de mayor potencia, en los últimos años los yacimientos entre 1 y 1,3 metros han empezado a ser estudiados para medir su grado de mecanización. Algunos países como Polonia y Ucrania han puesto en marcha la explotación de mantos de carbón con estas potencias, en conjunto con el desarrollo de tecnologías en equipos como arados mineros que son útiles para el método de *longwall mining*. Sin embargo, la potencia del yacimiento no es suficiente para poder definir y estudiar el grado de mecanización, también se deben considerar algunas variables mineras, que están vinculadas con cada método de explotación. Por motivos de producción y de economía es mucho más factible explotar el yacimiento de carbón subterráneo por el método de *longwall mining*, dado que presenta una mejor recuperación que el método de *room and pillar*, pues no requiere de pilares de soporte y genera derrumbe, aunque esto pueda tener también un impacto negativo.

El estudio del grado de mecanización de un yacimiento por medio de las variables mineras puede implicar un trabajo laborioso y costoso. Por eso, es importante contar con herramientas que puedan ayudar en la toma de decisiones de manera sencilla, económica y con un buen argumento, como lo hace la lógica difusa. Las variables mineras están fuertemente relacionadas con aspectos geológicos del yacimiento, por lo que muchas veces dicha información no es precisa, es subjetiva y en muchos casos conlleva cierto grado de incertidumbre; la ventaja de utilizar la lógica difusa es que permite trabajar con este tipo de información vaga y mutable. Al fuzzificar las variables mineras y traspasarlas a variables lingüísticas con sus respectivas reglas difusas se pueden encontrar las

condiciones que favorezcan la mecanización. También es importante tener en cuenta que el modelo difuso, que procesa los datos de entrada y salida, depende de la experiencia del programador, pues el modelo es ajustable y puede ser modificado sin mayor dificultad al utilizar el sistema de inferencia difusa que se escoja.

Matlab es una herramienta útil para desarrollar sistemas de control con lógica difusa; además, su sistema de SIMULINK permite simular los sistemas de inferencia difusa y adaptar las funciones de pertenencia cuando estas se presentan de manera predeterminada. Las herramientas de Matlab son de fácil entendimiento y manipulación para el usuario, y permiten editar e incluso crear sistemas de inferencia difusa propios. A pesar de que Matlab cuenta con varias herramientas para mejorar la complejidad de la función de pertenencias y los procesos difusos, el objetivo de la lógica difusa es generar sistemas de procesamiento simples y baratos que solucionen problemas que involucran subjetividad, incertidumbre o datos imprecisos. La complejidad del sistema de inferencia difusa también depende de las capacidades del *hardware* y de la cantidad de variables y reglas difusas involucradas en el proceso. A su vez, los sistemas de inferencia de Mamdani y el de Sugeno pueden ser manipulados de igual manera; sin embargo, el primero es ideal para realizar la mayor parte de los procesos difusos, sobre todo cuando estos no presentan un comportamiento lineal.

El total de las reglas difusas es justificado mediante el uso de AHP, esta herramienta permite determinar el comportamiento de las diferentes variables difusas al conjugarse para medir la calidad tanto de la mena como de la roca. Luego, una vez conocido las calidades tanto de la roca como de la mena, estas nuevamente se conjugan para dar lugar a la capacidad de mecanización que posee la veta de carbón. Es de esperar que una capacidad de mecanización categorizada como "Alta", es favorable para aplicar el método de extracción por *longwall mining*, bajo de esta categorización significa que al menos dos variables presentan una pobre o baja calidad para favorecer la mecanización. Es posible vislumbrar que ciertas variables presentan un rango más amplio que favorezca la mecanización y en otros casos, como el ángulo de inmersión y las perturbaciones geológicas, son muy sensibles desde el punto de vista de mecanización de la veta, es decir, una pequeña variación de estas genera un importante cambio en la capacidad de la veta de carbón para ser mecanizada.

7 Simulación en Matlab de la mecanización de minas de carbón

En este capítulo se presentan los métodos y procedimientos para fuzzificar las variables mineras con base en el marco teórico de estas sumado a las operaciones del proceso de inferencia difusa (FIS) en el software de Matlab con sus respectivas herramientas de ejecución. Los resultados que se muestran se basan en la teoría y estudios ya efectuados sobre mecanización de minas de carbón [13-14].

7.1 Marco metodológico para el proceso de simulación

Para lograr el proceso de simulación de la mecanización de vetas de carbón es de vital importancia señalar las etapas involucradas en el desarrollo de la codificación en Matlab por lógica difusa:

- Fuzzificación de las variables mineras. Se utiliza la inferencia de Mamdani para realizar el proceso de codificación. Las variables mineras son clasificadas cada una de acuerdo con variables lingüísticas para ser utilizadas por medio de la teoría de lógica difusa. Se establece la función de membresía para cada variable minera involucrada en el proceso. Las variables mineras se agrupan en calidad de mena y calidad de roca.
- Establecer las reglas difusas. Cada una de las variables mineras al ser vinculadas con la calidad de la mena o la calidad de la roca, ejercen una influencia. La manera en que influyen cada una de ellas se estudia a través de procesos de jerarquización (AHP) y se mide la consistencia de prioridades. Por medio de AHP se justifican las reglas difusas que condicionan la calidad de la mena o de la roca, sujetas a las variables mineras.
- Grado de mecanización. La calidad de la mena y la calidad de la roca son utilizadas para medir el grado de mecanización de la veta. Ambas variables son estudiadas por AHP para justificar las reglas difusas que condicionan el grado de mecanización. Se aplica el proceso de defuzzificación para obtener el grado de mecanización de la veta de carbón.

7.1.1 Fuzzificación de variables mineras

Polonia y Ucrania [2] difieren en cierta forma para clasificar las potencias de las vetas de carbón, además el desarrollo de nuevas tecnologías [9] puede actualizar esta categorización. En todo caso, para esta variable se propone la siguiente clasificación con su respectiva variable lingüística.

Tabla 10. Clasificación del ancho de veta

Ancho de veta (m)				
0,4–1,0	1,0 – 1,5	1,5 – 2,5	2,5 – 3,5	3,5–6
Muy delgado	Delgado	Medio	Grueso	Muy grueso

La calidad del piso se clasifica con base en el estudio sobre el desarrollo de nuevas técnicas para medir el grado de mecanización de minas de carbón realizado por H. S. Mehdi en 2013, como se muestra en la tabla a continuación.

Tabla 11. Clasificación de la calidad del piso en base a la capacidad de carga

Calidad del piso - capacidad de carga (Mpa)				
0–30	30–50	50–70	70–90	+90
Inestable	Poco estable	Semiestable	Estable	Muy estable

Para el caso de la calidad del techo se usa la clasificación realizada por Unrug y Szwilski en 1982 (Tabla 12) en la cual se utilizan las mismas variables lingüísticas anteriores con su respectivo rango de índice de calidad.

Tabla 12. Clasificación de la calidad del techo

Calidad del techo - (Kg/cm)				
0–18	18–35	35–60	60 – 130	>130
Débil	Bastante estable	Semiestable	Estable	Muy firme

La categorización de “inadecuado para derrumbe” se descarta al dejar como límite un índice de calidad del techo de = 250 (/). Por otro lado, para la cantidad de agua se usa la misma clasificación que propuso Gazizov en 1983 y se proponen las siguientes variables lingüísticas:

Tabla 13. Clasificación de la cantidad de agua en base a su entrada a las labores

Cantidad de agua - entrada de agua (m ³ /hora)				
0 – 5	5–10	10–15	>15	
Pequeña	Media	Alta	Muy alta	

El índice de desplazamiento [14] entrega las variables lingüísticas en el caso de las perturbaciones geológicas (Tabla 6) que son “muy poco uniforme”, “poco uniforme”, “semiuniforme”, “bien uniforme” y “muy bien uniforme”. Para la extensión de las vetas de carbón, a partir del hecho de que el valor óptimo está entre 800 y 1000 m, y que se explotan extensiones que varían entre los 2500 y los 6500 m, se propone lo siguiente:

Tabla 14. Clasificación de la extensión de la veta

Extensión de la veta (m)				
200 – 600	600 – 800	800 – 1000	1000 – 2500	2500 – 6500
Muy pequeña	Pequeña	Mediana	Grande	Muy grande

El largo de la veta se vincula directamente con los soportes de techo; una mayor longitud de la veta conlleva a una mayor cantidad de equipos de soportes y a la vez requerimientos de potencia mayores a la hora de desplazar el equipo de corte sobre la cara de la veta de carbón [10]. Para efectos de la simulación se asume que la veta es superior a 100 metros y que es aplicable el método de *longwall mining*. De acuerdo con el estudio de mecanización realizado por K. Oraee en 2004 se propusieron las siguientes variables lingüísticas para el proceso de fuzzificación de la inclinación de la veta de forma transversal.

Tabla 15. Clasificación de la inclinación de la veta

Inclinación de la veta (grados)				
0°-5°	5° - 15°	15° - 25°	25° - 40°	40° - 90°
Muy pequeña	Pequeña	Mediana	Grande	Muy grande

Para continuar con la fuzzificación de las variables mineras se proponen las siguientes funciones de membresía, a partir de la función *tramf* y *trimf* en Matlab.



Figura 12. Funciones de membresía propuestas para ancho de veta (superior izquierda), índice de uniformidad (superior derecha), extensión de la veta (inferior izquierda) e inmersión de la veta (inferior derecha)

Las funciones de membresía mostradas en la Figura 12 definen la calidad de la mena. Esta nueva variable en conjunto con la calidad de la roca, a través de la lógica difusa, determina el potencial de mecanización de la veta de carbón.

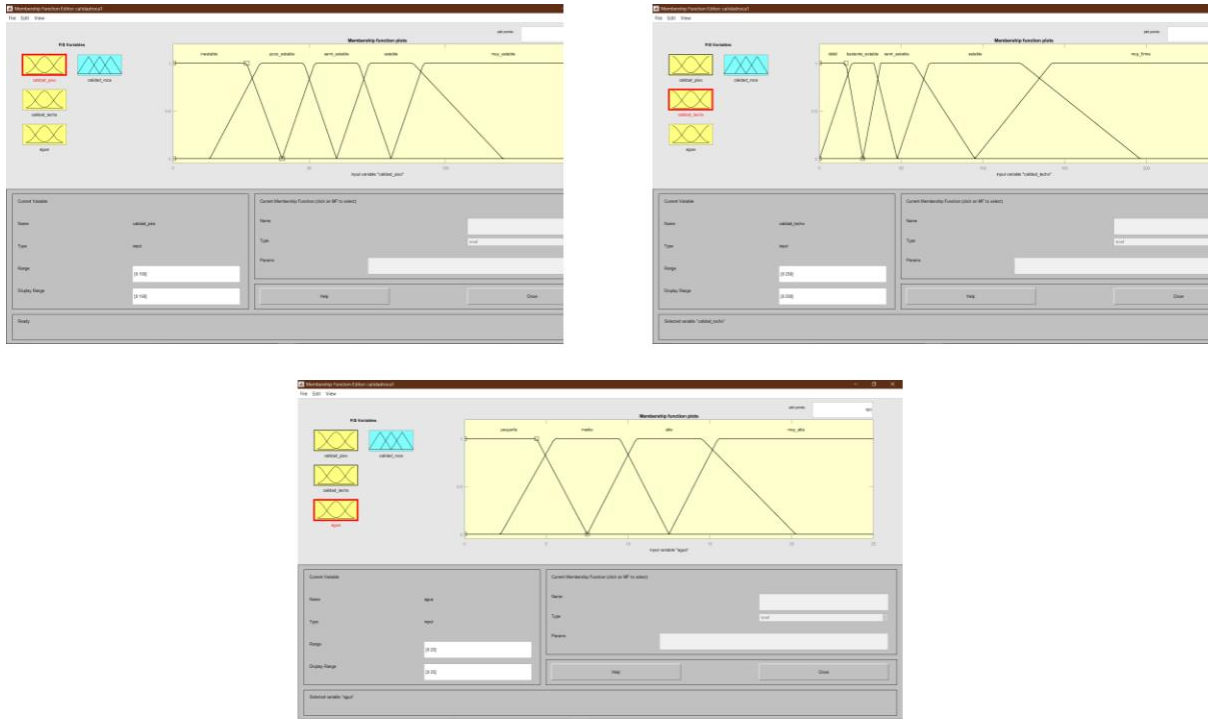


Figura 13. Funciones de membresía propuestas para calidad del piso (superior derecha), calidad del techo (superior izquierda) y cantidad de agua (abajo)

Estas funciones de membresía (Figura 13) son las que definen la calidad de la roca. La calidad de roca es la variable de salida, que se fuzzifica posteriormente para dar lugar a la mecanización de la veta de carbón.

7.1.2 Establecer las reglas difusas

Las reglas difusas en varios sistemas de control se disponen de acuerdo con la experiencia que se tenga respecto a los procesos involucrados en el sistema. Para determinar las variables de salida es importante establecer las proposiciones (h) con sus respectivos antecedentes y consecuentes. En primer lugar, se establecen las proposiciones para la calidad de la mena donde las variables lingüísticas de ancho de la veta, índice de uniformidad, extensión y ángulo de inmersión constituyen los antecedentes, y la calidad de la mena es el consecuente, esto es:

$$h \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad h \quad \dots$$

Es decir, las variables lingüísticas de cada variable minera se conjugan para dar lugar a la calidad de la mena; si esta se quiere determinar según todas las combinaciones posibles de las variables lingüísticas se propone un AHP que permita evaluar cada una de sus contribuciones e impacto en la variable de salida.

Tabla 16. Intensidad de prioridad para las variables mineras

Criterios	Ancho veta	Uniformidad	Extensión	Inmersión
Ancho veta	1	1	3	1/3
Uniformidad	1	1	3	1/3
Extensión	1/3	1/3	1	1/3
Inmersión	3	3	3	1

De esta forma se tiene la matriz de comparación :



1 1 3 1/3

$$= \begin{pmatrix} 1 & 1 & 3 & 1/3 \\ 1/3 & 1/3 & 1 & 1/3 \\ 3 & 3 & 3 & 1 \end{pmatrix}$$

Que al normalizarla se tiene:

$$= \begin{pmatrix} 0,188 & 0,188 & 0,300 & 0,167 \\ 0,563 & 0,563 & 0,300 & 0,500 \end{pmatrix}$$

Luego, el vector de prioridades ponderado \bar{w} de la matriz de comparación :

			0,210			
	0,188	0,188	0,300	0,167	0,210	0,875
	0,188	0,188	0,300	0,167	0,210	0,875
	0,063	0,063	0,100	0,050	0,063	0,208
	0,563	0,563	0,300	0,500	0,481	2,038

Por ende:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} = 1 \quad \sum_{j=1}^n a_{ij} = 1 \quad \sum_{i=1}^n a_{ij} = 1 \quad \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} = 4,186$$

Para la razón de consistencia se tiene:

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0,063}{0,990} = 0,063 < 0,10$$

En resumen, la matriz de comparación es consistente dentro del rango aceptable por AHP y se acepta para los criterios con las respectivas intensidades de importancia propuestas. Ahora, al utilizar el vector de prioridades ponderados se llega al nivel de importancia para cada variable minera como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 17. Importancia ponderada para las variables mineras

Prioridades ponderadas por AHP			
Ancho veta	Uniformidad	Extensión	Inmersión
21,0 %	21,0 %	9,8 %	48,1 %

Las ponderaciones mostradas en la Tabla 17 deben distribuirse entre las variables lingüísticas de cada una de las variables mineras. El procedimiento es el mismo al utilizado con AHP para obtener la ponderación de cada criterio.

Tabla 18. Ponderaciones para las variables lingüísticas (V.L.) asociada a las variables mineras

Ancho de veta (m)/ponderación V.L.				
0,4 – 1,0	1,0 – 1,5	1,5 – 2,5	2,5 – 3,5	3,5–6
Muy delgado	Delgado	Medio	Grueso	Muy grueso
4,2 %	8,4 %	12,6 %	16,8 %	21,0 %
Ancho de veta (m)/ponderación V.L.				
0,4 – 1,0	1,0 – 1,5	1,5 – 2,5	2,5 – 3,5	3,5–6
Muy delgado	Delgado	Medio	Grueso	Muy grueso
4,2 %	8,4 %	12,6 %	16,8 %	21,0 %
Extensión de la veta (m)/ponderación V.L.				
200 – 600	600 – 800	800 – 1000	1000 – 2500	2500 – 6500
Muy pequeña	Pequeña	Mediana	Grande	Muy grande
2,0 %	3,9 %	5,9 %	7,8 %	9,8 %
Inclinación de la veta (grados)/ponderación V.L.				
0°-5°	5° - 15°	15° - 25°	25° - 40°	40° - 90°
Muy pequeña	Pequeña	Mediana	Grande	Muy grande
48,1 %	31,3 %	10,3 %	3,6 %	0,0 %

Las variables lingüísticas al conjugarse unas con otras suman un porcentaje basado en la calidad de la mena para ser mecanizada. Para esto es necesario también establecer las ponderaciones que definen la calidad de la mena (Tabla 19).

Tabla 19. Ponderación para la calidad de la mena

Calidad de la mena (%)				
Muy baja	Baja	Media	Buena	Muy buena
0–20	20–40	40–60	60–80	80 – 100

Dado que solo se estudia el grado de mecanización para vetas de carbón delgadas, las variables lingüísticas para el ancho de veta solo son “muy delgado”, “delgado” y “medio”. Con base en cuenta esta restricción se genera un total de 375 reglas difusas (Anexo A), las cuales son ingresadas una a una en Matlab. A continuación se presentan algunas de ellas.

Ancho Veta	Uniformidad	Extensión	Inmersión	Porcentaje Calidad	Calidad Mena
delgado	poco unifor	muy grande	muy alto	29,7%	baja
delgado	poco unifor	muy grande	alto	30,2%	baja
delgado	poco unifor	muy grande	medio	36,9%	baja
delgado	poco unifor	muy grande	bajo	57,9%	media
delgado	poco unifor	muy grande	muy bajo	74,8%	buena
delgado	semi unifor	muy pequeña	muy alto	26,0%	baja
delgado	semi unifor	muy pequeña	alto	26,6%	baja
delgado	semi unifor	muy pequeña	medio	33,3%	baja
delgado	semi unifor	muy pequeña	bajo	54,3%	media
delgado	semi unifor	muy pequeña	muy bajo	71,1%	buena
delgado	semi unifor	pequeña	muy alto	28,0%	baja
delgado	semi unifor	pequeña	alto	28,5%	baja
delgado	semi unifor	pequeña	medio	35,2%	baja
delgado	semi unifor	pequeña	bajo	56,2%	media
delgado	semi unifor	pequeña	muy bajo	73,1%	buena
delgado	semi unifor	mediana	muy alto	30,0%	baja
delgado	semi unifor	mediana	alto	30,5%	baja
delgado	semi unifor	mediana	medio	37,2%	baja
delgado	semi unifor	mediana	bajo	58,2%	media

Figura 14. Reglas difusas para la calidad de la mena

De esta forma, queda establecido el sistema de inferencia difusa para la calidad de la mena como variable de salida, como se muestra en la Figura 15.

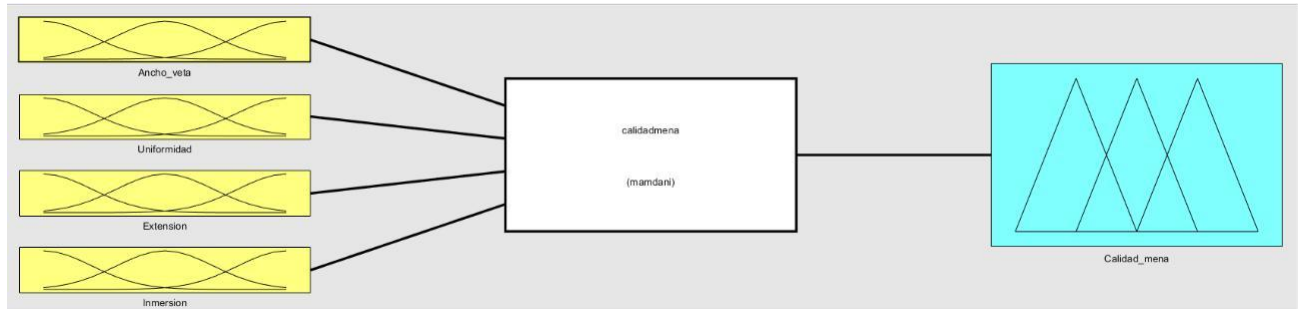


Figura 15. FIS para la calidad de la mena

Para el caso de la calidad de la roca las reglas difusas se establecen de la misma manera que se hace con la calidad de la mena. Las variables aquí involucradas son la calidad del piso, la calidad del techo y la entrada de agua.

Tabla 20. Ponderaciones para las variables lingüísticas de las variables mineras calidad roca

Calidad del piso - capacidad de carga (Mpa)/ponderación V.L.				
0–30	30–50	50–70	70–90	>90
Inestable	Poco estable	Semiestable	Estable	Muy estable
0 %	0 %	17,1 %	22,7 %	28,4 %
Calidad del techo - (Kg/cm)/ponderación V.L.				
0–18	18–35	35–60	60 – 130	>130
Débil	Bastante estable	Semiestable	Estable	Muy firme
4,7 %	25,1 %	61,9 %	25,1 %	7,1 %
Cantidad de agua - entrada de agua (m ³ /hora)/ponderación V.L.				
0 – 5	5–10	10–15	>15	
Pequeña	Media	Alta	Muy alta	
9,6 %	7,2 %	4,8 %	2,4 %	

La ponderación “inestable” y “poco estable” de las V.L. de la calidad del piso es 0%, como se muestra en la Tabla 20. Esto se basa en la necesidad de que la capacidad de carga pueda soportar las cargas ejercidas por los equipos de soporte de techo para *longwall mining*, además se sugiere que para vetas inferiores a 100 metros su extracción sea por *shortwall mining* [11]. Lo anterior sumado a que las vetas de carbón se depositan en un ambiente geológico sedimentario, hace que se tomen los valores típicos para rocas sedimentarias [37] y las densidades de rocas quebradas producto del avance de los soportes al dejar caer [38] con el propósito de utilizar las ecuaciones 5 y 11 [8] para justificar las ponderaciones nulas.

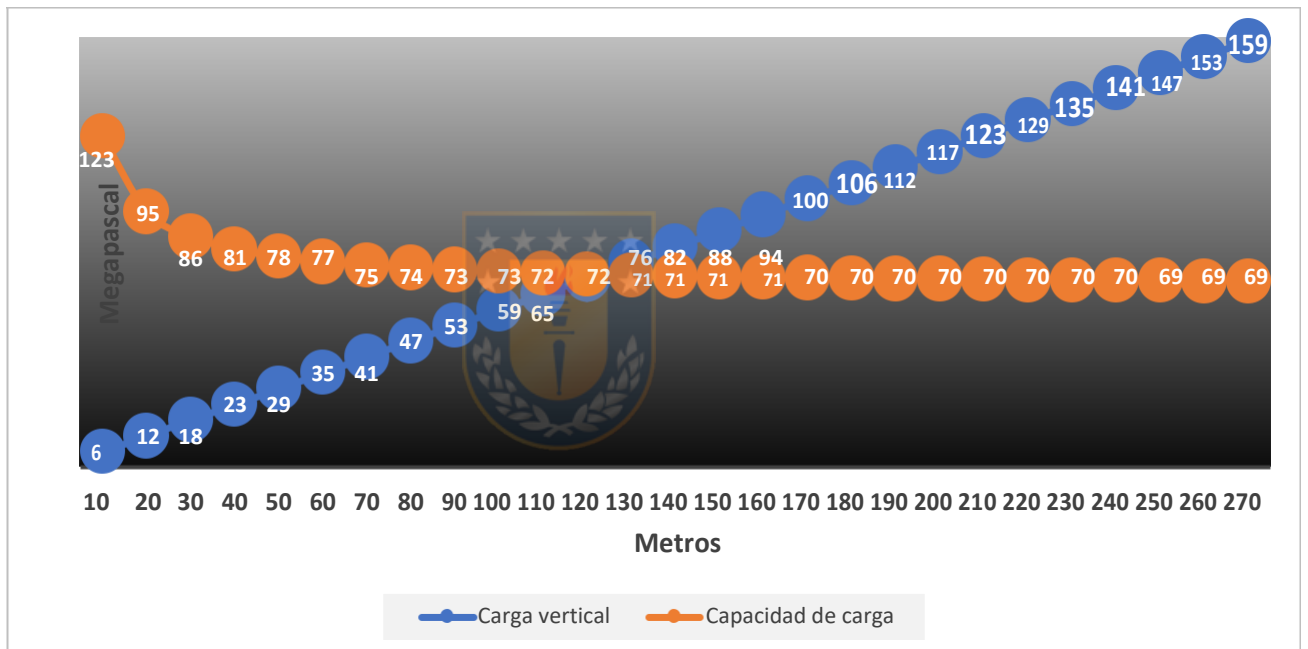


Figura 16. Gráfico para la capacidad de carga y carga vertical sobre equipos de soporte de techo

De la Figura 16 se puede deducir que para valores de 0 a 50 Mpa para la capacidad de carga la mecanización se vuelve desfavorable y tampoco se puede cumplir con la longitud mínima para aplicar el método de *longwall mining*. Para la calidad del techo la máxima ponderación es semiestable (ver Tabla 20), puesto que el método es favorable cuando el techo de derrumba de forma gradual. En los extremos de esta variable minera se consideran los casos desfavorables. Cada una de las matrices de comparación para las variables mineras involucradas en la calidad de la roca presentan una inconsistencia inferior al 10 %, por lo tanto las ponderaciones propuestas son

aceptables. Esto genera un total de 100 reglas difusas para la calidad de la roca (Anexo B), que da lugar a un sistema de inferencia difusa como se muestra en la Figura 17.

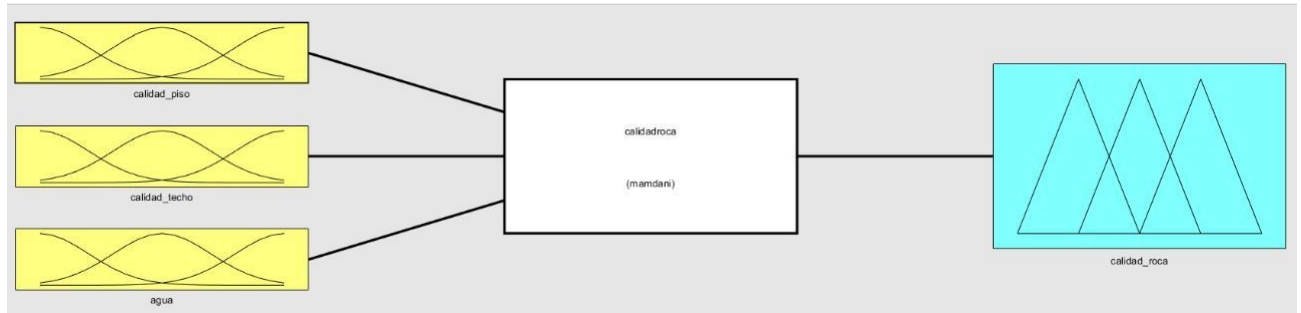


Figura 17. FIS para la calidad de la roca

7.1.3 Grado de mecanización

La calidad de la mena y la calidad de la roca son las variables de entrada y como variable de salida se tiene la mecanización de la veta de carbón, que entrega valores entre 0 y 100 para asignar el potencial de mecanización.

Tabla 21. Ponderaciones para las variables lingüísticas de las variables de entrada involucradas en la mecanización

Calidad de la mena (%)/ponderación V.L.				
0–20	20–40	40–60	60–80	80 – 100
Muy baja	Baja	Media	Buena	Muy buena
3,2 %	3,7 %	10,7 %	32,5 %	50,0 %
Calidad de la roca (%)/ponderación V.L.				
0–20	20–40	40–60	60–80	80 – 100
Muy baja	Baja	Media	Buena	Muy buena
2,8 %	6,1 %	13,2 %	27,9 %	50,0 %

Cada una de estas ponderaciones (Tabla 21) tiene asociada una matriz de comparación cuya inconsistencia es inferior al 10 %, por lo tanto, para desarrollar las reglas difusas en este caso se propone un total de 25 reglas (Anexo C), como se muestra en la Figura 18.

Tabla 22. Grado de mecanización para las reglas difusas

Mecanización (%)				
Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
0–20	20–40	40–60	60–80	80 – 100

h

	Mena	Roca	Porcentaje	Mecanización
1	muy baja	muy baja	6,0%	muy baja
2	muy baja	baja	9,3%	muy baja
3	muy baja	media	16,3%	muy baja
4	muy baja	buena	31,1%	baja
5	muy baja	muy buena	53,2%	media
6	baja	muy baja	6,5%	muy baja
7	baja	baja	9,8%	muy baja
8	baja	media	16,9%	muy baja
9	baja	buena	31,6%	baja
10	baja	muy buena	53,7%	media
11	media	muy baja	13,5%	muy baja
12	media	baja	16,8%	muy baja
13	media	media	23,8%	baja
14	media	buena	38,6%	baja
15	media	muy buena	60,7%	media
16	buena	muy baja	35,3%	baja
17	buena	baja	38,6%	baja
18	buena	media	45,7%	media
19	buena	buena	60,4%	alta
20	buena	muy buena	82,5%	muy alta
21	muy buena	muy baja	52,8%	media
22	muy buena	baja	56,1%	media
23	muy buena	media	63,2%	alta
24	muy buena	buena	77,9%	alta
25	muy buena	muy buena	100,0%	muy alta

Figura 18. Reglas difusas para la mecanización

Cada una de estas reglas son ingresadas en Matlab para desarrollar el sistema de inferencia difusa que arroje el grado de mecanización, así mismo se puede obtener la dependencia de la mecanización en función de la calidad de la mena y la calidad de la roca, como se muestra en la Figura 19. Todo esto se basa en las reglas difusas propuestas que han sido sometidas a un AHP.

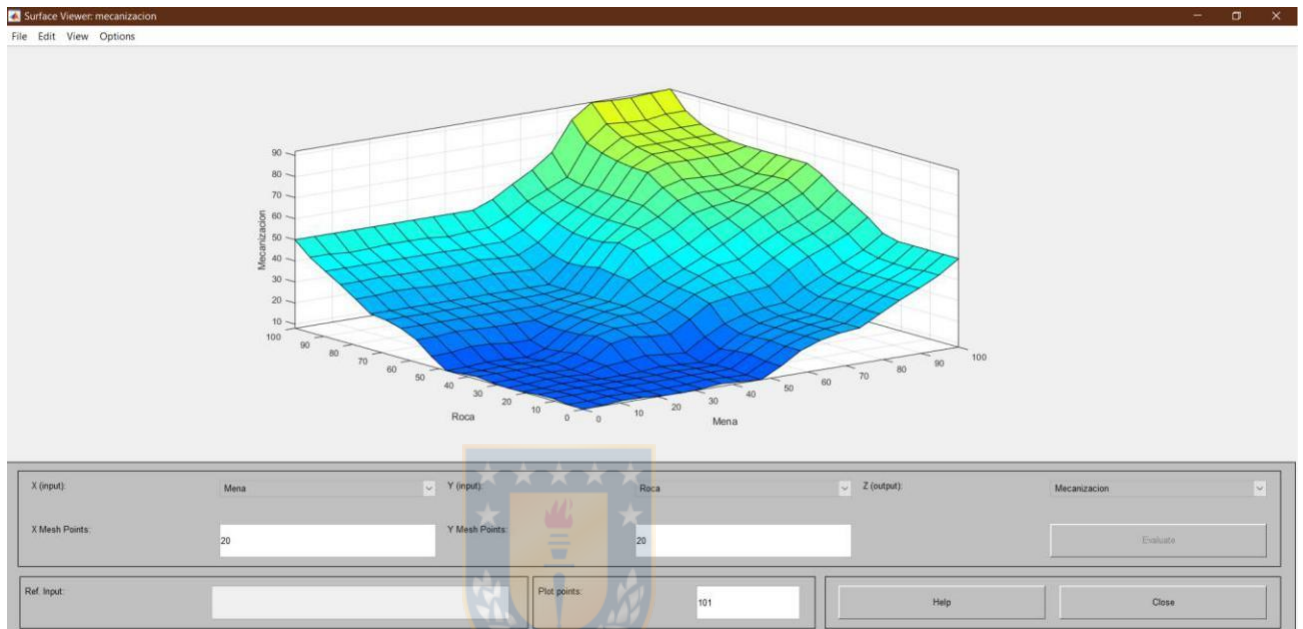


Figura 19. Herramienta Surface Viewer Matlab para la mecanización en función de las variables de calidad de mena y roca

El proceso de defuzzificación consiste en la agregación del peso de importancia de cada una de las variables de entrada en una única variable de salida. Para el caso de la función de mecanización se utiliza el método de *centroid* en Matlab cuyo proceso consiste en devolver el área bajo la curva de la función de salida.

7.2 Aplicación del método

En este apartado se presentan distintos escenarios para poder discutir los resultados de acuerdo con el peso de importancia de las variables mineras que influyen en la mecanización de las vetas de carbón. No todas las variables tienen el mismo impacto en el resultado, una pequeña variación de alguna puede provocar un considerable aumento o disminución de su valor en la variable de salida y con ello afectar el grado de mecanización de la veta.

7.2.1 Variables mineras para vetas de estudio

A continuación, se presentan, a modo de ejemplo, dos vetas, que por practicidad se denominarán veta #1 y veta #2, con su información, la cual fue extraída del trabajo realizado por M. Ataei en 2009, que corresponde a un caso de estudio de una mina de carbón en Irán. Cada una de las variables mineras presentadas en la Tabla 23 están medidas en las mismas unidades presentadas para la fuzzificación de dicha variable en el apartado anterior.

Tabla 23. Variables mineras de las vetas en estudio

Veta	Inmersión	Ancho de veta	Uniformidad	Calidad de techo	Calidad de piso	Entrada de agua	Extensión de la veta
#1	32,5	1,02	0,8	14,04	112,5	5	6500
#2	26	1,13	0,8	41,17	83,4	4	7000

7.2.2 Resultados

Las vetas presentan los siguientes resultados tras la aplicación del método de FIS en Matlab.

Tabla 24. Resultados de las vetas en Matlab (FIS)

Veta	Mecanización FIS Matlab
#1	22,0 %
#2	24,0 %

La veta #1 tiene una baja posibilidad de ser mecanizada al igual que la veta #2, aunque esta presenta variables mineras que califican la calidad de la roca como “buena”.

7.2.3 Análisis de resultados

Ambas vetas registran una situación desfavorable para ser mecanizadas, pues lo ideal es que presenten un potencial sobre el 60 %, es decir una “alta” o “muy alta” posibilidad de mecanización. La veta #1 presenta una calidad de techo =14,04 Kg/cm, esto significa que al ser expuesto el techo este cae inmediatamente, lo que ocasiona un derrumbe difícil de controlar a medida que los

soportes de techo avanzan. Esta variable minera castiga la variable de calidad de roca, al otorgarle una calidad “media”, a pesar de que las demás variables involucradas favorezcan la aplicación del método de extracción. Para la veta #2 se tiene que la calidad de la roca califica como “buena”, pues su calidad de techo =41,17 Kg/cm cae en la categoría de “semiestable”, lo que favorece la aplicación del método de extracción por longwall mining, al igual que el resto de las variables mineras involucradas en la calidad de la roca.

Ahora bien, tanto la veta #1 como la veta #2 presentan las condiciones favorables para ser mecanizadas debido a la inmersión de la veta, aunque el resto de las variables involucradas en la sí la favorecen. Ambos ángulos de inmersión son muy pronunciados ($32,5^\circ$ y 26°), lo que castiga en gran manera la calidad de la mena. Además, también se hace notorio que una pequeña variación en los ángulos genera un potencial de mecanización muy distinto. De acuerdo con la función de Oraee K. (2004) que mide la mecanización de la veta en función del ángulo de inmersión (ecuación 1) y según el tramo en donde se encuentran los ángulos de inmersión para la veta #1 y la veta #2 se puede hacer el siguiente análisis: la Figura 20 muestra el nivel de mecanización que para un ángulo de inmersión de 26° (veta #2) es de 2,05, esto representa un 18,64 % de posibilidad de ser mecanizada. La situación no cambia en el caso de la veta #1, la cual con un ángulo de inmersión de $32,5^\circ$ alcanza un nivel de mecanización de 1,57, es decir, un 14,27 % de posibilidad de ser mecanizada.

El hecho de que la mecanización de las vetas en función del ángulo de inmersión alcance un 14,27 % y un 18,64 %, y que en Matlab el potencial de mecanización alcance un 22,0 % y un 24,0 % (veta #1 y veta #2, respectivamente), simplemente refleja la contribución del resto de las variables mineras. Esto quiere decir que cada variable minera afecta la mecanización de la veta de forma diferente, por ejemplo, el ángulo de inmersión tiene una alta influencia en la mecanización, lo cual es consecuente con el método de explotación que se desea aplicar. Por lo tanto, la mecanización es mucho más favorable cuando las vetas presenten ángulos de inmersión entre 0° y 10° , pues, como se puede ver en la Figura 20, la contribución del nivel de mecanización estaría sobre el 50 %.

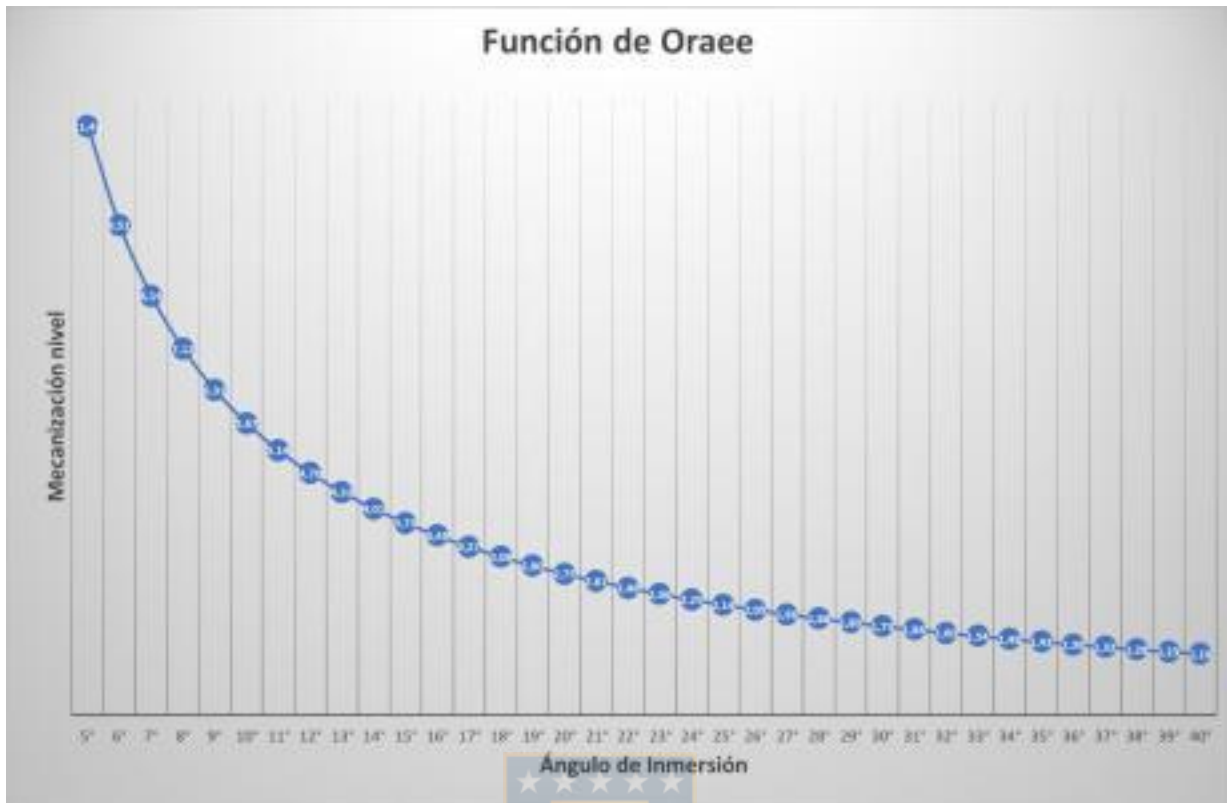


Figura 20. Nivel de mecanización en función del ángulo de inmersión

Para ilustrar la afirmación anterior en la siguiente tabla se muestran los potenciales de mecanización para la veta #1 y veta #2 variando el ángulo de inmersión para favorecer la mecanización. La situación cambió de forma favorable para la veta #2 que para un ángulo de inmersión de 0° y 5° presenta una “alta” capacidad para ser mecanizada, mientras que para la veta #1 la capacidad de mecanización no supera la categoría de “media”.

Tabla 25. Variaciones en el ángulo de inmersión de vetas de estudio

Veta	Mecanización FIS Matlab			
	Original	0°	5°	20°
#1	22,0 %	59,6 %	56,8 %	24,1 %
#2	24,0 %	66,8 %	67,4 %	24,4 %

8 Caso real de análisis de mecanización

La aplicación del método para obtener el grado de mecanización por lógica difusa se aplicó a ciertas formaciones de carbón ubicadas en la provincia de Arauco. Este sector presenta formaciones de carbón con potencia delgada que han sido explotadas de manera artesanal y se transportan a la superficie por sistemas de winches y carros de carga. La información aún es escasa para saber con exactitud las condiciones de las reservas de carbón, por lo tanto, se asumen diferentes escenarios para poder describir los potenciales de mecanización de las formaciones a partir de los datos obtenidos de algunos testigos de sondajes realizados en el año 2019.



Figura 21. Sistema de acarreo de mina artesanal en Curanilahue (provincia de Arauco) formada por un winche y carros

8.1 Descripción geológica del área de estudio

La cuenca carbonífera de Arauco cubre una superficie cercana a los 3000 km² y se desarrolla entre la vertiente occidental de la cordillera de Nahuelbuta y el límite externo de la plataforma submarina, 2000 km² se encuentran en la península y el resto bajo las aguas del golfo de Arauco, dentro de un ambiente sedimentario. En esta área se pueden identificar tres paisajes carboníferos eoterciarios designados con nombres geográficos, Trihueco, Colico y Lota [39]. Las vetas de carbón están interestratificadas con depósitos de tipo arcilla, limo y arena, producto de las inundaciones habituales del lugar. Los depósitos de carbón son de tipo bituminoso de baja potencia, por lo que son favorables para explotación por minería subterránea.

Cabe añadir que la provincia de Arauco se encuentra sometida a un sistema de fallas normales con dirección E NE- N NE, que ocasionan desplazamientos verticales de hasta 1000 metros; en ocasiones se involucra un segundo sistema más localizado en la zona de Lebu con dirección EO – O NO [39]. Esto da cuenta de una ubicación accidentada producto de la zona de choque de dos placas que influyen en el ambiente subterráneo de los mantos de carbón.

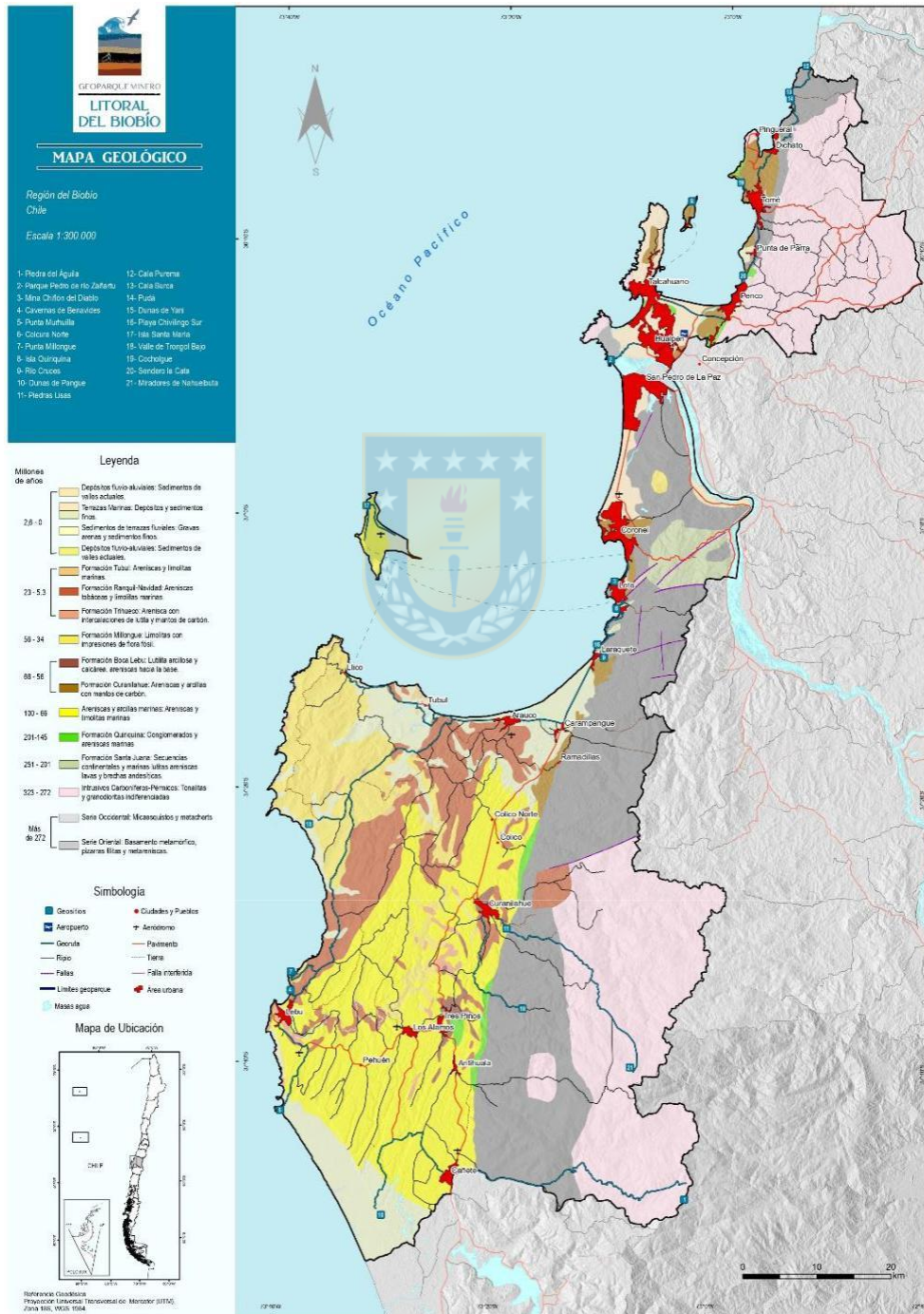


Figura 22. Ambiente geológico de la provincia de Arauco

8.2 Análisis descriptivo preliminar

Con base en la información entregada por PAMA, organismo gubernamental encargado de ayudar a la minería artesanal, que corresponde a 11 sondeos realizados en el mes de abril de 2019, se plantearon ciertos escenarios para el manto de carbón en el sector de Curanilahue con el fin de estudiar su nivel de mecanización probable. Durante este periodo al menos tres de los sondeos evidencian un interés económico en las vetas con potencias que varían entre los 60 y los 90 cm. El primer pozo (pozo #15) para analizar se ubica en la zona de Curanilahue con las coordenadas N 5861970 E 650250. El testigo cercano al manto de carbón presenta las siguientes características:

Tabla 26. Descripción de sondaje y contenido litológico primer pozo de análisis

		<p>Presencia de arenisca gris blanquecina, luego se encuentra un manto de carbón, cuyo techo es lutita y el piso es arenisca. El manto presenta una potencia de unos 60 cm. Después, se encuentra otro manto de una potencia de 90 cm, cuyo techo es de arenisca y el piso lutita.</p>
--	--	--

El sondaje presentado en la Tabla 26 corresponde a la caja 11 de un total de 12 cajas que han sido descritas. El sondaje completo se presenta en la Figura 23, que sobrepasa los 130 metros.

El segundo pozo (pozo #13) se ubica en la zona de Curanilahue con coordenadas N 5853844 E 467001. En la Tabla 27 se muestran las características del testigo cercano a la veta de carbón y en la Figura 24 se muestra la columna estratigráfica asociada a tal sondaje. El último pozo (pozo #11) se ubica en la zona de Curanilahue en el sector de Pilpilco, su descripción se presenta en la Tabla 28

con su respectiva columna estratigráfica en la Figura 24. Como se puede observar cada uno de estos sondajes muestran un ambiente sedimentario diferente de la zona carbonífera de Arauco, esto se debe, sobre todo, a la profundidad a la que se encuentran los mantos de carbón con potencia delgada. En el caso del primer sondaje, el manto de carbón se ubica alrededor de los 120 metros de profundidad, para el segundo caso se tienen dos profundidades, una de 112,8 metros y otra cerca de los 120 metros con potencia similar al primer manto de la columna, y por último se tiene un manto ubicado alrededor de los 72 metros de profundidad con una potencia de 90 cm.

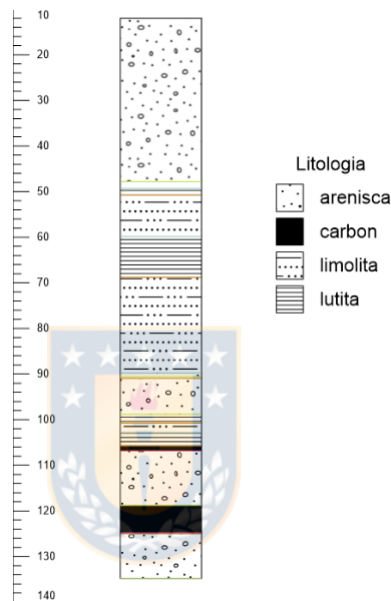


Figura 23. Columna estratigráfica del sondaje completo primer pozo de análisis

El resto de los sondajes no contaban con la potencia mínima para aplicar el método de mecanización, estaban entre los 10 y los 40 cm, y en algunos casos había ausencia de vetas de carbón. En la Figura 25 se presenta la ubicación de cada uno de los pozos que fueron registrados con su localización, es apreciable que en la mayoría de los sondajes presentan distancias del orden de kilómetros uno del otro, por lo que se hace difícil estimar la continuidad de la veta de carbón. Lo importante de estos sondajes es la identificación de la litología presente en las zonas de estudio, por lo que permite aproximar las características tanto geológicas como mecánicas de las rocas sedimentarias tanto del techo como de piso, ambas importante a la hora de determinar la capacidad de mecanización

Tabla 27. Descripción de sondaje y contenido litológico segundo pozo de análisis

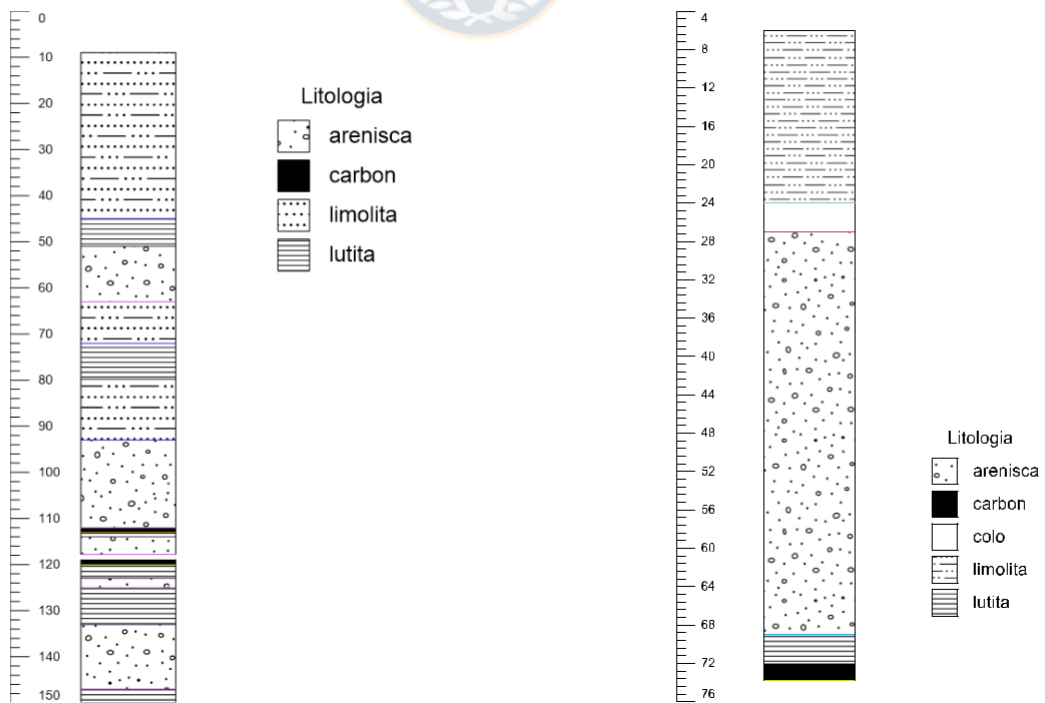


Figura 24. Columna estratigráfica para segundo pozo (izquierda) y tercero (derecha)

Tabla 28. Descripción de sondaje y contenido litológico tercer pozo de análisis

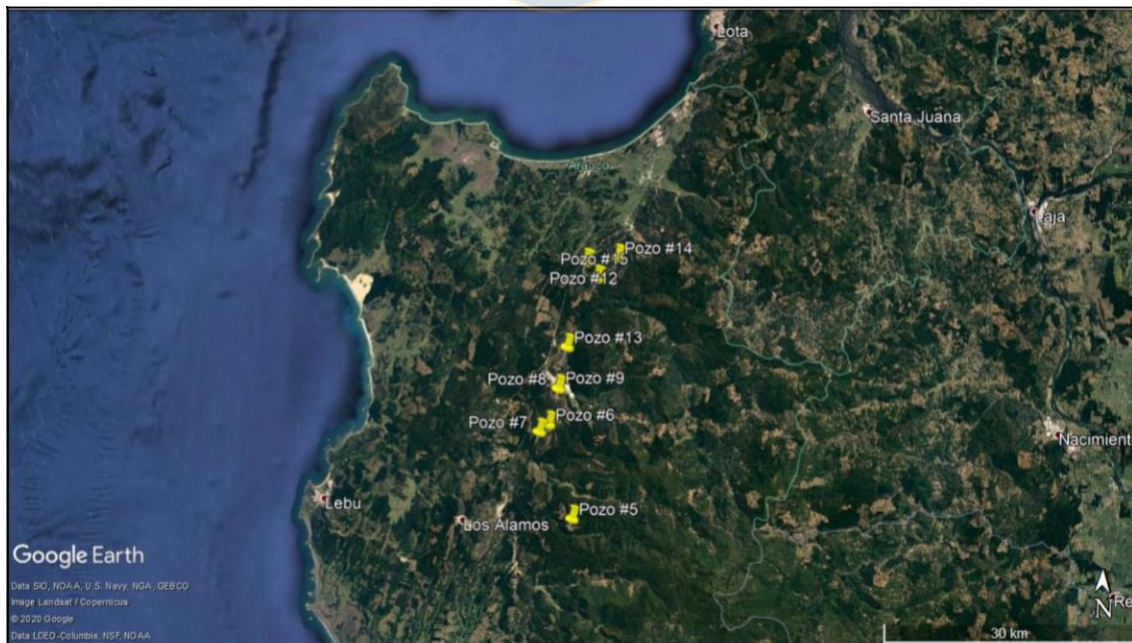


Figura 25. Ubicación de los sondajes registrados durante el periodo de abril 2019

8.3 Aplicación FIS en Matlab

8.3.1 Calidad de la mena

En primer lugar, se analiza la calidad de la mena para el pozo #15 desde varios escenarios posibles. En este caso las variables mineras que se deben considerar son el ancho, la uniformidad, la extensión y el ángulo de inmersión de la veta. Este pozo tiene dos mantos de carbón separados por aproximadamente 10 metros que resultan extraíbles desde el punto de vista económico, el más cercano a la superficie tiene una potencia de 60 cm y el segundo, que está más profundo, posee una potencia de 90 cm. Para el primer manto se tiene que para una uniformidad igual a 1 (semiuniforme), una extensión de 500 metros (pequeña) y un ángulo de inmersión de 0°, la calidad de la mena esta sobre el 60,8 %, es decir, la veta es propicia para ser mecanizada. Esta bajará a medida que se superen los 5° de inmersión, para ángulos cercanos a los 10° el potencial varía de 53,7 % a 35,8 % y, entonces, la mecanización estaría totalmente descartada.

Si la veta presenta una uniformidad de 0,5 y se mantienen constantes el resto de las variables, para un ángulo de inmersión de 5° la calidad de la mena sube a un 62,5 %. Esta aumenta a medida que el ángulo disminuye, así se puede establecer un 75 % de calidad para vetas horizontales sin ángulo de inmersión y un 37,5 % para vetas con 10° de inmersión, por lo cual de nuevo no se favorecería la aplicación de una mecanización. Cuando la veta presenta una uniformidad mejor que 0,25, al mantener un ángulo de inmersión de 10° se logra una calidad de mena de 50 %. Así, es posible notar que a medida que el ángulo de inmersión aumenta necesariamente la uniformidad de la veta debe hacerlo para lograr una buena calidad, pero la extensión de la veta no parece tener un impacto igual de importante en esta.

Ahora bien, en el manto de 90 cm de potencia, que cuenta con una uniformidad de 1, una extensión de 500 metros y un ángulo de inmersión de 5°, la calidad de la mena alcanza un valor de 62,5 %, lo que la cataloga como “buena”. Al igual que con el manto anterior, si el ángulo de inmersión supera los 5°, la calidad de la mena disminuye considerablemente, con un ángulo de 10° esta llega al 37,5 %, es decir, la mena se categoriza como “baja” y no es apta para ser mecanizada. Como la potencia del resto de los pozos es la misma que la del pozo #15, es de esperar que los resultados sean similares a los mostrados. En general, se puede afirmar que el ángulo de inmersión, junto con

la uniformidad de la veta, desempeñan un rol fundamental a la hora de estimar la calidad de la mena para ser mecanizada, sobre todo si se presentan potencias de manto muy delgadas. A su vez, la extensión de la veta difícilmente logra una mejora en la calidad de la mena producto de las malas condiciones de las otras dos variables cruciales.

Tabla 29. Análisis de la calidad de la mena para vetas de 0,6 m de potencia

Ancho de veta = 0,6 m	Uniformidad = 1	Extensión = 500 m	Inmersión = 0°
Calidad de la mena = 75,0 %		Categorización = Buena	
Ancho de veta = 0,6 m	Uniformidad = 1	Extensión = 500 m	Inmersión = 5°
Calidad de la mena = 61,6 %		Categorización = Buena	
Ancho de veta = 0,6 m	Uniformidad = 1	Extensión = 500 m	Inmersión = 10°
Calidad de la mena = 36,6 %		Categorización = Baja	
Ancho de veta = 0,6 m	Uniformidad = 0,5	Extensión = 500 m	Inmersión = 10°
Calidad de la mena = 37,5 %		Categorización = Baja	
Ancho de veta = 0,6 m	Uniformidad = 0,25	Extensión = 500 m	Inmersión = 10°
Calidad de la mena = 50,0 %		Categorización = Media	

Tabla 30. Análisis de la calidad de la mena para vetas de 0,9 m de potencia

Ancho de veta = 0,9 m	Uniformidad = 1	Extensión = 500 m	Inmersión = 0°
Calidad de la mena = 75,5 %		Categorización = Buena	
Ancho de veta = 0,9 m	Uniformidad = 1	Extensión = 500 m	Inmersión = 5°
Calidad de la mena = 62,5 %		Categorización = Buena	
Ancho de veta = 0,9 m	Uniformidad = 1	Extensión = 500 m	Inmersión = 10°
Calidad de la mena = 37,5 %		Categorización = Baja	
Ancho de veta = 0,9 m	Uniformidad = 0,5	Extensión = 500 m	Inmersión = 10°
Calidad de la mena = 40,3 %		Categorización = Baja	
Ancho de veta = 0,9 m	Uniformidad = 0,25	Extensión = 500 m	Inmersión = 10°
Calidad de la mena = 50,0 %		Categorización = Media	

8.3.2 Calidad de la roca

Para la calidad de la roca se consideran las variables mineras de calidad de piso, calidad de techo y cantidad de agua presente. Las primeras dos variables son estimadas de acuerdo con la geología presente en los sondajes y para el caso del agua presente se presentan distintos escenarios. La calidad del piso queda definida por la capacidad de carga, por eso, es necesario conocer los rangos de cohesión y de ángulo de fricción interna de la roca, como se muestra en la tabla siguiente.

Tabla 31. Cohesión y ángulo de fricción de rocas sedimentarias [40]

Roca	Valores típicos de y	
	Cohesión (kp/cm ²)	Ángulo de fricción (grados)
Arenisca	80 – 350	30–50
Lutita	30 – 350	15–25

Entonces, a partir de los valores mínimos de la Tabla 31 en conjunto con la ecuación 5, se obtienen los siguientes valores de capacidad de carga para una extensión de 500 m, la cual es utilizada en todos los pozos en estudio para analizar su grado de mecanización.

Tabla 32. Capacidad de carga para sondajes

Pozo	Capacidad de carga (Mpa)	Potencia de veta (m)
#15	255/66	0,6/0,9
#13	66	0,6
#11	66	0,9

Por otro lado, para la calidad del techo es necesario conocer los valores de la resistencia a la compresión simple, de acuerdo con los datos de la Tabla 33 [40] se pueden estimar estos valores dependiendo del tipo roca presente sobre el manto de carbón. Igualmente, se debe considerar el factor de esponjamiento cuyo valor varía entre 1,35 y 1,5 para rocas sedimentarias [41]. Los resultados totales para la calidad del techo se presentan en la Tabla 34.

Tabla 33. Parámetros resistencia de roca intacta

Roca intacta	Resistencia a la compresión simple (Mpa)	
	Valores medios	Rango de valores
Arenisca	55 – 140	30 – 235
Lutita	30–70	10 – 100

Tabla 34. Calidad del techo de los pozos en estudio

Pozo	Índice de calidad (Kg/cm)	
	Mínimo	Máximo
#15; potencia = 0,6 m	0,99	1,97
#15; potencia = 0,9 m	2,20	5,59
#13; potencia = 0,6 m	2,20	5,59
#11; potencia = 0,9 m	0,99	1,97

Por último, la cantidad de agua presente se hace variar para ver de qué manera afecta la calidad de la roca para ser mecanizada. A continuación, se presentan los resultados en relación con la calidad de la roca de los datos anteriores.

Tabla 35. Calidad de la roca para pozo #15 con ancho de veta de 0,6 m

Calidad del piso = 255 Mpa	Calidad del techo = 0,99 Kg/cm	Cantidad de agua = 3 m³/hora
Calidad de la roca = 51,8 %		Categorización = Media
Calidad del piso = 255 Mpa	Calidad del techo = 0,99 Kg/cm	Cantidad de agua = 8 m³/hora
Calidad de la roca = 46,7 %		Categorización = Media
Calidad del piso = 255 Mpa	Calidad del techo = 0,99 Kg/cm	Cantidad de agua = 12 m³/hora
Calidad de la roca = 32,4 %		Categorización = Baja
Calidad del piso = 255 Mpa	Calidad del techo = 1,97 Kg/cm	Cantidad de agua = 3 m³/hora
Calidad de la roca = 53,3 %		Categorización = Media
Calidad del piso = 255 Mpa	Calidad del techo = 1,97 Kg/cm	Cantidad de agua = 8 m³/hora
Calidad de la roca = 58,2 %		Categorización = Media
Calidad del piso = 255 Mpa	Calidad del techo = 1,97 Kg/cm	Cantidad de agua = 12 m³/hora
Calidad de la roca = 34,5 %		Categorización = Baja

Tabla 36. Calidad de la roca para pozo #15 con ancho de veta de 0,9 m y pozo #13 con veta 0.6 m

Calidad del piso = 66 Mpa	Calidad del techo = 2,20 Kg/cm	Cantidad de agua = 3 m³/hora
Calidad de la roca = 28,6 %		Categorización = Baja
Calidad del piso = 66 Mpa	Calidad del techo = 2,20 Kg/cm	Cantidad de agua = 8 m³/hora
Calidad de la roca = 28,6 %		Categorización = Baja
Calidad del piso = 66 Mpa	Calidad del techo = 2,20 Kg/cm	Cantidad de agua = 12 m³/hora
Calidad de la roca = 28,6 %		Categorización = Baja
Calidad del piso = 66 Mpa	Calidad del techo = 5,59 Kg/cm	Cantidad de agua = 3 m³/hora
Calidad de la roca = 32,5 %		Categorización = Baja
Calidad del piso = 66 Mpa	Calidad del techo = 5,59 Kg/cm	Cantidad de agua = 8 m³/hora
Calidad de la roca = 32,5 %		Categorización = Baja
Calidad del piso = 66 Mpa	Calidad del techo = 5,59 Kg/cm	Cantidad de agua = 12 m³/hora
Calidad de la roca = 32,5 %		Categorización = Baja

Tabla 37. Calidad de la roca para pozo #11 con ancho de veta de 0,9 m

Calidad del piso = 66 Mpa	Calidad del techo = 0,99 Kg/cm	Cantidad de agua = 3 m³/hora
Calidad de la roca = 26,8 %		Categorización = Baja
Calidad del piso = 66 Mpa	Calidad del techo = 0,99 Kg/cm	Cantidad de agua = 8 m³/hora
Calidad de la roca = 26,8 %		Categorización = Baja
Calidad del piso = 66 Mpa	Calidad del techo = 0,99 Kg/cm	Cantidad de agua = 12 m³/hora
Calidad de la roca = 26,8 %		Categorización = Baja
Calidad del piso = 66 Mpa	Calidad del techo = 1,97 Kg/cm	Cantidad de agua = 3 m³/hora
Calidad de la roca = 28,3 %		Categorización = Baja
Calidad del piso = 66 Mpa	Calidad del techo = 1,97 Kg/cm	Cantidad de agua = 8 m³/hora
Calidad de la roca = 28,3 %		Categorización = Baja
Calidad del piso = 66 Mpa	Calidad del techo = 1,97 Kg/cm	Cantidad de agua = 12 m³/hora
Calidad de la roca = 28,3 %		Categorización = Baja

8.3.3 Mecanización

Para obtener el nivel de mecanización de los pozos se han propuesto distintos escenarios. En el caso de la calidad de la mena (Tabla 29 y Tabla 30) se tiene lo siguiente:

Tabla 38. Escenarios para los sondajes de pozo #15 y pozo #13

Calidad de la mena, vetas de 0,6 m	
75,0 %	Escenario 1
61,6 %	Escenario 2
36,6 %	Escenario 3
37,5 %	Escenario 4
50,0 %	Escenario 5

Tabla 39. Escenarios para los sondajes de pozo #15 y pozo #11

Calidad de la mena, vetas de 0,9 m	
75,5 %	Escenario 1
62,5 %	Escenario 2
37,5 %	Escenario 3
40,3 %	Escenario 4
50,0 %	Escenario 5

Con respecto a los escenarios propuestos para la calidad de la roca que corresponden a las tablas 35, 36 y 37, estos se resumen a continuación:

Tabla 40. Escenarios calidad de la roca para sondaje de pozo #15

Calidad de la roca, vetas de 0,6 m	
51,8 %	Escenario A1
46,7 %	Escenario B1
32,4 %	Escenario C1
53,3 %	Escenario D1
58,2 %	Escenario E1
34,5 %	Escenario F1

Tabla 41. Escenarios calidad de la roca para sondajes de pozo #15 y pozo #13

Calidad de la roca, vetas de 0,9 m y 0,6 m	
28,6 %	Escenario A2
32,5 %	Escenario B2

Tabla 42. Escenarios calidad de la roca para sondaje de pozo #11

Calidad de la roca, vetas de 0,9 m	
26,8 %	Escenario A3
28,3 %	Escenario B3

Con base en la conjugación de los escenarios de calidad de la mena y calidad de la roca presentados, en la Tabla 43 se muestran los potenciales y niveles de mecanización obtenidos, con su respectivo valor máximo y mínimo.

Tabla 43. Mecanización en base a los escenarios propuestos para los sondajes

Pozo #15; veta de 0,6 m			
Max	Min	Escenario Max	Mecanización Max
59,0 %	18,3 %	1/E1	<i>Media</i>
Pozo #15; veta de 0,9 m			
Max	Min	Escenario Max	Mecanización Max
34,2 %	14,3 %	1/B2	<i>Baja</i>
Pozo #13; veta de 0,6 m			
Max	Min	Escenario Max	Mecanización Max
33,2 %	14,3 %	1/B2	<i>Baja</i>
Pozo #11; veta de 0,9 m			
Max	Min	Escenario Max	Mecanización Max
30,3 %	11,6 %	1/B3	<i>Baja</i>

8.4 Análisis de resultados

Tras los análisis y estimaciones realizadas, el máximo potencial de mecanización obtenido fue de 59,0 %, que es categorizado como una capacidad “media”, lo cual advierte que la situación o los escenarios conjugados no garantizan la aplicación del método de *longwall mining* para extraer la veta de carbón. Lo ideal es que la veta presente una capacidad de mecanización “alta” o “muy alta” para favorecer la aplicación de dicho método de extracción. Cabe destacar que los escenarios a los que fueron sometidos los resultados de los sondajes también son supuestos, pues actualmente PAMA no cuenta con información de la continuidad del manto, dado que los sondajes se encuentran muy separados uno del otro, en muchos casos por varios kilómetros.

Ahora bien, para lograr una mecanización favorable del manto se tiene que la mejor calidad de la mena se logra cuando el ángulo de inmersión se mantiene bajo, es decir entre los 0° y 5°. Bajo esta condición las vetas de carbón presentan una calidad de mena “buena”, pero también es necesaria una uniformidad de la veta que vaya de “muy bien uniforme” a “semiuniforme” en potencias de vetas entre 60 y 90 cm. Sin embargo, es el ángulo de inmersión el factor que parece tener más peso, al considerar ángulos de inmersión cercanos a 10° la calidad de la mena es “baja” y solo cuando la veta es “muy bien uniforme” se alcanza una calidad “media”. Dado que las vetas son bastante delgadas difícilmente son mecanizadas con ángulos de inmersión categorizados como “medio”, “alto” o “muy alto”, a pesar de que su uniformidad sea buena o mejor.

En lo que respecta a la calidad de la roca, en ninguno de los escenarios propuestos se presentó una calidad “buena”. El máximo valor de calidad alcanzó un 58,2 %, es decir, “media” y el resto de las situaciones oscilaron entre este nivel y “baja”. De esta forma se puede afirmar que la litología en los sondajes no presenta las cualidades mecánicas necesarias para aplicar el método de explotación, sobre todo cuando se presenta la lutita en el piso de la veta, cuya capacidad de carga es baja para sostener los soportes de techo. De hecho, en cada sondaje donde había lutita como piso de la veta la calidad de la roca no superó en nivel “baja”.

La máxima capacidad de mecanización se logró para el pozo #15 que tenía un ancho de veta de 60 cm, su uniformidad era “semiuniforme” y un ángulo de inmersión “bajo”. Además, en este tanto el techo como el piso de este eran arenisca, cuyas características mecánicas son mejores que la lutita, lo que favorece la calidad de la roca y, por ende, la capacidad de la veta de ser mecanizada.

9 Discusión y conclusiones

La lógica difusa es una buena herramienta que en la actualidad se ha utilizado frecuentemente en sistemas de control, pues permite el desarrollo de sistemas simples y a la vez efectivos para la toma de decisiones. En este caso particular se extendió su uso para determinar la factibilidad de mecanizar o no el yacimiento de carbón según sus características mineras. A pesar de contar con la teoría que hace que el proceso tenga características objetivas, el sistema queda sujeto a la subjetividad o experiencia del controlador. Las funciones de membresía y las reglas difusas quedan sujetas a la experiencia de labores anteriores y dependen también de la teoría manejada respecto a las variables mineras.

El método utilizado para sustentar las reglas difusas fue el de análisis jerárquico (AHP), que consiste en establecer las prioridades de una variable sobre otra. En toda situación la consistencia de la matriz de prioridades no superó el 10 %, por lo que las reglas difusas quedaron sustentadas bajo este proceso. Sin embargo, las prioridades se pueden variar y aun así mantener una inconsistencia de la matriz dentro del rango establecido, entonces hay modificaciones en las reglas difusas que pueden alterar el potencial de mecanización en cuanto al valor de porcentaje. Para controlar esto, la lógica difusa permitió categorizar las salidas como “muy baja”, “baja”, “media”, “alta” y “muy alta” en lo que se refiere a la capacidad del manto de carbón para lograr una mecanización por *longwall mining* como método de extracción.

Las variables mineras utilizadas en el sistema de lógica difusa fueron siete, pues se hizo énfasis en aquellas que estaban directamente involucradas con la calidad de la mena y calidad de la roca. Hay otras variables, como la cantidad de gas presente, que alteran más que nada el proceso productivo de extracción, y generan condiciones que deben ser abordadas al momento de llevar a cabo la explotación, como, por ejemplo, reducir la tasa de producción o mejorar las condiciones de ventilación. Igualmente, las variables económicas, sociales y ambientales quedan fuera de este análisis, a pesar de ser consideradas importantes cuando se piensa llevar a cabo un proyecto minero; no obstante, el fin de este trabajo era estimar solamente el potencial de mecanización de las vetas de carbón delgadas cuya factibilidad está fuertemente ligada a las características geológicas del

yacimiento. Es necesario recalcar que el método de explotación por *longwall mining* genera subsidencia, por lo que de cierta forma generará impactos económicos, sociales y/o ambientales.

Por otro lado, la lógica difusa en Matlab es fácil de utilizar por los soportes de herramienta que ofrece el *software*, lo importante es determinar de manera correcta la función de membresía y las reglas difusas o que al menos estén bien justificadas bajo la teoría y la experiencia del desarrollador. Las variables de entrada tienen un valor de pertenencia según el tramo en el cual están definidas, dicho valor determina las reglas difusas que entran en la operación para truncar la función de membresía de la variable de salida. Al estar involucrada más de una regla difusa, el sistema continúa con el proceso de agregación de las funciones de salida, que consiste en agregar la contribución de cada regla difusa en la función de pertenencia de la variable de salida. El resultado formará una función de membresía truncada cuya área bajo la curva corresponde al potencial de mecanización buscado.

Cada variable minera estuvo compuesta por tramos que se definieron a partir de variables lingüísticas, cuyo principal objetivo era definir las reglas difusas. La concepción de las funciones de membresía parte del hecho de que el valor central de cada tramo en que han sido divididas las variables mineras, es decir, “muy bajo”, “bajo”, “medio”, etc., posee un valor máximo de pertenencia y que el resto de los valores no centrales poseen un valor de pertenencia que comparten con el conjunto adyacente más cercano. Esta situación puede generar controversia en los potenciales de mecanización si no existen reglas difusas claramente establecidas.

Por ejemplo, se puede ingresar un valor central en alguna variable minera, que llamará a la regla difusa involucrada y truncará las funciones de membresía de la variable de salida. Si se mueve ese valor con el propósito de mejorar la variable minera, este llamará, en este caso, a las reglas difusas involucradas en todos los conjuntos donde el valor presente un grado de pertenencia, pues ahora no representa un valor central con un único valor máximo de pertenencia. Lo anterior puede generar un potencial de mecanización un poco más bajo, puesto que la variable no trunca la función de salida con un valor máximo de membresía de la variable de entrada y, entonces, crea un área bajo la curva un poco más pequeña.

Lo ideal es que el potencial de mecanización varíe de acuerdo con la contribución de las variables mineras; sin embargo, existen situaciones en la cuales el potencial de mecanización no

variará a pesar de que una variable minera se mejore o empeore. Por ejemplo, puede pasar que exista un rango en que la variable minera alcance su valor máximo de pertenencia, esto implica que mientras se ingresen valores dentro de ese mismo rango, las mismas reglas difusas son llamadas para determinar el potencial de mecanización, lo cual produce valores de salida idénticos. También, puede pasar que cuando la contribución de una variable minera es ínfima, provoca en la variable de salida una modificación nula en caso de variar los valores de entrada. Por lo tanto, es importante interpretar correctamente este valor de salida y enfocar la mirada especialmente en la categorización en la que cae el manto de carbón, en otras palabras, definir si el manto posee una “baja” o “muy alta” capacidad de ser mecanizado.

Con respecto a la situación de los sondajes realizados en el sector de Curanilahue, es difícil estimar con exactitud el potencial de mecanización que pueden presentar las distintas formaciones, por el bajo conocimiento que se tiene de la continuidad del manto. En todo caso, se plantearon diferentes escenarios probables para aquellos sondajes con potencias de vetas de carbón mínimas para ser extraídas por el método de explotación de *longwall mining*. A pesar de los avances en el desarrollo de equipos mineros que puedan extraer mantos de carbón de potencia delgada, la situación no es muy alentadora para los sondajes estudiados, sus condiciones no permiten una “alta” o “muy alta” capacidad de mecanización, lo que descarta cualquier posibilidad de aplicar el método de explotación *longwall mining*.

Las condiciones geológicas del sector desempeñan un rol para esta poca factibilidad de mecanización. Las formaciones carboníferas del lugar han sido sometidas a esfuerzos de compresión lateral que han producido estructuras geológicas sinclinales-anticlinales e inclinaciones con buzamientos que van desde los 15° a los 20° [39]. Con base en la función de Oraee, que solo considera el ángulo de inmersión, dichas formaciones solo alcanzarían entre un 25,0 % y un 33,9 % de posibilidad de ser mecanizadas, lo que indica una “baja” capacidad. Además, la presencia de fallas normales en la zona, como se muestra en la Figura 26, condiciona el índice de las perturbaciones geológicas y el ángulo de inmersión, que, como se evidenció, son variables mineras sensibles; una pequeña variación de ellas genera un importante impacto en la capacidad de mecanización, en este caso en particular, de manera negativa.

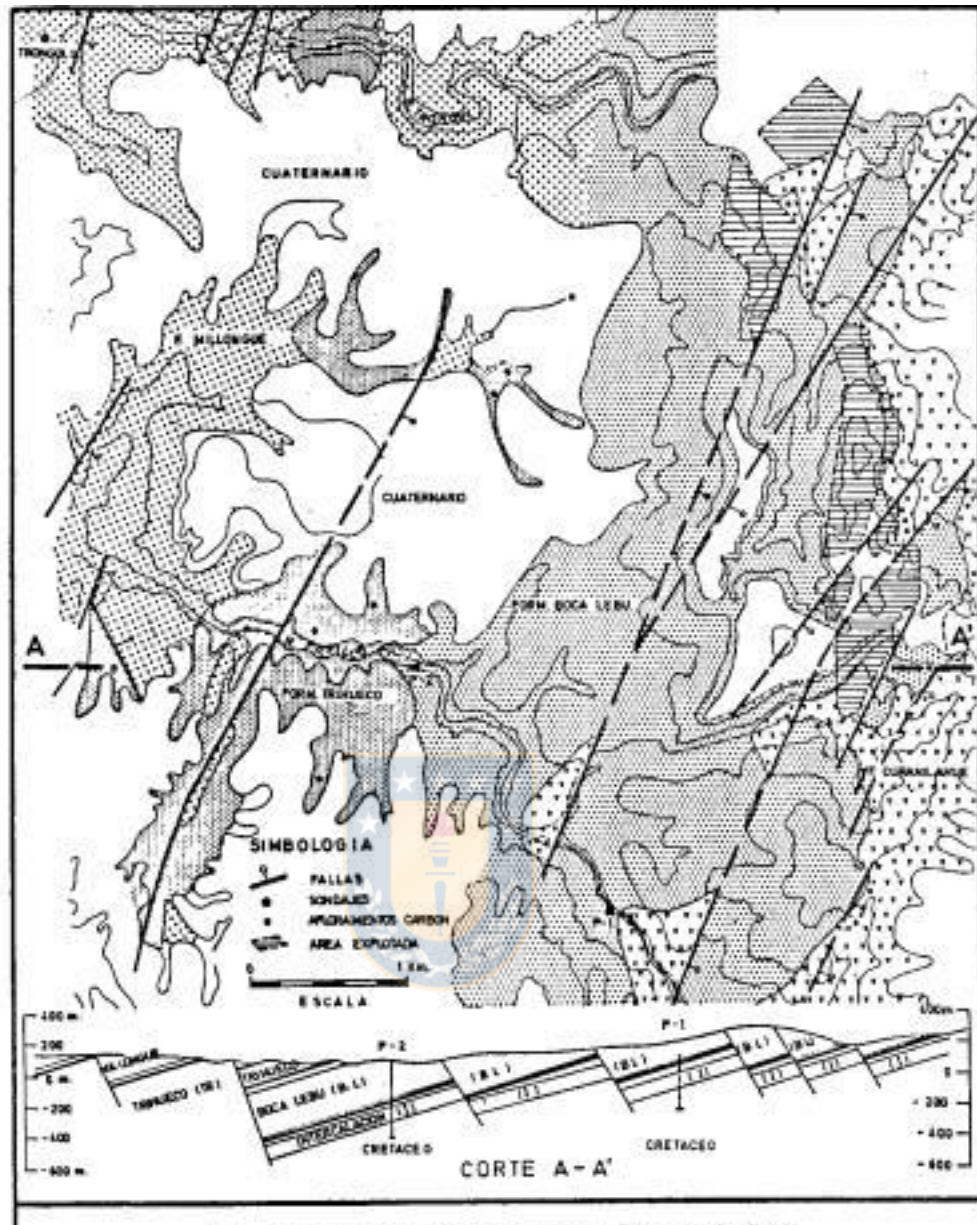


Figura 26. Esquema geológico estructural, sector ríos, Tringol - Pilpilco [39]

10 Referencias

1. **International Energy Agency [IEA].** *Coal Information 2018*. París : OECD-IEA, 2018.
2. **ASTAFIEV, D., et al.** Analysis of longwall equipment for thin seams mining in conditions of Polish and Ukrainian mines. [book auth.] Volodymyr Bondarenko, Iryna Kovalevs'ka and Kostiantyn Ganushevych. *Progressive Technology of Coal, Coalbed Methane and Ores Mining*. London : Taylor & Francis Group, 2014, pp. 287-292.
3. **SAIKA, Binoy, SAIKA, Ananya y BARUAH, Bimala.** Nature and Chemistry of Coal an Its Products. [aut. libro] M. R. Riazi y Rajender Gupta. *Coal Production and Processing Technology*. London, New York : CRC Press, 2016.
4. **BOLOZ, Lukasz.** Mining of thin coal seams using surface-underground methods. *Mining-Informatics, automation and electrical engineering*. s.l. : Instytut Technik Innowacyjnych EMAG, 2018, págs. 47-52.
5. **PASCHEDAG, U.** Plow Technology - History and Today's State of the Art. [ed.] Dyczko et al. *International Mining Forum*. London : Taylor & Francis Group, 2011, págs. 1-15.
6. **GALVIN, J. M.** *Ground Engineering - Principles and Practices for Underground Coal Mining*. s.l. : Springer, 2016.
7. **PETLOVANYI, Mykhailo, y otros.** *Modern experience of low-coal seams underground mining in Ukraine*. 6, 2018, International Journal of Mining Science and Technology, Vol. 28, págs. 917-923.
8. **ORAE, K. y POURKHANDANI, R.** The Influence of Physical Parameters on Mechanizability of Longwall Mining of Coal. [aut. libro] Jerzy KICKI y Eugeniusz SOBCZYK. *International Mining Forum - New Technologies in Underground Mining Safety in Mines*. London : Taylor & Francis Group, 2004, págs. 63-70.
9. **BOLOZ, Lukasz.** Longwall shearers for exploiting thin coal seams as well as thin and highly inclined coal seams. *Minin - Informatic, Automation and Electrical Engineering*. s.l. : s/e, 2018, págs. 59-65.
10. **VLASOV, S.** Substantiation of the rational longwall length methodology. [ed.] Volodymyr Bondarenko, Iryna Kovalevs'ka y Kostiantyn Ganushevych. *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane and Ores Mining*. London : Taylor & Francis Group, 2014, págs. 423-426.

11. **Universidad Politécnica de Madrid.** Diseño de aplicaciones del método del tajo largo. *Diseño de Explotaciones e Infraestructura Mineras Subterráneas*. España : Universidad Politécnica de Madrid, 2007, págs. 143-154.
12. **WANG, F., TU, S. y BAI, Q.** *Practice and prospects of fully mechanized mining technology for thin coal seams in China*. 2, 2012, The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 112, págs. 161-170.
13. **ATAEI, M., KHALOKAKAEI, R. y HOSSIENI, M.** *Determination of coal mine mechanization using fuzzy logic*. 2, 2009, Mining Science and Technology, Vol. 19, págs. 149-154.
14. **MEHDI, Hosseini Sayed, y otros.** *Development a new classification for assessing the coal mine mechanization*. 1, 2013, Mining Science and Technology, Vol. 58, págs. 217-226.
15. **WANG, Chen y TU, Shihao.** *Selection of an Appropriate Mechanized Mining Technical Process for Thin Coal Seam Mining*. 7, 2015, Mathematical Problems in Engineering, págs. 1-10.
16. **WANG, C., y otros.** *Monte Carlo analytic hierarchy process for selection of the longwall mining method in thin coal seama*. 12, 2019, The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 119, págs. 1005-1012.
17. **RENTON, John J.** Depositional Characteristics of Coal Beds. [aut. libro] Christoher Bise. [ed.] Christopher J. Bise. *Modern American Coal Mining - Methods and Applications*. Colorado : Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2013, págs. 25-50.
18. **DEEPAK, D.** Longwall face support design - a micro computer model. *Journal of Mines, Metals and Fuels*. s.l. : INSIO Scientific Books and Periodicals, 1986.
19. **UNRUG, K. y SZWILSKI, B.** Methods of roof cavability prediction. *State of the Art of Ground Control in Longwall Mining and Mining Subsidence*. s.l. : Society for Mining Metallurgy, 1981, págs. 13-29.
20. **KRAUSE, E. y KRZEMIEN, K.** *Methane Risk Assessment in Underground Mines by Means of a Survey by the Panel of Experts (Sope)*. 2, 2014, Journal of Sustainable Mining, Vol. 13, págs. 6-13.
21. **HARTMAN, H., et al.** Methane drainage. [book auth.] Howard L. Hartman. *Mine Ventilation and Air Conditioning*. New York : Jhon Wiley & Sons, Inc., 1997, pp. 64-74.

22. **BISE, C.** Coal Industry Statistics. *Moder American Coal Mining - Methods And Applications*. s.l. : Society for Mining, Metallurgy & Exploration, 2013, págs. 1-23.
23. **SERRA, M. E.** *Topografía para minería subterránea*. Catalunya : Universidad Politécnica de Catalunya, 2002. Vol. 62.
24. **FERNÁNDEZ, R., y otros.** Underground Mining Drainage. State of the Art. s.l. : International Mine Water Association, 2012, págs. 87-112.
25. **ZADEH, Lofti A.** *Fuzzy set*. 3, 1965, Information and Control, Vol. 8, págs. 338-353.
26. **GONZÁLEZ, Carlos.** Lógica Difusa: Una introducción práctica - Tecnicas de Softcomputing. [En línea] 2011.
https://www.esi.uclm.es/www/cglez/downloads/docencia/2011_Softcomputing/LogicaDifusa.pdf.
27. **ZADEH, Lofti A.** *Outline of a new approach to the analysis of complex system*. 1, 1973, IEEE Transaction on System Man and Cybernetics, Vol. 3, págs. 28-44.
28. **PÉREZ PUEYO, R.** *Descripción general de las técnicas de lógica difusa*. Catalunya : Universitat Politècnica de Catalunya, 2005. págs. 35-59.
29. **fuzzyTech.** INFORM GmbH and Inform Software Corporation. [En línea] s.f. [Citado el: 09 de Agosto de 2020.] <http://www.fuzzytech.com>.
30. *jFuzzyLogic: a robust and flexible Fuzzy-Logic inference system language implementation*. **CINGOLANI, P. y ALCALÁ-FDEZ, J.** s.l. : 2012 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 2012. págs. 1-8.
31. **Instituto de Microelectrónica de Sevilla.** IMSE-CNM. [En línea] [Citado el: 09 de agosto de 2020.] <http://www.imse-cnm.csic.es/Xfuzzy>.
32. **SIVANANDAM, S. N., SUMATHI, S. y DEEPA, S. N.** *Introduction to Fuzzy Logic using Matlab*. New York : Springer, 2007. 103540357807.
33. **GILAT, Armos.** *Matlab: una introducción con ejemplos prácticos*. Barcelona : Reverte, 2006.
34. **MATLAB.** *Fuzzy Logic Toolbox - Users Guide*. Nastic : MathWorks, 2016.
35. **SAATY, T. L.** *The Analytic Hierarchy Process*. New York : McGraw-Hill, 1980.

36. **SAATY, T. L. y KEARNS, K. P.** The Analytic Hierarchy Process. [aut. libro] K. P. Kearns y T. L. Saaty. *Analytical Planing - The Organization of Systems*. s.l. : Elsevier, 1985, págs. 19-62.
37. **HERNÁNDEZ, K. O.** *Criterio de resistencia al corte de las discontinuidades rocosas*. [Tesis]. Madrid : Universidad Politécnica de Madrid, 2014. págs. 10-28.
38. **SINGH, G. S. y SINGH, U. K.** *Assessment of goaf characteristics and compaction in longwall caving*. 4, 2011, Mining Technology, Vol. 120, págs. 222-232.
39. **WENZEL, O.** *Estratigrafía de las series carboníferas de Arauco*. s.l. : III Congreso Geológico Chileno, 1982. págs. 256-279.
40. **GONZÁLEZ DE VALLEJO, L.** Propiedades físicas y mecánicas de los materiales rocosos. [aut. libro] I. González de Vallejo. *Ingeniería Geológica*. s.l. : Pearson Education, 2002, págs. 125-140.
41. **CARIDE DE LINAN, C. A.** Clasificación de las rocas y propiedades físicas principales. [aut. libro] C. A. Caride de Linan. *Manual de perforación y voladura de rocas*. Madrid : Instituto Tecnológico Geominero de España, 1994, págs. 18-23.
42. **RANA, M.S. y AL HUMAIDAN, F.S.** Statistical data on worldwide coal reserves, production, consumption, and future demand. [aut. libro] M.R. Riazi y R. Gupta. *Coal production and processing technology*. London : Taylor & Francis Group, 2016, págs. 31-49

11 Anexos

Anexo A. Aplicación AHP a Calidad de la Mena

Las reglas difusas son justificadas mediante el porcentaje obtenido en el método de AHP. La contribución por separado de cada variable minera, dependiendo de la categoría en la que se encuentre el valor, en suma, define la calidad de la mena. Una vez obtenidos los resultados, son programados en Matlab en la aplicación **Fuzzy Logic Designer**, como se presenta en las siguientes tablas.

Tabla A-44. Reglas difusas para la calidad de la mena, regla 1 a la 30

#	Ancho Veta	Uniformidad	Extensión	Inmersión	Porcentaje Calidad	Calidad Mena
1	muy delgado	muy poco u	muy pequeña	muy alto	10,4%	muy baja
2	muy delgado	muy poco u	muy pequeña	alto	18,6%	muy baja
3	muy delgado	muy poco u	muy pequeña	medio	26,8%	baja
4	muy delgado	muy poco u	muy pequeña	bajo	46,5%	media
5	muy delgado	muy poco u	muy pequeña	muy bajo	58,5%	media
6	muy delgado	muy poco u	pequeña	muy alto	12,3%	muy baja
7	muy delgado	muy poco u	pequeña	alto	20,5%	baja
8	muy delgado	muy poco u	pequeña	medio	28,7%	baja
9	muy delgado	muy poco u	pequeña	bajo	48,4%	media
10	muy delgado	muy poco u	pequeña	muy bajo	60,5%	buena
11	muy delgado	muy poco u	mediana	muy alto	14,3%	muy baja
12	muy delgado	muy poco u	mediana	alto	22,5%	muy baja
13	muy delgado	muy poco u	mediana	medio	30,7%	baja
14	muy delgado	muy poco u	mediana	bajo	50,4%	media
15	muy delgado	muy poco u	mediana	muy bajo	62,4%	buena
16	muy delgado	muy poco u	grande	muy alto	16,3%	muy baja
17	muy delgado	muy poco u	grande	alto	24,5%	baja
18	muy delgado	muy poco u	grande	medio	32,7%	baja
19	muy delgado	muy poco u	grande	bajo	52,4%	media
20	muy delgado	muy poco u	grande	muy bajo	64,4%	buena
21	muy delgado	muy poco u	muy grande	muy alto	18,2%	muy baja
22	muy delgado	muy poco u	muy grande	alto	26,4%	baja
23	muy delgado	muy poco u	muy grande	medio	34,6%	baja
24	muy delgado	muy poco u	muy grande	bajo	54,3%	media
25	muy delgado	muy poco u	muy grande	muy bajo	66,3%	buena
26	muy delgado	poco unifor	muy pequeña	muy alto	14,6%	muy baja
27	muy delgado	poco unifor	muy pequeña	alto	22,8%	baja
28	muy delgado	poco unifor	muy pequeña	medio	31,0%	baja
29	muy delgado	poco unifor	muy pequeña	bajo	50,7%	media
30	muy delgado	poco unifor	muy pequeña	muy bajo	62,7%	buena

Tabla A - 45. Reglas difusas para la calidad de la mena, regla 31 a la 80

#	Ancho Veta	Uniformidad	Extensión	Inmersión	Porcentaje Calidad	Calidad Mena
31	muy delgado	poco unifor	pequeña	muy alto	16,5%	muy baja
32	muy delgado	poco unifor	pequeña	alto	24,7%	baja
33	muy delgado	poco unifor	pequeña	medio	32,9%	baja
34	muy delgado	poco unifor	pequeña	bajo	52,6%	media
35	muy delgado	poco unifor	pequeña	muy bajo	64,7%	buena
36	muy delgado	poco unifor	mediana	muy alto	18,5%	muy baja
37	muy delgado	poco unifor	mediana	alto	26,7%	baja
38	muy delgado	poco unifor	mediana	medio	34,9%	baja
39	muy delgado	poco unifor	mediana	bajo	54,6%	media
40	muy delgado	poco unifor	mediana	muy bajo	66,6%	buena
41	muy delgado	poco unifor	grande	muy alto	20,5%	baja
42	muy delgado	poco unifor	grande	alto	28,7%	baja
43	muy delgado	poco unifor	grande	medio	36,9%	baja
44	muy delgado	poco unifor	grande	bajo	56,6%	media
45	muy delgado	poco unifor	grande	muy bajo	68,6%	buena
46	muy delgado	poco unifor	muy grande	muy alto	22,4%	baja
47	muy delgado	poco unifor	muy grande	alto	30,6%	baja
48	muy delgado	poco unifor	muy grande	medio	38,8%	baja
49	muy delgado	poco unifor	muy grande	bajo	58,5%	media
50	muy delgado	poco unifor	muy grande	muy bajo	70,5%	buena
51	muy delgado	semi unifor	muy pequeña	muy alto	18,8%	muy baja
52	muy delgado	semi unifor	muy pequeña	alto	27,0%	baja
53	muy delgado	semi unifor	muy pequeña	medio	35,2%	baja
54	muy delgado	semi unifor	muy pequeña	bajo	54,9%	media
55	muy delgado	semi unifor	muy pequeña	muy bajo	66,9%	buena
56	muy delgado	semi unifor	pequeña	muy alto	20,8%	baja
57	muy delgado	semi unifor	pequeña	alto	29,0%	baja
58	muy delgado	semi unifor	pequeña	medio	37,2%	baja
59	muy delgado	semi unifor	pequeña	bajo	56,9%	media
60	muy delgado	semi unifor	pequeña	muy bajo	68,9%	buena
61	muy delgado	semi unifor	mediana	muy alto	22,7%	baja
62	muy delgado	semi unifor	mediana	alto	30,9%	baja
63	muy delgado	semi unifor	mediana	medio	39,1%	baja
64	muy delgado	semi unifor	mediana	bajo	58,8%	media
65	muy delgado	semi unifor	mediana	muy bajo	70,8%	buena
66	muy delgado	semi unifor	grande	muy alto	24,7%	baja
67	muy delgado	semi unifor	grande	alto	32,9%	baja
68	muy delgado	semi unifor	grande	medio	41,1%	media
69	muy delgado	semi unifor	grande	bajo	60,8%	media
70	muy delgado	semi unifor	grande	muy bajo	72,8%	buena
71	muy delgado	semi unifor	muy grande	muy alto	26,6%	baja
72	muy delgado	semi unifor	muy grande	alto	34,8%	baja
73	muy delgado	semi unifor	muy grande	medio	43,0%	media
74	muy delgado	semi unifor	muy grande	bajo	62,7%	buena
75	muy delgado	semi unifor	muy grande	muy bajo	74,8%	buena
76	muy delgado	bien unifor	muy pequeña	muy alto	23,0%	baja
77	muy delgado	bien unifor	muy pequeña	alto	31,2%	baja
78	muy delgado	bien unifor	muy pequeña	medio	39,4%	baja
79	muy delgado	bien unifor	muy pequeña	bajo	59,1%	media
80	muy delgado	bien unifor	muy pequeña	muy bajo	71,1%	buena

Tabla A - 46. Reglas difusas para la calidad de la mena, regla 81 a la 130

#	Ancho Veta	Uniformidad	Extensión	Inmersión	Porcentaje Calidad	Calidad Mena
81	muy delgado	bien unifor	pequeña	muy alto	25,0%	baja
82	muy delgado	bien unifor	pequeña	alto	33,2%	baja
83	muy delgado	bien unifor	pequeña	medio	41,4%	media
84	muy delgado	bien unifor	pequeña	bajo	61,1%	buena
85	muy delgado	bien unifor	pequeña	muy bajo	73,1%	buena
86	muy delgado	bien unifor	mediana	muy alto	26,9%	baja
87	muy delgado	bien unifor	mediana	alto	35,1%	baja
88	muy delgado	bien unifor	mediana	medio	43,3%	media
89	muy delgado	bien unifor	mediana	bajo	63,0%	buena
90	muy delgado	bien unifor	mediana	muy bajo	75,0%	buena
91	muy delgado	bien unifor	grande	muy alto	28,9%	baja
92	muy delgado	bien unifor	grande	alto	37,1%	baja
93	muy delgado	bien unifor	grande	medio	45,3%	media
94	muy delgado	bien unifor	grande	bajo	65,0%	buena
95	muy delgado	bien unifor	grande	muy bajo	77,0%	buena
96	muy delgado	bien unifor	muy grande	muy alto	30,8%	baja
97	muy delgado	bien unifor	muy grande	alto	39,0%	baja
98	muy delgado	bien unifor	muy grande	medio	47,2%	media*
99	muy delgado	bien unifor	muy grande	bajo	66,9%	buena
100	muy delgado	bien unifor	muy grande	muy bajo	79,0%	buena
101	muy delgado	muy bien u	muy pequeña	muy alto	27,2%	baja
102	muy delgado	muy bien u	muy pequeña	alto	35,4%	baja
103	muy delgado	muy bien u	muy pequeña	medio	43,6%	media
104	muy delgado	muy bien u	muy pequeña	bajo	63,3%	buena
105	muy delgado	muy bien u	muy pequeña	muy bajo	75,3%	buena
106	muy delgado	muy bien u	pequeña	muy alto	29,2%	baja
107	muy delgado	muy bien u	pequeña	alto	37,4%	baja
108	muy delgado	muy bien u	pequeña	medio	45,6%	media
109	muy delgado	muy bien u	pequeña	bajo	65,3%	buena
110	muy delgado	muy bien u	pequeña	muy bajo	75,3%	buena
111	muy delgado	muy bien u	mediana	muy alto	31,1%	baja
112	muy delgado	muy bien u	mediana	alto	39,3%	baja
113	muy delgado	muy bien u	mediana	medio	47,5%	media
114	muy delgado	muy bien u	mediana	bajo	67,2%	buena
115	muy delgado	muy bien u	mediana	muy bajo	79,3%	buena
116	muy delgado	muy bien u	grande	muy alto	33,1%	baja
117	muy delgado	muy bien u	grande	alto	41,3%	media
118	muy delgado	muy bien u	grande	medio	49,5%	media
119	muy delgado	muy bien u	grande	bajo	69,2%	buena
120	muy delgado	muy bien u	grande	muy bajo	81,2%	muy buena
121	muy delgado	muy bien u	muy grande	muy alto	35,0%	baja
122	muy delgado	muy bien u	muy grande	alto	43,2%	media
123	muy delgado	muy bien u	muy grande	medio	51,4%	media
124	muy delgado	muy bien u	muy grande	bajo	71,1%	buena
125	muy delgado	muy bien u	muy grande	muy bajo	83,2%	muy buena
126	delgado	muy poco u	muy pequeña	muy alto	14,6%	muy baja
127	delgado	muy poco u	muy pequeña	alto	18,6%	muy baja
128	delgado	muy poco u	muy pequeña	medio	26,8%	baja
129	delgado	muy poco u	muy pequeña	bajo	46,5%	media
130	delgado	muy poco u	muy pequeña	muy bajo	58,5%	media

Tabla A - 47. Reglas difusas para la calidad de la mena, regla 131 a la 180

#	Ancho Veta	Uniformidad	Extensión	Inmersión	Porcentaje Calidad	Calidad Mena
131	delgado	muy poco u	pequeña	muy alto	16,5%	muy baja
132	delgado	muy poco u	pequeña	alto	24,7%	baja
133	delgado	muy poco u	pequeña	medio	32,9%	baja
134	delgado	muy poco u	pequeña	bajo	52,6%	media
135	delgado	muy poco u	pequeña	muy bajo	64,7%	buena
136	delgado	muy poco u	mediana	muy alto	18,5%	muy baja
137	delgado	muy poco u	mediana	alto	26,7%	baja
138	delgado	muy poco u	mediana	medio	34,9%	baja
139	delgado	muy poco u	mediana	bajo	54,6%	media
140	delgado	muy poco u	mediana	muy bajo	66,6%	buena
141	delgado	muy poco u	grande	muy alto	20,5%	baja
142	delgado	muy poco u	grande	alto	28,7%	baja
143	delgado	muy poco u	grande	medio	36,9%	baja
144	delgado	muy poco u	grande	bajo	56,6%	media
145	delgado	muy poco u	grande	muy bajo	68,6%	buena
146	delgado	muy poco u	muy grande	muy alto	22,4%	baja
147	delgado	muy poco u	muy grande	alto	30,6%	baja
148	delgado	muy poco u	muy grande	medio	38,8%	baja
149	delgado	muy poco u	muy grande	bajo	58,5%	media
150	delgado	muy poco u	muy grande	muy bajo	70,5%	buena
151	delgado	poco unifor	muy pequeña	muy alto	18,8%	muy baja
152	delgado	poco unifor	muy pequeña	alto	27,0%	baja
153	delgado	poco unifor	muy pequeña	medio	35,2%	baja
154	delgado	poco unifor	muy pequeña	bajo	54,9%	media
155	delgado	poco unifor	muy pequeña	muy bajo	62,7%	buena
156	delgado	poco unifor	pequeña	muy alto	20,8%	baja
157	delgado	poco unifor	pequeña	alto	29,0%	baja
158	delgado	poco unifor	pequeña	medio	37,2%	baja
159	delgado	poco unifor	pequeña	bajo	56,9%	media
160	delgado	poco unifor	pequeña	muy bajo	68,9%	buena
161	delgado	poco unifor	mediana	muy alto	22,7%	baja
162	delgado	poco unifor	mediana	alto	30,9%	baja
163	delgado	poco unifor	mediana	medio	39,1%	baja
164	delgado	poco unifor	mediana	bajo	58,8%	media
165	delgado	poco unifor	mediana	muy bajo	70,8%	buena
166	delgado	poco unifor	grande	muy alto	24,7%	baja
167	delgado	poco unifor	grande	alto	32,9%	baja
168	delgado	poco unifor	grande	medio	41,1%	media
169	delgado	poco unifor	grande	bajo	60,8%	buena
170	delgado	poco unifor	grande	muy bajo	72,8%	buena
171	delgado	poco unifor	muy grande	muy alto	26,6%	baja
172	delgado	poco unifor	muy grande	alto	34,8%	baja
173	delgado	poco unifor	muy grande	medio	43,0%	media
174	delgado	poco unifor	muy grande	bajo	62,7%	buena
175	delgado	poco unifor	muy grande	muy bajo	74,8%	buena
176	delgado	semi unifor	muy pequeña	muy alto	23,0%	baja
177	delgado	semi unifor	muy pequeña	alto	31,2%	baja
178	delgado	semi unifor	muy pequeña	medio	39,4%	baja
179	delgado	semi unifor	muy pequeña	bajo	59,1%	media
180	delgado	semi unifor	muy pequeña	muy bajo	71,1%	buena

Tabla A - 48. Reglas difusas para la calidad de la mena, regla 181 a la 230

#	Ancho Veta	Uniformidad	Extensión	Inmersión	Porcentaje Calidad	Calidad Mena
181	delgado	semi unifor	pequeña	muy alto	25,0%	baja
182	delgado	semi unifor	pequeña	alto	33,2%	baja
183	delgado	semi unifor	pequeña	medio	41,4%	media
184	delgado	semi unifor	pequeña	bajo	61,1%	buena
185	delgado	semi unifor	pequeña	muy bajo	73,1%	buena
186	delgado	semi unifor	mediana	muy alto	26,9%	baja
187	delgado	semi unifor	mediana	alto	35,1%	baja
188	delgado	semi unifor	mediana	medio	43,3%	media
189	delgado	semi unifor	mediana	bajo	63,0%	buena
190	delgado	semi unifor	mediana	muy bajo	75,0%	buena
191	delgado	semi unifor	grande	muy alto	28,9%	baja
192	delgado	semi unifor	grande	alto	37,1%	baja
193	delgado	semi unifor	grande	medio	45,3%	media
194	delgado	semi unifor	grande	bajo	65,0%	buena
195	delgado	semi unifor	grande	muy bajo	77,0%	buena
196	delgado	semi unifor	muy grande	muy alto	30,8%	baja
197	delgado	semi unifor	muy grande	alto	39,0%	baja
198	delgado	semi unifor	muy grande	medio	47,2%	media
199	delgado	semi unifor	muy grande	bajo	66,9%	buena
200	delgado	semi unifor	muy grande	muy bajo	79,0%	buena
201	delgado	bien unifor	muy pequeña	muy alto	27,2%	baja
202	delgado	bien unifor	muy pequeña	alto	35,4%	baja
203	delgado	bien unifor	muy pequeña	medio	43,6%	media
204	delgado	bien unifor	muy pequeña	bajo	63,3%	buena
205	delgado	bien unifor	muy pequeña	muy bajo	75,3%	buena
206	delgado	bien unifor	pequeña	muy alto	29,2%	baja
207	delgado	bien unifor	pequeña	alto	37,4%	baja
208	delgado	bien unifor	pequeña	medio	45,6%	media
209	delgado	bien unifor	pequeña	bajo	65,3%	buena
210	delgado	bien unifor	pequeña	muy bajo	77,3%	buena
211	delgado	bien unifor	mediana	muy alto	31,1%	baja
212	delgado	bien unifor	mediana	alto	39,3%	baja
213	delgado	bien unifor	mediana	medio	47,5%	media
214	delgado	bien unifor	mediana	bajo	67,2%	buena
215	delgado	bien unifor	mediana	muy bajo	79,3%	buena
216	delgado	bien unifor	grande	muy alto	33,1%	baja
217	delgado	bien unifor	grande	alto	41,3%	media
218	delgado	bien unifor	grande	medio	49,5%	media
219	delgado	bien unifor	grande	bajo	69,2%	buena
220	delgado	bien unifor	grande	muy bajo	81,2%	muy buena
221	delgado	bien unifor	muy grande	muy alto	35,0%	baja
222	delgado	bien unifor	muy grande	alto	43,2%	media
223	delgado	bien unifor	muy grande	medio	51,4%	media
224	delgado	bien unifor	muy grande	bajo	71,1%	buena
225	delgado	bien unifor	muy grande	muy bajo	83,2%	muy buena
226	delgado	muy bien u	muy pequeña	muy alto	31,4%	baja
227	delgado	muy bien u	muy pequeña	alto	39,6%	baja
228	delgado	muy bien u	muy pequeña	medio	47,8%	media
229	delgado	muy bien u	muy pequeña	bajo	67,5%	buena
230	delgado	muy bien u	muy pequeña	muy bajo	79,5%	buena

Tabla A - 49.Reglas difusas para la calidad de la mena, regla 231 a la 280

#	Ancho Veta	Uniformidad	Extensión	Inmersión	Porcentaje Calidad	Calidad Mena
231	delgado	muy bien u	pequeña	muy alto	33,4%	baja
232	delgado	muy bien u	pequeña	alto	41,6%	media
233	delgado	muy bien u	pequeña	medio	49,8%	media
234	delgado	muy bien u	pequeña	bajo	69,5%	buena
235	delgado	muy bien u	pequeña	muy bajo	81,5%	muy buena
236	delgado	muy bien u	mediana	muy alto	35,3%	baja
237	delgado	muy bien u	mediana	alto	43,5%	media
238	delgado	muy bien u	mediana	medio	51,7%	media
239	delgado	muy bien u	mediana	bajo	71,4%	buena
240	delgado	muy bien u	mediana	muy bajo	83,5%	muy buena
241	delgado	muy bien u	grande	muy alto	37,3%	baja
242	delgado	muy bien u	grande	alto	45,5%	media
243	delgado	muy bien u	grande	medio	53,7%	media
244	delgado	muy bien u	grande	bajo	73,4%	buena
245	delgado	muy bien u	grande	muy bajo	85,4%	muy buena
246	delgado	muy bien u	muy grande	muy alto	39,3%	baja
247	delgado	muy bien u	muy grande	alto	47,5%	media
248	delgado	muy bien u	muy grande	medio	55,7%	media
249	delgado	muy bien u	muy grande	bajo	75,4%	buena
250	delgado	muy bien u	muy grande	muy bajo	87,4%	muy buena
251	medio	muy poco u	muy pequeña	muy alto	18,8%	muy baja
252	medio	muy poco u	muy pequeña	alto	27,0%	baja
253	medio	muy poco u	muy pequeña	medio	35,2%	baja
254	medio	muy poco u	muy pequeña	bajo	54,9%	media
255	medio	muy poco u	muy pequeña	muy bajo	66,9%	buena
256	medio	muy poco u	pequeña	muy alto	20,8%	baja
257	medio	muy poco u	pequeña	alto	29,0%	baja
258	medio	muy poco u	pequeña	medio	37,2%	baja
259	medio	muy poco u	pequeña	bajo	56,9%	media
260	medio	muy poco u	pequeña	muy bajo	68,9%	buena
261	medio	muy poco u	mediana	muy alto	22,7%	baja
262	medio	muy poco u	mediana	alto	30,9%	baja
263	medio	muy poco u	mediana	medio	39,1%	baja
264	medio	muy poco u	mediana	bajo	58,8%	media
265	medio	muy poco u	mediana	muy bajo	70,8%	buena
266	medio	muy poco u	grande	muy alto	24,7%	baja
267	medio	muy poco u	grande	alto	32,9%	baja
268	medio	muy poco u	grande	medio	41,1%	media
269	medio	muy poco u	grande	bajo	60,8%	buena
270	medio	muy poco u	grande	muy bajo	72,8%	buena
271	medio	muy poco u	muy grande	muy alto	26,6%	baja
272	medio	muy poco u	muy grande	alto	34,8%	baja
273	medio	muy poco u	muy grande	medio	43,0%	media
274	medio	muy poco u	muy grande	bajo	62,7%	buena
275	medio	muy poco u	muy grande	muy bajo	74,8%	buena
276	medio	poco unifor	muy pequeña	muy alto	23,0%	baja
277	medio	poco unifor	muy pequeña	alto	31,2%	baja
278	medio	poco unifor	muy pequeña	medio	39,4%	baja
279	medio	poco unifor	muy pequeña	bajo	59,1%	media
280	medio	poco unifor	muy pequeña	muy bajo	71,1%	buena

Tabla A - 50. Reglas difusas para la calidad de la mena, regla 281 a la 330

#	Ancho Veta	Uniformidad	Extensión	Inmersión	Porcentaje Calidad	Calidad Mena
281	medio	poco unifor	pequeña	muy alto	25,0%	baja
282	medio	poco unifor	pequeña	alto	33,2%	baja
283	medio	poco unifor	pequeña	medio	41,4%	media
284	medio	poco unifor	pequeña	bajo	61,1%	buena
285	medio	poco unifor	pequeña	muy bajo	73,1%	buena
286	medio	poco unifor	mediana	muy alto	26,9%	baja
287	medio	poco unifor	mediana	alto	35,1%	baja
288	medio	poco unifor	mediana	medio	43,3%	media
289	medio	poco unifor	mediana	bajo	63,0%	buena
290	medio	poco unifor	mediana	muy bajo	75,0%	buena
291	medio	poco unifor	grande	muy alto	28,9%	baja
292	medio	poco unifor	grande	alto	37,1%	baja
293	medio	poco unifor	grande	medio	45,3%	media
294	medio	poco unifor	grande	bajo	65,0%	buena
295	medio	poco unifor	grande	muy bajo	77,0%	buena
296	medio	poco unifor	muy grande	muy alto	30,8%	baja
297	medio	poco unifor	muy grande	alto	39,0%	baja
298	medio	poco unifor	muy grande	medio	47,2%	media
299	medio	poco unifor	muy grande	bajo	66,9%	buena
300	medio	poco unifor	muy grande	muy bajo	79,0%	buena
301	medio	semi unifor	muy pequeña	muy alto	27,2%	baja
302	medio	semi unifor	muy pequeña	alto	35,4%	baja
303	medio	semi unifor	muy pequeña	medio	43,6%	media
304	medio	semi unifor	muy pequeña	bajo	63,3%	buena
305	medio	semi unifor	muy pequeña	muy bajo	75,3%	buena
306	medio	semi unifor	pequeña	muy alto	29,2%	baja
307	medio	semi unifor	pequeña	alto	37,4%	baja
308	medio	semi unifor	pequeña	medio	45,6%	media
309	medio	semi unifor	pequeña	bajo	65,3%	buena
310	medio	semi unifor	pequeña	muy bajo	77,3%	buena
311	medio	semi unifor	mediana	muy alto	31,1%	baja
312	medio	semi unifor	mediana	alto	39,3%	baja
313	medio	semi unifor	mediana	medio	47,5%	media
314	medio	semi unifor	mediana	bajo	67,2%	buena
315	medio	semi unifor	mediana	muy bajo	79,3%	buena
316	medio	semi unifor	grande	muy alto	33,1%	baja
317	medio	semi unifor	grande	alto	41,3%	media
318	medio	semi unifor	grande	medio	49,5%	media
319	medio	semi unifor	grande	bajo	69,2%	buena
320	medio	semi unifor	grande	muy bajo	81,2%	muy buena
321	medio	semi unifor	muy grande	muy alto	35,0%	baja
322	medio	semi unifor	muy grande	alto	43,2%	media
323	medio	semi unifor	muy grande	medio	51,4%	media
324	medio	semi unifor	muy grande	bajo	71,1%	buena
325	medio	semi unifor	muy grande	muy bajo	83,2%	muy buena
326	medio	bien unifor	muy pequeña	muy alto	31,4%	baja
327	medio	bien unifor	muy pequeña	alto	39,6%	baja
328	medio	bien unifor	muy pequeña	medio	47,8%	media
329	medio	bien unifor	muy pequeña	bajo	67,5%	buena
330	medio	bien unifor	muy pequeña	muy bajo	79,5%	buena

Tabla A - 51. Reglas difusas para la calidad de la mena, regla 331 a la 375

#	Ancho Veta	Uniformidad	Extensión	Inmersión	Porcentaje Calidad	Calidad Mena
331	medio	bien unifor	pequeña	muy alto	33,4%	baja
332	medio	bien unifor	pequeña	alto	41,6%	media
333	medio	bien unifor	pequeña	medio	49,8%	media
334	medio	bien unifor	pequeña	bajo	69,5%	buena
335	medio	bien unifor	pequeña	muy bajo	81,5%	muy buena
336	medio	bien unifor	mediana	muy alto	35,3%	baja
337	medio	bien unifor	mediana	alto	43,5%	media
338	medio	bien unifor	mediana	medio	51,7%	media
339	medio	bien unifor	mediana	bajo	71,4%	buena
340	medio	bien unifor	mediana	muy bajo	83,5%	muy buena
341	medio	bien unifor	grande	muy alto	37,3%	baja
342	medio	bien unifor	grande	alto	45,5%	media
343	medio	bien unifor	grande	medio	53,7%	media
344	medio	bien unifor	grande	bajo	73,4%	buena
345	medio	bien unifor	grande	muy bajo	85,4%	muy buena
346	medio	bien unifor	muy grande	muy alto	39,3%	baja
347	medio	bien unifor	muy grande	alto	47,5%	media
348	medio	bien unifor	muy grande	medio	55,7%	media
349	medio	bien unifor	muy grande	bajo	75,4%	buena
350	medio	bien unifor	muy grande	muy bajo	87,4%	muy buena
351	medio	muy bien u	muy pequeña	muy alto	35,6%	baja
352	medio	muy bien u	muy pequeña	alto	43,8%	media
353	medio	muy bien u	muy pequeña	medio	52,0%	media
354	medio	muy bien u	muy pequeña	bajo	71,7%	buena
355	medio	muy bien u	muy pequeña	muy bajo	83,8%	muy buena
356	medio	muy bien u	pequeña	muy alto	37,6%	baja
357	medio	muy bien u	pequeña	alto	45,8%	media
358	medio	muy bien u	pequeña	medio	54,0%	media
359	medio	muy bien u	pequeña	bajo	73,7%	buena
360	medio	muy bien u	pequeña	muy bajo	85,7%	muy buena
361	medio	muy bien u	mediana	muy alto	39,5%	baja
362	medio	muy bien u	mediana	alto	47,7%	media
363	medio	muy bien u	mediana	medio	55,9%	media
364	medio	muy bien u	mediana	bajo	75,6%	buena
365	medio	muy bien u	mediana	muy bajo	87,7%	muy buena
366	medio	muy bien u	grande	muy alto	41,5%	media
367	medio	muy bien u	grande	alto	49,7%	media
368	medio	muy bien u	grande	medio	57,9%	media
369	medio	muy bien u	grande	bajo	77,6%	buena
370	medio	muy bien u	grande	muy bajo	89,6%	muy buena
371	medio	muy bien u	muy grande	muy alto	43,5%	media
372	medio	muy bien u	muy grande	alto	51,7%	media
373	medio	muy bien u	muy grande	medio	59,9%	media
374	medio	muy bien u	muy grande	bajo	79,6%	buena
375	medio	muy bien u	muy grande	muy bajo	91,6%	muy buena


Anexo B. Aplicación AHP a calidad de la roca

Para la programación de las reglas difusas de la calidad de la roca se presentan los siguientes cálculos y resultados. Estos datos también son programados en Matlab.

Tabla B - 52. Intensidad de prioridad para las variables mineras de calidad de roca

Criterios	Piso	Techo	Agua
Piso	1	1/3	4
Techo	3	1	5
Agua	1/4	1/5	1

Luego se tiene la matriz de comparación :



1	1/3	4
3	1	5
1/4	1/5	1

Al normalizar la matriz se tiene:

0,235 0,217 0,400

= (0,706 0,652 0,500)
0,059 0,130 0,100

Luego, el vector de prioridades ponderado \bar{w} de la matriz de comparación :

0,284

$\bar{w} = (0,619) 0,096$

0,235 0,217 0,400 0,284 0,876

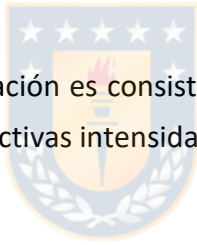
$\bar{w} = (0,706 0,652 0,500) (0,619) = (1,954)$
0,059 0,130 0,100 0,096 0,291

Por ende, se sabe:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

Para la razón de consistencia se tiene:

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0,061}{0,10} = 0,61 < 0,10$$



Por lo tanto, la matriz de comparación es consistente dentro del rango aceptable por AHP y se acepta para los criterios con las respectivas intensidades de importancia propuestas.

Tabla B - 53. Ponderaciones para las variables mineras de calidad de la roca

Prioridades ponderadas por AHP		
Calidad del piso	Calidad del techo	Entrada de agua
28,4 %	61,9 %	9,6 %

Las ponderaciones son distribuidas en las diferentes variables lingüísticas para establecer las reglas difusas de la calidad de la roca, como se mostró en la Tabla 20. La suma de la contribución de las variables lingüísticas define, entonces, la calidad de la roca y luego, con base en el porcentaje obtenido, se categoriza según su calidad.

Tabla B - 54. Calidad de la roca en base al porcentaje obtenido por las variables lingüísticas

Calidad de la roca (%)				
Muy baja	Baja	Media	Buena	Muy buena
0–20	20–40	40–60	60–80	80 – 100

Tabla B - 55. Reglas difusas para la calidad de la roca, regla 1 a la 30

#	Piso	Techo	Agua	Porcentaje	Calidad Roca
1	inestable	débil	muy alta	7,1%	muy baja
2	inestable	débil	alta	9,5%	muy baja
3	inestable	débil	media	11,9%	muy baja
4	inestable	débil	pequeña	14,3%	muy baja
5	inestable	bastante est	muy alta	27,5%	baja
6	inestable	bastante est	alta	29,9%	baja
7	inestable	bastante est	media	32,3%	baja
8	inestable	bastante est	pequeña	34,7%	baja
9	inestable	semi estable	muy alta	64,3%	buena
10	inestable	semi estable	alta	66,8%	buena
11	inestable	semi estable	media	69,2%	buena
12	inestable	semi estable	pequeña	71,6%	buena
13	inestable	estable	muy alta	27,5%	baja
14	inestable	estable	alta	29,9%	baja
15	inestable	estable	media	32,3%	baja
16	inestable	estable	pequeña	34,7%	baja
17	inestable	muy firme	muy alta	9,5%	muy baja
18	inestable	muy firme	alta	11,9%	muy baja
19	inestable	muy firme	media	14,3%	muy baja
20	inestable	muy firme	pequeña	16,7%	muy baja
21	poco estable	débil	muy alta	7,1%	muy baja
22	poco estable	débil	alta	9,5%	muy baja
23	poco estable	débil	media	11,9%	muy baja
24	poco estable	débil	pequeña	14,3%	muy baja
25	poco estable	bastante est	muy alta	27,5%	baja
26	poco estable	bastante est	alta	29,9%	baja
27	poco estable	bastante est	media	32,3%	baja
28	poco estable	bastante est	pequeña	34,7%	baja
29	poco estable	semi estable	muy alta	64,3%	buena
30	poco estable	semi estable	alta	66,8%	buena

Tabla B - 56. Reglas difusas para la calidad de la roca, regla 31 a la 70

#	Piso	Techo	Agua	Porcentaje	Calidad Roca
31	poco estable	semi estable	media	69,2%	buena
32	poco estable	semi estable	pequeña	71,6%	buena
33	poco estable	estable	muy alta	27,5%	baja
34	poco estable	estable	alta	29,9%	baja
35	poco estable	estable	media	32,3%	baja
36	poco estable	estable	pequeña	34,7%	baja
37	poco estable	muy firme	muy alta	9,5%	muy baja
38	poco estable	muy firme	alta	11,9%	muy baja
39	poco estable	muy firme	media	14,3%	muy baja
40	poco estable	muy firme	pequeña	16,7%	muy baja
41	semi estable	débil	muy alta	24,2%	baja
42	semi estable	débil	alta	26,6%	baja
43	semi estable	débil	media	29,0%	baja
44	semi estable	débil	pequeña	31,4%	baja
45	semi estable	bastante est	muy alta	44,6%	media
46	semi estable	bastante est	alta	47,0%	media
47	semi estable	bastante est	media	49,4%	media
48	semi estable	bastante est	pequeña	51,8%	media
49	semi estable	semi estable	muy alta	81,4%	muy buena
50	semi estable	semi estable	alta	83,8%	muy buena
51	semi estable	semi estable	media	86,2%	muy buena
52	semi estable	semi estable	pequeña	88,6%	muy buena
53	semi estable	estable	muy alta	44,6%	media
54	semi estable	estable	alta	47,0%	media
55	semi estable	estable	media	49,4%	media
56	semi estable	estable	pequeña	51,8%	media
57	semi estable	muy firme	muy alta	26,5%	baja
58	semi estable	muy firme	alta	28,9%	baja
59	semi estable	muy firme	media	31,4%	baja
60	semi estable	muy firme	pequeña	33,8%	baja
61	estable	débil	muy alta	29,8%	baja
62	estable	débil	alta	32,2%	baja
63	estable	débil	media	34,7%	baja
64	estable	débil	pequeña	37,1%	baja
65	estable	bastante est	muy alta	50,2%	media
66	estable	bastante est	alta	52,6%	media
67	estable	bastante est	media	55,1%	media
68	estable	bastante est	pequeña	57,5%	media
69	estable	semi estable	muy alta	87,1%	muy buena
70	estable	semi estable	alta	89,5%	muy buena

Tabla B - 57. Reglas difusas para la calidad de la roca, regla 71 a la 100

#	Piso	Techo	Agua	Porcentaje	Calidad Roca
71	estable	semi estable	media	91,9%	muy buena
72	estable	semi estable	pequeña	94,3%	muy buena
73	estable	estable	muy alta	50,2%	media
74	estable	estable	alta	52,6%	media
75	estable	estable	media	55,1%	media
76	estable	estable	pequeña	57,5%	media
77	estable	muy firme	muy alta	32,2%	baja
78	estable	muy firme	alta	34,6%	baja
79	estable	muy firme	media	37,0%	baja
80	estable	muy firme	pequeña	39,5%	baja
81	muy estable	débil	muy alta	35,5%	baja
82	muy estable	débil	alta	37,9%	baja
83	muy estable	débil	media	40,3%	media
84	muy estable	débil	pequeña	42,8%	media
85	muy estable	bastante est	muy alta	55,9%	media
86	muy estable	bastante est	alta	58,3%	media
87	muy estable	bastante est	media	60,7%	buena
88	muy estable	bastante est	pequeña	63,2%	buena
89	muy estable	semi estable	muy alta	92,8%	muy buena
90	muy estable	semi estable	alta	95,2%	muy buena
91	muy estable	semi estable	media	97,6%	muy buena
92	muy estable	semi estable	pequeña	100,0%	muy buena
93	muy estable	estable	muy alta	55,9%	media
94	muy estable	estable	alta	58,3%	media
95	muy estable	estable	media	60,7%	buena
96	muy estable	estable	pequeña	63,2%	buena
97	muy estable	muy firme	muy alta	37,9%	baja
98	muy estable	muy firme	alta	40,3%	media
99	muy estable	muy firme	media	42,7%	media
100	muy estable	muy firme	pequeña	45,1%	media

Anexo C. Reglas difusas para la capacidad de mecanización

La situación para la capacidad de mecanización se presenta a través de la contribución de las calidades tanto de la mena como de la roca.

Tabla C - 58. Reglas difusas para la capacidad de mecanización

#	Mena	Roca	Porcentaje	Mecanización
1	muy baja	muy baja	6,0%	muy baja
2	muy baja	baja	9,3%	muy baja
3	muy baja	media	16,3%	muy baja
4	muy baja	buena	31,1%	baja
5	muy baja	muy buena	53,2%	media
6	baja	muy baja	6,5%	muy baja
7	baja	baja	9,8%	muy baja
8	baja	media	16,9%	muy baja
9	baja	buena	31,6%	baja
10	baja	muy buena	53,7%	media
11	media	muy baja	13,5%	muy baja
12	media	baja	16,8%	muy baja
13	media	media	23,8%	baja
14	media	buena	38,6%	baja
15	media	muy buena	60,7%	media
16	buena	muy baja	35,3%	baja
17	buena	baja	38,6%	baja
18	buena	media	45,7%	media
19	buena	buena	60,4%	alta
20	buena	muy buena	82,5%	muy alta
21	muy buena	muy baja	52,8%	media
22	muy buena	baja	56,1%	media
23	muy buena	media	63,2%	alta
24	muy buena	buena	77,9%	alta
25	muy buena	muy buena	100,0%	muy alta

Estas reglas difusas se centran en el siguiente análisis:

Tabla C - 59. Intensidad de prioridad para las variables lingüísticas de calidad de la mena

Crterios	Muy baja	Baja	Media	Buena
Muy baja	1	1/3	1/5	1/7
Baja	3	1	1/3	1/5
Media	5	3	1	1/3
Buena	7	5	3	1

Tabla C - 60. Intensidad de prioridad para las variables lingüísticas de calidad de la roca

Criterios	Muy baja	Baja	Media	Buena
Muy baja	1	1	1/5	1/9
Baja	3	1	1/3	1/7
Media	5	3	1	1/5
Buena	9	7	5	1

La matriz de comparación para las variables lingüísticas de la calidad de la mena y la matriz de comparación para las variables lingüísticas de la calidad de la roca son:

1	1/3	1/5	1/7
3	1	1/3	1/5
5	3	1	1/3
7	5	3	1
1	1	1/5	1/9
3	1	1/3	1/5
5	3	1	1/3
9	7	5	1

Al normalizar la matriz A y B , respectivamente, se tiene:

0,063	0,036	0,044	0,085
0,438	0,536	0,662	0,597
0,063	0,083	0,031	0,076
0,563	0,583	0,765	0,688

Luego, el vector de prioridades ponderado w de la matriz de comparación :

				0,057		
				0,122		
				0,558		
	0,063	0,036	0,044	0,085	0,057	0,230
	0,188	0,107	0,074	0,119		0,122
	0,313	0,321	0,221	0,190 (0,202) = (0,198)		0,492
	0,438	0,536	0,662	0,597	0,558	2,356

Por lo tanto, se sabe:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \quad \sum_{k=1}^n \lambda_k = 1 \quad \sum_{l=1}^n \lambda_l = 1$$

Para la razón de consistencia se tiene:

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0,059}{0,650} = 0,090$$

0,059 < 0,10

Ahora, se sigue para el vector de prioridades ponderado \bar{w} de la matriz de comparación A :

$$\bar{w} = (0,213) \quad 0,650$$

0,063	0,083	0,031	0,076	0,063	0,252
0,063	0,083	0,051	0,098	0,074	0,301
0,103	0,250	0,153	0,130 (0,210) - (0,080)		
0,563	0,583	0,765	0,688	0,659	2,802

Así, se sabe:

$$\sum_{i=1}^4 a_{ij} = 1 \quad \sum_{j=1}^4 a_{ij} = 1 \quad \sum_{i=1}^4 a_{ij} = 1 \quad \sum_{j=1}^4 a_{ij} = 4,235$$

Para la razón de consistencia se tiene:

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0,079}{0,090} = 0,878 < 0,10$$

De esta forma se prueba la consistencia de ambas matrices. Tanto la calidad de la roca como de la mena presentan igual ponderación en su valor más alto, como se resume en las siguientes tablas.

Tabla C - 61. Ponderaciones de acuerdo con las variables lingüísticas de la calidad de la mena

calidad mena				
muy baja	baja	media	buena	muy buena
0-20	20-40	40-60	60-80	80 - 100
3,2%	3,7%	10,7%	32,5%	50,0%

Tabla C - 62. Ponderaciones de acuerdo con las variables lingüísticas de la calidad de la roca

Calidad roca				
Muy baja	Baja	Media	Buena	Muy buena
0-20	20-40	40-60	60-80	80 - 100
2,8%	6,1%	13,2%	27,9%	50,0%



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN - FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Hoja Resumen Memoria de Título

Título: Título: “Capacidad de mecanización de vetas de carbón de baja potencia por medio de lógica difusa en Matlab”		
Nombre Memorista: Juan Gabriel Fredes Tapia		
Modalidad	Investigación	Profesor (es) Patrocinante (s)
Concepto		 Prof. Roberto Fustos T.
Calificación		
Fecha	20-11-2020	
 Prof. Fernando Parada		Ingeniero Supervisor:
		Institución:
Comisión (Nombre y Firma)		
Prof. Jean Navarrete C.		Prof. Francisco Muñoz G.
Resumen		
<p>Poder determinar la capacidad de mecanización en vetas de carbón de baja potencia mediante un método sencillo y rápido se vuelve una herramienta útil para respaldar y ayudar en la toma de decisiones de proyectos mineros, sobre todo cuando se busca favorecer la producción y seguridad de la extracción de la veta.</p> <p>Por medio de la lógica difusa se puede trabajar bajo reglas y variables lingüísticas que permiten categorizar la veta mediante la utilización de variables mineras que la describen. El fin de esto es categorizar la veta de carbón de acuerdo con su capacidad de ser mecanizada, siendo estas categorías “muy baja”, “baja”, “media”, “alta” o “muy alta” capacidad.</p> <p>La metodología consiste en programar en Matlab todas las reglas difusas que se generan producto de la conjugación de las variables mineras involucradas en la mecanización de la veta. Dado que se pretende estudiar la capacidad para vetas de baja potencia, el método de explotación adecuado para estas condiciones es el método de longwall mining. Teniendo esto en cuenta, las variables mineras son analizadas y definidas por variables lingüísticas cuyos rangos son respaldados por sugerencias y estudios de diversos autores, y la teoría asociada a extraer vetas de carbón por este método de extracción. Las reglas difusas son respaldadas por AHP cuya matriz de consistencia se mantuvo dentro del rango, generando un total de 500 reglas.</p> <p>Por último, se analiza la capacidad de mecanización de sondajes en el sector de Curanilahue, Chile, donde debido a la falta de información, se proponen escenarios siendo el más favorable de una capacidad de 59% categorizado como capacidad “media”, el resto de los escenarios presentan capacidad de “muy bajas” y “bajas”, lo que sugiera que la capacidad de mecanización de este sector se ve muy perjudicado por las condiciones geológicas de la zona.</p>		