



UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BASICAS E INGENIERÍA

ÁREA ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y MATERIALES

LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN GEOLOGÍA AMBIENTAL

“METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DEL RIESGO DE DESPRENDIMIENTO INSTANTÁNEO DE CARBÓN Y GAS METANO, DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DE GALERÍAS EN UNA MINA SUBTERRÁNEA DE CARBÓN”

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO GEÓLOGO AMBIENTAL

PRESENTA:

DANAE VIGUERAS ESPÍNDOLA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ALBERTO BLANCO PIÑÓN (UAEH)

CO-DIRECTOR DE TESIS:

ING. JOSÉ ISRAEL VILLAREAL BARRAGÁN (GAN)

MINERAL DE LA REFORMA, MARZO DE 2016

Dedicatoria

A mi papá por todo el apoyo brindado a lo largo de mi formación, por esos empujoncitos que me daba para ser mejor cada día y hacer las cosas lo mejor que se puede. A mi hermana por el aliento y tener la paciencia de escucharme. A mi mamá y mi abuelita Alicia por su apoyo, su cariño y tiempo.

A toda mi familia que me ayudo a lo largo de mi vida. En especial a mi tía Rosa y sus consejos. Al tío Gabriel, él fue una inspiración constante para ser y hacer lo que más amo en esta vida.

A mi abuelita Elvira que donde quiera que esté, siempre la tengo presente y sé que siempre me cuida...

“Y AC dijo:

¡¡HÁGASE LA LUZ!!

Y la luz se hizo...”

Isaac Asimov

Agradecimientos

A mi director de tesis Dr. Alberto Blanco Piñón por la paciencia y la confianza en mí para este trabajo. Al Dr. Enrique Cruz Chávez que siempre estuvo allí para escucharme y regañarme cuando creí que abandonaría toda meta. Al Ing. José Alfredo Meneses Lugo por la paciencia y su buena disposición. Al Quim. Jorge Alberto Duran Hidalgo por sus comentarios y disposición, Al Dr. Eleazar Salinas Rodríguez por sus observaciones y tiempo. Al Dr. Juan Hernández Ávila por el tiempo de revisar mi trabajo y sus comentarios. Al Dr. José Cruz Escamilla Casas por los comentarios, las observaciones y críticas a mi trabajo.

Al Ing. José Israel Villareal Barragán por las atenciones, paciencia y tiempo de enseñarme aun cuando él se encontraba laborando durante mi estancia en Coahuila. Al Ing. Mario Alberto Alonso Rosales por su apoyo, motivación y amistad brindado durante mi estancia y aun después de mi partida. Al Ing. Roberto Carlos Gallegos Cruz "Robe" por ser mi amigo, apoyarme y escucharme. Al Ing. Armando Reyna Castillo por sus consejos y tiempo. Al Ing. Pedro Rangel Tristán por sus atenciones y motivación. Al Ing. Jesús Eduardo Rueda por la paciencia y buena disposición.

A la Señora Goyita y su familia por todas sus atenciones, por permitirme estar en su casa y el enorme cariño de su gran persona.

A todos aquellos que creyeron en mí y a los que no... también.

RESUMEN

Un desprendimiento instantáneo de gas y carbón es la expulsión de gas y carbón desde la frente de trabajo, acompañado de carbón pulverizado en combinación con metano (CH_4) y otros gases. La influencia de algunos factores como el contenido de gas, la geología del yacimiento, permeabilidad del carbón a la liberación de gas, dureza del carbón, etc., aumentan la presencia de un evento. Se considera que este fenómeno sólo afecta a la minería subterránea de carbón.

Este fenómeno se ha presentado en 16 países; dentro de estos se encuentra México; en nuestro país se tiene clasificada a la minería subterránea de carbón como aparte de los otros tipos de actividad extractiva, y está regulada en la Norma Oficial Mexicana NOM-032-STPS-2008, encargada de la seguridad en minas subterráneas de carbón, esta norma dedica un apartado al análisis de riesgo de desprendimientos instantáneos de gas metano y carbón. En el presente trabajo se elaboró el análisis de riesgo establecido en la norma, y se incorporó información que sirva como guía para tener una mejor evaluación de riesgo, haciendo que la elaboración de este análisis se volviera más efectivo, para la identificación de zonas del desarrollo minero que son susceptible a un desprendimiento instantáneo de gas y carbón; además de que se creó un formato para que el personal que se encuentra expuesto, tenga la labor de identificar aquellas condiciones que pueden terminar en un posible evento, y se aplique con mayor rigor las medidas de prevención para disminuir la susceptibilidad de riesgo. Como una medida que ha funcionado para contrarrestar un riesgo de desprendimiento instantáneo, son las actividades de desgasamiento previo al desarrollo de paneles de frentes largas y la perforación en mantos de carbón, para disminuir la presión del gas en el carbón alterado.

CONTENIDO

RESUMEN	i
ÍNDICE DE FIGURAS	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
1.- INTRODUCCIÓN	1
1.1.- Justificación	2
1.2.- Antecedentes	2
2.-OBJETIVOS	4
2.1.-Objetivo general.....	4
2.2.-Objetivos específicos	4
3- MARCO GEOLÓGICO	4
3.1.- Marco estratigráfico de la Cuenca de Sabinas.....	4
3.2.- Marco Estratigráfico	5
3.2.1.- Secuencia estratigráfica que aflora en la Región Carbonífera de Coahuila.....	6
3.3.-Paleogeografía de la Región Carbonífera.....	15
3.4.- Geología Estructural de la Región Carbonífera	15
4.- CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO	17
4.1.- Localización y vías de acceso.....	17
4.2.- Orografía.....	18
4.3.- Clima.....	19
4.4.- Biota.....	20
4.5.- Suelos.....	20
5.- MINERÍA DEL CARBÓN Y RIESGOS SIGNIFICATIVOS	21
5.1.- Generalidades del carbón.....	21
5.1.1.- Proceso de carbonización	23
5.1.2.- Emisión de gases durante la carbonización	26
5.1.3.-Composición maceral del carbón.....	26
5.2.- Minería del carbón	28
5.3.- Riesgos significativos en la minería subterránea de carbón	29
5.4.- Problemática de la Región Carbonífera	30
5.5.- Normatividad en minas subterráneas de carbón.....	31
5.6.- Fenómeno de desprendimiento instantáneo	34
5.6.1.- Inicio de un desprendimiento instantáneo	35

5.6.2.- Mecanismos de un desprendimiento instantáneo.....	36
5.6.3.- Desprendimientos instantáneos asociado al tipo de carbón.....	42
5.6.4.- Relación de profundidad y desprendimientos instantáneos.....	42
6.- METODOLOGÍA	43
7.- RESULTADOS	46
7.1.- Formación Olmos en el área de estudio	46
7.1.1.- Distribución.....	46
7.1.2. Características del yacimiento	46
7.1.3.- Características petrográficas	48
7.2.- Análisis de riesgo de desprendimiento instantáneo en la Norma Oficial Mexica NOM-032-STPS-2008	51
7.2.1.- Propuesta de análisis de riesgo de desprendimiento instantáneo ..	51
7.3.- Aplicación de la metodología propuesta al área de estudio.....	64
7.4.- Formato para el monitoreo de áreas susceptibles a desprendimientos instantáneos de gas y carbón	86
8.- DISCUSIÓN	89
9.- CONCLUSIONES	92
9.1.- Recomendaciones	93
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
ANEXOS	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1.- Localización de la Cuenca Sabinas-Monclova (Modificado de Corona <i>et al.</i> 2006 en Rivera-Martínez y Alcocer-Valdés 2003).....	5
Figura 3.2.- Paleogeografía del Noreste de México Campaniano y Maastrichtiano (Modificado de Padilla, 1988).....	16
Figura 4.1.-Mapa de localización del municipio de Progreso Coahuila y ubicación del proyecto minero (Modificado de INEGI, 2009).....	17
Figura 4.2.- Mapa de relieve del municipio de Progreso Coahuila (Modificado de INEGI, 2009).	18
Figura 4.3.- Mapa de clima del municipio de Progreso Coahuila (Modificado de INEGI, 2009).	19
Figura 4.4.- Mapa de los suelos predominantes del Municipio de Progreso Coahuila (Modificado de INEGI, 2009).....	21

Figura 5.1. Modelo tradicional de un ciclotema (Modificado de Corona <i>et al.</i> 2006, tomado de Shaw, Prothero y Schwab, 1977).	23
Figura 5.2.- Proceso de carbonización. (Modificado de Bodziony & Lama, 1996).	24
Figura 5.3. Diagrama de evolución composicional de dos diferentes tipos de carbón en base a un incremento de rango. La curva baja representa un carbón húmico, rico en macérales como la vitrinita, mientras que la curva superior representa carbón sapropélico, rico en alginita o esporinita. La composición inicial de la alginita puede ser más rica en hidrógeno y pobre en oxígeno que en otro carbón (Modificado de Levine, 1993).	25
Figura 5.4.- Tipos de macérales y el material del cual provienen (Modificado de Schweinfurth, 2000).	28
Figura 5.5.- Fracturas endogenéticas, resultado del metamorfismo del manto de carbón (Modificado de Bodziony & Kraj, 1995).	39
Figura 5.6.- Los estereogramas <i>A</i> y <i>D</i> representan los flancos del pliegue, <i>B</i> y <i>E</i> los lados convexos del pliegue y <i>C</i> el lado cóncavo del pliegue, se considera como modelo ideal del fracturamiento de un pliegue (Modificado de Twiss & Moore, 1973).	40
Figura 5.7.- Relación de estrés y la presión del gas frente del desarrollo minero (Modificado de Yang <i>et al.</i> 2014).	42
Figura 5.8.-Un carbón con partículas desintegradas, en donde el flujo de gas se encuentra intensificado por la falta de canales hasta que sale a una matriz más ordenada y el flujo de gas se vuelve estable (Modificado de Bodziony & Kraj, 1995).	42
Figura 5.9.- Isoterma de presión y cantidad de gas presente en los diferentes rangos de maduración del carbón (Modificado.....	43
Figura 6.1.- Equipo Dräger utilizado para medir el contenido de gas en los barrenos de la frente de trabajo.	46
Figura 7.1.- En esta fotografía se observa la distribución de los mantos de carbón, y como escala un ayudante de topografía del tajo	48
Figura 7.2.- Ésta fotografía muestra la columna completa del yacimiento, se tiene delimitado el manto de carbón de la lutita carbonosa, como escala, un yucle, una excavadora y un tractor de oruga, de aproximadamente 7.4 m de altura cada máquina.	49
Figura 7.3.- Microfotografía de macérales presentes en muestras de carbón sin alteración que tienen materia orgánica así como su estructura mineral del carbón en mantos de la Formación Olmos, Subcuenca Saltillito-Lapacitos, Noreste de México. A) Vitrinita con presencia de inertita así como materia mineral. B) Pirita framboidal con gran brillo alojado en cavidades de vitrinita. C) Presencia de vitrinita muy conservada. D) Predominancia del subgrupo macéral de la inertita, fusinita en asociación a materia mineral. (Abreviaturas V=Vitrinita; F= Fusinita; PF; Pirita framboida; I= Inertita) (Modificado de Pérez, 2014).	50

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

Figura 7.4.- Microfotografía de macérales presentes en muestras de carbón alterado en mantos de la Formación Olmos, Subcuenca Saltillito-Lampacitos en el Noreste de México. A) Fusinita e Inertita. B) Vitrinita en mayor cantidad con presencia de fusinita y levemente semifusinita. C) Predominancia de vitrinita bien conservada con un filón de semifusinita. D) Presencia de materia mineral diseminada en una matriz de vitrinita bien conservada. Abreviaturas; V=Vitrinita; F=Fusinita; MM=Materia mineral; I=Inertita. (Modificado de Pérez, 2014).	52
Figura 7.5.- Relación de la composición y contenido de gas, establecimiento de las restricciones del minado (modificado de Nicholls & Hunt, 2011).	61
Figura 7.6.-Relación entre profundidad, rango y capacidad de desorción (modificado de Stoeckinger, 1991).	65
Figura 7.7.- Se muestra la profundidad y la frecuencia de los desprendimientos instantáneos de gas y carbón que han ocurrido en el proyecto minero.	69
Figura 7.8.- Isoterma de adsorción de gas metano en muestras de carbón del proyecto minero (Modificado de informes internos de la empresa, 2015).	70
Figura 7.9.- Columna estratigráfica típica para el espesor de carbón económicamente explotable dentro del proyecto minero donde se realiza el análisis.	74
Figura 7.10.- Estereogramas mostrando el fracturamiento principal del manto de carbón (líneas verdes y círculos verdes), el fracturamiento secundario del manto del carbón (líneas punteadas azules y cuadros azules), la línea morada punteada representa la dirección a la que se está minando esa zona y la línea roja es la presencia de falla en el manto de carbón.	77
Figura 7.11- Relación del contenido de metano (CH ₄) y la profundidad que presenta el proyecto minero, se observa que en algunas zonas con baja profundidad presentaba altos contenidos en gas por posibles alteraciones en los mantos de carbón, y a mayores profundidades el gas aumenta paulatinamente, también se debe considerar como están las condiciones de los mantos de carbón.	78
Figura 7.12.- Ubicación del personal con el minero convencional (Modificado de Norma Oficial Mexicana NOM-023-STPS-2008).	81
Figura 7.14.- Vista lateral de un minado a distancia de 10 y/o 20 m.	85
Figura 7.15.- Tipo de minado según los contenidos de gas presentes en las zonas a minar.	86
Figura 7.16.- Diagrama de flujo aplicando los controles para la reducción de riesgo en las actividades de desarrollo minero y perforación.	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1- Jerarquización del riesgo	33
Tabla 2.- Probabilidad de ocurrencia de los riesgos (P)	34
Tabla 3.- Exposición de los trabajadores a los riesgos (E).....	34
Tabla 4.- Severidad del daño	34
Tabla 5.- Porcentaje en volumen de macérales de las muestras estudiadas de carbón sin alteración (Modificado de Pérez, 2014)	49
Tabla 6.- Porcentajes en volumen de macérales de las muestras estudiadas de carbón alterado proveniente de desprendimientos instantáneos.	51
Tabla 7.- Clasificación de desprendimientos instantáneos en cuatro grupos, basados en material expulsado en un sólo evento de desprendimiento (Modificado de Bykov, 1985).....	56
Tabla 8.- Liberaciones que ocurren de repente en cantidades importantes de gas: categorías y contramedidas (Modificado de Noack <i>et al.</i> 1995)	56
Tabla 9.- Tabla de clasificación en desprendimientos instantáneos.....	71
Tabla 10.- Evaluación de riesgo en actividades convencionales sin implementación de controles de riesgo.....	82
Tabla 11.-Evaluación de riesgo con implementación de los controles de riesgo de desprendimientos instantáneos.....	87

1.- INTRODUCCIÓN

Un desprendimiento instantáneo de gas y carbón, es la expulsión repentina y espontánea de gas y carbón triturado desde la frente de trabajo en minas subterráneas de carbón, este fenómeno se encuentra ligado a la presencia de gas metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂). Un evento presenta diferentes factores que condicionan la frecuencia como, contenido de gas, dureza de la roca encajonante, madurez del carbón, presión del yacimiento etc.; los cuales aumentan la probabilidad de tener mantos de carbón alterados y frágiles, que pueden provocar un evento. Se cree que el conjunto de estos factores anteriormente señalados, condicionan la periodicidad y severidad de un desprendimiento instantáneo de gas y carbón, dada esta combinación se han creado métodos para alertar y prevenir aquellos indicios que puedan causar un evento de esta naturaleza.

En el caso de México, la minería subterránea de carbón se considera aparte de la minería típica de metales y no metales, ya que esta tiene como riesgo constante la presencia de altas emisiones de gas metano (CH₄), para ello la Secretaría de Trabajo y Previsión Social (STPS) se ha encargado de regular estas actividades, implementando normas para el desarrollo de estas. La Norma Oficial Mexicana que se encarga de este tipo de minería es la NOM-032-STPS-2008, abarcando la seguridad en minas subterráneas de carbón, dentro de su desarrollo contiene un apartado especial para desprendimientos instantáneos de gas metano (CH₄) y carbón (Diario Oficial de la Federación (DOF), 2008), esta norma pide que se elabore un análisis de riesgo de dicho fenómeno, cada vez que se inicie un proyecto minero o se deba desarrollar una nueva zona del minado, con el fin de prevenir, disminuir la probabilidad a un evento y aislar al personal que se encuentre propenso a sufrir fatalidades. Sin embargo para el desarrollo y efectividad de este análisis de riesgo, se toma como referencia la Norma Oficial Mexicana NOM-023-STPS-2012, encargada de las condiciones de seguridad en las minas subterráneas y a cielo abierto (DOF, 2012).

1.1.- Justificación

Los desprendimientos instantáneos de gas y carbón, sólo afectan a la minería subterránea de carbón, se considera que es necesario mejorar la seguridad de los desarrollos mineros, para que la extracción sea más efectiva y que el personal que se encuentra expuesto no sufra una fatalidad. En la Norma Oficial Mexicana NOM-032-STPS-2008 se tiene un apartado para el análisis de riesgo de dicho fenómeno, sin embargo no establece con mayor detalle que deberá contener cada inciso, además de que el personal que está expuesto, no cuenta con un formato para la identificación de condiciones que puedan desencadenar un evento de desprendimiento instantáneo, que será útil para el monitoreo de la construcción de galerías subterráneas de carbón.

1.2.- Antecedentes

Los eventos de desprendimiento instantáneo, han ocurrido en al menos 16 países a lo largo del mundo, el primer desprendimiento instantáneo de gas y carbón, se registró en 1847 en Bélgica, el cual expulsó cerca de 1,400kg de carbón triturado, sin embargo no se reporta mayor información por la falta de conocimiento y documentación de dicho evento (Lama & Bodziony, 1998). Se sabe que estos son un fenómeno que sólo afecta a la minería subterránea de carbón. Durante el desarrollo de las primeras actividades de extracción del carbón en la Región Carbonífera de Coahuila, estas estuvieron acompañadas de una gran cantidad de riesgos, que tuvieron como consecuencia fatalidades, y pérdidas monetarias a los proyectos mineros que se encontraban en esta zona. Con el paso de los años se identificaron como prioritarios a prevención, las lesiones al personal y los desprendimientos instantáneos de gas y carbón.

En México, la minería del carbón comenzó en 1884, para el desarrollo de la industria siderúrgica, predominando la actividad minera de carbón en la subcuencas de Sabinas, Esperanzas, Río Escondido en el estado de Coahuila (Corona *et al.* 2006). Durante 1900, se tuvo el primer registro de un evento de desprendimiento instantáneo de gas y carbón en México, en la mina “El Hondo”, que ocurrió tras una explosión que terminó con aproximadamente 123 fatalidades y 20 sobrevivientes (Organización Familias Pasta de Conchos, 2012). Conforme pasaron los años y la demanda de extracción crecía, la minería de carbón empezó a incrementar sus tasas de producción. Sin

embargo, la explotación de este recurso se siguió realizando por varias décadas, sin una regulación respecto a los desprendimientos instantáneos de gas y carbón. A partir del año 2000, diferentes grupos de mineros (Organización Familias Pasta de Conchos, 2012) comenzaron a manifestar su preocupación por trabajar en minas de carbón debido a los riesgos que podrían presentarse, entre ellos la ocurrencia de explosiones, desprendimientos instantáneos de gas y carbón, inundaciones, incendios y lesiones al personal. En Febrero de 2006 ocurrió el accidente más famoso de esta región, en mina Pasta de Conchos, donde se presentaban áreas inseguras de trabajo, inadecuada ventilación y mal aseguramiento de los ademes. En particular, la escasa ventilación generó un acumulamiento de gas, resultando así en altas concentraciones de gas provocando una explosión que causó 65 fatalidades. Tras este acontecimiento, trabajadores y familiares de las víctimas de Pasta de Conchos organizaron una huelga con el fin de mejorar la seguridad en la minas de carbón, hasta que en el 2008 la Secretaria de Trabajo y Previsión Social (STPS) creó la Norma Oficial Mexicana NOM-032-STPS-2008, esta norma se encarga de regular la seguridad para minas subterráneas de carbón, estableciendo las condiciones más adecuadas para la seguridad en las instalaciones y funcionamiento de las minas subterráneas de carbón, y prevenir riesgos a los trabajadores que laboren en ellas, destaca que esta norma presenta un apartado para el análisis de riesgo de desprendimiento instantáneo de gas metano y carbón.

Para un análisis más detallado de los antecedentes de la Región Carbonífera de Coahuila, véase *capítulo 7. Resultados en el subcapítulo 7.3.- Aplicación de la metodología propuesta al área de estudio*, en donde se encuentra el inciso a) antecedentes de desprendimientos en explotaciones realizadas en la región, correspondiente al numeral 12 de la Norma Oficial Mexicana NOM-032-STPS-2008.

2.-OBJETIVOS

2.1.-Objetivo general

Desarrollar y validar una metodología estándar para la evaluación y el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de gas y carbón, con esto generar un documento que contenga un análisis de riesgo de desprendimiento instantáneo de gas y carbón más específico, para el desarrollo y construcción de las galerías en una mina subterránea de carbón.

2.2.-Objetivos específicos

- Establecer los tipos de desprendimientos posibles para las áreas susceptibles de sufrir desprendimientos instantáneos, con base a los antecedentes de desprendimientos del área de estudio y comparándola con las clasificaciones existentes.
- Desarrollar una metodología para el análisis de riesgo de desprendimiento instantáneo, usando el numeral 12 de la Norma Oficial Mexicana NOM-032-STPS-2008.
- Aplicar y validar la metodología hecha para las áreas susceptibles de sufrir desprendimientos instantáneos de gas y carbón, para la construcción de galerías subterráneas de carbón.
- Generar la información que permita elaborar un documento que contenga, la metodología para la evaluación del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano.

3- MARCO GEOLÓGICO

3.1.- Marco estratigráfico de la Cuenca de Sabinas

La Cuenca de Sabinas, se le conoce en Coahuila como la Región Carbonífera, esta se divide en dos sub-regiones. La primera se localiza al sur de las poblaciones de Nueva Rosita y de Sabinas, y se extiende hasta las cercanías de Monclova, cubriendo una superficie aproximadamente de 10,000 km². La segunda se localiza en el área Nava-Piedras Negras, se extiende en una franja paralela al Río Bravo del Norte, cubre una superficie de aproximadamente

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

2,000 km² y se le denomina “Zona de Fuentes-Río Escondido” (Figura 3.1) (Verdugo & Ariciaga, 1988).

3.2.- Marco Estratigráfico

La columna estratigráfica de la Región Carbonífera de Coahuila está constituida por rocas cuyas edades varían desde el Cretácico Superior al Reciente. Las rocas más antiguas que afloran en esta zona están constituidas por lutitas calcáreas, limolitas calcáreas y lentes de areniscas laminares, con esporádicas y delgadas interestratificación de caliza arcillosa hacia la cima.

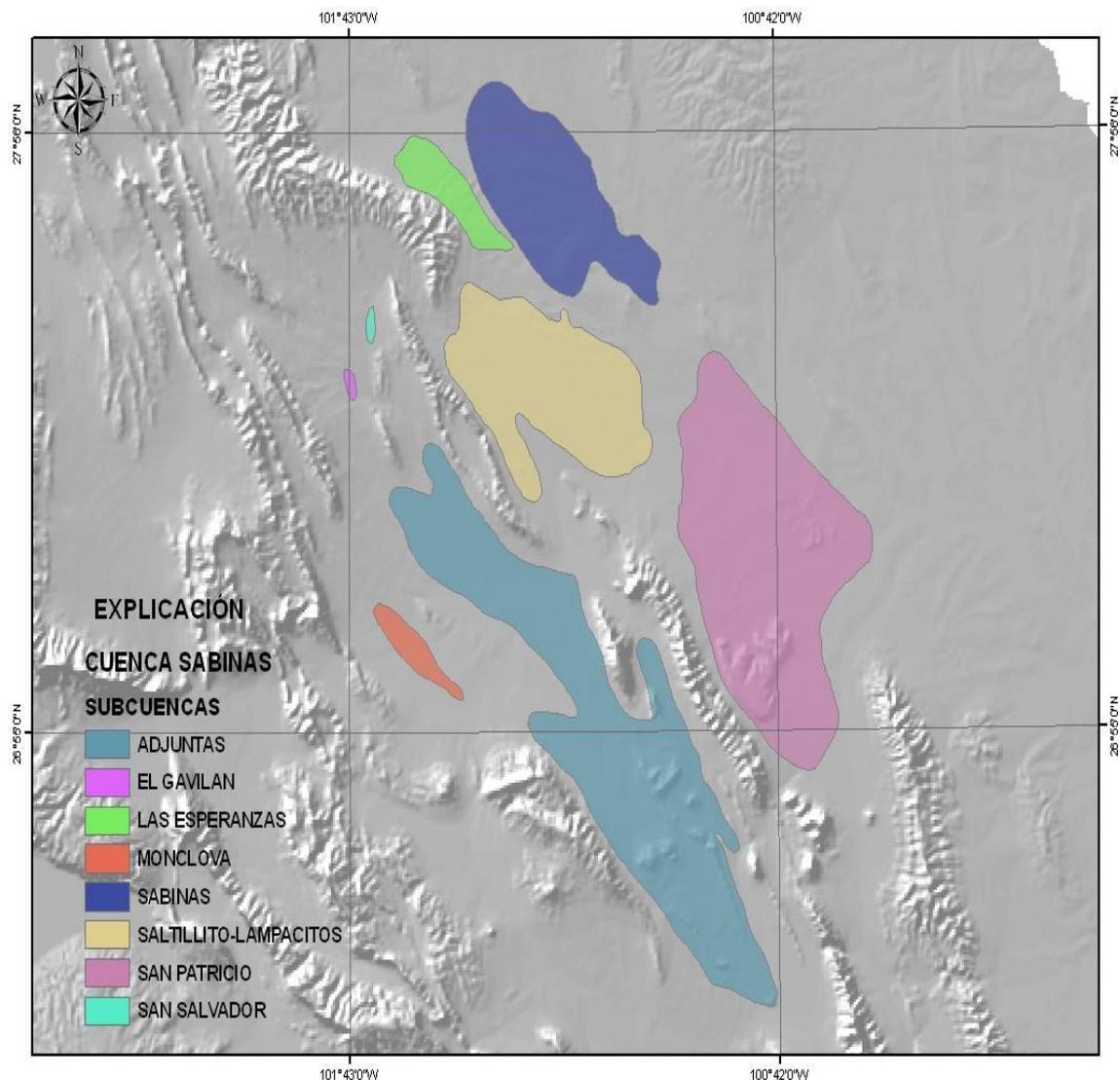


Figura 3.1.- Localización de la Cuenca Sabinas-Monclova (Modificado de Corona *et al.* 2006 en Rivera-Martínez y Alcocer-Valdés 2003).

3.2.1.- Secuencia estratigráfica que aflora en la Región Carbonífera de Coahuila.

Eratema Mesozoico Sistema Cretácico Serie Cretácico Superior

Formación Upson- Campaniano Inferior.

Definición.

Esta Formación fue definida por Dumble en 1892. Su localidad tipo se encuentra en la oficina postal de Upson, actualmente abandonada en el condado de Maverick, Texas (Comision Federal de Electricidad (CFE), 1987; Vejar., 1998).

Distribución.

Aflora en la parte occidental de la cuenca, así como en las regiones El Cedral y Piloncillos. Aflora en la parte noroeste de Piedras Negras del Río Bravo (Vejar, 1998; Corona *et al.* 2006).

Correlación.

La Formación Upson infrayace concordantemente con la Formación San Miguel y suprayace de la misma forma a la Formación Austin (Vejar, 1998).

Litología y Espesor.

Esta formación está compuesta principalmente de lutita de color gris oscuro, parcialmente calcítica, que al intemperizarse cambia a amarillento contiene localmente cristales de yeso y calcita.

Una característica interesante que presenta la Formación Upson, es que las concreciones de pirita están formados en su alrededor de varios fósiles como amonites. También contiene pequeños nódulos de pirita esparcidos a lo largo de esta formación, además de estratos lenticulares de arenisca de menos de un metro en posiciones alternadas dentro de la formación. Este aspecto es producto de avalanchas a partir de las barras de desembocadura de canales distributarios hacia la cuenca durante etapas de inundación (CFE, 1987; Vejar, 1998).

Algunas de las capas de arenisca pueden ser correlacionadas sobre distancias de 2 a 3 km. La lutita presenta poca fisibilidad a causa de que la orientación original preferente de los minerales arcillosos (illita y clorita), y exhibe un alto

grado de bioturbación. El color gris de la lutita es causado por distintos fragmentos de plantas terrestres, materia orgánica insoluble y pirita. El contenido de limo en la lutita varía de 0 a 30%. Éstos fueron depositados durante las tormentas o inundaciones, que posteriormente fueron mezclados con minerales arcillosos durante la bioturbación. La presencia de limolita con estratos centimétricos de arenisca, se incrementan en abundancia hacia la parte superior, hasta llegar a una secuencia predominantemente de arenisca de estratos mayores de un metro, que de forma arbitraria han sido asignados como el límite de la Formación Upson. El espesor promedio de esta unidad es de 180 m aproximadamente (CFE, 1987, Vejar, 1998).

Contactos

Esta unidad sobreyace concordantemente y transicionalmente a la Formación Austin y subyace de la misma manera a la Formación San Miguel. Lateralmente con la Formación Pen, del Graben del Big Bend y con la porción inferior del Grupo Difunta de la Cueva de Parras-La Popa (Santamaría *et al.* 1991).

Edad y Correlación.

Dentro de los fósiles más comunes se encuentran los pelecípodos del tipo *Inoceramus* que se presentan en placas (capas de calcita prismática) y un grupo esparcido de otros moluscos que están presentes solo en forma local. En muestras obtenidas de núcleos más profundizados en esta formación, se les ha hecho análisis palinológico que arroja la presencia de organismos del tipo dinoflagelados, específicamente los del grupo *Cavatae* (CFE, 1987). Por medio de estudios de forminíferos y debido a su posición estratigráfica se le ha asignado una edad del Campaniano Inferior (Verdugo & Ariciaga, 1985; Vejar, 1998).

Ambiente de depósito.

Pertenece a plataforma de aguas someras y prodelta formado durante un ciclo de inundación durante el desarrollo inicial en una cuenca tipo “foreland” (Eguiluz, 2001).

Formación San Miguel- Campaniano Superior- Maastrichtiano.

Definición.

Esta Formación fue definida por Dumble en 1892. Su localidad tipo se encuentra en el antiguo Rancho San Miguel sobre el Río Bravo, A 8.8 km al norte del Paso, Texas (Verdugo & Ariciaga, 1985, Vejar, 1998).

Distribución.

Esta unidad fue reconocida en Estados Unidos de América en el estado de Texas (Petróleos Mexicanos (PEMEX), 1988). En Coahuila se encuentra aflorando en El Cedral y hacia el margen oeste de la cuenca, aflora en la localidad de Piloncillos (López, 1980; Vejar, 1998).

Litología y Espesor:

Originalmente esta unidad fue dividida en cinco miembros en su localidad tipo, aunque su corrección no siempre es posible con los miembros establecidos en otras zonas debido a la génesis de la formación (unidades de frente deltáico). Los miembros no han recibido nombre y se enumeran en orden progresivo del más antiguo al más joven (Vejar, 1998):

- a) Unidad de concreciones fosilíferas
- b) Unidad limolita compactas
- c) Unidad arenisca blancas
- d) Unidad limolita sin estratificación
- e) Unidad arenisca con laminaciones

La formación está constituida principalmente de areniscas de grano medio a grueso y en menor proporción de grano fino, pero a consecuencia de que localmente presenta depósitos de barra de desembocadura de canal y depósitos por rotura de canales distributarios, el espesor de ésta es muy variable. Las interestratificaciones de arenisca y lutita de un metro o más de espesor son comunes en la base, hacia la cima se presentan estratos muy gruesos de arenisca con escasas interestratificaciones de lutita. En algunos casos, los estratos de lutita están ausentes y son detectados 20 m o más de areniscas limpias (CFE, 1987, Vejar, 1998).

La parte inferior de la Formación San Miguel es una secuencia de estratos delgados y de grano fino que varía hacia la cima a estratos potentes y de grano grueso. Esta secuencia es típica de cuerpos de arena progradantes asociados con una regresión marina. La parte superior de la Formación San Miguel es de carácter variable, pero comúnmente las estratificaciones de lutita interrumpen las capas de arenisca, y los paquetes de arenisca de 1 a 3 m de espesor tienden a presentar sedimentos de grano fino hacia la parte superior, estas secuencias están coronadas por detritos finos y son formadas por la depositación en canales distributarios. Los fucoides o barrenaciones, incluyendo *Ophiomorfa sp.*, ocurren en la parte inferior de la formación. En algunos núcleos, se encuentran también placeres de 20 cm de espesor de conchas y guijarros de areniscas. Estos representan depósitos transgresivos marinos que son formados cuando la depositación deltaica activa, ha cambiado temporalmente a un área diferente (CFE, 1987; Vejar, 1998).

La arenisca que ha sido bioturbada tiene una composición general: 30 a 40% de cuarzos, 25 a 30% de feldespatos y 30 a 35% de fragmentos de rocas volcánicas y clastos de arcillas. La mayoría de las capas de arenisca tienen porosidad secundaria de 15 a 25% que fue producida por la disolución del cementante (CaCO_3) y algunos feldespatos por las aguas ácidas del subsuelo, por lo que ésta arenisca está débilmente cementada por kaolinita autógena. Los clastos de arcilla en algunas areniscas también han sido clorotizados mostrándose de color verde y semejando glauconita (CFE, 1987; Vejar, 1998). Los espesores de ésta formación varían de 3 a 30 m, pero generalmente el espesor promedio más común es de 8 a 15 m. Aunque en la región El Cedral, se ha encontrado alrededor de 277 m según López (1980) (Vejar, 1998).

Contactos

La Formación San Miguel infrayace, concordante a la Formación Olmos y suprayace de igual manera a la Formación Upson (Vejar, 1998). Sus contactos laterales son Formación Méndez al este y al sureste con la Formación Parras (Padilla, 1986).

Edad y Correlación.

Dumble (1892) le asignó la misma edad definida para la parte inferior del Grupo Taylor (Campaniano Superior), aunque correlaciona ésta formación con las capas glauconíticas del Grupo Navarro, con base en la presencia de *Exogira ponderosa* y *Exogira costata* (Maastrichtiano Inferior). Ésta formación es correlacionable en edad con el Grupo Difunta de la Cuenca de Parras y la Popa, equivalente al Grupo Taylor que aflora en Texas y a la parte inferior de la Formación Méndez que aflora en la Cuenca Tampico-Misantla (CFE, 1987; Vejar, 1998).

Ambiente de depósito.

El ambiente de depósito de acuerdo a las características litológicas, así como las estructuras primarias en arenisca, corresponde a un ambiente deltáico progradante con abundantes canales distributarios, con influencia litoral y de frente deltaico, cuyo origen está asociado a la zona de antefosa de la deformación Laramide (PEMEX, 1988). Se ha identificado la presencia de estratificación cruzada que indica un ambiente litoral o nerítico cercano a la costa y de frente deltaico (López, 1980).

Formación Olmos- Maastrichtiano Inferior.

Definición.

Dumble (1892) definió a las capas de la Formación Olmos tomando su nombre de la estación Olmos Creek, ubicado en el condado de Maverick, que está aproximadamente entre 11.26 y 12.87 km al norte de Eagle Pass rumbo a Río Grande (Bravo), Texas, Estados Unidos de América. Donde se estableció la localidad tipo de la Formación Olmos. Verdugo y Ariciaga (1985) mencionan que Dumble (1892) nombró las capas de las Formación Olmos como las “Series del Carbón” y les extendió el término “División Eagle Pass”. Estas capas se distribuyen dentro de la Cuenca de Sabinas, Cuenca de Burgos y la Cuenca del Río Escondido al sur de Texas, Estados Unidos de América (Vejar, 1998).

Distribución.

La Formación Olmos aflora en la ciudad de Piedras Negras y hacia el sureste en la Región Carbonífera (la cual adquiere su nombre debido al carbón) (Vejar, 1998; Corana *et al.* 2006).

Litología y Espesor.

La Formación Olmos está compuesta de lutitas gris oscuras comúnmente carbonáceas, con interestratificación de estratos de areniscas de 1 a 5 m de espesor (Vejar, 1998) y que son explotados comercialmente ya sea en minado subterráneo o a cielo abierto. La parte inferior de la Formación Olmos está compuesta de depósitos de pantanos-manglares con sedimentos de tamaño limo a arcilla, con predominio de restos orgánico vegetales formando estructuras sedimentarias como estructuras de raíces con escasas señales de corrientes. Los fósiles son muy abundantes, principalmente los vegetales, con delgadas acumulaciones de sedimentos distributarios y canales fluviales, con sedimentos grano crecientes los cuales llevan desde arenas gruesas a arenas finas. La parte superior presenta predominantemente depósitos de planicie aluvial constituidos por areniscas fluviales, lutitas de sobrebanco y pantanos fluviales. La arenisca es similar en composición a la Formación San Miguel, excepto por los clastos de carbón y restos de plantas que son más abundantes en las areniscas de la Formación Olmos (CFE, 1987).

Los estratos de lutita contienen abundantes fragmentos diminutos de plantas, impresiones locales de plantas y a causa de una moderada bioturbación son moderadamente fisibles (Vejar, 1998). Las areniscas de canal comúnmente disminuyen hacia la parte superior de la sección en el tamaño del grano y en el espesor de los estratos, la mayoría de ellas presentan capas conglomeráticas basales de unos pocos centímetros de espesor. Las lutitas y clastos carbonosos pasan hacia la cima, en laminaciones cruzadas o paralelas a laminaciones cruzadas de rizaduras por corrientes. El total de la Formación Olmos tiene un espesor de 65 a 100 m aproximadamente (CFE, 1987; Vejar, 1998).

Contactos

La Formación Olmos sobreyace a la Formación San Miguel (Grupo Taylor) y subyace a la Formación Escondido (Grupo Navarro). Los contactos no son precisos, debido a que el contacto inferior con la Formación San Miguel se ha puesto en la cima de la última capa de arenisca, que descansa sobre la primera capa de carbón, pero en donde no se generó carbón es muy incierto. El contacto superior es transicional y concordante con la Formación Escondido

pero es difícil de establecerlo y generalmente se ubica dónde empieza a predominar la arenisca (Santamaría *et al.* 1991). Los contactos laterales al sureste y este de ésta formación son con la Formación Méndez (Padilla, 1986).

Edad y Correlación.

Los fósiles encontrados por Vejar (1998) en esta formación, tales como cefalópodos (*Sphenodiscus* sp.) y pelecípodos, como los restos de *Exogira costata* y gasterópodos, nos indican que corresponden a principios del Maastrichtiano y son correlacionables con la Formación Picacho (Cuenca de Ojinaga), Formación Javelina (Grabén del Big Bend), parte inferior y media del Grupo Difunta (Cuenca de Parras y Cuenca de La Popa), y es equivalente a la parte inferior del Grupo Navarro que aflora en Texas, y a la parte superior de la Formación Méndez que aflora en la cuenca sedimentaria Tampico-Misantla (Burrola, 2013).

Ambiente de depósito.

Se depositó en un ambiente marino somero y de frente deltaico (Burrola, 2013). La formación presenta secciones en la Cuenca de Sabinas que muestran depósitos diferentes a las establecidas en Eagle Pass. Algunas zonas distensivas en el margen continental (Santamaría *et al.* 1991).

Formación Escondido- Maastrichtiano Superior.

Definición.

Fue nombrada por Dumble en 1892. La localidad tipo se encuentra cerca de la desembocadura del Río Escondido con el Río Bravo aproximadamente a 4 km al sur de Piedras Negras (CFE, 1987; Vejar, 1998).

Distribución.

Aflora principalmente al norte y este de la Región Carbonífera, se encuentra en la localidad Los Piloncillos y a lo largo del camino Nueva Rosita-Esperanzas, aproximadamente a 1 km, de la plaza de Las Esperanzas (Vejar, 1998; Santamaría *et al.* 1991).

Contactos.

La Formación Escondido se encuentra suprayaciendo discordantemente a la Formación Olmos y subyace discordante al Conglomerado Sabinas-Reynosa.

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

Los contactos laterales que presenta son con el Grupo Difunta al sureste y al este con la Formación Méndez (Padilla, 1986).

Litología y Espesor.

La Formación Escondido está constituida en su base de lutita fosilífera y limolita. En la mitad inferior tiene numerosos mantos de areniscas. El miembro superior está hecho de lutita glauconítica y caliza impura. Muestra de cuatro a siete miembros distintos, pudiendo alcanzar un espesor total de 300 m. El grueso de la formación está conformado por depósitos de plataforma interdeltáicos y marinos caracterizados por, huellas de olas y horadaciones de gusanos (CFE, 1987; Vejar, 1998).

Edad y Correlación.

En base a su posición estratigráfica se le asignó una edad del final del Maastrichtiano. Esta formación es equivalente a la parte superior del Grupo Navarro, que aflora en el estado de Texas (López, 1980; Vejar, 1998).

Ambiente de depósito.

El depósito de esta formación ocurrió en escenarios litorales a lagunares, probablemente de tipo de barras y canales interdistributarios y distributarios (PEMEX, 1988). Planicie de inundación oscilante, la distribución de los mantos de carbón denota la migración de las subcapas deltáicas. (Eguiluz & Amezcua, 2003).

Eratema Cenozoico Sistema Mioceno-Plioceno

Conglomerado Sabinas-Reynosa, Mioceno-Plioceno.

Definición.

Según Humprey (1956), ésta unidad fue definida en la Región Carbonífera de Sabinas para depósitos del tipo de conglomerados. La localidad tipo está al borde sudoriental de la Sierra de Santa Rosa (Valdez, 2001).

Distribución.

Dentro de la Cuenca de Sabinas aflora a lo largo del río del mismo nombre, en los Piloncillos y en las partes bajas de los flancos de los anticlinales. En los valles o llanuras que separan las sierras que integran el Golfo de Sabinas; así como sobre el Valle de San Marcos, también se encuentra distribuida en el

flanco norte de la Sierra La Gloria y al oriente de la ciudad de Monclova, en el flanco noreste de las Sierras de Obayos y Santa Rosa (López, 1980; Vejar, 1998).

Contactos.

El conglomerado Sabinas-Reynosa se encuentra suprayaciendo discordantemente a las rocas cretáceas que existen en la región y en este caso la Formación Escondido. Así mismo se encuentra infrayaciendo al aluvión. Se dispone lateralmente en algunas partes de la Lava las Esperanzas (Valdez, 2001).

Litología y Espesor.

La formación está constituida por fragmentos de calizas de diversos tamaños cementados por carbonato de calcio (CaCO_3). El espesor promedio oscila aproximadamente en los 30 m. El origen de ésta formación conglomera, se originó como productos de la acción erosiva de los diferentes agentes sobre las partes altas de las estructuras. Los detritos resultantes de esa erosión, fueron arrastrados hasta las depresiones o cuencas donde posteriormente fueron cementadas (CFE, 1987; Vejar, 1998). El conglomerado Sabinas-Reynosa presenta intercalaciones de arena fina con gravas en estratificación cruzada (Vejar, 1998).

Edad y Correlación.

Al conglomerado, en su base de posición estratigráfica se le asigna una edad Cenozoica, correspondiente a las épocas Mioceno-Plioceno. Ésta formación es equivalente a la Formación Ahuichila que aflora en los estados de Zacatecas, San Luis Potosí y parte sur de Coahuila (López, 1980; Vejar, 1998).

Ambiente de depósito.

Se originó por la acción de los agentes erosivos sobre las estructuras plegadas cretácicas y depositadas en las partes bajas, estos sedimentos fueron arrastrados en un ambiente fluvial, la composición de estos sedimentos está asociada a depósitos de pie de monte y abanicos aluviales (López, 1980; Vejar, 1998).

3.3.-Paleogeografía de la Región Carbonífera

En el Campaniano y Maastrichtiano, el área fue totalmente abierta por sedimentos terrígenos, originados por sistemas fluviales asociados a una regresión que tuvo lugar a nivel global (Padilla, 1986; Goldhammer, 1999). Hacia el Campaniano, la línea de costa se recoloca hacia el oeste de la Cuenca de Sabinas, la cual muestra un incremento de terrígenos, especialmente arcilla. Hacia el norte de la cuenca, se depositaron lutita y arenisca (Formación Upson) de aguas someras y zonas de prodelta, así como limolita, arenisca laminar o arenisca sin estructuras internas, lutita con concreciones (Formaciones San Miguel) acumuladas en ambientes deltaicos, especialmente en canales distributarios con influencia litoral (Padilla, 1986; Goldhammer, 1999).

En el Maastrichtiano, marca un tiempo de mayor aporte de sedimentos terrígenos que comenzara a depositarse que el ocurrido durante el Campaniano. Hacia el Golfo de Sabinas se reconocía lutita, arenisca portadora de carbón y lignito (Formación Olmos) desarrollado en ambientes palustres asociados a sistemas deltaicos, muestran la arenisca con lodolita y calizas (Formación Escondido) y se refleja la formación de una plataforma interna somera, como escenarios de litorales a lagunares hacia el sur de la cuenca (Figura 3.2) (Padilla, 1986).

3.4.- Geología Estructural de la Región Carbonífera

La configuración actual de la Región Carbonífera de Coahuila inicio con el evento orogénico Ouachita-Marathon durante el Permo-Triásico (Goldhammer, 1999, González, 2007). La Cuenca de Sabinas se originó como una fosa de tipo *rift*, limitada por bloques paleotectónicos y paleogeográficos, como el Bloque de Coahuila al suroeste y el bloque de Tamaulipas al noreste. La Cuenca de Sabinas tuvo subsidencia tectónica y creó el espacio para acumular sedimentos erosionados de estos bloques (González, 2007). El producto de este tectónismo sinsedimentario es una complicada secuencia clástica terrígena del Cretácico Superior en la cuenca.

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón



Figura 3.2.- Paleogeografía del Noreste de México Campaniano y Maastrichtiano (Modificado de Padilla, 1988).

La Región Carbonífera que se encuentra dentro del paleoelemento Cuenca de Sabinas en los límites con la Península de Burro Peyotes, este sirvió como contrafuerte para el depósito de sedimentos, al presentarse eventos de deformación que adoptaron la forma de estructuras anticlinales y sinclinales con formas simétricas abiertas, estos anticlinales buzaron en sus extremos hacia las cuencas adyacentes, algunos anticlinales son por lo regular más erguidos en su flanco noreste, donde es común encontrar inclinaciones de 70° , aunque también hay lugares donde las capas son verticales o ligeramente reclinadas. La mayoría de los pliegues que se presentan en esta región tienen inclinaciones que varían de los 20° a 60° , los flancos de estos pliegues tienden a buzarse hacia el suroeste (Robeck *et al.* 1956; Corona *et al.* 2006). Los pliegues presentan poca extensión y estructuras con complicaciones locales tales como recostamientos, plegamientos subordinados en las calizas con estratificación delgada, y adelgazamiento de las formaciones lutíticas; estas rocas están también afectadas por diapiros de yeso y cuerpos ígneos intrusivos. Las capas

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

que se encuentran plegadas, se consideran de edad joven ya que marcan el final del Cretácico y sobre ellas descansa en posición discordante el Conglomerado Sabinas, considerado del Plioceno y en algunas partes derrames basálticos del Campo Volcánico de Las Esperanzas (Corona *et al.* 2006).

4.- CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1.- Localización y vías de acceso

El presente estudio se realizó en la Región Carbonífera de Coahuila de Zaragoza, en la porción norte del estado, dentro de las coordenadas 27°61'70.86" de latitud norte, y 101°23'74.94" de longitud oeste (Figura 4.1).

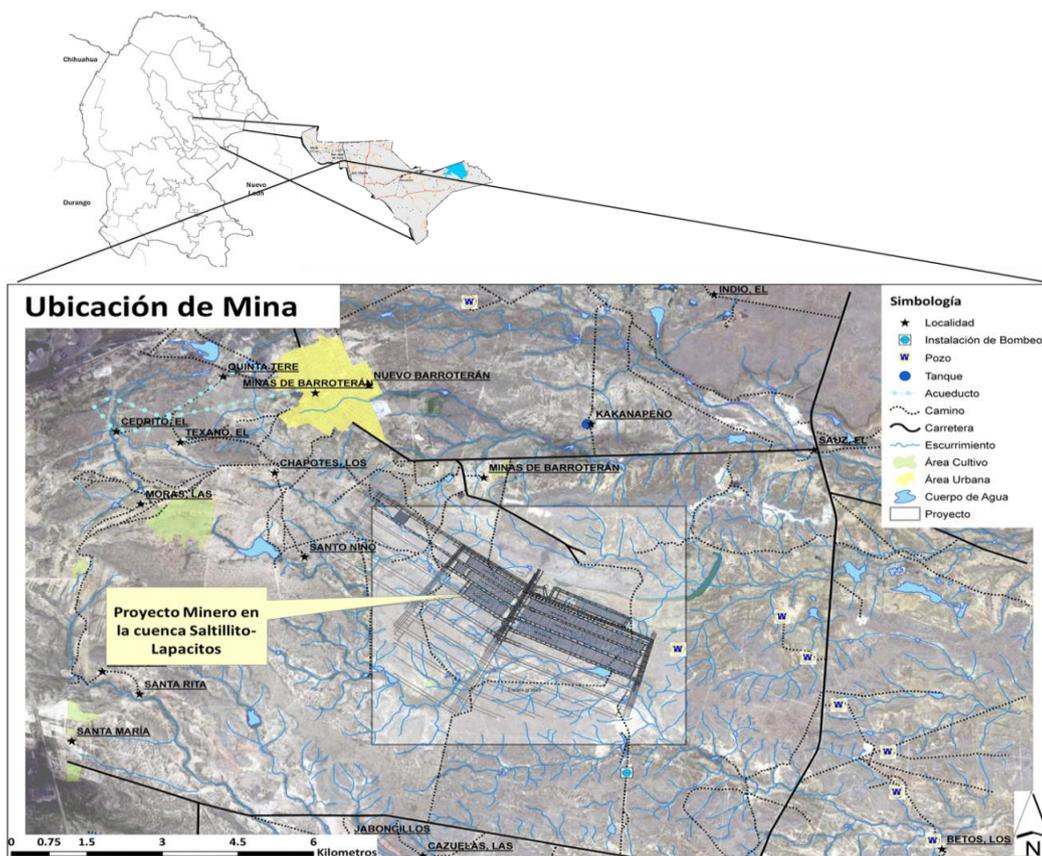


Figura 4.1.-Mapa de localización del municipio de Progreso Coahuila y ubicación del proyecto minero (Modificado de INEGI, 2009).

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

4.2.- Orografía

El municipio de Progreso Coahuila se encuentra situado en una planicie, a excepción de sus extremos oeste y sureste donde se encuentra la Sierra de Obayos (Figura 4.2).

En cuanto a hidrología, el río Aura representa el único afluente en Progreso; proveniente de Múzquiz Coahuila, atraviesa el municipio en dirección noroeste-sureste y se une al denominado Arroyo Seco para formar el río Salado de los Nadadores, que fluye hacia la Presa Venustiano Carranza en el municipio de Juárez; el territorio integró del municipio forma parte de la Cuenca Presa Falcón-Río Salado de la Región hidrológica Bravo-Conchos (INEGI, 2009).

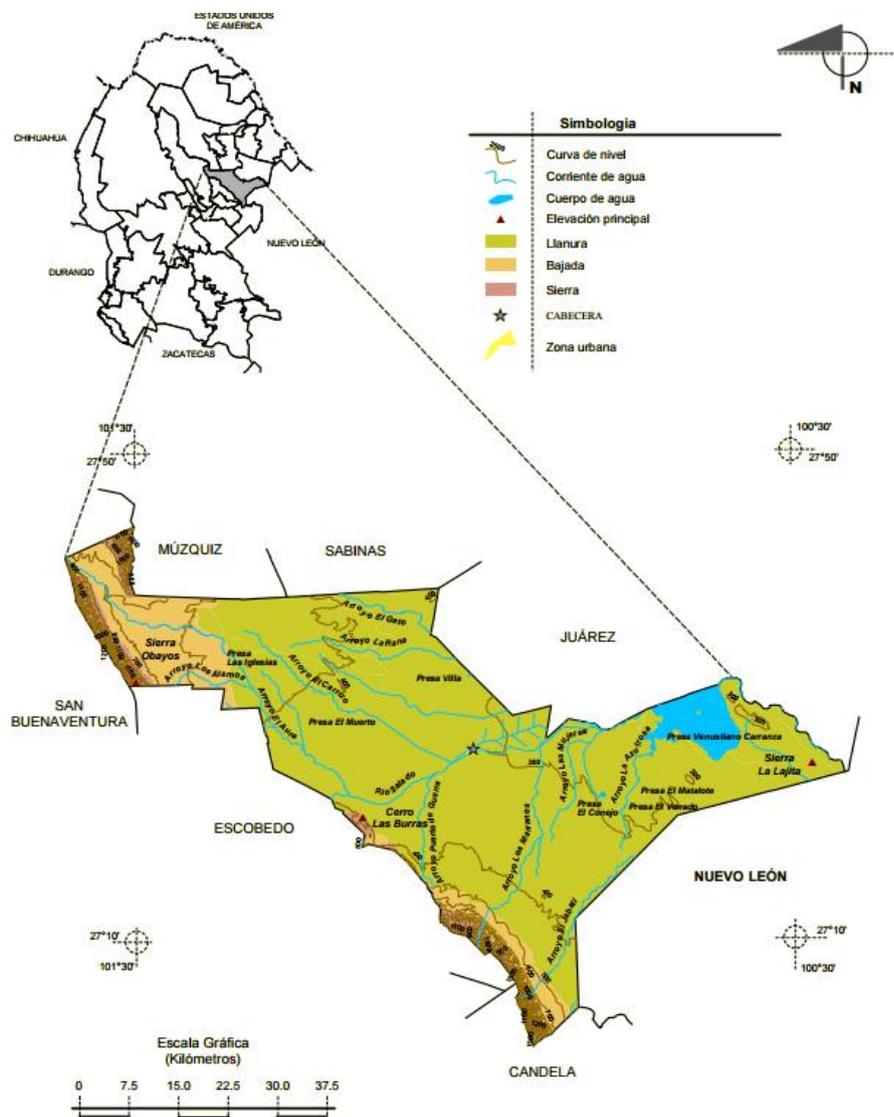


Figura 4.2.- Mapa de relieve del municipio de Progreso Coahuila (Modificado de INEGI, 2009).

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

4.3.- Clima

En el municipio de Progreso Coahuila se registran dos tipos de climas, mayoritariamente en su zona central es seco muy cálido y cálido, la temperatura media anual en todo el municipio es superior a los 20 °C (Figura 4.3) y la precipitación media anual que se registra en el territorio es de 200 a 300 mm (INEGI, 2009).

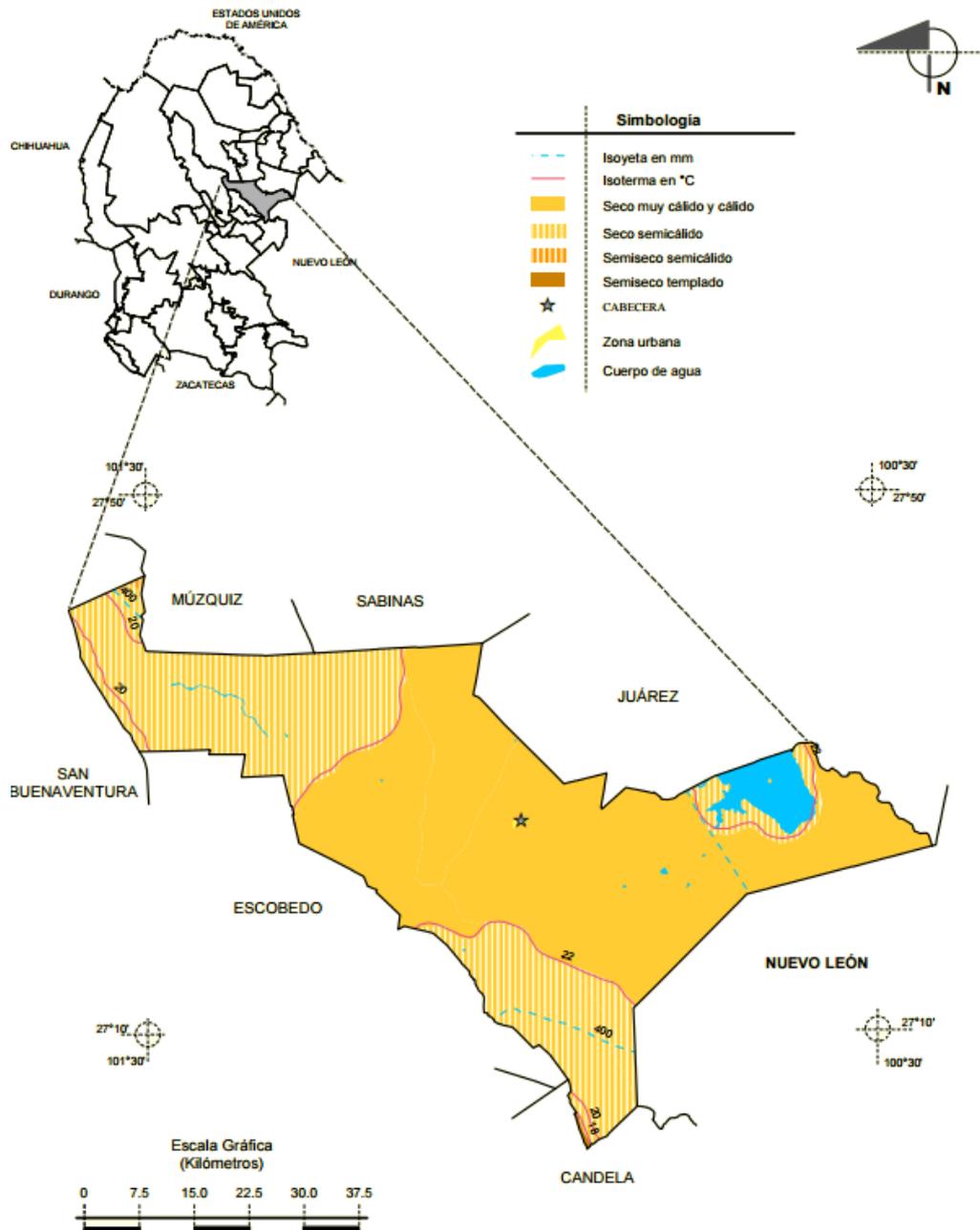


Figura 4.3.- Mapa de clima del municipio de Progreso Coahuila (Modificado de INEGI, 2009).

4.4.- Biota

La vegetación que está determinada por el clima, encontrado Soto (*Desylirión* sp.), Lechuguilla (*Agave funkiana*), Candelilla (*Euphorbia antisiphilitica*), Maguey (*Agave* sp.), Guayule (*Pathenium*), Mezquite (*Prosopis juliflora*), Uña de gato (*Acacia greggy*), Engordacabra (*Dalen* sp), Nopal Cegador (*Opuntia robusta*), Nopal Rastrero (*Opuntia trasera*), Nopal Tapón (*Opuntia robusta*), Biznaga (*Echinocactus* sp), Ocotillo (*Franquieria splendens*), Peyote (*Atrophytum aterias*), Granjeno (*Celtis* sp), Gobernadora (*Larrea divaricata*), Hojasén (*Fluorencia* sp), Palma Chica (*Yuca filífera*), Palma Real (*Yuca carnerosana*) y Zacatón Alcalino (*Sprobulas* sp) (INEGI, 2009).

La fauna que predomina en esta zona es tlalcoyote (*Taxidea taxus*), gato montés (*Felis silvestres*), zorra del desierto (*Vulpes velox*), rata canguro (*Dipodomys agilis*), cachorrito de Cuatro Ciénegas (*Cyprinodon bifasciatus*), lagarto-escorpión de Lugo (*Gerrhonotus lugoï*) y perrito de las praderas (*Cynomys mexicanus*). En los pastizales: borrego cimarrón (*Ovis canadensis*), ciervo rojo (*Cervus elaphus*), puma (*Puma concolor*) y armadillo (*Dasypodidae*) (INEGI, 2009).

4.5.- Suelos

Se pueden distinguir 5 tipos de suelos en esta región (INEGI, 2009) (Figura 4.4):

Xerosol.- Suelo de color claro y pobre en materia orgánica y el subsuelo es rico en arcilla o carbonatos, con baja susceptibilidad a la erosión.

Regosol.- No presenta capas distintas, es claro y se parece a la roca que le dio origen. Su susceptibilidad a la erosión es muy variable y depende del terreno en el que se encuentre.

Feozem.- Su capa superficial es suave y rica en materia orgánica y nutriente. La susceptibilidad a la erosión depende del tipo de terreno donde se encuentre.

Rendzina.- Tiene una capa superficial rica en materia orgánica que descansa sobre roca caliza y algún material rico en cal, es arcilloso y su susceptibilidad a la erosión es moderada.

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

Vertisol.- Presenta grietas anchas y profundas en la época de sequía, es un suelo muy duro, arcilloso, masivo, negro, gris y rojizo. Su susceptibilidad a la erosión es baja.

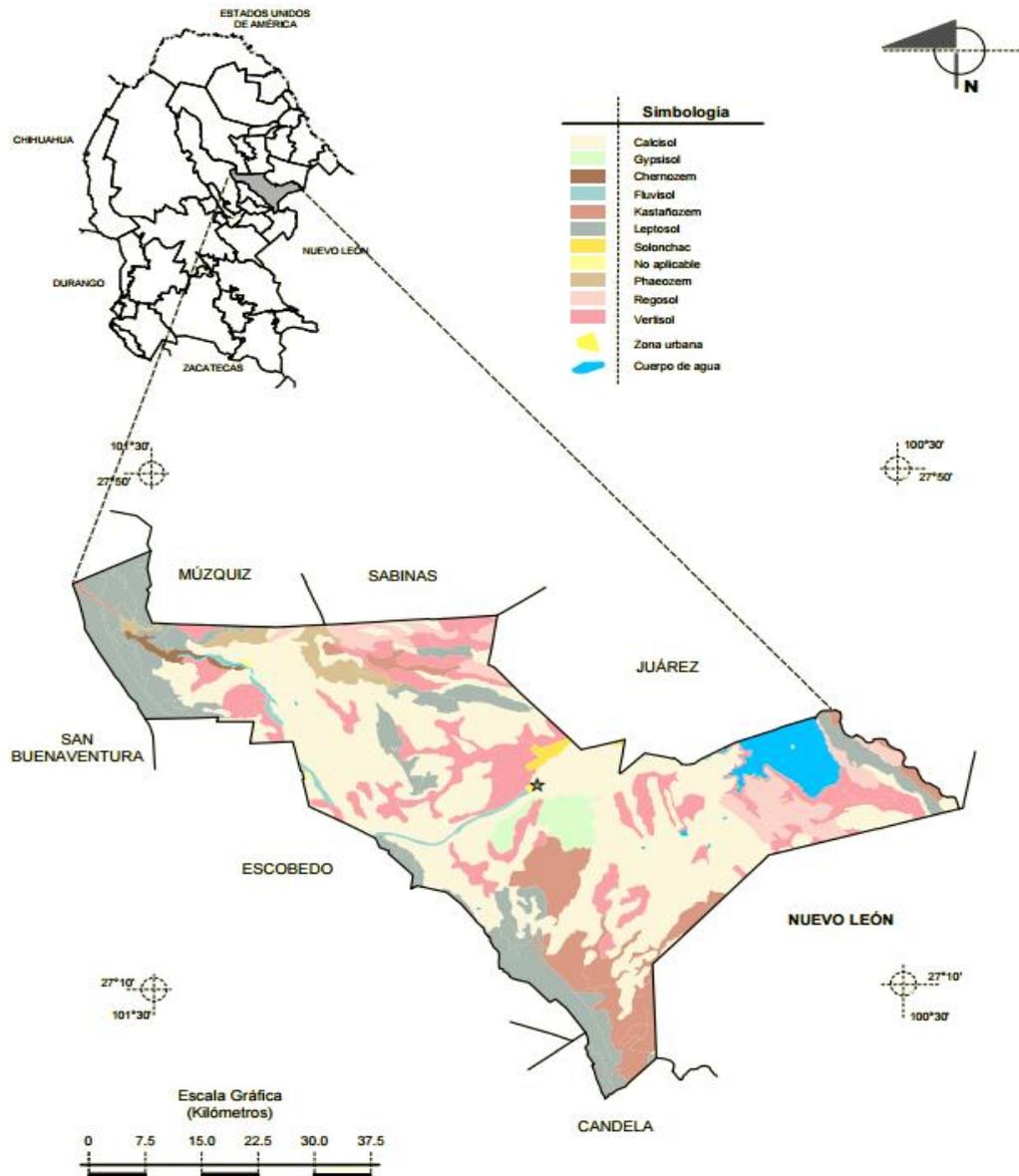


Figura 4.4.- Mapa de los suelos predominantes del Municipio de Progreso Coahuila (Modificado de INEGI, 2009).

5.- MINERÍA DEL CARBÓN Y RIESGOS SIGNIFICATIVOS

5.1.- Generalidades del carbón

El carbón es una roca de origen orgánico que se genera por diagénesis a partir de una profundidad de 5,000 m y a una temperatura de aproximadamente

300°C. Está conformado por materia vegetal procedente de pteridofitas, gimnospermas y angiospermas. Los depósitos más grandes de carbón reportados en la Tierra ocurrieron en el Carbonífero, hace aproximadamente 359.2 millones de años (Corona *et al.* 2014). La composición elemental del carbón incluye Carbono (C), Hidrógeno (H), Oxígeno (O), así como pequeñas cantidades de Azufre (S) y Nitrógeno (N) (British Geological Survey (BGS), 2010). Los yacimientos de carbón se generan en ambientes sedimentarios palustres bajo las siguientes condiciones (Corona *et al.* 2006):

- 1.- Presencia de vegetación muy abundante, normalmente de ambiente cálido y húmedo.
- 2.- Ambiente tectónico de subsidencia balanceada con el crecimiento y sepultamiento de la vegetación.
- 3.- Rápido sepultamiento de vegetación que cae al medio de depósito, de tal manera que no esté expuesta a la oxidación de la superficie. Así, la descomposición de la materia orgánica sepultada ocurre en un escenario deficiente de oxígeno y muy lentamente, dejando que se forme la turba.
- 4.- Todas las condiciones anteriores deben presentarse en conjunto durante intervalos de tiempo prolongados, alternados con lapsos durante los cuales se depositarán otros sedimentos.

Durante el proceso de madurez de la materia orgánica, los componentes vegetales sufren el proceso de carbonización, provocando su descomposición. Cuando va ocurriendo el depósito de las capas, éstas pueden ordenarse de tal manera que forman ciclos básicos asimétricos de secciones estratigráficas con niveles de carbón, también llamados ciclotemas (Figura 5.1), los cuales pueden repetirse periódicamente. Una secuencia de este tipo, está constituida de base a la cima, por capas de: (1) arcillas (lacustres o marinas); (2) arenisca y limolita; (3) conglomerado; y (4) carbón. La secuencia inicia con tres capas de rocas sedimentarias no marinas. La unidad 1 corresponde a una unidad de arenisca que descansa discordantemente sobre las capas que subyacen al depósito. Esta capa de arenisca está cubierta por estratos de lutita (unidad 2) y caliza lacustre (unidad 3). La unidad 4 suele ser un paleosuelo gris con fragmentos de raíces, que siempre subyace al manto de carbón (unidad 5). Una serie de 5 unidades sobreyacen al carbón; su composición incluye lutita (unidad 6), caliza

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

marina (unidad 7), lutita (unidad 8), caliza marina (unidad 9) y, finalmente, lutita (miembro 10). Esta última unidad está truncada por una superficie de erosión, que forma la base del depósito sobreyacente (Corona *et al.* 2006).

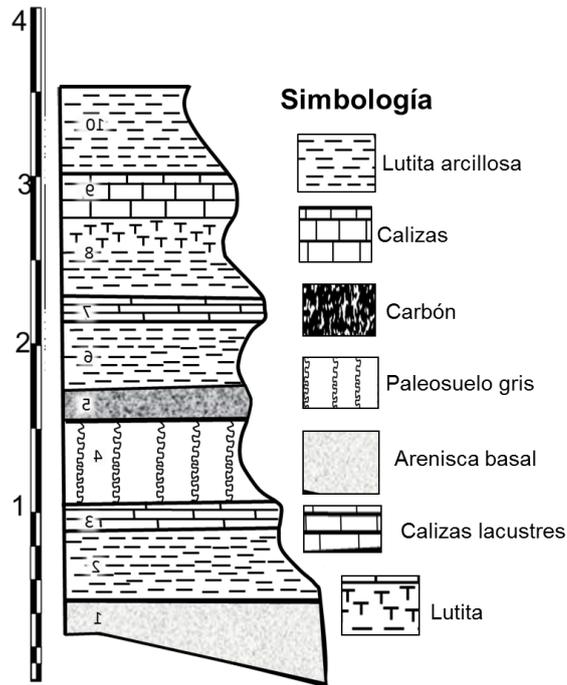


Figura 5.1. Modelo tradicional de un ciclotema (Modificado de Corona *et al.* 2006, tomado de Shaw, Prothero y Schwab, 1977).

5.1.1.- Proceso de carbonización

El término de carbonización se refiere al proceso de metamorfismo del carbón causado por el incremento de la carga litostática que ejercen los sedimentos sobreyacentes, movimientos tectónicos y el aumento de la temperatura como función de la profundidad de sepultamiento. El aumento de la presión afecta principalmente las propiedades físicas del carbón, es decir, su dureza, resistencia, anisotropía óptica y porosidad. El incremento de la temperatura modifica la composición química, aumentando el contenido de Carbono (C), reduciendo el Oxígeno (O) e Hidrogeno (H) y dándole un mayor poder calorífico (Speight, 2012).

El proceso de carbonización puede dividirse en 3 fases: humificación, diagénesis y metamorfismo (Figura 5.2). El proceso de humificación empieza con la presencia de oxígeno y bacterias aeróbicas que forman la turba. La

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

oxidación ocurre con procesos físico-químicos resultado de la emisión de dióxido de carbono (CO_2), ácido sulfídrico (H_2S), amoniaco (NH_3), formación de ácidos orgánicos, floculación, hidrólisis, depolimerización, condensación y formación de grupos funcionales como carboxilo (COOH), hidroxilo (OH), etano (CH_3) y oxido de carbono (CO). La siguiente fase de la carbonización es la formación de lignito. Con la lenta deshidratación de la turba, hay un decrecimiento rápido en la porosidad, remoción de los carboxilos (COOH) y el hidroxilo (OH) con el incremento del contenido de carbón y el decrecimiento en proporción Oxígeno/Carbono (Lama & Bodziony, 1996).

Para convertir la turba en lignito, la profundidad debe oscilar entre 2000-3000 m, los porcentajes del contenido de agua deben variar en un rango de 15-70% y con la eliminación parcial de celulosa la turba cambia a lignito (Kreiner, 1993).

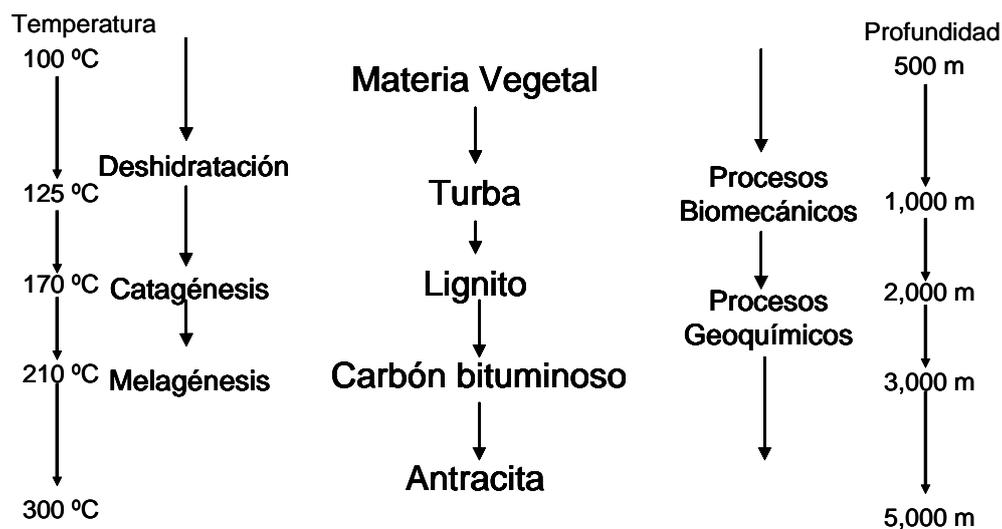


Figura 5.2.- Proceso de carbonización. (Modificado de Bodziony & Lama, 1996).

De acuerdo con la ley de Hilt (1875) (Trotter, 1950), la carbonización del material va en relación a la profundidad y a este proceso se le llama maduración. La conversión de lignito a carbón bituminoso ocurre con el incremento de la condensación de ácido húmico, incrementando el tamaño de las moléculas, gelificación y vitrinización de las sustancias húmicas. Con el

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

incremento continuo en dureza, brillo, y decremento de la porosidad (Teichmuller, 1989; Speight, 2012).

En las etapas tempranas se presenta la generación de aceites, seguido de la liberación de gas condensado, proveniente de la fase temprana de bituminización (sub-bituminoso) (Figura 5.3), la degradación termal está acompañada por un significativo decrecimiento en la proporción atómica Hidrogeno/Carbono con la expulsión de hidrocarburos de bajo peso molecular tales como metano (CH_4) (Rionda, 2010).

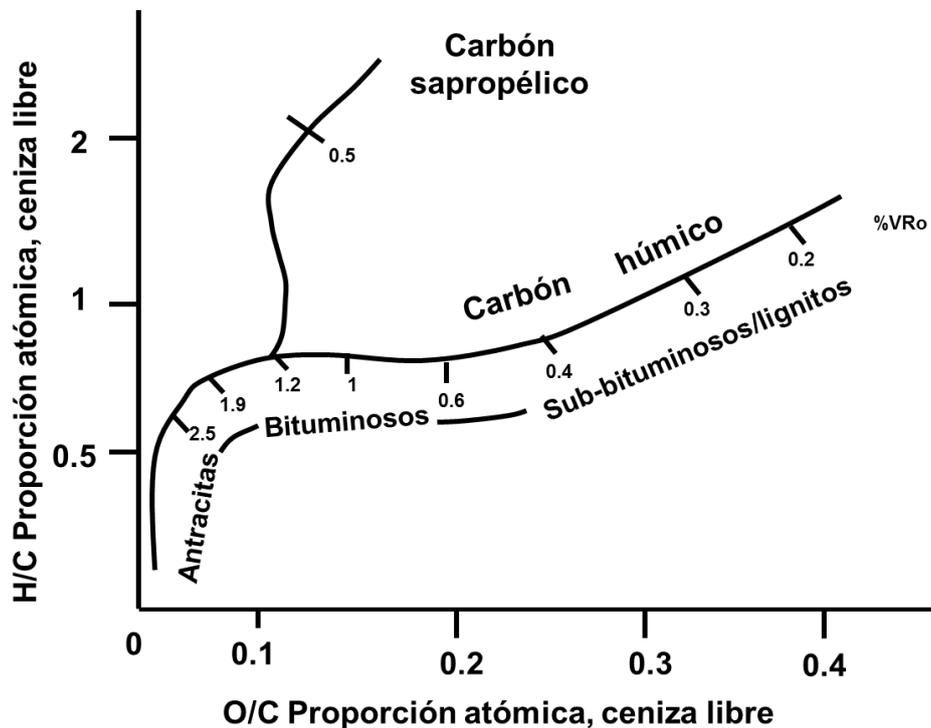


Figura 5.3. Diagrama de evolución composicional de dos diferentes tipos de carbón en base a un incremento de rango. La curva baja representa un carbón húmico, rico en macérales como la vitrinita, mientras que la curva superior representa carbón sapropélico, rico en alginita o esporinita. La composición inicial de la alginita puede ser más rica en hidrógeno y pobre en oxígeno que en otro carbón (Modificado de Levine, 1993).

Durante la debituminación se continúa con carbón bituminoso con bajo contenido de materia volátil, toda evidencia de bituminación previa es gradualmente preservada, las propiedades de fluorescencia desaparecen, esto significa que el peso molecular de las moléculas constituyentes decrece, la

estructura molecular se reabre con la asociación y finalmente teniendo un incremento en la capacidad de adsorción. Existe un aumento significativo en la reflectancia de la vitrinita, su densidad, estructura anisotrópica y dureza. Al tener incremento en el rango de carbón, disminuye la cantidad de materia volátil (Levine, 1993).

5.1.2.- Emisión de gases durante la carbonización

Lama & Bodziony (1996) presentan una relación entre la fracción de materia volátil y el rango de carbón que se libera como volátiles durante la maduración. Levine (1993) estimó la emisión de metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) a partir del balance de Hidrógeno/Oxígeno en lignito y calculó, con una proporción 1:1 de agua y dióxido de carbono (H₂O/CO₂), que se generan casi 280 cm³/g de materia volátil desde el lignito hasta el estado de antracita. Las pruebas de laboratorio que realizó Kim (1977) muestran que el dióxido de carbono es el primer gas en formarse seguido del metano (CH₄), y que en un periodo de varios meses, la composición del gas se modificó alcanzando una relación de 95% metano (CH₄) y 5% dióxido de carbono (CO₂).

5.1.3.-Composición maceral del carbón

El carbón es una roca heterogénea formada por la acumulación de restos vegetales de naturaleza variada, y que han sufrido diferentes grados de alteración (*Véase sección 5.1 Generalidades del carbón*).

Entre las observaciones realizadas al microscopio, se distinguen morfologías y características de reflectancia, que es el porcentaje de luz que se refleja por incidencia perpendicular. Estos componentes han sido nombrados como macérales, que son constituyentes orgánicos individuales, reconocibles bajo el microscopio. Los macérales similares pueden reunirse en tres grupos que tienen características de reflectancia, origen y composición química análogas (Dirección General de Energía (DGE), 1998; Rionda, 2010; Coordinación General de Minería, 2013). Estos tres grupos son:

- La vitrinita, que proviene de celulosa. Tiene una reflectancia intermedia entre los dos grupos y suele ser el maceral más abundante (Figura 5.4).

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

- La liptinita, que proviene de los organismos de protección, reproducción y reserva de las plantas terrestres, tales como esporas, cutícula de las hojas, contenidos celulares y de las algas que viven en el medio de sedimentación. Este grupo presenta la reflectancia más baja entre los tres grupos (Figura 5.4).
- La inertita, proviene de la alteración previa al depósito de los materiales vegetales que originan a los otros dos grupos. La alteración incluye procesos físicos-térmicos, procesos químicos (como la oxidación) y procesos de alteración bioquímica por organismos. Este grupo presenta la reflectancia más alta (Figura 5.4).
- Ceniza, es el material mineral como parte de la materia inorgánica del carbón, este consiste principalmente de minerales que pertenecen a los sulfuros, sulfosales, óxidos e hidróxidos, silicatos, sulfatos, carbonatos, fosfatos, cloruros, elementos nativos (Figura 5.4).



Figura 5.4.- Tipos de macérales y el material del cual provienen (Modificado de Schweinfurth, 2000).

El carbón es una sustancia lábil que va cambiando de rango, se le domina como carbón de evolución creciente, aquellos donde los materiales originales han sufrido una alteración como el lignito, hulla y antracita. Este aumento de rango se ve reflejado en el contenido maceral, dado por un cambio gradual en

las propiedades físico-químicas. Los cambios en las propiedades en base al rango no son uniformes en la escala evolutiva y las velocidades de cambio son diferentes para cada uno de los macerales (DGE, 1998).

La vitrinita se presenta a lo largo de toda la escala evolutiva del carbón de rango medio y alto (sub-bituminosos hasta antracitas). Esto no ocurre con la liptinita ni con la inertita. Por esta razón se le considera a la vitrinita como el maceral más abundante en la mayoría del carbón (Schweinfurth, 2000).

5.2.- Minería del carbón

En México existen diferentes tipos de explotación minera para el carbón (Canet & Camprubí, 2006, Coordinación General de Minería, 2013):

- Minado a cielo abierto o por tajos: La Norma Oficial Mexicana NOM-023-STPS-2012 (DOF, 2012) define este tipo de minería como la obra minera a cielo abierto para explotar diversos minerales. Se lleva a cabo en la superficie del terreno a explotar, primero se retira el material estéril para recuperar el carbón, este minado se usa para recuperar el material a una profundidad de 50 metros.
- Minas subterráneas: La Norma Oficial Mexicana NOM-032-STPS-2008 (DOF, 2008) define a las minas como una excavación realizada por medio de tiros verticales o inclinados y galerías para extraer carbón; una vez cortado el carbón se traslada al exterior a través de bandas, el carbón es recuperado a profundidades de 300 m o más. Los desarrollos mineros sobre el manto de carbón, se construyen por medio de dos o más galerías, que llegan a alcanzar varios kilómetros de longitud, sin embargo, debido a las características de los sistemas de ventilación, estas galerías deben interconectarse a distancias de aproximadamente 100 m, para facilitar la dilución de los gases.
- Pozo: La Norma Oficial Mexicana NOM-032-STPS-2008, (DOF,2008) define este sistema de minería como una obra minera vertical o ligeramente inclinada, de aproximadamente dos metros de diámetro y

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

con profundidades que van desde 30 hasta 70 m. Los mineros cortan el manto para desarrollar una serie de galerías de aproximadamente 50 m de largo en forma de retícula, de donde extraen el carbón con el uso de carretillas y con ayuda de un malacate lo transportan al exterior.

5.3.- Riesgos significativos en la minería subterránea de carbón

Los riesgos significativos son todas aquellas tareas derivadas de los procesos de trabajo y que generan condiciones inseguras, una sobre exposición de los trabajadores a los agentes físicos, químicos o biológicos, capaces de provocar daño a la persona o al centro de trabajo (DOF, 2008). La Norma Oficial Mexicana NOM-032-STPS-2008, establece que es responsabilidad del patrón, el analizar los riesgos potenciales para cada área, proceso y actividad en toda la mina (DOF, 2008). Este análisis debe contemplar los riesgos de mayor impacto, los cuales son:

- **Explosiones:** Es la ruptura violenta de un cuerpo por la acción de un explosivo o por el exceso de presión en el interior, provocando un fuerte estruendo. Las explosiones pueden ser ocasionadas por la acumulación de metano (CH_4), en la atmósfera del túnel, en porcentajes explosivos que van del 5% al 15%; por la acumulación de polvo de carbón en suspensión, en concentraciones de $\sim 80 \text{ g/m}^3$ (Cashdollar, 2000) o bien, o por la ocurrencia de ambos factores. Las fallas en el equipo eléctrico, el sistema de monitoreo de gases, el uso y manejo de explosivos, así como los trabajos que requieren calentamiento (como son los de soldadura y corte), pueden ser la fuente que dé inicio a una explosión.
- **Incendios:** Fuego de grandes proporciones que arde de forma fortuita o es provocada y destruye cosas. Los incendios pueden suceder por el uso y manejo de explosivos, emisiones no controladas de metano (CH_4), fallas en los equipos eléctricos, calentamiento de los equipos mecánicos, trabajos que producen calentamiento, o como resultado de una explosión.

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

- Inundaciones: Ocupación por parte del agua de zonas que habitualmente están libres de ésta y se produce por la filtración de agua hacia las galerías, que se ve agravado por fallas en el sistema de bombeo, eventos de lluvias torrenciales, por la comunicación de la mina con una obra abandonada.
- Derrumbes: Es un fenómeno en el que existe un desplazamiento del material preexistente, ya que ha perdido su estabilidad. En la mina ocurre cuando se presenta una constante inestabilidad en el techo de las galerías, presencia de fallas geológicas, instalación de soportes inadecuados.
- Desprendimientos Instantáneos: Expulsión repentina y espontánea de carbón y gas, en la que el carbón se encuentra triturado y mezclado con gas. Se producen cuando se tienen contenidos elevados de gas, cuya presión de confinamiento supera la resistencia del carbón. La ocurrencia de estos eventos está íntimamente relacionada con la presencia de estructuras geológicas que causen fracturamiento intenso en el carbón y la consecuente pérdida de su resistencia.
- Lesiones al personal: Se le considera una lesión en el cuerpo de un trabajador. Pueden resultar por falta de capacitación y concientización. En la minería del carbón es una constante, ya que el personal está expuesto a diferentes peligros en todo momento. La ocurrencia de estos eventos está también relacionada a los riesgos anteriormente mencionados.

5.4.- Problemática de la Región Carbonífera

Durante los primeros años de extracción del carbón en la Región Carbonífera se han presentado los riesgos anteriormente mencionados, sin embargo el riesgo que es de mayor importancia para el desarrollo de este trabajo es el desprendimiento instantáneo de gas y carbón, actualmente la minería subterránea de carbón está regulada por la Norma Oficial Mexicana NOM-032-STPS-2008 seguridad en minas subterráneas de carbón, teniendo su

fundamento con la Ley Organica de la Administración Pública Federal (DOF,2014) y la Ley Federal del Trabajo (DOF,2012) que hablan de los reglamentos o instructivos que utilizan las autoridades laborales (patrones), para prevenir los riesgos de trabajo y lograr que se presten condiciones que aseguren la vida y salud de los trabajadores; esto se creó con la finalidad de facilitar la administración de los riesgos de trabajo derivados de las actividades de explotación (DOF, 2008). Esta norma establece las medidas que se deben adoptar en equipos, maquinarias, instalaciones y dispositivos, además de los procedimientos obligatorios que se deben realizar para desarrollar los trabajos extractivos. Igualmente, establece las medidas que se deben adoptar para administrar el riesgo que representan los desprendimientos instantáneos de gas y carbón en las minas subterráneas de carbón.

5.5.- Normatividad en minas subterráneas de carbón

En el numeral 12 de la Norma Oficial Mexicana NOM-032-STPS-2008, que menciona a los desprendimientos instantáneos de gas metano y carbón, requiere la elaboración de un análisis de riesgo para este fenómeno y establece los indicadores con los que este debe contar. No obstante, estos incisos no establecen la información que se deberá seguir en la elaboración de dicho análisis. Por este motivo, el presente trabajo propone utilizar como referencia la metodología establecida en la Norma Oficial Mexicana NOM-023-STPS-2012, donde se establece en el elemento 7, los valores para determinar la magnitud de riesgo y las tablas de ponderación que se han de utilizar (DOF, 2012). Cabe aclarar que las minas subterráneas de carbón quedan exceptuadas del campo de aplicación de la anterior norma y solo se pretende utilizar como referencia en la elaboración del análisis de riesgo de desprendimientos instantáneos de gas y carbón. La única norma oficial mexicana que tiene su campo de aplicación en las minas subterráneas, donde se desarrollen actividades relacionadas con la explotación de carbón, es la Norma Oficial Mexicana NOM-032-STPS-2008.

La Norma Oficial Mexicana NOM-023-STPS-2012 establece que la magnitud de riesgo (MR) es el producto de la probabilidad de ocurrencia, la exposición de

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

los trabajadores y la severidad del daño que puede ocasionar el riesgo, expresado según la Ecuación 1 (DOF, 2012).

Ecuación 1 $MR = P * E * S$

Dónde:

MR = Magnitud del riesgo;

P = Probabilidad de ocurrencia del riesgo;

E = Exposición de los trabajadores al riesgo, y

S = Severidad del daño.

También establece que los riesgos se deberán jerarquizar por su magnitud en graves, elevados, medios, bajos y mínimos. Dichas categorías servirán de base para establecer el orden de atención de las medidas de prevención, protección y control por adoptar; en conformidad con lo determinado en la Tabla 1, considerando que los riesgos graves se deberán atender de manera inmediata y en forma sucesiva, los riesgos elevados, medios, bajos y mínimos.

Tabla 1- Jerarquización del riesgo

Jerarquización	Resultado de la Ecuación $MR = P * E * S$	Descripción
Grave	Mayor a 400	Requiere de la aplicación de medidas de seguridad estrictas y particulares, a fin de modificar las condiciones de seguridad; los procedimientos de seguridad; el equipo de protección personal, o la capacitación.
Elevado	De 200 a 400	Requiere atención inmediata y revisión de las condiciones de seguridad.
Medio	De 70 a 199	Requiere corrección.
Bajo	De 20 a 69	Requiere atención y, en su caso, corrección.
Mínimo	Menor de 20	Requiere atención.

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

Los tres factores requeridos para medir la magnitud de riesgo (probabilidad, exposición y severidad) son definidos por la norma de la siguiente manera.

a) La probabilidad de ocurrencia de los riesgos (P), la cual deberá de obtenerse en base a la estadística de riesgos ocurridos en el centro de trabajo asociados a las actividades de la mina, en caso de no contar con dicha estadística, se tomara como referencia las de otros centros de trabajo que presenten características similares, conforme al contenido de la Tabla 2;

Tabla 2.- Probabilidad de ocurrencia de los riesgos (P)

Probabilidad	Definición	Ponderación
Remota	Que excepcionalmente puede ocurrir (una vez cada 10 años o más).	0.5
Aislada	Que excepcionalmente puede ocurrir (una vez al año).	1
Ocasional	Que pocas veces ocurre (una vez por mes).	3
Recurrente	Que ocurre con periodicidad (una vez por semana).	6
Continua	Que ocurre con regularidad (una vez al día).	10

b) La exposición de los trabajadores al riesgo (E), misma que se deberá obtener a partir de la frecuencia o tiempo de contacto o acercamiento al riesgo, de acuerdo con la Tabla 3, y

Tabla 3.- Exposición de los trabajadores a los riesgos (E)

Exposición	Definición	Ponderación
Muy baja	Una o dos veces al año.	0.5
Baja	Una o dos veces al mes.	1
Media	Una o dos veces por semana.	3
Alta	Una vez al día.	6
Muy alta	Más de una vez al día.	10

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

c) La severidad del daño (S) que puede ocasionar el riesgo, con su categoría y denominación, que habrá de obtenerse tomando como base las definiciones de daños establecidas en la Tabla 4.

Tabla 4.- Severidad del daño

Severidad	Definición	Ponderación
Menor	Sin daños o con daños que implican incapacidades temporales del trabajador de tres días o menos.	1
Seria	Puede implicar la incapacidad temporal del trabajador por más de tres días.	7
Crítica	Puede implicar la incapacidad permanente parcial del trabajador.	40
Fatal	Puede implicar la incapacidad permanente total o el deceso del trabajador.	100

Los indicadores, que la Norma Oficial Mexicana NOM-032-STPS-2008 establece en el numeral 12.3, pueden utilizarse para ponderar la probabilidad, exposición y severidad (DOF, 2008).

5.6.- Fenómeno de desprendimiento instantáneo

El fenómeno de desprendimiento instantáneo es una expulsión repentina de carbón y gas desde la frente de trabajo en las minas subterráneas de carbón.

Este fenómeno está ligado a la combinación de gas metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) (Hyman, 1987; Beamish & Crosdale, 1998; Hong-wei *et al.* 2008). El rango del tamaño de un desprendimiento oscila entre unas cuantas toneladas a miles de toneladas de carbón con los correspondientes volúmenes de gas que va desde décimas de metros cúbicos a cientos y miles de metros cúbicos.

Como se mencionó anteriormente la composición del gas es predominantemente metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y otras mezclas de gases. Los desprendimientos de dióxido de carbono tienden a ser mucho más violentos, porque existe el riesgo de una explosión posterior acompañada de metano (CH₄) (Sobczyk, 2011). El carbón donde ocurren los

desprendimientos instantáneos, comúnmente se encuentra pulverizado y aparece en flujos, aunque algunos eventos han presentado hundimientos o esponjamiento en el piso, este fenómeno está fuertemente relacionado al contenido de gas (Gray, 1980 II; Beamish & Crosdale, 1998).

5.6.1.- Inicio de un desprendimiento instantáneo

Generalmente, un desprendimiento instantáneo de gas y carbón está precedido por el fracturamiento del manto de carbón, sin embargo, el fracturamiento del carbón por sí mismo no predice la ocurrencia de un evento. En un desprendimiento instantáneo el material fallado se expulsa con energía y gas (Wang *et al.* 2012), este último contribuye de una manera importante a la expulsión de carbón y es generalmente el principal contribuyente a la liberación total de energía en la mayoría de los desprendimientos instantáneos (Gray, 1980 II).

La falla del carbón sucede cuando se alcanza un estado en que la tensión efectiva del carbón supera su resistencia. Para este caso la tensión efectiva se define como la tensión total menos el flujo de presión (Sobczyk, 2011). La presión del fluido puede provenir del contenido de gas o agua en el carbón, sin embargo se requiere muy poca dilatación para que el efecto de la presión del agua sea mitigado, mientras que la presión de gas se mantendrá mediante la desorción. Un desprendimiento instantáneo de gas y carbón ubicado en la parte baja de la frente de trabajo, puede ser obstruido por la carga del material extraído, provocando que este se ahogue y no genere repercusiones (Gray, 1980 I).

Las variaciones en las características del carbón causan diferentes respuestas ante el estrés. La madurez del carbón influye en su fractura, porque un carbón duro absorbe la energía que se propaga en las fracturas (Gray, 1980 I). En la compresión uniaxial la mayoría del carbón es frágil y se rompen en múltiples partículas, particularmente el carbón brillante (sub-bituminoso a antracita), por lo que la respuesta mecánica está en función del rango de carbón. Los tamaños de las partículas generadas son importantes, entre más fino sea el tamaño de partícula creado, mayor será la capacidad para liberar el gas más rápidamente y expulsarlo a la zona del desprendimiento instantáneo de gas y

carbón (Meng *et al.* 2014). Si el carbón ya está fracturado, por el proceso de falla entonces tiene una cohesión insignificante y se espera que se comporten como un suelo (mecánicamente), con la diferencia de que puede producir gas (Gray, 1980 I).

La dureza del carbón es un tema de especial importancia en los desprendimientos de carbón sólido. Está es, por definición, una medida de energía requerida para causar un aumento en el área de la fractura. Si pensamos que el fracturamiento ocurre como resultado de la presión del gas, entonces debemos pensar que el fracturamiento se puede propagar durante la liberación de gas, que se produce a causa de la desorción en el carbón (Gray, 1980 I).

5.6.2.- Mecanismos de un desprendimiento instantáneo

De acuerdo a Lama & Saghafi (2002) y con Wang *et al.* (2012) un desprendimiento instantáneo de gas y carbón ocurre por la interacción de los siguientes factores:

1) Aspectos geológicos

Para el proceso de desprendimiento instantáneo la geología juega un papel muy importante. El carbón asociado a estructuras geológicas complejas es susceptible a desprendimientos instantáneos de gas y carbón cuando tiene altas concentraciones de gas. Taylor (1852-1853), mientras estudiaba explosiones de metano (CH₄) al norte de Inglaterra, fue el primero en descubrir el fenómeno de expulsión de gas y desprendimiento de carbón. El observo que el desprendimiento instantáneo de gas y carbón, ocurría en las inmediaciones de actividad tectónica y que el carbón expulsado provenía de partes del manto de carbón, donde este es suave y alterado por la pérdida de la textura.

Lama & Bodziony (1998) Dividen en 2 grupos los aspectos geológicos:(1) Parámetros característicos en la ocurrencia y geometría de los mantos de carbón y, (2) parámetros característicos en la distribución tectónica de los mantos de carbón y las rocas encajonantes.

- (1) El primer grupo se caracteriza por presentar factores compresivos que influyen directamente en la geometría del manto de carbón. Estos factores incluyen: la profundidad, ángulo de buzamiento y el espesor del manto. Esto representa la forma geométrica de los depósitos de carbón.

Yang *et al.* (2014) estudió los parámetros de profundidad: (1) vector de dirección de máxima actuante sobre el manto de carbón y dos vectores de estrés horizontal, (2) la energía acumulada por el gas contenido en los poros de carbón y roca, (3) el cambio de temperatura y sus efectos en el proceso de desorción de gases en el carbón. A partir de este estudio descubrió que la intensidad de un desprendimiento instantáneo de gas y carbón es más pronunciada en el caso de un buzamiento más fuerte, ya que bajo estas circunstancias, el fracturamiento es más intenso. En su investigación también descubrió que la probabilidad de que ocurra un desprendimiento instantáneo de gas y carbón incrementa cuando el minado se hace de forma perpendicular a la posición del esfuerzo principal máximo, esto debido a la influencia que tiene el fracturamiento sistemático sobre la permeabilidad del carbón. Estos resultados soportan la afirmación hecha por Lama & Bodziony (1996) de que los desprendimientos instantáneos ocurren raramente en túneles paralelos al echado.

En general en un manto grueso es más probable que exista un desprendimiento instantáneo de gas y carbón que en uno más delgado. En mantos gruesos la probabilidad de que exista carbón suave incrementa y la cantidad total de gas disponible para el transporte de carbón expulsado es mayor. La cantidad de energía acumulada que puede iniciar una explosión es mayor cuando se compara con mantos con carbón más finos (Chen *et al.* 1995).

- (2) El segundo grupo que reconoce Lama & Bodziony (1996) comprende factores característicos que resultan de la acción tectónica y del vulcanismo. Estos factores incluyen: pliegues, fracturas, zonas de cizalla, cambios en el grosor de los mantos e intrusiones magmáticas. La ocurrencia de las áreas de interacción tectónica y volcánica puede tener

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

gran influencia en el proceso de inicio y progreso de un desprendimiento instantáneo de gas y carbón (Yang *et al.* 2014).

(2.1) Fracturas

La fracturación es el elemento básico de perturbación tectónica. El proceso de plegamiento da lugar a fracturas. Las juntas son fracturas naturales en el carbón. El metano (CH_4) y otros gases del manto de carbón, saldrán de los poros en presencia de un gradiente de presión que actuara como una fuerza de conducción y si las fracturas son lo suficientemente permeables, el gas comenzará a desorbar y migrara a través de la matriz de carbón y fluirá entre las fracturas naturales. Las fracturas naturales en el carbón se pueden dividir en dos clases principales (Close, 1993; Bodziony & Kraj, 1995):

- Fracturas endogenéticas que se forman durante el cambio físico en las propiedades del carbón en el proceso de metamorfismo (Figura 5.5).

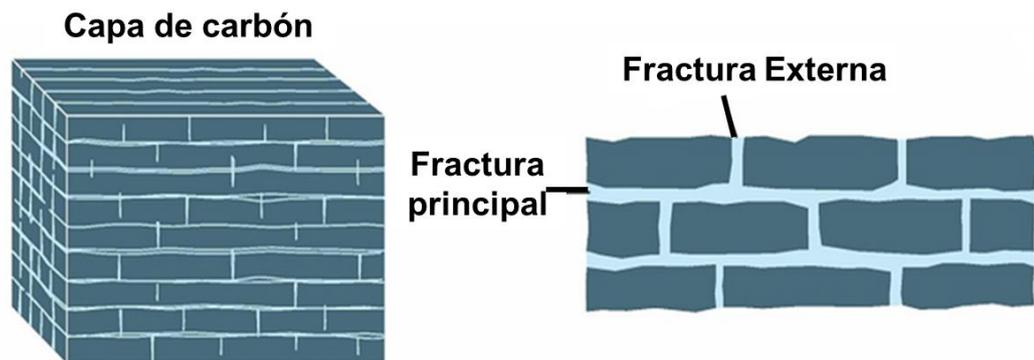


Figura 5.5.- Fracturas endogenéticas, resultado del metamorfismo del manto de carbón (Modificado de Bodziony & Kraj, 1995).

- Fracturas exogenéticas se forman como el resultado de tensiones externas del manto de carbón, particularmente de tensiones tectónicas.

Estas deformaciones pueden afectar la permeabilidad del manto en diferentes direcciones, por ejemplo, si se hace un túnel en dirección paralela al buzamiento de las capas, las fracturas *ac* y *hk0* (Figura 5.6) incrementarían la

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

permeabilidad del manto de carbón hacia la dirección del minado (Hancock, 1985; Yang *et al.* 2014).

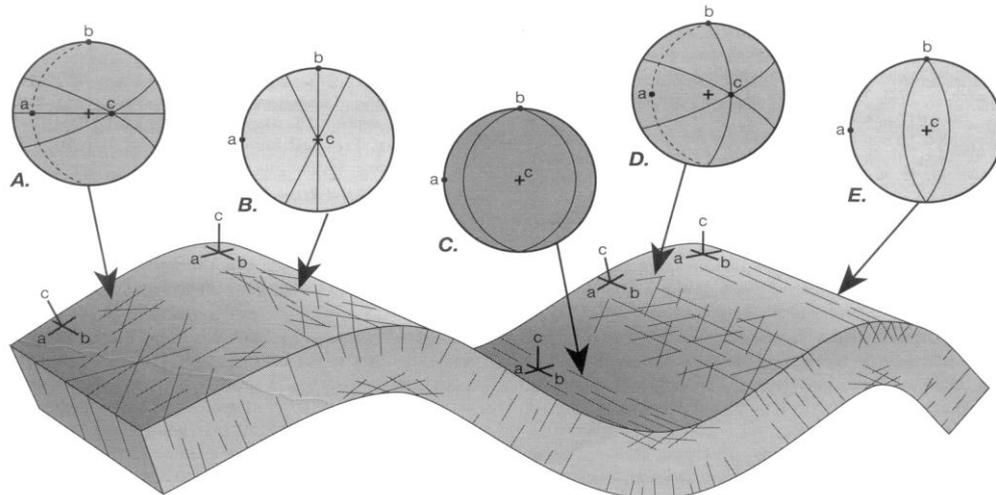


Figura 5.6.- Los estereogramas A y D representan los flancos del pliegue, B y E los lados convexos del pliegue y C el lado cóncavo del pliegue, se considera como modelo ideal del fracturamiento de un pliegue (Modificado de Twiss & Moore, 1973).

(2.2) Fallas

Se debe considerar que las fallas normales que presentan un salto mayor al espesor del manto de carbón, generarán una trampa estructural que detenga el flujo de gas y por lo tanto, estas pueden ser más peligrosas que aquellas fallas donde se presente un salto menor al espesor del manto de carbón. Cuanto mayor sea el espesor de las deformaciones, mayor es la probabilidad de un desprendimiento instantáneo de gas y carbón (Lama & Bodziony, 1996).

(2.3) Zonas de Cizalla

En zonas de cizalla donde los mantos de carbón se encuentran intercalados con mantos de lutitas suaves, éstas tienden a proteger la capa de carbón de una cizalla y crean condiciones menos susceptibles a un desprendimiento instantáneo de gas y carbón ya que las lutitas absorben el esfuerzo (Doyle, 2002).

Cuando se presentan areniscas que encajonan a los mantos de carbón, la frecuencia de zonas de cizalla aumenta y favorece la ocurrencia de un

desprendimiento instantáneo de gas y carbón. Por lo cual es importante revisar las características del techo y piso del manto de carbón económicamente explotable. Si se presentan mantos con grandes espesores en el desarrollo y existe un repentino cambio en el grosor del manto de carbón por efectos de deformación, esta zona podrá generar un desprendimiento instantáneo de gas y carbón (Shepherd *et al.* 1981; Chen *et al.* 1995).

2) Presión del yacimiento

Nakajima *et al.* (1995) analizaron el desarrollo de grietas y trituración de carbón en los bordes de la extracción, donde se genera una baja en el estrés y una disminución de la resistencia. También observaron que al existir cambios en la permeabilidad de los mantos de carbón, había una redistribución de la presión de gas y se incrementan las emisiones de gas. La transferencia de la presión del terreno de una fase estática a una fase dinámica influenciada por el desarrollo minero da como resultado la destrucción del manto de carbón cerca de la frente y debido a la pérdida de la resistencia, hacia el techo, dando lugar a la subsecuente generación de superficies de erosión dadas por la pérdida de cohesión del material que facilita la desorción y permiten el flujo del gas (Lama & Bodziony, 1996).

2.1) Presión del gas en el carbón

La presión del gas que está presente durante el proceso de formación del carbón va aumentando según la maduración de este, por lo tanto el carbón que presentan mayor susceptibilidad a un desprendimiento instantáneo de gas y carbón, es aquel carbón que se ubica en el rango de sub-bituminoso a antracítico, y si cumplen con las siguientes condiciones (Wang *et al.* 2013):

- Presencia de contenidos altos de gas en el carbón y disminuciones abruptas durante el desarrollo.
- La generación rápida de grietas y desintegración de carbón como consecuencia del desarrollo, la formación de superficies nuevas fracturadas, garantizan que la desorción se intensifique y exista una mayor filtración de gas (Figura 5.7).

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

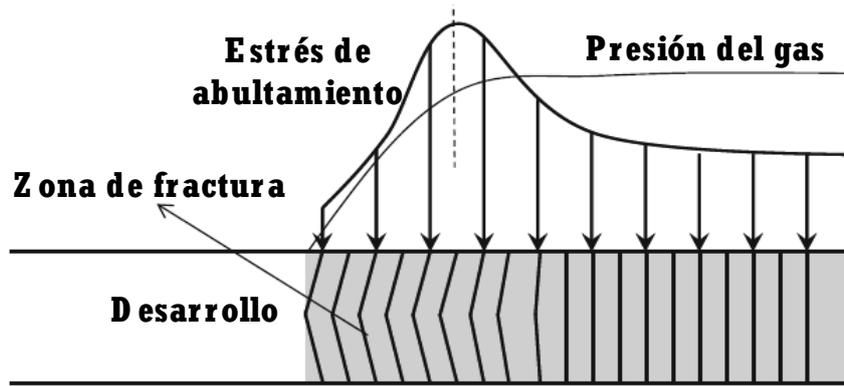


Figura 5.7.- Relación de estrés y la presión del gas frente del desarrollo minero (Modificado de Yang *et al.* 2014).

- El gas presente en el manto, desintegra las partículas de carbón e intensifica el flujo de gas en las partículas de carbón dentro de la frente de trabajo (Figura 5.8).

El gas liberado de las fracturas y grietas del carbón es suficiente para iniciar un desprendimiento instantáneo de gas y carbón, debe existir una presión de gas que este dentro del rango de 0.3-0.6Mpa (43.51psi-87.02psi) (Bodziony & Kraj, 1995; Lama & Bodziony, 1998).

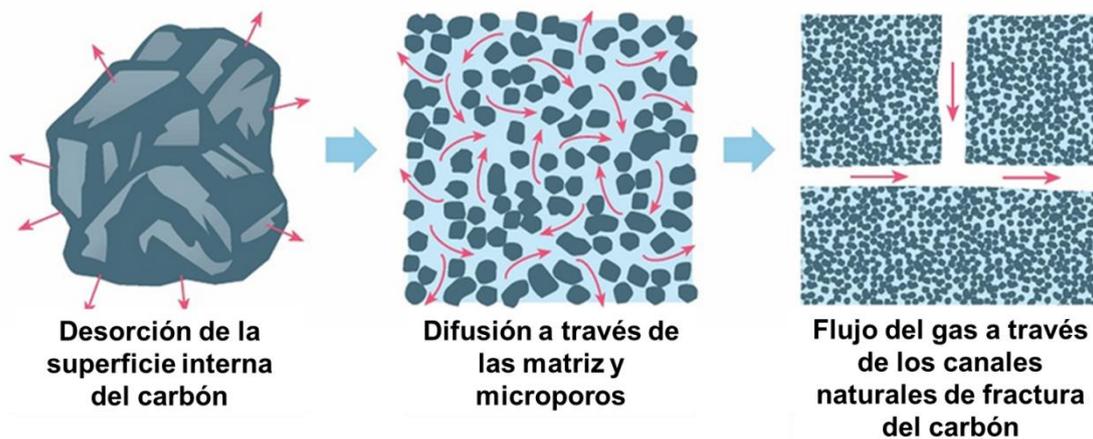


Figura 5.8.-Un carbón con partículas desintegradas, en donde el flujo de gas se encuentra intensificado por la falta de canales hasta que sale a una matriz más ordenada y el flujo de gas se vuelve estable (Modificado de Bodziony & Kraj, 1995).

5.6.3.- Desprendimientos instantáneos asociado al tipo de carbón

Estudios realizados por Hargraves (1980) demostraron que la probabilidad a un desprendimiento instantáneo de gas y carbón se relacionaba con la maduración del carbón. Por lo tanto si existe carbón con mayor grado de madurez, este absorbera mayores cantidades de gas. Por ejemplo, a una presión de 2000 KPa (290psi) se absorberán 20 m³/t de gas para un carbón con 10% de materia volátil (Antracita), mientras que a una presión de 1000 KPa (145psi) se absorberán 10 m³/t de gas para un carbón con 20%-25% de materia volátil (Sub-bituminoso-bituminoso) (Figura 5.9) (Kim, 1977). La capacidad de sorpción del gas cuando un carbón ha absorbido diferentes multicomponentes (CO₂, CH₄, H₂O, N₂) involucran condiciones especiales para cada uno (presión, humedad, madurez, materia volátil) (Bodziony & Lama, 1996).

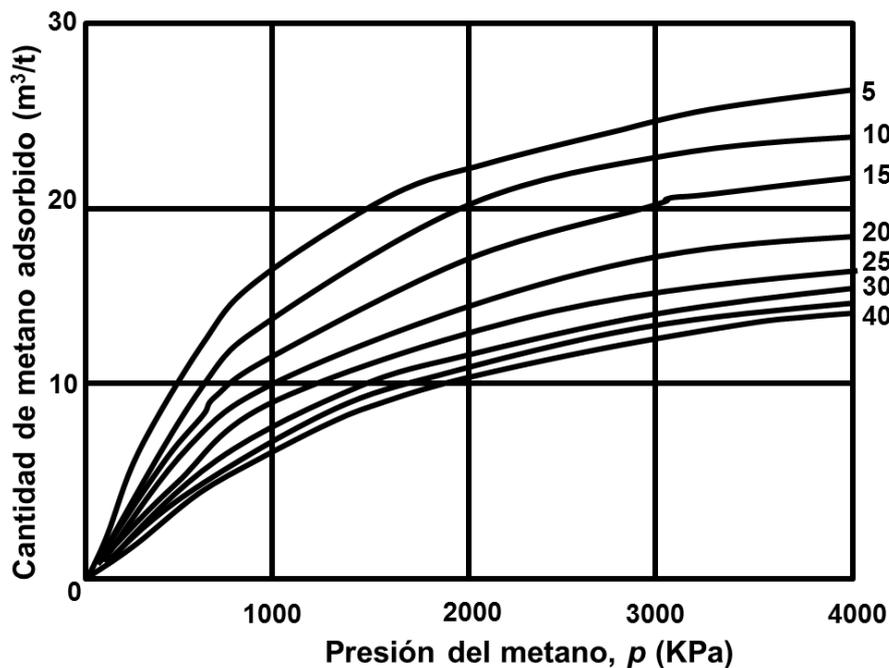


Figura 5.9.- Isoterma de presión y cantidad de gas presente en los diferentes rangos de maduración del carbón (Modificado de Kim, 1977).

5.6.4.- Relación de profundidad y desprendimientos instantáneos

La profundidad del manto de carbón se debe considerar, porque así se puede determinar la carga vertical sobre el yacimiento, involucrando parámetros de

geometría en la estructura del manto de carbón (Yang *et al.* 2014). Hargraves (1980) menciona que el rol de la profundidad es importante porque la tensión vertical ejercida por la profundidad se volverá el principal esfuerzo, presentado una influencia sobre la presión del gas que está en el yacimiento.

Lama (1995) concluye en estudios realizados en varias minas australianas de carbón, que al incrementar gradualmente la profundidad hay una variación en la frecuencia de los desprendimientos instantáneos de gas y carbón, con el aumento del peso de los sólidos, esto influye en la distribución del contenido de gas en el manto de carbón. Al presentarse un incremento en el potencial de energía que se encuentra acumulado y el gas contenido en el yacimiento, incrementa la frecuencia de ocurrencia de un evento. Desde este punto de vista, los datos muestran que la distancia en tamaño de masa del carbón y el volumen de gas liberado de un desprendimiento instantáneo de gas y carbón incrementa con la profundidad. Es aceptado en general que el incremento de la profundidad impacta la madurez del carbón, siguiendo la ley de Hilt (1857) (*Revisar 5.1.2 Emisión de gases durante la carbonización*) (Bodziony & Lama, 1996).

6.- METODOLOGÍA

El presente trabajo se llevó a cabo en tres etapas: 1) Recopilación bibliográfica, 2) Campo, 3) Gabinete.

1) Etapa de recopilación bibliográfica.

Al inicio de este trabajo se realizó investigación, compilación y análisis de la información sobre desprendimientos instantáneos de gas y carbón en regiones del mundo donde se presentaran las mismas condiciones o similitudes con el área de estudio, para tener un panorama que permitiera entender cómo se comportaba el yacimiento. Al analizar las referencias bibliográficas de la geología de la región y el área de estudio se dio el primer paso para el desarrollo de la investigación, y con ello entender mejor el fenómeno de desprendimiento instantáneo de gas y carbón; y así clasificar aquellas condiciones que pudieran desencadenar dicho evento.

2) Etapa de Campo.

Para la obtención de los datos del fracturamiento del manto de carbón del yacimiento, se procedió a medir el ángulo que guardan los planos del manto de carbón con respecto al rumbo de la galería. Para obtener este ángulo, se utilizaron, reglas de madera y el transportador de una brújula. Ésta medición se hace inicialmente con la brújula, ésta se alinea con el espejo y la pínula, después se pone a alguien frente al corte y éste lanzará la luz de su lámpara hacia uno, y sin mover la brújula, se mide el ángulo que se forma con el plano que se planea medir. Como son ángulos que están con respecto a la galería, se utilizan los centros obtenidos por topografía.

También para medir el contenido de gas presente en los barrenos de las frentes de trabajo, se utilizó el equipo Dräger X-am 7000 (Figura 6.1), que detecta cinco clases de gases (CO , CH_4 , CO_2 , O_2 , H_2S .) con un sensor especializado para detectar gases explosivos y vapores orgánicos inflamables, que al presentar lecturas altas fuera del rango normal de gas, activa una alarma visible y audible para alejarse, este equipo fue ubicado en la frente de trabajo en las entradas de los orificios de barrenación.

3) Etapa de gabinete

Para realizar el presente estudio, la empresa donde se realizó este trabajo proporcionó la información de sondajes hechos para el cálculo de reservas, junto con los resultados de pruebas sísmicas para elaborar los planos de estructural, grosores del manto de carbón y de la roca encajonante; para detectar posibles zonas donde los mantos de carbón se encontraban en fallas, cizallas, salbandas de fallas y adelgazamientos en los mantos; con el resultado de estos sondajes se pudo obtener la profundidad máxima del yacimiento.

En zonas del desarrollo se obtuvo la dirección del fracturamiento y se elaboraron redes estereográficas de wulff en el programa Stereonet para determinar, la dirección máxima de esfuerzo a la que está sometido el yacimiento. Para la elaboración de los planos del proyecto minero, se utilizó AutoCad Carlson Mining para la edición y ajuste de la información.

Para los estudios de desorción de contenido de metano en capas de carbón, el objetivo es capturar rápidamente la muestra de carbón en un recipiente sellado,

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

este recipiente deberá contener gas inerte o agua para estabilizar la muestra. El recipiente (frasco) se diseñará y construirá o fabricara para que en el momento de que el núcleo este en la superficie sea fácil de llenar, cerrar rápidamente y contener los gases que el carbón llegara a liberar, facilitando las mediciones de gas de desorción rápido. Los frascos donde se contendrá la muestra deberán de ser de aluminio o de plástico; se utilizara un manómetro con el que se obtendrá el volumen de gas liberado; después se mide el volumen de gas restante, y este se obtiene de una muestra triturada de carbón. Para la composición del gas o análisis gas de isótopos o ambos, el gas se muestrea durante la desorción de este en carbón. Todos estos datos se introducen sobre formularios y hojas de cálculo. El gas perdido, gas desorbido y contenido residual de gas, se suman para obtener el contenido total de gas que, después del nuevo cálculo del pesaje base de la muestra, se tiene el rendimiento total de contenido de gas expresado en cm^3 / g o $\text{m}^3 / \text{tonelada}$. Con estos datos se elaboraron las curvas de gas y mallas de los contenidos de gas del área de estudio.



Figura 6.1.- Equipo Dräger utilizado para medir el contenido de gas en los barrenos de la frente de trabajo.

Al tener toda esta información se procedió a elaborar el análisis de riesgo de desprendimiento instantáneo de gas y carbón del proyecto minero, y así establecer parámetros de control para un mejor desarrollo en la construcción de galerías subterráneas en el área de estudio.

7.- RESULTADOS

7.1.- Formación Olmos en el área de estudio

7.1.1.- Distribución.

Se encuentra distribuida en gran parte de la Cuenca de Sabinas con gran presencia en la Subcuenca Saltillito-Lapacitos (*Véase en 3.2.1. Secuencia estratigráfica de la Región Carbonífera de Coahuila, Formación Olmos*).

7.1.2. Características del yacimiento

A continuación se describen las características de los mantos de carbón en las diferentes subcuencas que comprende el Distrito Carbonífero Sabinas-Monclova. En la Subcuenca de Sabinas el yacimiento carbonífero está formado por una serie de mantos de espesores desde unos cuantos centímetros hasta 1.80 m, interestratificados con lutitas, limolitas y areniscas depositadas en la base de la Formación Olmos, denominada zona de carbón, cuyo espesor varía de 13 m en el extremo sureste, cambiando de 27 a 30 m en la porción noroeste de la subcuenca. El mayor número de mantos que se conocen es de 15 y como mínimo se reportan únicamente 9 mantos, esto es porque posiblemente los otros mantos han sido erosionados.

Los cuerpos más persistentes son los llamados doble manto, dentro de los cuales están los espesores más gruesos de mayor importancia económica. Éste horizonte es de mucha utilidad y sirve como guía estratigráfica en la correlación de los mantos de carbón económicamente explotables. Ésta opinión está soportada por los contactos graduales que se observan en algunos casos, por la presencia ocasional de bandas o laminillas de materia orgánica dentro de éstas capas y, en algunas localidades, la presencia dentro del carbón de múltiples capas con éstas mismas características (Figura 7.1, Figura 7.2) (Monografía Geológico-Minera, 1993).

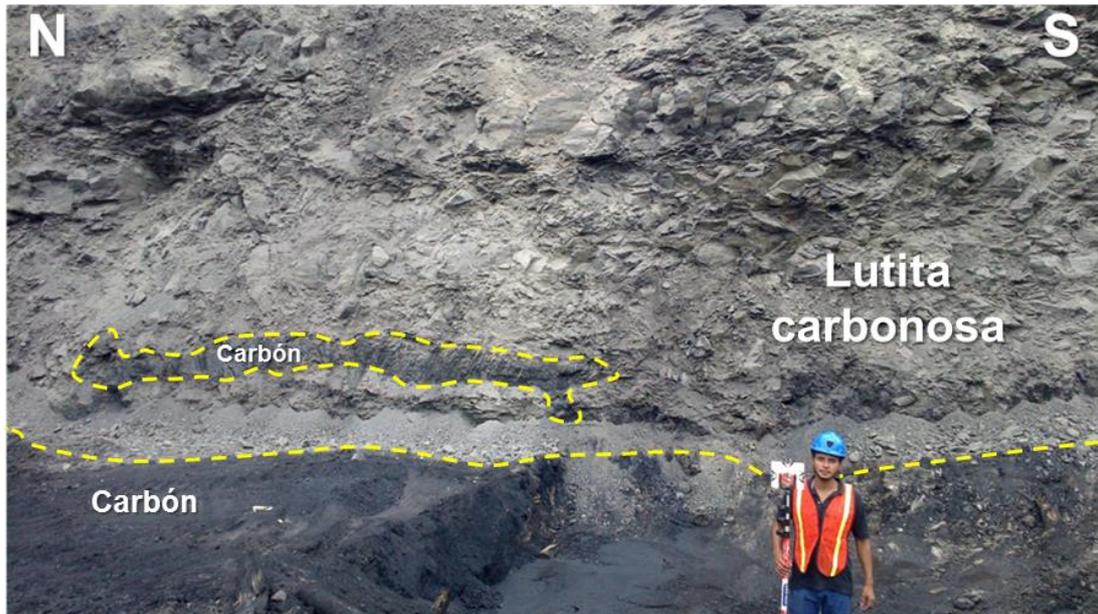


Figura 7.1.- En esta fotografía se observa la distribución de los mantos de carbón, y como escala un ayudante de topografía del tajo.

En las Subcuencas de Saltillo-Lampacitos, Adjuntas y Monclova, los mantos de carbón presentan las mismas características que en la Subcuenca de Sabinas, diferenciados únicamente por una menor continuidad y espesor de los mantos de carbón, reduciéndose por lo tanto la zona de transición contenedora de los cuerpos económicamente explotables. Las Subcuencas de Esperanzas, San Salvador y El Gavilán, presentan características similares en cuanto a distribución de los mantos de carbón diferenciándose geomorfológicamente, porque en estas áreas predominan ambientes continentales. Por último las Subcuencas de Adjuntas Sureste y San Patricio presentan depósitos de predominio marino, encontrándose mantos de carbón de espesor muy reducido y sin ningún interés económico (Monografía Geológico-Minera, 1993).

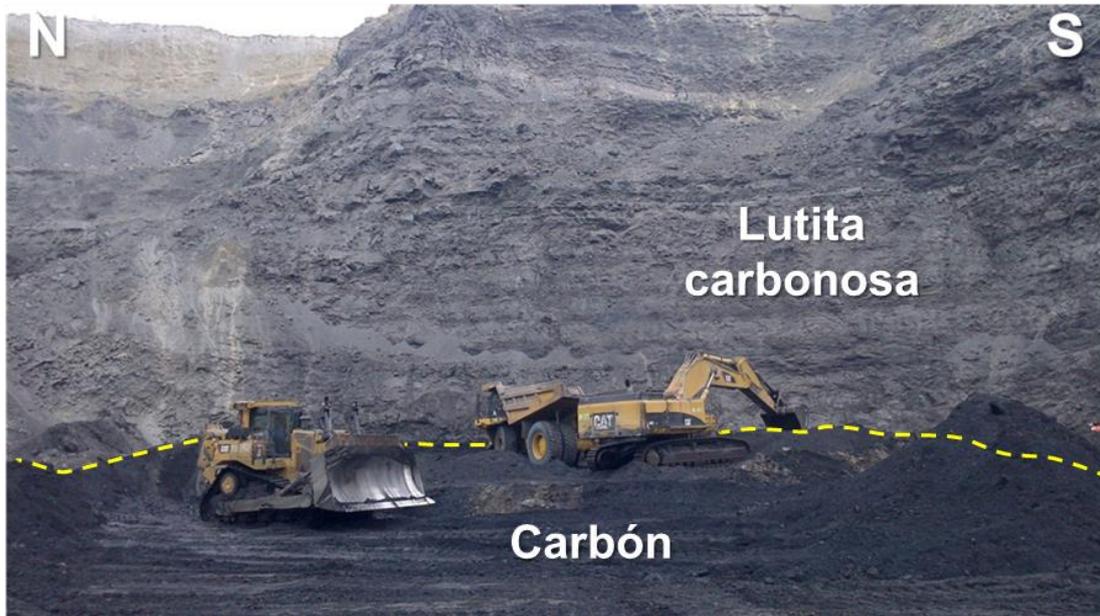


Figura 7.2.- Ésta fotografía muestra la columna completa del yacimiento, se tiene delimitado el manto de carbón de la lutita carbonosa, como escala, un yucle, una excavadora y un tractor de oruga, de aproximadamente 7.4 m de altura cada máquina.

7.1.3.- Características petrográficas

Los estudios petrográficos para conteo maceral, muestran el porcentaje en volumen de los componentes microscópicos de muestras de carbón que no presentan manifestaciones de alteración. Según las muestras de Pérez (2014) procedentes de diferentes mantos de carbón de la Formación Olmos, el obtuvo una gran variedad de microfotografías, donde observo un predominio del grupo maceral vitrinita (Tabla 5).

Tabla 5.- Porcentaje en volumen de macérales de las muestras estudiadas de carbón sin alteración (Modificado de Pérez, 2014).

# Muestra	%Vitrinita	%Liptinita	%Inertita	%Mat. Mineral
1	77.40	0.00	8.65	13.94
2	76.92	0.00	7.18	15.90
3	77.40	0.00	5.29	17.31
4	78.10	0.00	7.17	14.76
5	74.33	0.00	9.09	16.58

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

Las muestras de Pérez (2014) se encontró inertitas, materia mineral y pirita framboidal, como se observa en la Figura 7.3.

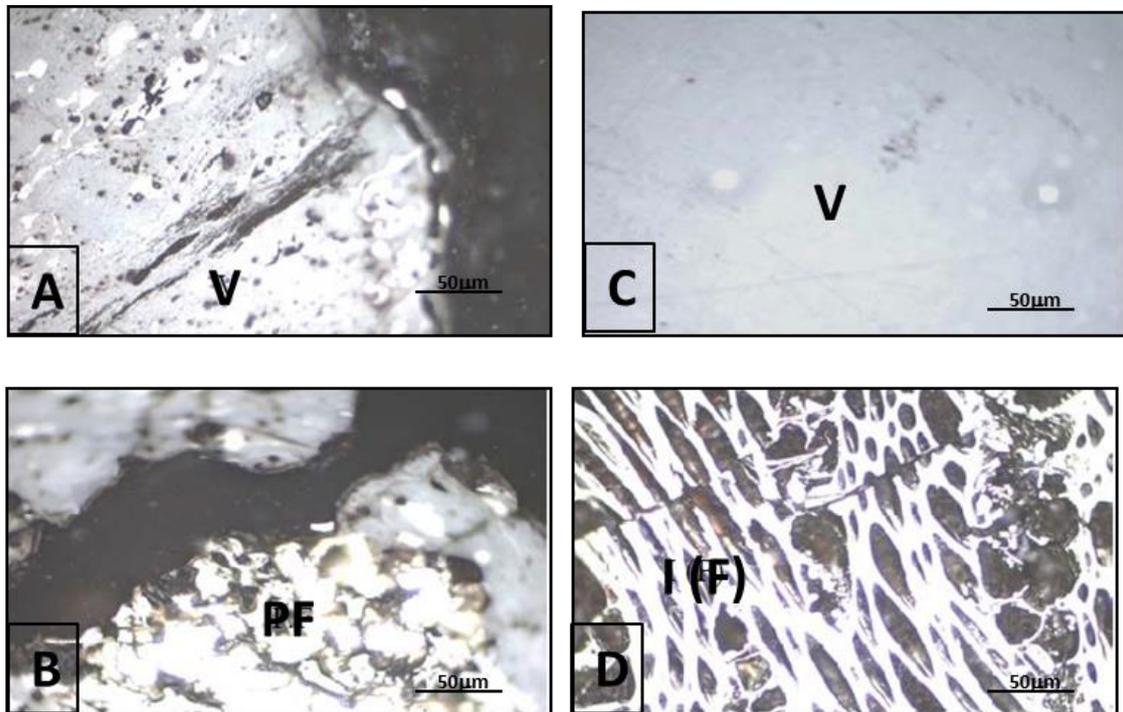


Figura 7.3.- Microfotografía de macéras presentes en muestras de carbón sin alteración que tienen materia orgánica así como su estructura mineral del carbón en mantos de la Formación Olmos, Subcuenca Saltillo-Lapacitos, Noreste de México. A) Vitrinita con presencia de inertita así como materia mineral. B) Pirita framboidal con gran brillo alojado en cavidades de vitrinita. C) Presencia de vitrinita muy conservada. D) Predominancia del subgrupo macéras de la inertita, fusinita en asociación a materia mineral. (Abreviaturas V=Vitrinita; F= Fusinita; PF; Pirita framboida; I= Inertita) (Modificado de Pérez, 2014).

También Pérez (2014) realizó estudios petrográficos para conteo maceral en muestras de carbón alterado proveniente de desprendimientos instantáneos de gas y carbón. Las muestras en base a su contenido se pueden catalogar como carbones moderadamente altos en vitrinita en base al contenido maceral (Tabla 6). Estas muestras presentan valores altos en comparación con los resultados de las muestras de carbón sin alteración (Figura 7.4), esto podría significar que el grado de reflectancia de vitrinita estaría en relación con los desprendimientos instantáneos de gas y carbón (Pérez, 2014).

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

Tabla 6.- Porcentajes en volumen de macérales de las muestras estudiadas de carbón alterado proveniente de desprendimientos instantáneos.

# Muestra	%Vitrinita	%Liptinita	%Inertita	%Mat. Mineral
6	77.78	0.00	3.58	18.64
7	74.24	0.00	6.37	19.39
8	76.36	0.00	2.30	21.34
9	73.18	0.00	3.45	23.37
10	77.43	0.00	3.50	19.07

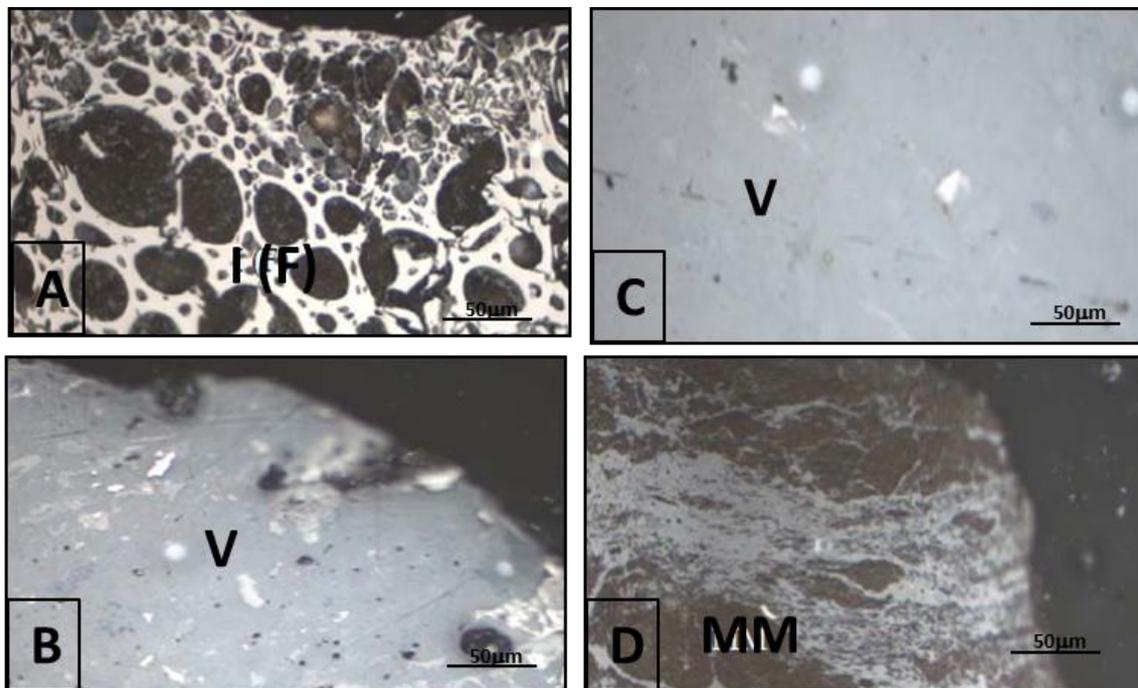


Figura 7.4.- Microfotografía de macérales presentes en muestras de carbón alterado en mantos de la Formación Olmos, Subcuenca Saltillito-Lampacitos en el Noreste de México. A) Fusinita e Inertita. B) Vitrinita en mayor cantidad con presencia de fusinita y levemente semifusinita. C) Predominancia de vitrinita bien conservada con un filón de semifusinita. D) Presencia de materia mineral diseminada en una matriz de vitrinita bien conservada. Abreviaturas; V=Vitrinita; F=Fusinita; MM=Materia mineral; I=Inertita. (Modificado de Pérez, 2014).

7.2.- Análisis de riesgo de desprendimiento instantáneo en la Norma Oficial Mexicana NOM-032-STPS-2008

7.2.1.- Propuesta de análisis de riesgo de desprendimiento instantáneo

La Norma Oficial Mexicana NOM-032-STPS-2008 establece que las minas subterráneas de carbón deben elaborar un análisis de riesgos para determinar e identificar las áreas propensas a desprendimientos instantáneos de gas metano y carbón, contenido en el numeral 12 en el cual se enumeran 10 incisos para su cumplimiento, sin embargo se notó que no mencionan de manera puntual el contenido de cada uno de estos apartados, por lo que se elaboró una propuesta del contenido de cada uno de estos.

La normatividad referida establece que este análisis de riesgo debe considerar al menos, los siguientes indicadores:

- a) Los antecedentes de desprendimientos en explotaciones realizadas en la región;
- b) El tipo de carbón a explotar (bituminoso o hulla, sub-bituminoso, antracita, lignitos, entre otros);
- c) Los tipos de desprendimientos posibles;
- d) Los planos geológicos estructurales (Isopacas, fallas, deformaciones, entre otras);
- e) La distribución de los contenidos de gas metano en el manto de carbón, en m^3/Ton ;
- f) La presencia de milonita (capa reactiva) en la estratigrafía del manto;
- g) Las estructuras geológicas en parte superior e inferior del manto a explotar;
- h) La profundidad del manto a explotar;
- i) La determinación del rumbo del fracturamiento principal del manto de carbón a explotar, y

j) Las estadísticas de las concentraciones de gas metano en el (los) manto(s) de carbón por m³/Ton.

Cada inciso se interpretó con el fin de determinar el tipo de información necesaria y el tratamiento que se le debe de dar para ponderar: la probabilidad, severidad o exposición de un evento de desprendimiento instantáneo de gas y carbón, obteniéndose la siguiente propuesta.

a) Los antecedentes de desprendimientos en explotaciones realizadas en la región.

Para el cumplimiento de este punto, es necesario reunir toda la información posible, la cual puede obtenerse de diarios, reportes técnicos o comunicación personal con quienes prestaron sus servicios en proyectos mineros cercanos al área de estudio. El objetivo final es contar con una descripción general de las actividades desarrolladas cerca del proyecto, dando mayor importancia aquellas que involucren registros de desprendimientos instantáneos, con condiciones geológicas similares a las que se esperan en el área a evaluar y explotar.

Quien desarrolle esta investigación, deberá considerar los tipos de minado que se han utilizado, las profundidades máximas alcanzadas y la frecuencia con la que se presentaron eventos de desprendimiento instantáneo durante el minado. De manera particular, en la zona de interés se deben mencionar las condiciones geológicas que se esperan para el yacimiento, así como las profundidades máximas proyectadas. Si el proyecto ya presenta avances en el desarrollo de sus galerías, es necesario considerar los eventos que se han registrado durante las labores mineras sin importar su magnitud; por ejemplo, las emisiones anómalas de gas que provienen de grietas, las manifestaciones de gas y fragmentos de carbón que son arrojados durante la perforación para la extracción de gas, y cualquier comportamiento atípico que muestre el yacimiento durante su explotación.

Con esta información, será posible generar una matriz de eventos donde se integre su ubicación, estructuras geológicas asociadas, profundidad, volumen del gas o material expulsado, así como las consecuencias del evento y

medidas de prevención que se hayan adoptado para el reinicio de las operaciones. Ésta base de datos puede dar una idea sobre la complejidad del proyecto. A partir de ésta matriz se puede estimar la frecuencia y magnitud de los eventos que podrían ocurrir. Quien elabore el análisis de riesgos deberá integrar ésta información al mismo para sustentar los valores de probabilidad y severidad ponderados. Siempre y cuando se utilicen los mismos métodos de minado, se podrá manejar ésta información para ponderar el nivel de exposición del personal a éste riesgo. Adicionalmente, se evaluarán las medidas de prevención que hayan sido adoptadas en otros proyectos mineros y en base a los resultados obtenidos, se podrán implementar en el proyecto evaluado.

- b) El tipo de carbón a explotar (bituminoso o hulla, sub-bituminoso, antracita, lignitos, entre otros).

Considerando los estudios realizados por Hargraves (1980) y Rionda (2010), donde determinaron carbón con alto grado de madurez, tales como los sub-bituminosos a antracíticos, son más propensos a originar un riesgo de desprendimiento instantáneo de gas y carbón, es necesario realizar un muestreo del carbón a explotar para determinar su rango, y contar con información fisicoquímica de las muestras como: color, brillo, dureza, contenido de materia volátil y gas. Se recomienda contar con valores de reflectividad y contenido maceral de algunas muestras de carbón. Al obtener el tipo de carbón a explotar y sus características, se podrá comparar con carbón que tenga antecedentes a eventos de desprendimientos instantáneos de gas y carbón. Esta comparación aportará información útil en la ponderación de la probabilidad y la severidad que se utilizará en el análisis de riesgos.

- c) Los tipos de desprendimientos posibles;

Existen diferentes sistemas de clasificación de desprendimientos instantáneos, algunos se basan en la magnitud de los eventos (volumen de gas y material expulsado), mientras que otros se enfocan en las características propias del evento como: la ubicación de la fuente de emisión, duración y magnitud de la emisión, o si el evento estuvo acompañado de una expulsión de carbón

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

fragmentado. Tomando en cuenta las características de los eventos ocurridos en la región, quien realice el análisis de riesgo deberá definir cuál sistema de clasificación es el más apropiado para el área de estudio. Por ejemplo, para los yacimientos de carbón de la Región Carbonífera de Sabinas, se recomienda el uso del sistema propuesto por la Dirección de Inspección de Minas Alemanas mencionado en el estudio de Noack *et al.* (1995), en donde clasifican a los desprendimientos en cuatro tipos, nombrados como desprendimientos de gas y carbón (Tipo 1), desprendimientos de gas y roca (Tipo 2), emisión alta en el suelo (Tipo 3) y liberaciones repentinas de gas (Tipo 4), en este último tipo se presenta una categoría según las condiciones que actúen en la frente de trabajo (Tabla 8). Así mismo, Bodziony & Lama (1996) clasificaron en cuatro grupos a los desprendimientos instantáneos registrados en Australia, basándose en el volumen de material arrojado en los eventos (Tabla 7).

La información obtenida de los antecedentes de explotaciones realizadas en la región puede servir para crear un sistema local de clasificación, el cual puede complementarse con información sobre las condiciones geológicas del manto, comportamiento de la emisión de gas y profundidad. Con ello se podrá crear un catálogo de condiciones que se relacionen con la ocurrencia de desprendimientos instantáneos, y será integrado posteriormente en el plan de trabajo requerido por la Norma Oficial Mexicana NOM-032-STPS-2008 (elemento 12.6), bajo el concepto de “indicadores de riesgo”. Una vez que ésta información ha sido integrada en el análisis de riesgos, puede utilizarse para ponderar la severidad y en algunos casos proporcionará información relevante sobre la probabilidad de ocurrencia.

Tabla 7.- Clasificación de desprendimientos instantáneos en cuatro grupos, basados en material expulsado en un sólo evento de desprendimiento (Modificado de Bykov, 1985)

Clase	Descripción
Clase I	Pequeños desprendimientos- arriba de 10 toneladas
Clase II	Desprendimientos medianos- de 11 a 100 toneladas
Clase III	Grandes desprendimientos- de 101 a 1,000 toneladas
Clase IV	Muy grandes desprendimientos- mayores que 1,000 toneladas

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

Tabla 8.- Liberaciones que ocurren de repente en cantidades importantes de gas: categorías y contramedidas (Modificado de Noack *et al.* 1995)

Desprendimientos de gas y carbón	Desprendimientos de gas y roca	Emisiones de gas en el suelo	Otras liberaciones de mayores cantidades de gas	
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	
Tipo 4				
Categoría	Condiciones	Causas	Temprana detección	Prevención
Categoría 1 Gas expulsado de las fisuras	Gas expandido libre en los canales de las fracturas (Generalmente en fallas o fallas inversas)	Exploración en los canales de las fisuras (Generalmente en las operaciones de desarrollo)	Barrenos de exploración	Gas liberado durante la barrenación
Categoría 2 Desplazamiento de carbón	Carbón sujeto a esfuerzos tectónicos, que conducen a un desarrollo con echados muy abruptos (efectos de gravedad)	Operación de desarrollos	Barrenos de exploración	Reforzamiento en la cara del carbón
Categoría 3 Casos de límite: Desprendimientos de gas/ Roca abultada	Altas presiones en la roca y altos contenidos de gas; posiblemente fallas microtectónicas	Desarrollos en las frentes de trabajo (en algunos casos: aumento del techo por la planeación de una frente)	Presión extra en la roca, contenido de gas, datos de desorción, barrenos de exploración	Perforación para la liberación de la presión y bombeo para la cesión de gas
Categoría 4 Gas colectado en antiguos desarrollos	Formación de estanques de gas en labores mineras antiguas (Presencia de gas a sobre presión)	Fluctuaciones barométrica en la presión del aire, comunicación entre antiguos desarrollos y partes abiertas de la mina	Conocer la localización de antiguos frentes de trabajo	Sobre presión de ventilación y/o conexión con antiguos desarrollos a el sistema de drenaje de gas
Categoría 5 Frecuencia en frentes de trabajo al empezar la fase producción	Extremadamente competente (5a) o mecánicamente menos estable los estratos de roca (5b) en el techo del manto minado	Comienzo de las operaciones de operación	Reconocimiento de la estructura litológica en el techo y de fallas tectónicas	Drenaje de gas (Series especiales de barrenación si es necesaria), reduce el porcentaje de producción

d) Los planos geológicos estructurales (Isopacas, fallas, deformaciones, entre otras);

Pescod (1947-48) realizó estudios en zonas con estructuras geológicas, y encontró que de 101 desprendimientos instantáneos ocurridos en minas de antracita en West Wales, 76 de estos eventos tuvieron lugar en anticlinales o pliegues, seguidos por un adelgazamiento del manto. El manto que estudió presentaba mucha deformación como carbón fragmentado, presencia de relleno de fallas, adelgazamientos repentinos y engrosamientos del manto, así como echados abruptos; también observó que no todos los mantos de carbón son propensos a desprendimientos instantáneos, durante el desarrollo minero el yacimiento puede presentar más de un manto de carbón en la frente de trabajo, por lo tanto los mantos presentes durante el minado tendrán menor

susceptibilidad a un desprendimiento instantáneo, que el manto deformado ya que los otros mantos presentan mayor competencia, como falta de deformación, sin presencia de brechas de falla y una desorción lenta del gas.

Así mismo, Meng *et al.* (2014) mencionan que si se tienen mantos de carbón con espesores menores a 30 centímetros, la susceptibilidad a un desprendimiento instantáneo de gas y carbón será menor, porque la presencia de factores como la alteración y esfuerzos compresivos sobre estos mantos, no generan zonas de riesgo, pero al presentarse mantos con espesores mayores a 30 centímetros, la probabilidad de que se encuentren deformados aumentará, e igualmente la probabilidad de ocurrir un desprendimiento instantáneo de gas y carbón. Considerando las observaciones hechas por Pescod (1947-48), los cambios en el espesor, pliegues, fallas y los estratos de carbón intensamente fracturados, deben considerarse como indicadores de riesgo de desprendimientos instantáneos de gas y carbón.

La generación de las isopacas definen los cambios en el espesor de los mantos de carbón, para obtener éstos datos se debe realizar mediante el método de semivarianza para describir la estructura de autocorrelación espacial, aplicando kriging para elaborar los mapas de contornos (Giraldo, 1997). Es conveniente acompañar el mapa de isopacas con los correspondientes mapas de isolíneas, de los errores con el propósito de identificar zonas de mayor incertidumbre respecto a las predicciones. Y en los casos en que se observen cambios atípicos en el espesor, se debe marcar en el plano considerando una cierta influencia lateral de ésta condición.

Las estructuras geológicas observadas e inferidas, deben incluirse en éste plano y debe marcarse un área utilizando el mismo criterio. En los casos en que se cuenta con más de un manto de carbón económicamente explotable, cada uno debe ser tratado de forma independiente. Cada estructura encontrada debe considerarse como una posibilidad de desprendimiento instantáneo. La detección de estructuras se puede apoyar en el uso de métodos geofísicos, como son los métodos sísmicos, de ésta manera se puede tener mayor información a integrar en los planos.

Al integrar al análisis de riesgo la información que resulte bajo éste indicador, se puede inferir la frecuencia de eventos en una distancia determinada, lo cual servirá de ayuda para ponderar la probabilidad de ocurrencia.

- e) La distribución de los contenidos de gas metano en el manto de carbón, en m^3/ton ,

No se sabe con seguridad cual es el contenido exacto de gas que debe de existir en el yacimiento de carbón, ya que el gas es considerado un indicador, en algunos casos, se han registrado altas emisiones de gas antes de presentarse un desprendimiento instantáneo de gas y carbón. Lama & Bodziony (1998) mencionan que esto depende de varios factores como, la dureza del carbón o la forma del yacimiento, la permeabilidad del manto de carbón y aspectos geológicos asociados. Algunos estudios realizados por Beamish *et al.* (1995); Lama (1995); Lama & Bodziony (1998) determinaron que contenidos de gas mayores a $8 \text{ m}^3/\text{t}$, son considerados suficientes para iniciar un desprendimiento instantáneo de gas y carbón, solo si existen las condiciones adecuadas como: carbón fragmentado o mantos de carbón fragmentados, baja permeabilidad, zonas de falla, deformación, pliegues y cizalla.

Lama (1995) realizo pruebas a muestras de carbón, a las cuales se les sometió a presión con diferente composición de gas, y así obtuvo resultados de las presiones a las que inician un desprendimiento instantáneo de gas y carbón, obtuvo que para dióxido de carbono (CO_2) se necesitan 195.8psi, y para metano (CH_4) necesita 108.7psi; Chen *et al.* (1995) también realizaron pruebas, con modelos computarizados, para determinar la presión mínima de iniciación, y encontró que un desprendimiento instantáneo de gas y carbón con contenidos de metano (CH_4) ocurría a 217.5 psi; Gotoh *et al.* (1995) hicieron la misma investigación con modelos computarizados, y ellos encontraron que a la presión mínima a la que su experimento tenía un desprendimiento instantáneo de gas y carbón, se encontraba en un rango de 217.55-435.11 psi; Lama & Bodziony (1998) encontraron que a una presión de >43.51 psi (>0.3Mpa) en un yacimiento con presencia de carbones suaves (sub-bituminosos) ,resultara en un desprendimiento instantáneo de gas y carbón, mientras que en mantos de

carbón que son más duros (antracitas), se presentara un rango de presión que va de 87.02psi-145.04psi (0.6-1Mpa), para el comienzo de un desprendimiento instantáneo de gas y carbón, solo se necesita que cuente con los ya mencionados factores (Geología, presencia de grandes volúmenes de gas, salbanda de falla) que aumentaran la presencia de este fenómeno y Weiji *et al.* (2012) determinaron en pruebas de laboratorio, que en un rango de 97.17 psi a 37.78 psi comenzaba un desprendimiento instantáneo de gas y carbón (Anexo 1).

Teniendo en cuenta lo anterior, quien se encargue de elaborar el análisis de riesgo deberá medir contenidos de gas y con ello, establecer posibles zonas susceptibles a un evento de desprendimiento instantáneo de gas y carbón, donde se medirán las emisiones de gas durante las actividades mineras, (litros por segundo y litros por metro), se reportaran zonas de deformación, fallas, características del manto de carbón y el encargado del análisis de riesgo tomará las medidas de seguridad junto con las demás áreas involucradas para el desarrollo (planeación, desarrollos, geología, ventilación, desgasamiento y barrenación), y se procederá a mejorar la ventilación del lugar o aplicar otras medidas de prevención para evitar un evento de desprendimiento instantáneo de gas y carbón.

La norma no requiere que se analice la composición del gas en los mantos de carbón, pero en estudios hechos por Greaves *et al.* (1993) reportaron que al iniciar el proceso de carbonización, la composición de gas en el carbón es de 75% dióxido de carbono (CO₂) y 25% metano (CH₄), y conforme avanza el proceso de maduración del carbón, la composición del gas cambia a 75% de metano (CH₄) y 25% de dióxido de carbono (CO₂), se encontró que existen desprendimientos instantáneos de dióxido de carbono (CO₂) que a comparación de los de metano (CH₄) son más violentos. Por ello se propone considerar la composición de gas contenido en el carbón, para vislumbrar las características de los desprendimientos instantáneos de gas y carbón que podrían presentar. Adicionalmente, para soportar estas observaciones, se recomienda considerar la existencia de actividad volcánica cercana al proyecto, ya que éste puede ser una fuente de dióxido de carbono (CO₂).

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

Tradicionalmente se ha demostrado que la concentración de dióxido de carbono (CO_2) en el manto de carbón, se hace relevante cuando es superior al 30% (Figura 7.5), para el análisis de riesgos se propone mantener el mismo criterio. Se recomienda observar las relaciones del contenido de gas con la profundidad, de manera que se puedan construir modelos de contenido de gas, extrapolando la información de los barrenos que se tengan. Estos modelos pueden ser utilizados para comparar o evaluar los resultados obtenidos de los nuevos análisis de contenido de gas.

El contenido y la composición del gas en los mantos de carbón, determinan la probabilidad de ocurrencia y la magnitud de los eventos de desprendimiento instantáneo, es por eso que se debe de contar con un estimado del contenido y establecer un plan de trabajo de medidas preventivas, para aquellas zonas donde las emisiones de gas sean mayores.

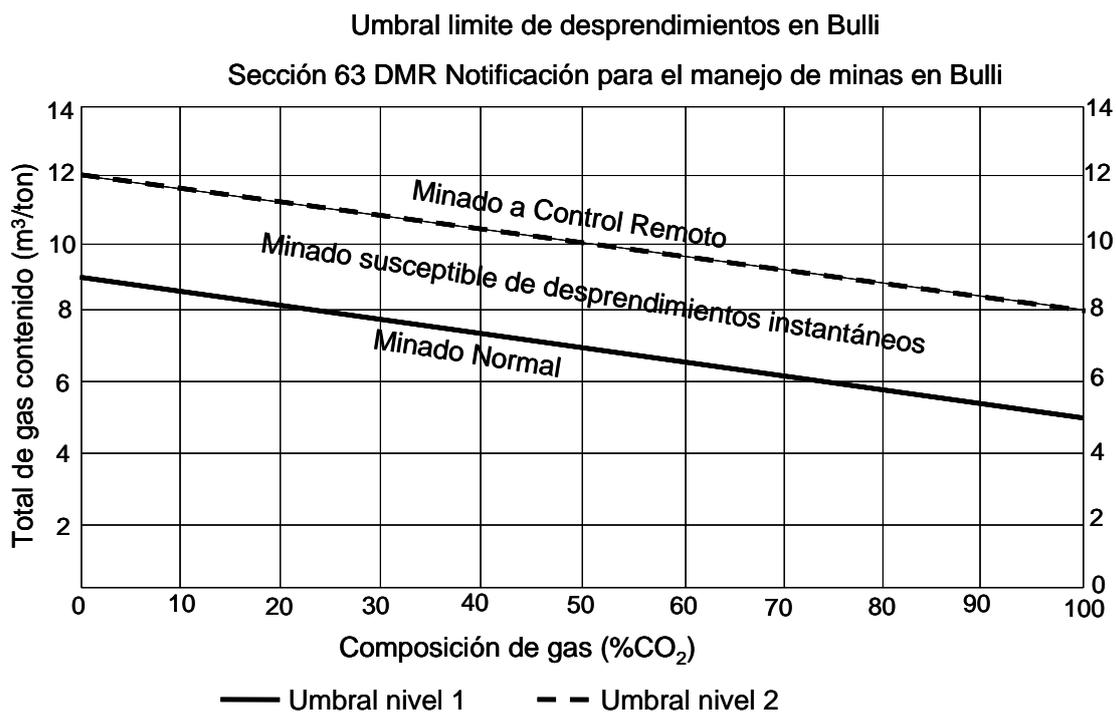


Figura 7.5.- Relación de la composición y contenido de gas, establecimiento de las restricciones del minado (modificado de Nicholls & Hunt, 2011).

f) La presencia de milonita (capa reactiva) en la estratigrafía del manto,

Dentro del yacimiento de carbón, se originan ciertas áreas afectadas por el incremento de las direcciones del estrés a las que este se encuentra sometido

el yacimiento, generando nuevas superficies de fractura o movimientos de cizalla, favorecidas por el esfuerzo principal máximo. Se debe aclarar que el término de milonita no concuerda con las observaciones hechas en campo, ya que una milonita se define como roca de grano muy fino, originada por un proceso metamórfico dinámico, donde se pueden observar granos gruesos, los cuales han sufrido un proceso de deformación plástica, y han reducido su tamaño. Este proceso tiene lugar en zonas donde la profundidad alcanza más de 10 km. La definición anterior, no corresponde con las capas que se observan en los yacimientos, pero localmente se le denomina de esta manera, el término correcto para denominarle a esta capa sería como salbanda de falla (Hancock, 1985).

Según Wang *et al.* (2013) estas capas son áreas donde se encuentran sometidas a un estrés confinante, creando un incremento en la permeabilidad del carbón, ésta salbanda de falla se encuentra dispuesta en los mantos de carbón fragmentado, de manera vertical, o en bandas horizontales entre o debajo del carbón fragmentado. El carbón fragmentado es el resultado de fuerzas que cizallaron al manto y lo pulverizaron en partículas más finas.

Para obtener datos sobre ésta capa, se debe considerar que la información de barrenos anteriores, no habrá presencia de éstas capas de carbón fragmentado y de salbandas, ya que se pierden o desaparecen por el trabajo de barrenación, sin embargo teniendo como antecedente la estructura de nuestro yacimiento, se podrá inferir la frecuencia de que dichas capas se presentaran en zonas de deformación, zonas de fallas, cizallas y se tendrá una relación de éstas capas, lo cual hará más completo el análisis de riesgo, esto corresponde al apartado de “indicadores de riesgo”.

En si éstas salbandas no generan riesgo, a menos que actúen como un “tapón” en alguna cavidad, y podrían contener gas y carbón fragmentado a una presión; al presentarse un agente que altere el equilibrio de ese “tapón”, aumentara la presión y colmatara así en un desprendimiento instantáneo de gas y carbón. Con éste antecedente se podrá determinar la probabilidad a desprendimiento instantáneo de gas y carbón, y tomar medidas de prevención para evitar que se desencadene en un evento.

- g) Las estructuras geológicas en parte superior e inferior del manto a explotar,

Chen *et al.* (1995) mencionan que al incrementar el espesor de las rocas encajonantes, se presenta una relación con la presión del gas contenido en el carbón, el cual aumentara la frecuencia a un desprendimiento instantáneo de gas y carbón. Ellos proponen que al existir el evento, la capa de roca que se encuentre sobre el manto se colapsara, haciendo que la cavidad se haga más grande. La proporción de estrés y la presión de gas aumentan constantemente como aumenta la profundidad del minado, así que es posible encontrar desprendimientos instantáneos de gas y carbón con mayor severidad.

Para el análisis de riesgo se han de preparar planos que indiquen la distancia entre el manto de carbón y las capas de arenisca, así como sus espesores. En el plano se marcan los casos en las capas de arenisca están en contacto con el manto de carbón, ya que representan zonas donde es muy probable que el carbón se encuentre intensamente deformado.

La observación de las estructuras sedimentarias en la parte superior e inferior del manto de carbón, una vez integrada en el análisis de riesgos, aportara información para ponderar la probabilidad de ocurrencia y la severidad de un desprendimiento instantáneo de gas y carbón.

- h) La profundidad del manto a explotar;

Como se mencionó en los anteriores apartados, se cree que la profundidad influye en la geometría de los mantos de carbón y de roca encajonante. La presión que viene de la superficie actúa con la presión horizontal del yacimiento, dando así mantos deformados y triturados, aumentando el riesgo de desprendimientos instantáneos de gas y carbón (Yang *et al.* 2014). Así mismo, existe una fuerte relación entre la profundidad a la que se encuentra el yacimiento y su contenido de gas. Como ya se ha mencionado anteriormente, el estudio de éstas relaciones puede ayudar a construir un modelo que permita inferir los contenidos de gas, a partir de los datos existentes y de ésta forma, reducir los costos derivados de la perforación para recuperar muestras de carbón.

La observación de los antecedentes de desprendimientos instantáneos de gas y carbón en explotaciones de la región, pueden ayudar a determinar la profundidad mínima a la que se han registrado, y la relación que guarda la profundidad con la severidad de los eventos. De esta manera se pueden discriminar las áreas de nuestro proyecto que son más propensas a sufrir desprendimientos instantáneos de gas y carbón. Dentro del análisis de riesgos, ésta información ayudará a determinar la probabilidad de ocurrencia y la severidad de los eventos que puedan ocurrir.

i) La determinación del rumbo del fracturamiento principal del manto de carbón a explotar,

La orientación del fracturamiento natural relacionado al yacimiento de carbón, responde a la posición de los esfuerzos principales que actúan en el macizo rocoso. Las fracturas que se asocian a los pliegues pueden influir en la permeabilidad del manto de carbón durante el minado.

Los resultados del estudio realizado por Yang *et al.* (2014) sugieren, que la probabilidad de ocurrencia a un desprendimiento instantáneo de gas y carbón, se incrementa cuando el minado avanza en forma perpendicular al esfuerzo principal máximo, y se reduce cuando el minado se hace paralela a éste, pues el fracturamiento natural que resulta de éste esfuerzo, incrementa la permeabilidad de las capas de carbón delante de la dirección del minado, y en consecuencia, se reduce la presión causada por el contenido de gas. Para cumplir con éste requerimiento normativo, se debe estudiar la orientación de las principales familias de fracturas, para determinar su influencia en la permeabilidad. Ésta información puede ayudar también en la planeación de la mina, y en las actividades de perforación para la extracción de gas.

La ponderación de la probabilidad de ocurrencia de un desprendimiento instantáneo de gas y carbón, se puede sustentar con la información obtenida de éste estudio, y se delimitaran zonas donde la dirección del esfuerzo principal máximo sea perpendicular al desarrollo, teniendo en cuenta que los eventos se vuelvan más frecuentes.

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

j) Las estadísticas de las concentraciones de gas metano en el (los) manto(s) de carbón por m^3/ton ,

Como ya se mencionó en los incisos e) y h), se recomienda estudiar estadísticamente, las relaciones entre la profundidad y las concentraciones de gas metano en el carbón. El modelo que resulte de éste estudio puede ayudar a extrapolar la información obtenida de los incisos anteriores, para generar una mejor comparación y evaluación de las concentraciones de gas presentes en el manto (Figura 7.6).

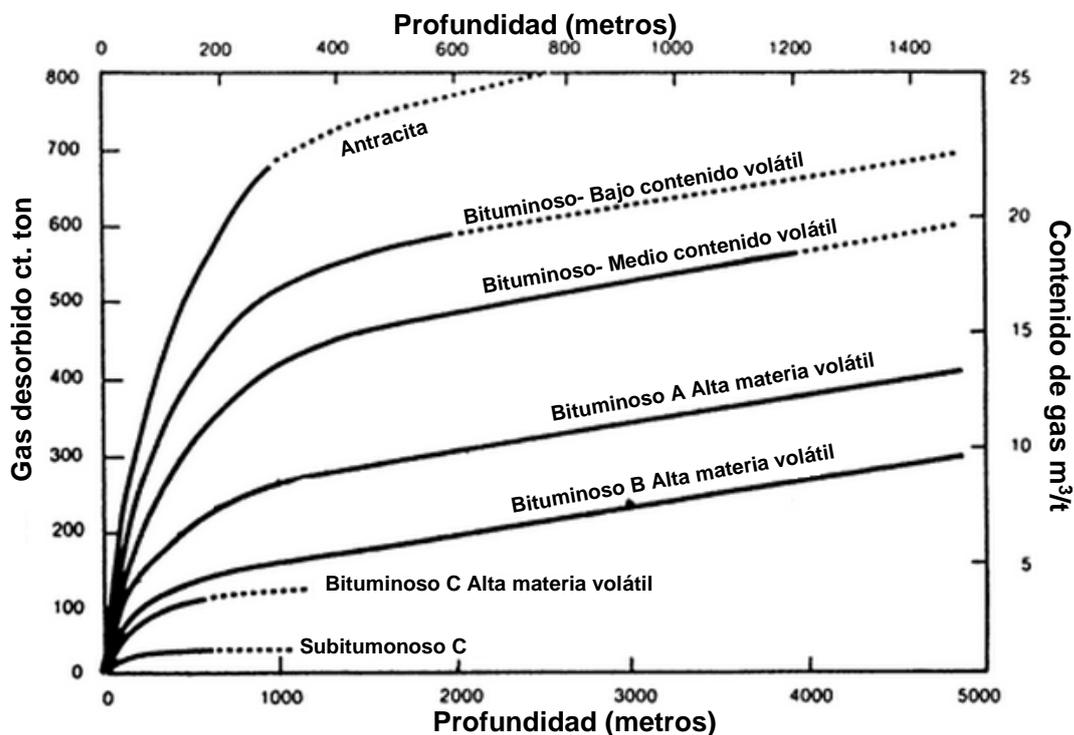


Figura 7.6.-Relación entre profundidad, rango y capacidad de desorción (modificado de Stoeckinger, 1991).

El contenido de gas incrementa proporcionalmente a la profundidad como ocurre en los yacimientos de gas convencionales. Puede incrementar debido a la influencia positiva de la presión sobre la capacidad de adsorción. Sin embargo, el contenido de gas depende directamente de la cantidad de cenizas, rango del carbón, características del carbón, geología del yacimiento y temperatura (Llitas & Sánchez, 2010). La combinación de estos factores determinará la probabilidad de zonas con altas concentraciones de gas.

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

Se busca establecer alternativas que reduzcan las concentraciones de gas en las actividades mineras, como medidas de prevención para reducir la probabilidad a un desprendimiento instantáneo de gas y carbón, reducir el tiempo de exposición del personal a las emisiones, y aplicando planes de desgasamiento para eliminar áreas que puedan provocar un evento.

7.3.- Aplicación de la metodología propuesta al área de estudio

Con la información propuesta anteriormente se realizó el ejercicio en un proyecto minero ubicado en la Región Carbonífera de Sabinas, dentro de la porción norte de la Subcuenca Saltillo-Lampacitos. Ésta subcuenca es de las más productivas de carbón en México, presenta un historial de eventos de desprendimientos instantáneos de gas y carbón. La zona de estudio cumple con éste elemento normativo, y se decidió aplicar para mejorar el análisis de riesgo de las actividades de extracción de carbón y desarrollo minero.

- a) Los antecedentes de desprendimientos en explotaciones realizadas en la región;

La Región Carbonífera de Coahuila es la zona más productiva de carbón en México, ubicada al norte del estado, entre los municipios de Múzquiz, Sabinas y San Juan de Sabinas, cuenta con el 98% de la producción total de carbón del país. La extracción del carbón ha presentado muchos riesgos, entre ellos, el fenómeno de desprendimiento instantáneo de gas y carbón, que solo ocurre en minas subterráneas de carbón. Éste se define como la expulsión repentina de gas y fragmentos de carbón desde la frente de trabajo.

En el año de 1884 comenzaron las actividades de explotación minera en la Región Carbonífera, en ésta época no se tenía conocimiento de que existía el fenómeno de desprendimiento instantáneo de gas y carbón. Sin embargo, según los registros de Organización Familias Pasta de Conchos (2012) mencionan que en el año 1902, sucedió un evento de desprendimiento instantáneo en la Mina el Hondo, el cual precedió a una explosión que causó cerca de 123 fatalidades y solo 20 mineros pudieron sobrevivir. Se sabe que existieron más eventos durante los siguientes años, pero no existe un registro detallado de estos, por la falta de un sistema que administrara la información

de los eventos de desprendimientos instantáneos en las minas, o por las políticas internas de confidencialidad de las empresas mineras. El 31 de Marzo de 1969 en la Mina II, ubicada en la localidad de Barroterán, se presentó un desprendimiento instantáneo, que también precedió a una explosión y donde perdieron la vida 153 trabajadores (CERCHAR, 1972; Organización Familias Pasta de Conchos, 2012). Según registros internos de las Minas de Barroterán y Florida, durante el desarrollo de sus galerías tuvieron cerca de 153 desprendimientos instantáneos de gas y carbón, de los cuales 138 arrojaron más de 10 ton de carbón fragmentado (CERCHAR, 1980). El 16 de Agosto de 2009 en la Mina Lulú, se reportó un evento de desprendimiento instantáneo, no se detalla las condiciones de la frente de trabajo (Informe de Organización Familias Pastas de Conchos, 2012). El 26 de Agosto de 2011 en Mina “La Esmeralda” se reporta la expulsión de carbón fragmentado y gas que cubrió el equipo minero y registró 4 fatalidades.

El proyecto minero donde se realizó el análisis de riesgo se encuentra ubicado en el flanco de un pliegue sinclinal, con un rumbo 40° NW de la Subcuenca de Saltillito-Lampacitos en cuerpos estratiformes, esta subcuenca presenta una superficie de 1124.38 km², con una inclinación 10° NE/SW. Al final de su etapa productiva, este proyecto alcanzará una profundidad máxima cercana a los 600 m, para extraer las reservas de carbón que se han proyectado. La columna estratigráfica de la Formación Olmos presenta un espesor total de 240 m, de los cuales 30.25 m presenta intercalaciones de arenisca, lutita, limonita, lutita carbonosa con carbón, los mantos que se consideran económicamente explotables son 2.60 m de carbón, ubicados en la parte basal de la Formación Olmos.

Al momento en el que se escribe éste documento, la mina presenta avances en el desarrollo minero y la extracción de carbón. Durante los primeros años de vida del proyecto, éste operó mediante el minado a cielo abierto, sin embargo por el incremento de profundidad que resulta de la disposición inclinada de los estratos (que buzcan 10° al SW), al alcanzar la máxima relación económica se sustituyó el tipo de minado, por el sistema subterráneo de frentes largas para continuar con la extracción del carbón.

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

Al inicio de las operaciones de la mina, se registraron ciertas anomalías, como las emisiones anómalas que se presentaron desde profundidades cercanas a los 200 m de profundidad, y donde se reportó la presencia de una capa de 50 cm de carbón intensamente fracturado.

La mina presentó su primer evento de desprendimiento instantáneo en julio de 2006, a una profundidad de aproximadamente 220 m, en este evento se observó que había presencia de carbón intensamente fracturado, éste expulsó cerca de 70 m³ de gas y 2 ton de carbón, sin embargo no se reportaron consecuencias mayores. Durante ese año se registraron 3 eventos más, a la misma profundidad pero diferente ubicación, las condiciones de cada evento fueron similares ya que había carbón intensamente fracturado, uno de estos eventos presentó volúmenes de gas metano que resultó de mezclas explosivas que activó los dispositivos de seguridad, interrumpiendo la alimentación eléctrica a los equipos de medición dentro de la obra minera. A pesar de que las consecuencias del evento no fueron graves, éste se considera el primer evento de gran magnitud y con potencial de causar lesiones graves al personal.

En los siguientes años, la ocurrencia de estos eventos continuó, algunos de ellos alcanzaron magnitudes similares a las del evento del 2006, sin embargo en el año del 2011 se registró un evento de mayor magnitud a una profundidad de 300 m, en el que el material expulsado cubrió los equipos mineros y causó la muerte a dos trabajadores. Posteriormente, la empresa como medidas de prevención, implementó medidas de seguridad más estrictas y estableció un programa de perforación más extenso sobre los mantos de carbón. A esta misma profundidad, en el año del 2012 se registró otro evento de gran magnitud que causó la muerte de 6 trabajadores, quienes fueron sepultados bajo el material expulsado. Como consecuencia, la empresa decidió suspender sus operaciones para buscar soluciones que proporcionaran protección a los trabajadores, 4 meses después se reiniciaron las actividades mineras con equipos modificados para su operación a distancia.

Hasta el momento de la preparación de este documento, ésta técnica ha probado ser efectiva en la protección del personal ante los efectos de un desprendimiento instantáneo de gas y carbón. Para todos los eventos ocurridos

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

en la mina, se reportan con la presencia de una capa de carbón intensamente fracturado, donde el material es transportado por efecto del caudal de metano hacia la galería.

En base a los antecedentes del proyecto minero, se generó una matriz de eventos, donde se comparan con la profundidad de ocurrencia. De éste análisis, se observa que los eventos comenzaron a profundidades de 145 m, alcanzando su mayor frecuencia y magnitud a profundidades de entre 190 y 300 m. Se debe considerar que las medidas de prevención y seguridad, han incrementado y endurecido desde los primeros eventos, éste efecto se puede apreciar en la gráfica de la Figura 7.7 donde a partir de los 300 m de profundidad la cantidad de eventos se ha disminuido.

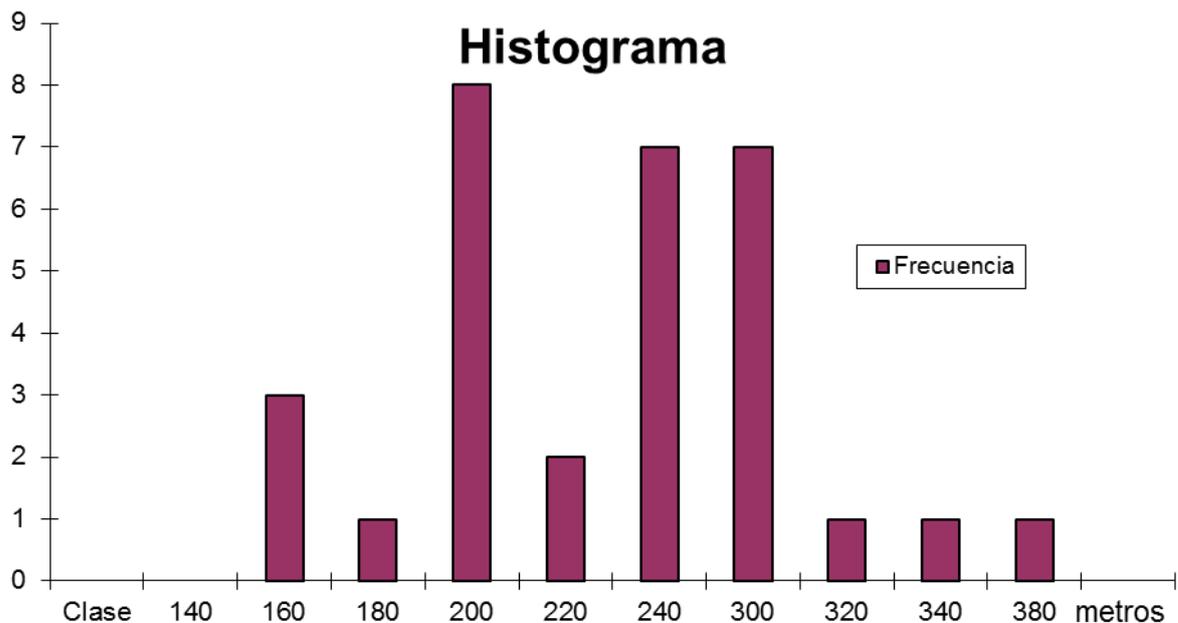


Figura 7.7.- Se muestra la profundidad y la frecuencia de los desprendimientos instantáneos de gas y carbón que han ocurrido en el proyecto minero.

- b) El tipo de carbón a explotar (bituminoso o hulla, sub-bituminoso, antracita, lignitos, entre otros);

El carbón a extraer es sub-bituminoso con contenido de materia volátil de 21.5%, según pruebas realizadas en los laboratorios de la empresa, a muestras de carbón tomadas del manto económicamente explotable en el oriente de la

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

mina (Figura 7.8). El carbón presenta características físicas como color negro y brillo mate a graso, quebradizo o deleznable. Es notable que la muestra de mano se siente ligera, esto es debido a que el carbón presenta densidades bajas de aproximadamente 1.2g/ml.

Autores como Bodziony & Lama (1996) y Beamish & Crosdale (1998), dicen que los carbones sub-bituminosos presentan altos contenidos de gas en sus mantos, teniendo así una mayor probabilidad de presentar desprendimientos instantáneos de gas y carbón con emisiones anómalas, por lo que es recomendable aplicar medidas de prevención para la extracción de gas presente en el manto, como planes de desgasamiento, adecuada ventilación, perforación en las frentes de trabajo y así reducir la probabilidad y severidad de un desprendimiento instantáneo de gas y carbón.

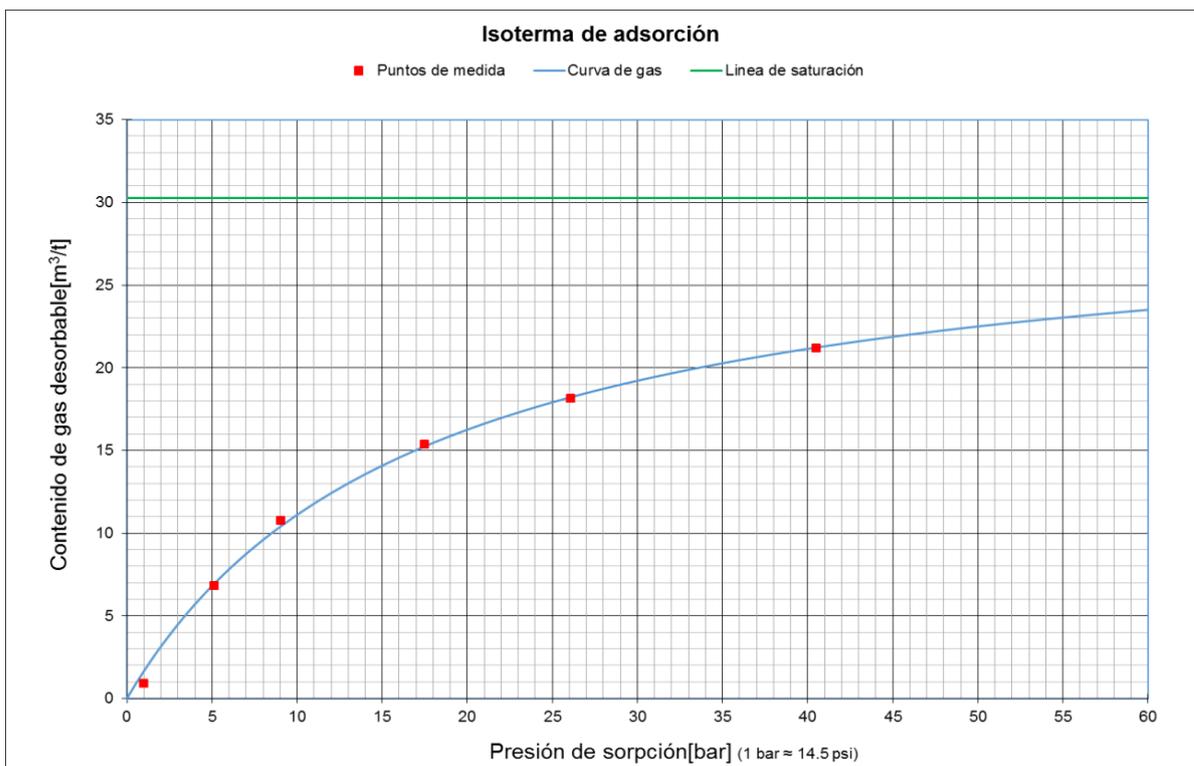


Figura 7.8.- Isoterma de adsorción de gas metano en muestras de carbón del proyecto minero (Modificado de informes internos de la empresa, 2015).

c) Los tipos de desprendimientos posibles;

Para evaluar los eventos de desprendimiento instantáneo se generó una matriz de clasificación, en donde se considera el contenido de gas estimado en las

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

capas de carbón, donde se llevan a cabo las labores mineras, y las condiciones mineras del área, a las que se les asignó un rango de: normal, compacta, estresada y crítica, dependiendo de su complejidad como se muestra en la Tabla 9. A continuación se hace una descripción de cada una de las condiciones que se pueden encontrar en el área de trabajo.

Condición **normal**, se presenta cuando los mantos de carbón son duros, sin evidencias de deformación, buena desorción del gas, sin la presencia de fallas o cambios en el espesor de las capas de carbón.

Condición **compacta**, es cuando se presenta deformación en el manto de carbón, la permeabilidad del gas es adecuada, existen fallas menores (< 30 cm) que no provocan la presencia de salbandas de falla muy delgadas.

Tabla 9.- Tabla de clasificación en desprendimientos instantáneos

Clasificación			Clasificación por contenido de gas			
			<5.5 m ³ /ton	de 5.5 a <9 m ³ /ton	de 9 a < 12 m ³ /ton	> 12m ³ /ton
			A	B	C	D
Condiciones geológicas	4	CRÍTICA	A4	B4	C4	D4
	3	ESTRESADA	A3	B3	C3	D3
	2	COMPACTA	A2	B2	C2	D2
	1	NORMAL	A1	B1	C1	D1
severidad esperada			BAJA	MEDIA	ALTA	CRÍTICA

Condición **estresada**, es cuando existen cambios en el espesor de los estratos de carbón, presencia de bandas de carbón intensamente fracturados con espesores menores que 30 cm, y existen fallas con saltos mayores a 30 cm, que afectan las capas de carbón y propician la aparición de salbandas de falla.

Condición **crítica**, es cuando se presentan bandas de carbón intensamente fracturado con espesores mayores a 30 cm. Los estratos de carbón presentan un grado mayor de deformación con buzamientos abruptos y fallas con saltos mayores.

De este criterio se generó una clasificación para obtener los tipos de eventos de desprendimiento instantáneo de gas y carbón, de los cuales resultan cuatro niveles de severidad, que representan los tipos de eventos posibles del proyecto minero, y que aportan la información necesaria para ponderar éste concepto dentro del análisis del riesgo.

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

Para los tipos de evento clasificados como A1, A2 y B1, que tienen el potencial de generar consecuencias dentro del rango bajo, se esperan emisiones de metano en rangos controlables por el sistema de ventilación, o que pueden ocurrir durante las actividades de perforación y corte de carbón.

Para los tipos de evento clasificados como A3, A4, B2 y C1, que tienen el potencial de generar consecuencias dentro del rango medio, se esperan emisiones de metano anómalas desde fracturas o grietas generadas en carbón altamente fracturado, las cuales serán controlables por el sistema de ventilación y que pueden ocurrir durante las actividades de perforación y de corte de carbón. Durante las actividades de perforación se pueden registrar emisiones de gas que resulten en lesiones personales. Durante las actividades de corte de carbón, puede observarse la generación de huecos cónicos o pequeños desprendimientos del carbón intensamente fracturados, que puede cubrir parcialmente el equipo minero y estar acompañados de emisiones de gas que pueden generar atmósferas explosivas por algunos minutos.

Para los tipos de evento clasificados como B3, B4, C2 y D1, que tienen el potencial de generar consecuencias dentro del rango alto, se esperan emisiones de metano anómalas desde fracturas o grietas generadas en carbón fracturado, que serán controlables por el sistema de ventilación y que pueden ocurrir durante las actividades de perforación y de corte de carbón, además del incremento en la frecuencia de emisiones anómalas controlables durante las operaciones. Se puede registrar un incremento considerable en el volumen de la cortadura que proviene de las perforaciones, y que puede acompañarse de emisiones no controlables de metano. Estas emisiones de gas que se registren durante las actividades de perforación pueden causar lesiones al personal. El material expulsado por estos desprendimientos instantáneos de gas y carbón, que puede cubrir completamente el equipo minero hasta distancias de aproximadamente 10 m, y generar atmósferas con mezclas de aire y metano en el rango explosivo, saturadas en polvo fino de carbón y que pueden reducir el contenido de oxígeno a niveles asfixiantes, por periodos limitados de tiempo (minutos).

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

Para los tipos de evento clasificados como C3, C4, D2, D3 y D4, que tienen el potencial de generar consecuencias dentro del rango crítico, se esperan emisiones de metano anómalas desde fracturas o grietas generadas en carbón fracturado, donde el sistema de ventilación no podrá controlar, y que tendrán lugar durante las actividades de perforación y de corte de carbón, estas emisiones pueden aportar un caudal de metano adicional de 120 l/s o más. Se puede registrar un incremento considerable en el volumen de la cortadura, que proviene de las perforaciones y que puede acompañarse de emisiones no controlables de metano. Estas emisiones de gas durante las actividades de perforación pueden causar lesiones personales graves. El material expulsado por estos desprendimientos instantáneos, puede cubrir completamente el equipo minero, y la galería hasta distancias de 20 m o más, y generar atmósferas con mezclas de aire y metano en el rango explosivo, saturadas en polvo fino de carbón, que reducirán el contenido de oxígeno a niveles asfixiantes, por periodos de tiempo que se pueden prolongar hasta horas.

- d) Los planos geológicos estructurales (Isopacas, fallas, deformaciones, entre otras);

La zona de carbón que se considera económicamente explotable consiste de 3 mantos de carbón separados por capas de lutita. Los planos de espesor de los mantos 4, 5 y 6, presentan zonas donde se destacan cambios anómalos de espesor (Figura 7.9).

El manto 4 no presenta muchos cambios en el espesor hacia la parte central de la mina, donde se aprecian estos cambios es en la periferia del proyecto donde además es más frecuente la ocurrencia de fallas (Anexo 2, Anexo 6, Anexo 9).

Sin embargo, la evidencia de salbandas de falla no se reportaron, o no estuvieron presentes en algunas partes del proyecto donde se observan los cambios de espesor de los mantos. Los cambios anómalos en el espesor del manto 5, son más frecuentes en la zona poniente de la mina, en el área algunas salbandas de falla en éste manto se asocian a cambios del espesor, y a fallas menores, sin embargo, los cambios no son tan abruptos como los que se observan en el manto 4 (Anexo 3, Anexo 6, Anexo 9). El manto 6 presenta

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

fallas pequeñas asociadas a los cambios de espesor, este manto no presenta cambios abruptos como los del manto 4 (Anexo 4, Anexo 6, Anexo 9).

Estos cambios anómalos en la potencia de los mantos de carbón, pueden ocasionar dificultades en las actividades de perforación, al cortar roca o registrar un incremento en el volumen de las cortaduras. Las actividades de exploración de la mina detectaron fallas geológicas y algunas estructuras, sin embargo, debido a las técnicas de perforación utilizadas en la empresa solo se pueden detectar estructuras mayores a los 5 m, por lo que durante el desarrollo de las obras mineras se esperara encontrar algunas fallas menores, cambios locales en el espesor de los mantos de carbón.

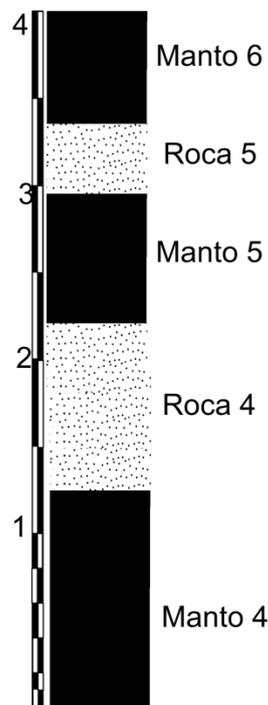


Figura 7.9.- Columna estratigráfica típica para el espesor de carbón económicamente explotable dentro del proyecto minero donde se realiza el análisis.

- e) La distribución de los contenidos de gas metano en el manto de carbón, en m^3/Ton ;

Durante las campañas de exploración por perforación, se considera la recuperación de muestras para la determinación del contenido de gas, con los valores obtenidos se generó una interpolación utilizando el método de

triangulación, con esta información se obtuvo una malla y se generaron curvas de isovalores para los contenidos de gas (Anexo 5, Anexo 8).

La Norma Oficial Mexicana NOM-032-STPS-2008 no requiere la composición del gas en los mantos de carbón, sin embargo, se realizó un muestreo en las frentes de trabajo para determinar qué porcentaje de metano (CH_4), y dióxido de carbono (CO_2) se tenía en los mantos y así determinar la severidad de los desprendimientos instantáneos, estas muestras se obtuvieron de diferentes zonas y profundidades, para comprobar si existían variaciones en la composición del gas. Pero en los resultados no se encontraron variaciones significativas en la composición del gas, ya que presenta gas metano (CH_4) en concentraciones de 98.5% a 100.0% y, contenidos bajos de dióxido de carbono 1.73% (CO_2).

f) La presencia de milonita (capa reactiva) en la estratigrafía del manto;

Como el término milonita es un concepto usado localmente, se hace la propuesta de usar el término salbanda de falla, por qué esa es la manera correcta de llamarle a ésta capa reactiva. La presencia de salbandas de falla en el proyecto minero, presentan una relación con la frecuencia en los cambios de espesor de los mantos de rocas encajonantes (Anexo 6, Anexo 7, Anexo 8, Anexo 9), los cuales sufrieron un proceso de deformación, estos mantos de roca tienden a presentar un engrosamiento que afectó la resistencia del carbón durante los movimientos de formación del pliegue, así generando un fracturamiento en los mantos de carbón, el proyecto minero presenta una zona con mucha presencia de salbanda de falla en la parte oriente de sus desarrollos.

Según los antecedentes del proyecto minero, durante algunos eventos de desprendimientos instantáneos de gas y carbón, se encontraron algunas salbandas de falla, pero esto no quiere decir que su presencia aumente la probabilidad a un evento, sino que es un indicador de que podría ocurrir un desprendimiento instantáneo de gas y carbón, por lo que los supervisores deben de verificar la frente de trabajo y revisar si existe la presencia de esa capa; en caso de estar presente en la frente de trabajo, se deberá de reportar a la central de monitoreo.

- g) Las estructuras geológicas en parte superior e inferior del manto a explotar;

A partir de las exploraciones geológicas del desarrollo minero, se observó que los mantos de roca que se encuentran en contacto con los mantos de carbón, no presentan grandes espesores en algunas zonas del desarrollo minero, sin embargo, se notó que las rocas 4 y 5 que encajonan el manto 4 de carbón han influido en las condiciones de este manto, presentando zonas con grandes alteraciones en el manto de carbón, originado por la fuerza de formación de la Cuenca Saltillo-Lampacitos, cizallando y alterando el manto de carbón en partículas más finas, induciéndole una mayor presión en su contenido de gas, y haciéndolo más susceptible a generar un evento de desprendimiento instantáneo de gas y carbón; estas rocas en zonas pequeñas presentan grandes espesores que influyen en los mantos inferiores y superiores de carbón (Anexo 6, Anexo 7, Anexo 9). En cuanto a los otros mantos no hay evidencia de afectaciones por las rocas encajonantes, pero afectadas mínimamente por fuerzas de deformación en el yacimiento.

- h) La profundidad del manto a explotar;

El proyecto minero alcanzara una profundidad de 600 m, los primeros desprendimientos instantáneos de gas y carbón se reportaron a una profundidad de 145 m. Hasta ahora se ha alcanzado aproximadamente 375 m de profundidad con los desarrollos mineros (Anexo 8); si ponemos los contenidos de gas y profundidad en un solo plano, podemos observar que el contenidos de gas aumenta de manera lineal con la profundidad, con ello se pueden establecer medidas de prevención y protección para el personal, determinando la severidad de los posibles desprendimientos instantáneos de gas y carbón que puedan desencadenarse por los altos contenidos de gas.

- i) La determinación del rumbo del fracturamiento principal del manto de carbón a explotar,

Como se mencionó anteriormente, el proyecto minero se encuentra en el flanco de un pliegue, este pliegue es considerado de naturaleza flexural, esto quiere decir que en el momento en que se empezó a formar el pliegue, las capas que

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

conforman al yacimiento de carbón sufrieron un esfuerzo de fricción entre ellas, haciendo que las capas más duras en este caso la arenisca actuara sobre las menos resistentes como la lutita y el carbón, y estas últimas absorbieron los esfuerzos (Twiss & Moores, 1992; Lama & Bodziony, 1996) es por ello que algunos mantos de carbón dentro del proyecto minero, presentan mucha alteración.

El pliegue que aloja al yacimiento presenta un fracturamiento tipo *ac*, donde el eje *a* presenta un plano perpendicular al eje del pliegue, y *c* es perpendicular al echado del pliegue; las fracturas principales del manto de carbón del proyecto minero, se encuentran dispuestas de manera perpendicular a la dirección del eje del pliegue y estas se formaron por extensión (Figura 7.10), las fracturas principales (tipo *a*) son perpendiculares al desarrollo de la mina, por lo tanto la liberación del gas dentro de los mantos de carbón será menos efectiva, dando como resultado mayores probabilidades de que se presente un desprendimiento instantáneo de gas y carbón. Las fracturas secundarias se encuentran de manera paralela a la dirección del eje, y se formaron después de que las fuerzas compresivas actuaran.

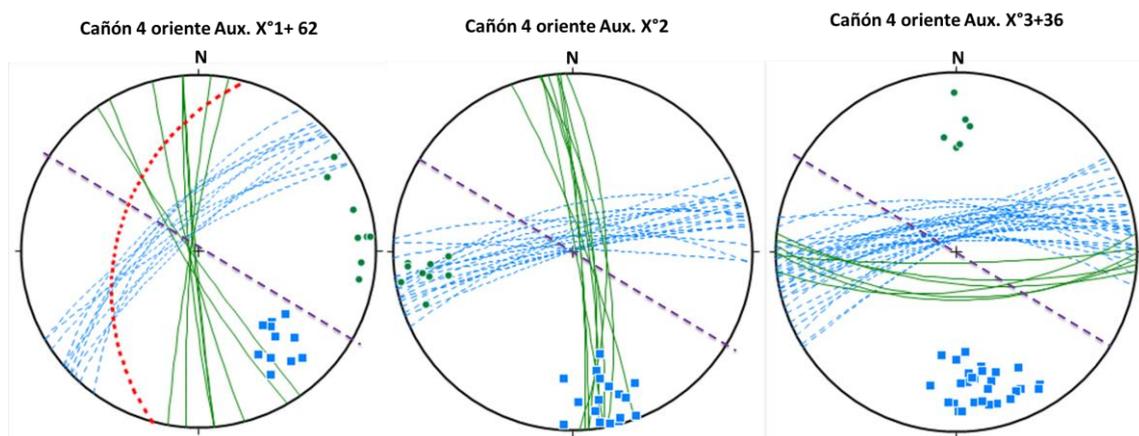


Figura 7.10.- Estereogramas mostrando el fracturamiento principal del manto de carbón (líneas verdes y círculos verdes), el fracturamiento secundario del manto del carbón (líneas punteadas azules y cuadros azules), la línea morada punteada representa la dirección a la que se está minando esa zona y la línea roja es la presencia de falla en el manto de carbón.

- j) Las estadísticas de las concentraciones de gas metano en el (los) manto(s) de carbón por m^3/Ton .

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

En base a barrenos exploratorios utilizados para obtener el grosor de los mantos de carbón, se obtuvo el contenido de gas metano (CH₄). De las muestras de carbón de estos barrenos, se calculó el contenido de gas que arrojaron las muestras en ciertos intervalos de tiempo de 10-15 min, con esos datos se graficó una matriz, que ayudo con la construcción de una malla de estadística en base a la concentración de gas y esto indico que el contenido de gas tenía una relación con la profundidad (Figura 7.11) (Anexo 5, Anexo 8).

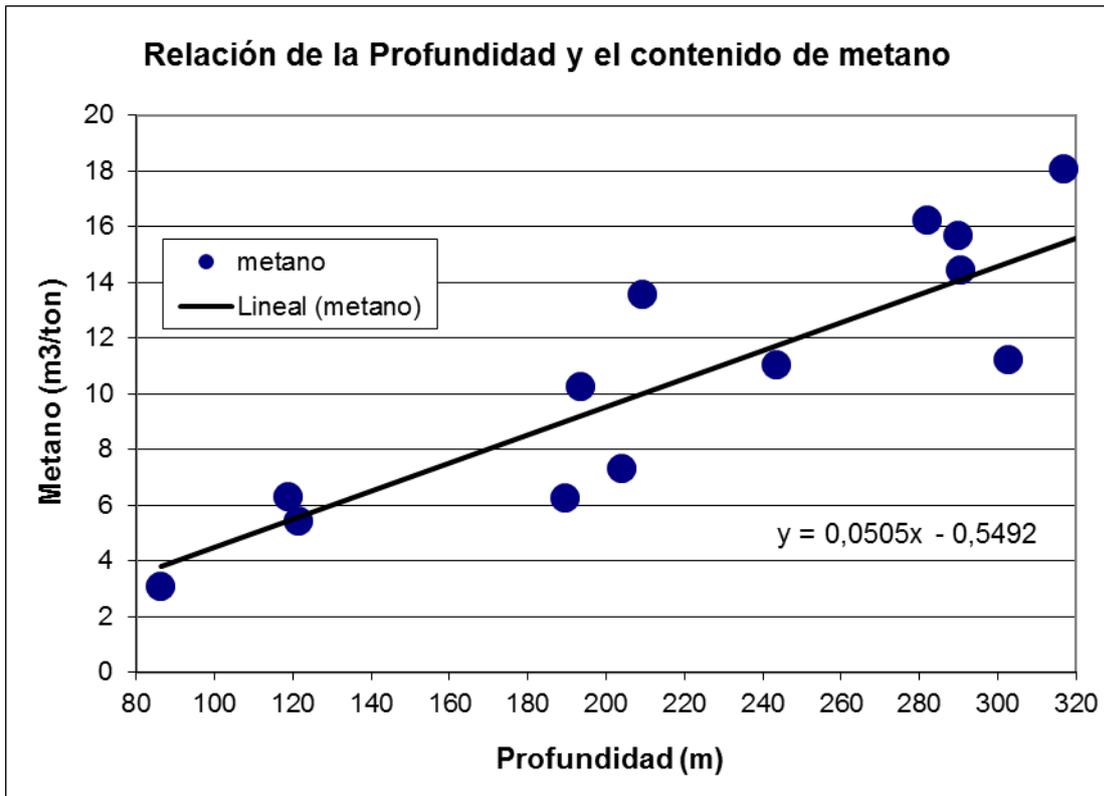


Figura 7.11- Relación del contenido de metano (CH₄) y la profundidad que presenta el proyecto minero, se observa que en algunas zonas con baja profundidad presentaba altos contenidos en gas por posibles alteraciones en los mantos de carbón, y a mayores profundidades el gas aumenta paulatinamente, también se debe considerar como están las condiciones de los mantos de carbón.

7.3.1.- Evaluación y análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo en el área de estudio

Para el análisis de riesgo del proyecto minero, se deberá establecer, implementar y mantener la identificación continua de peligros y determinación de los controles necesarios. Para determinar los peligros que resulten del

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

desarrollo de galerías subterráneas con probabilidad de desprendimientos instantáneos de gas y carbón, a continuación se hace mención de las actividades que son propensas a ese riesgo:

- Actividades de perforación en la frente de trabajo para la liberación de gas del manto de carbón.
- Actividades de excavación para la construcción de galerías subterráneas y corte del carbón.

Durante las actividades de perforación de los mantos de carbón, excavación de las galerías y corte de carbón, se requiere personal para realizar dichas actividades, la Norma Oficial Mexicana NOM-023-STPS-2012 los identifica como personal ocupacionalmente expuesto (POE), y se refiere a todas aquellas personas que realizan sus actividades laborales en donde se encuentra un ambiente de trabajo en el que está presente algún riesgo de mayor impacto, o que desarrollan una actividad peligrosa (DOF, 2012).

Durante las actividades de perforación.

- Operador de la perforadora (Supervisor y/o analista)
- Personal Auxiliar (4 operarios)

Durante las actividades de corte de carbón.

- Operador de la maquina cortadora (mineros continuos).
- Supervisor de operaciones del desarrollo de las galerías de la mina.
- Operarios
- Personal auxiliar (materialistas, mecánicos)

Para determinar los peligros y tener una evaluación inicial del riesgo de desprendimiento instantáneo de gas y carbón, se consideraron los contenidos de gas que tiene el proyecto minero, y con ello se obtuvo la severidad de los riesgos de dicho evento, teniendo así el establecimiento de un listado de severidad según la magnitud del riesgo (Anexo 10, Anexo, 11, Anexo 12):

- Un riesgo de desprendimiento instantáneo de severidad baja, donde se espera que ocurran emisiones de gas metano con rangos controlables, y tengan lugar durante la perforación y corte del manto de carbón.

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

- Severidad media, donde se espera tener emisiones de gas metano anómalas, ubicadas desde fracturas o grietas generadas en el manto de carbón que se encuentra altamente fracturado; con probabilidad de ocurrir durante la perforación y corte de carbón. Durante la perforación se puede registrar emisiones de gas metano, que generen lesiones al personal (asfixia). Durante la excavación para la construcción de la galería y corte de carbón, se pueden generar huecos cónicos o cavidades pequeñas, que pueden resultar en pequeños desprendimientos instantáneos de gas y carbón, resultando con material expulsado desde la frente de trabajo que puede cubrir parcialmente el equipo minero, y tener emisiones de gas metano que generen atmósferas explosivas por algunos minutos.
- Para los riesgos con severidad alta, se espera tener emisiones de gas metano, desde fracturas y grietas generadas por mantos de carbón con alto grado de fracturamiento, tendrán lugar durante las actividades de perforación, excavación para la construcción de galerías y corte del manto de carbón; con una frecuencia en el incremento de emisiones anómalas controlables durante las actividades de excavación. Las emisiones de gas que se registren durante las actividades pueden causar lesiones al personal. El material expulsado por los desprendimientos instantáneos de gas y carbón que ocurran en este rango, cubrirán completamente el equipo minero de carbón triturado, hasta una distancia de 10 m, generando atmósferas con mezclas de aire y metano con rangos explosivos, saturados en polvo fino de carbón, reduciendo el contenido de oxígeno a niveles asfixiantes por periodos limitados de tiempo (minutos).
- Severidad crítica, donde se espera encontrar emisiones anómalas no controlables durante la perforación, la excavación para la construcción de galerías y el corte de carbón. Se espera tener emisiones de gas metano, desde fracturas o grietas en los mantos de carbón que presenten un alto fracturamiento, durante estas emisiones se presentaran caudales de gas metano de 120 l/s o más. Las emisiones de gas durante las actividades de perforación pueden causar lesiones

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

graves al personal. El materia que se expulsa por los desprendimientos instantáneos de gas y carbón, pueden cubrir completamente el equipo minero y la galería hasta una distancia de 20 m o más, y presentar atmósferas con mezclas de aire y gas metano con rangos explosivos en presencia de polvo fino de carbón, reduciendo la presencia de oxígeno hasta niveles asfixiantes por periodos de tiempo que se pueden prolongar hasta horas.

Se determinó la frecuencia de los riesgos por desprendimientos instantáneos de gas y carbón, en el proyecto minero en intervalos de 1000 m de excavación para la construcción de galerías, por lo que se considera a los eventos como aislados, aquellos que ocurren en un periodo de tiempo de una vez por año.

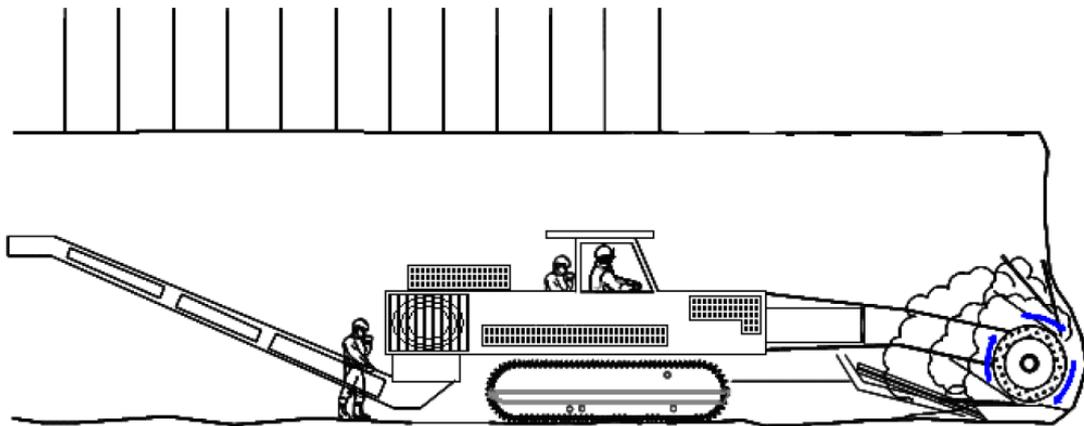


Figura 7.12.- Ubicación del personal con el minero convencional (Modificado de Norma Oficial Mexicana NOM-023-STPS-2008).

Durante las actividades de excavación y construcción de las galerías con máquinas mineras convencionales, el personal se encontraba dentro de la galería al momento del desarrollo de las actividades de corte, el operador de las maquinas mineras se hallaba manipulando el equipo desde arriba, y los operarios se ubicaban detrás de la maquina minera (Figura 7.12), por lo que se establecía en un rango de exposición critico donde el personal podía sufrir lesiones por atmósferas bajas en oxígeno, saturadas de polvo fino de carbón, y ser golpeado, o sepultado por el material que es expulsado en un evento de desprendimiento instantáneo de gas y carbón. En las actividades de perforación de la frente de trabajo para la liberación del gas, el personal se ubicaba a un lado de la máquina perforadora para acoplar las barras de

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

perforación, el riesgo de esta actividad es crítica, ya que el personal está expuesto a sufrir asfixia por inhalación de polvo fino de carbón, a atmósferas con bajos contenidos de oxígeno, ser golpeado por alguna roca o carbón expulsado durante la perforación de la frente, una explosión de gas y polvo fino de carbón.

Tabla 10.- Evaluación de riesgo en actividades convencionales sin implementación de controles de riesgo.

Peligros	Consecuencias	Personal ocupacionalmente expuesto	Controles implementados actualmente	Evaluación del riesgo			Magnitud del riesgo (MR)
				(P)	(E)	(S)	
Actividades excavación para la construcción de galerías subterráneas y corte del carbón.	Ser sepultado bajo la carga	Personal operando cualquier sistema de transporte de carbón dentro de la galería al momento del evento	Sin control operacional actual	1	10	100	1000
	Lesiones por exposición a polvo fino de carbón		Sin control operacional actual	1	10	100	1000
	Sufrir asfixia por inhalación de polvo fino		Sin control operacional actual	1	10	100	1000
	Ser golpeado por carbón o roca expulsado desde la frente de trabajo	Operador de mineros continuos y auxiliares	Sin control operacional actual	1	10	100	1000
Actividades de perforación en la frente de trabajo para la liberación de gas de manto de carbón.	Sufrir asfixia por inhalación de polvo fino	*Personal de supervisión de perforación que se encuentre dentro de la galería	Sin control operacional actual	1	10	100	1000
	Lesiones por exposición a atmósferas bajas en oxígeno		Sin control operacional actual	1	10	100	1000
	Ser golpeado por carbón o roca expulsado desde la frente de trabajo		Sin control operacional actual	1	10	100	1000
	Ocurrencia de una explosión de gas y polvo fino de carbón		Sin control operacional actual	1	10	100	1000

Para el análisis de riesgo de desprendimientos instantáneos de gas y carbón, en las áreas donde se desarrollara la excavación de galerías subterráneas, perforación y corte de los mantos de carbón, se elaboró un mapa donde se ubica la probabilidad a presentarse un riesgo de desprendimiento instantáneo de gas y carbón, tomando en cuenta los contenidos de gas para determinar la severidad (Anexo 10, Anexo 11). La Tabla 10 muestra los riesgos de desprendimiento instantáneo de gas y carbón dependiendo de las actividades,

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

se puede notar que el personal presenta un rango de exposición crítico, además de que no se presentan medidas de prevención para reducir la probabilidad o la severidad del evento (Anexo 12). Sin embargo, para la implementación de alternativas, se deberá llevar a cabo un nuevo análisis de riesgo con la aplicación de nuevos controles y tablas, donde se delimita el tipo de minado a desarrollar (Figura 7.13), proporcionando la protección del personal ante los riesgos de desprendimientos instantáneos de gas y carbón que pueden suceder durante un evento.

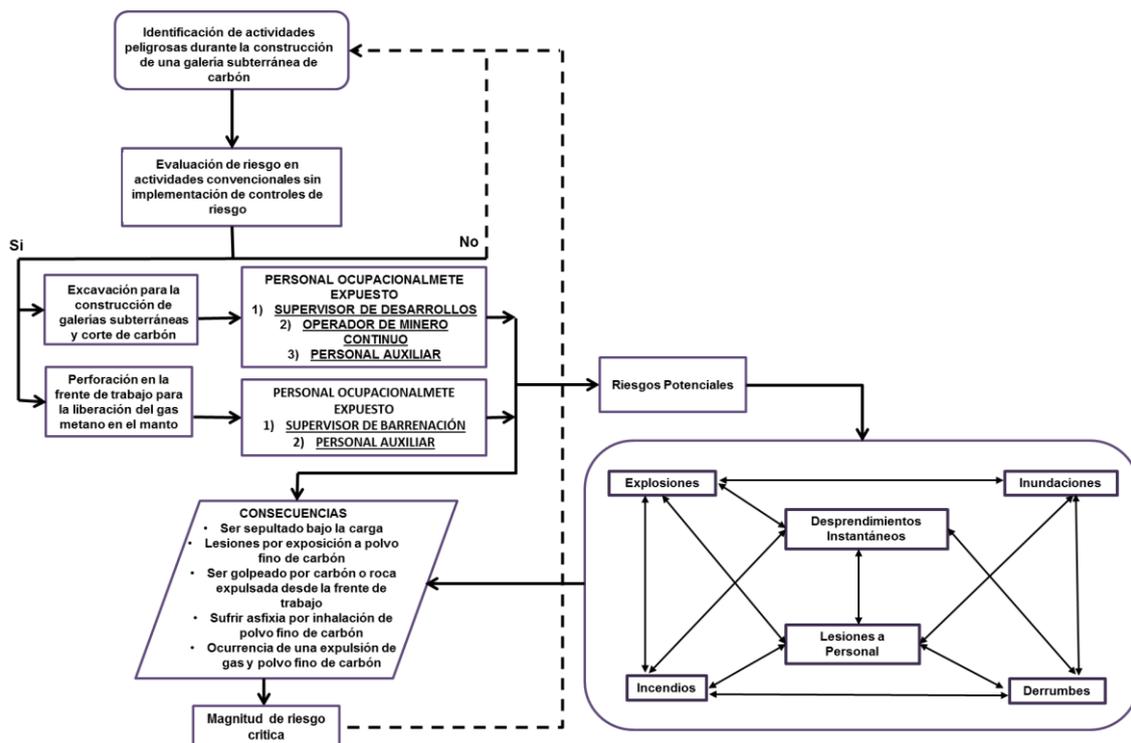


Figura 7.13.- Diagrama de flujo de evaluación a actividades convencionales sin la implementación de riesgo, denotando que el riesgo es crítico.

Con los riesgos ya identificados, se debe aplicar una reducción de los riesgos de acuerdo a las siguientes jerarquías en base a la Serie de Evaluación en Seguridad y Salud Ocupacional (OHSAS, 2007):

- Eliminación;
- Sustitución;
- Controles de ingeniería;
- Señalización/advertencias y/o controles administrativos;
- Equipo de protección personal.

De acuerdo al listado anterior se realizó una reducción de riesgo para el proyecto minero:

- **Eliminación:** Para la eliminación se analizó si se podía descartar la actividad de construcción de galerías, y utilizar otro sistema de extracción de carbón. Sin embargo, la explotación a cielo abierto ya no es posible dada la profundidad que han alcanzado las operaciones, y los cambios evaluados en el sistema de minado no reduce la exposición del personal a este riesgo.
- **Sustitución:** Se quiso implementar un desarrollo de galerías para actividades de desgasamiento en los mantos de carbón, como en un estudio de caso en minas de Karaganda, Kazajistán, donde los mantos de carbón presentan un grosor de 4 a 6.5 m con contenidos de gas, que van de 18 a 24 m³/ton, las actividades de predesgasamiento de los mantos consistía en construir una galería dentro de la arenisca a una distancia de entre 8-12 m por debajo de los mantos de carbón, en la cual se aplicarían planes de perforación de abajo hacia arriba para que el gas se liberara de los mantos de carbón y el riesgo a un desprendimiento instantáneo de gas y carbón sea minimizado (Baimukhametov *et al.* 2009). Esta actividad se intentó aplicar en el proyecto minero, sin embargo, no es posible por qué el gas que se extrae no se puede vender y México no cuenta con una regulación para la disposición final del gas, por lo tanto económicamente no es viable para la empresa.
- **Controles de ingeniería:** Con los puntos anteriores sin poder implementar, se decidió por este último, en donde se analizó que maquinaria podía mejorarse para la protección del personal ante un riesgo de desprendimiento instantáneo de gas y carbón, se decidió modificar los equipos mineros para que realizaran sus operaciones de forma remota, los operadores de los equipos mineros modificados trabajan a una distancia prudente de:
 - 1.- Distancia de 10 y/o 20 m, como se muestra en la Figura 7.14 proveído con un escudo protector para la expulsión de fragmentos de roca y carbón, las líneas de aire respirable son para evitar asfixia por inhalación de polvo fino de

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

carbón, si se llegaran a presentar atmósferas bajas en oxígeno, este tipo de minado se aplica cuando los contenidos de gas son de $8 \text{ m}^3/\text{ton}$ - $10 \text{ m}^3/\text{ton}$.

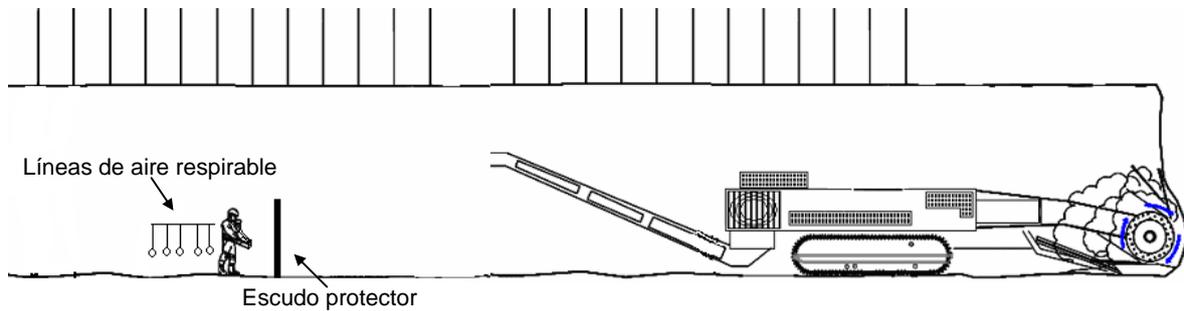


Figura 7.14.- Vista lateral de un minado a distancia de 10 y/o 20 m.

2.- Control remoto a 200 m, donde se maneja la maquina desde atrás del último crucero de aire donde se ubican las cabinas de control, la exposición del personal ante la expulsión de fragmentos de roca y carbón, asfixia por inhalación de polvo fino de carbón y lesiones por presencia de atmósferas con contenidos bajos de oxígeno, se reduce considerablemente, ya que el personal no puede entrar mientras están las actividades de corte; éste tipo de minado solo se utiliza cuando los contenidos de gas están arriba de $10 \text{ m}^3/\text{ton}$.

Combinando éste apartado con los siguientes puntos: señalización, advertencias, y/o controles administrativos y equipo de protección personal, se elaboró una tabla de límites para el tipo de minado en relación con el contenido de gas que se encuentre en la zona a minar (Figura 7.15), por lo tanto, con los controles anteriores se aumenta el nivel de protección del personal, y baja considerablemente la exposición del personal durante la excavación de las galerías y corte de carbón.

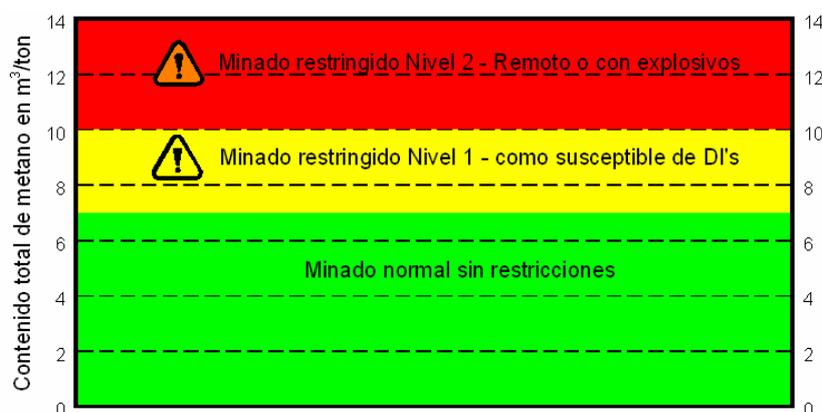


Figura 7.15.- Tipo de minado según los contenidos de gas presentes en las zonas a minar.

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

Con los riesgos ya determinados, se proponen los controles de reducción de riesgos de desprendimientos instantáneos de gas y carbón según las actividades; y se obtuvo un mapa de magnitud de riesgo de dicho evento con los controles de prevención ya aplicados, y se observa que notablemente disminuyen las zonas de riesgo, comparado con el mapa de riesgo inicial (Anexo 12, Anexo 13).

Durante las actividades de perforación de la frente de trabajo para la evaluación de los mantos de carbón, se plantean los siguientes controles para el caso de riesgos derivados de un desprendimiento instantáneo de gas y carbón, en caso de existir exposición a asfixia por inhalación de polvo de carbón y lesiones por exposición atmosféricas con contenidos bajos de oxígeno, se debe instalar líneas de aire respirable y reforzar el uso del autorrescatador; si existe el riesgo de ser golpeado por carbón o roca expulsado desde la frente de trabajo, se modificarán los controles de la máquina perforadora para manejarla desde una distancia de 10 m, el personal auxiliar se ubicará detrás de los controles de la perforadora (Figura 7.16).

Durante las actividades de excavación para la construcción de galerías subterráneas, se plantean los siguientes controles para la reducción de los riesgos derivados de un desprendimiento instantáneo de gas y carbón. En caso de que el personal esté expuesto a ser sepultado por el material expulsado, que se exponga a lesiones por la inhalación de polvo fino de carbón o que pudiera ser golpeado por el material expulsado desde el frente de trabajo, se recomienda limitar el número de personal dentro de la galería al momento de la excavación; modificar los controles de los mineros continuos para que estos funcionen de manera remota a 10 o 20 m según la severidad de la zona a minar y además la instalación de escudos de protección para el operador. Si se encuentra en un rango de severidad crítica se recomienda el uso de máquinas mineras a control remoto que se operen desde una distancia de 200 m, donde el personal se encuentre fuera del área de desarrollo, mientras continúan las actividades de corte de carbón (Figura 7.14; Figura 7.15).

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

Tabla 11.-Evaluación de riesgo con implementación de los controles de riesgo de desprendimientos instantáneos.

Peligros	Consecuencias	Controles propuestos para la reducción del riesgo	Evaluación del riesgo			Magnitud del riesgo
			(P)	(E)	(S)	
Actividades excavación para la construcción de galerías subterráneas y corte del carbón.	Ser sepultado bajo la carga	Limitar el número de personas que entran a la galería al momento de las actividades de desarrollo	1	0.5	1	0.5
	Lesiones por exposición a polvo fino de carbón	Irrigadores de supresión de polvo fino de carbón	1	0.5	1	0.5
	Sufrir asfixia por inhalación de polvo fino	Líneas de aire respirable a un lado del escudo de protección	1	0.5	1	0.5
	Ser golpeado por carbón o roca expulsado desde la frente de trabajo	Sensores que midan el contenido de gas metano Instalar escudo de protección para el operador	1	0.5	1	0.5
Actividades de perforación en la frente de trabajo para la liberación de gas de manto de carbón.	Sufrir asfixia por inhalación de polvo fino	Instalar líneas de aire respirable	1	0.5	1	0.5
	Lesiones por exposición a atmósferas bajas en oxígeno	Reforzar la capacidad del uso del equipo de autorescate	1	0.5	1	0.5
	Ser golpeado por carbón o roca expulsado desde la frente de trabajo	Ubicarse a una distancia de 10 metros de la frente durante los trabajos de perforación	10	6	1	60
	Ocurrencia de una explosión de gas y polvo fino de carbón	Generar un nivel de incombustibilidad en la galería, poniendo barreras de polvo inerte, sensores de monitoreo de gases	1	0.5	100	50

Para controlar el riesgo de explosión, la mina cuenta con varios mecanismos de control instalados, que consisten principalmente en la reducción del nivel de incombustibilidad, y la instalación de barreras de polvo inerte (Figura 7.15).

La Tabla 11 muestra como baja significativamente la magnitud de riesgo con medidas de control para las actividades de perforación en la frente de trabajo y las actividades de excavación para la construcción de galerías subterráneas, tomando en cuenta estas medidas y los tipos de minado según las concentraciones de gas de la Figura 7.15, se tiene una probabilidad, exposición y severidad baja ante el riesgo de desprendimiento instantáneo (Figura 7.16) (Anexo 13).

7.4.- Formato para el monitoreo de áreas susceptibles a desprendimientos instantáneos de gas y carbón

Este formato está dirigido a los supervisores de operación de desarrollo y de barrenación, ya que en la evaluación y análisis del riesgo de desprendimientos instantáneos del presente trabajo, se estableció que éste personal se encontraba bajo riesgo de dicho evento. Éste formato deberá llenarse por los supervisores de operación de desarrollos y de barrenación al iniciar actividades; los supervisores de operación de desarrollos lo completaran cuando estos aun tenga varios metros de barrenación, que le permitan seguir con el desarrollo de la galería (cerca de 6 metros restantes); y los supervisores de barrenación lo llenaran antes de iniciar sus labores de desgasamiento junto con el supervisor de operación de desarrollos, al finalizar el llenado ambos supervisores deberán firmarlo. Este formato deberá utilizarse en aquellas ocasiones en donde las actividades de un mismo turno presentaran cambios significativos en los mantos de carbón o rocas encajonantes, y así informar a la central de monitoreo sobre una condición de desprendimiento instantáneo de gas y carbón.

Con la información recabada en el análisis de riesgo de desprendimientos instantáneos, se notó que el personal ocupacionalmente expuesto (POE) no contaba con un formato que ayudara al monitoreo de los cambios en la frente de trabajo durante las actividades de desarrollo de la galería, el cual servirá para el encargado de elaborar el análisis de riesgo, en la toma de decisiones junto con los demás departamentos involucrados (geología, desgasamiento, barrenación, planeación y desarrollos), en aquellas áreas que presenten similitud con zonas anteriormente reportadas.

Para el correcto llenado de este formato, el personal ocupacionalmente expuesto (POE), deberá estar entrenado con conocimientos básicos de geología, los cuales le ayudaran a identificar y discriminar entre un manto de carbón sano y uno con alteración, establecer cambios en los espesores de las rocas, visualizar la presencia de salbandas de falla y estructuras geológicas que afectan al manto de carbón.

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

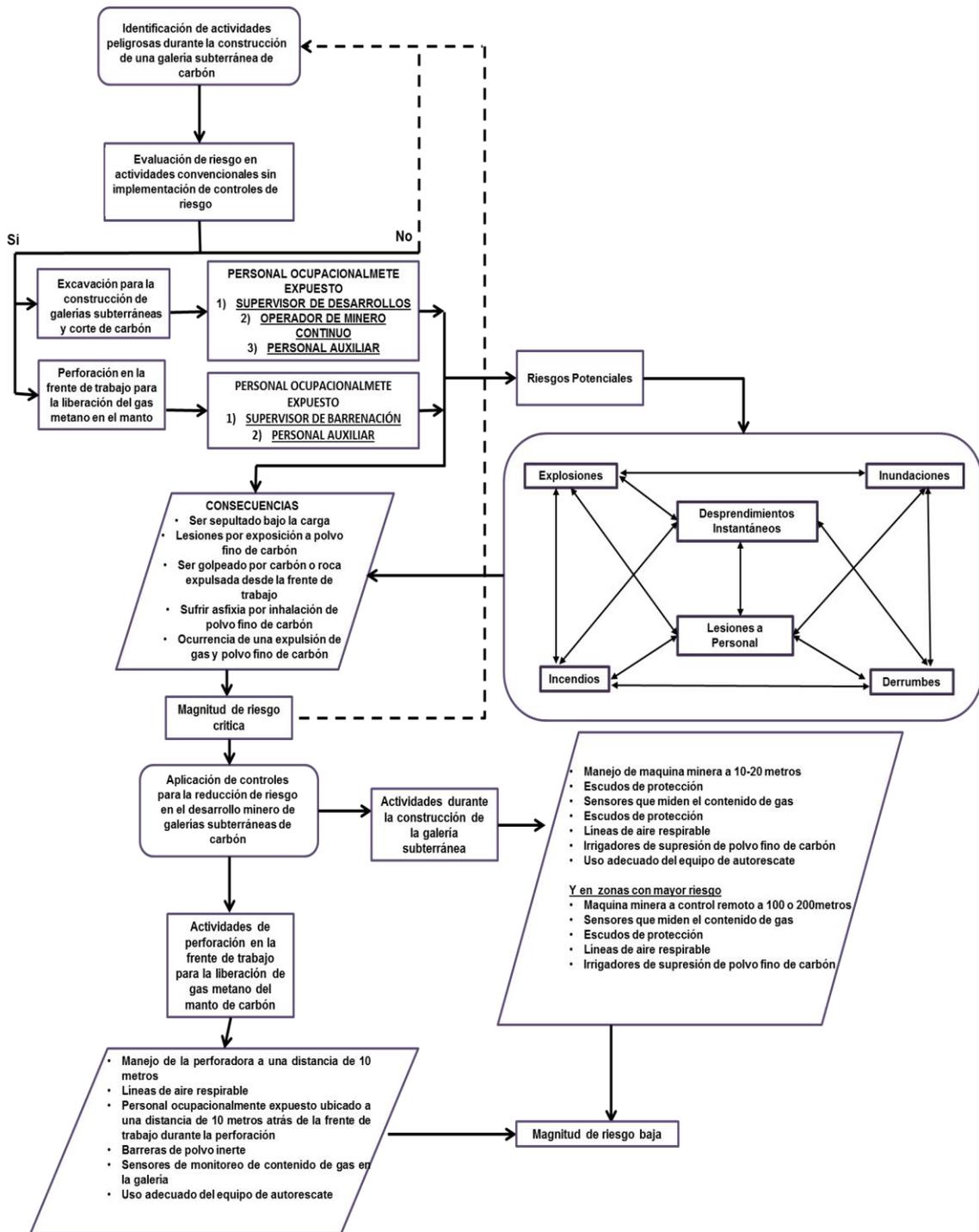


Figura 7.16.- Diagrama de flujo aplicando los controles para la reducción de riesgo en las actividades de desarrollo minero y perforación.

Para el llenado de este formato, se contará con un listado que hará más eficaz su llenado (Anexo 15), tomando en cuenta cualquier escenario que llegara a presentarse durante el desarrollo de una galería.

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

- I. Generalidades del lugar a desarrollar, los supervisores llenarán los datos de profundidad a la que se encuentran desarrollando, fecha, hora, maquina, turno, localización y nombre de quien lo elabora (Anexo 14)
- II. Condiciones geológicas, el supervisor de barrenación y/o operación de desarrollos deberá observar la frente de trabajo registrando si existe o no una estructura que altere los mantos de carbón; contestar los puntos en base a las observaciones con ayuda del listado (Anexo 15), considerando la opción más cercana o cercano a lo que presenta la frente de trabajo.
- III. Condiciones del manto de carbón, el supervisor de barrenación y/o operación de desarrollos verificarán las condiciones del manto en caso de presentar alguna variación, deberán establecer el grado de alteración que el carbón presenta y reportar la presencia y cantidad de agua que sale del manto de carbón y barrenos de la frente de trabajo (Véase Anexo 15)
- IV. Condición de la roca encajonante, el personal deberá revisar la roca que esta sobre y debajo de los mantos de carbón, verificando así la existencia de roca alterada, y calificarla con la clasificación de roca encajonante del Anexo 15.
- V. Signos de alerta, los supervisores de operación de desarrollo deberán estar atentos a los signos de alerta que la frente de trabajo presente antes de un desprendimiento instantáneo de gas y carbón, y registrar la existencia de:
 - Sonidos de fractura;
 - Aumento repentino en la emisión de gas;
 - Cambio en la dureza del carbón;
 - Aumento en la presión del techo;
 - Protuberancias en los mantos de carbón en la frente;
 - Presencia de agua.

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

Los supervisores de barrenación deberán estar atentos a los signos de alerta de la frente de trabajo que durante la barrenación presenten, antes de un posible desprendimiento instantáneo de gas y carbón, y registrar la presencia de:

- Alta emisión de gas en el orificio durante la barrenación;
 - Empuje o succión de las barras de barrenación;
 - Cambio (Aumento del tamaño de partículas de barrenación);
 - Neblina marrón del fluido de perforación en carbones suaves.
- VI. Dibujo de la frente de trabajo: los supervisores de barrenación y/o operación de desarrollo deberán elaborar un dibujo de la frente de trabajo, en el cual habrán de aproximarse lo más posible a las condiciones que se presentan en la frente de trabajo, el encargado de elaborar el análisis de riesgo, tendrá un control de la evolución del desarrollo y frecuencia de las condiciones que puedan desencadenar un evento de desprendimiento instantáneo de gas y carbón.

8.- DISCUSIÓN

Para establecer los posibles tipos de desprendimientos instantáneos del área de estudio, se encontró en la literatura una clasificación con la que se podía definir el tipo de desprendimiento instantáneo que se presentará en el área de estudio, para esto se tomó en cuenta esta clasificación realizada por Noack *et al.* (1995) para la Región Carbonífera, ya que si consideráramos los antecedentes de la zona de estudio, estos estarían dentro del tipo 1 y 4 que corresponden: 1) desprendimientos de gas y carbón y 4) otras liberaciones de mayores cantidades de gas, esta última se divide en 5 categorías, de las reportadas en el proyecto minero entraran en las categorías: 1 y 4 que se definen como (1) gas expulsado de fisuras y (4) gas colectado de antiguos desarrollos mineros. Esta clasificación sólo aplicaría a eventos pasados.

Sin embargo se propone incorporar la clasificación elaborada para este trabajo, porque incluye el contenido de gas, condiciones de la frente de trabajo, y con

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

esta clasificación se plantea la aplicación de medidas de prevención para las siguientes áreas a minar, considerando la tabla de desprendimientos instantáneos, la tabla de tipo de minado según las condiciones de la frente de trabajo y contenidos de gas que se estimen en la zona.

Para el desarrollo de la metodología del análisis de riesgo de desprendimientos instantáneos de gas y carbón, la normatividad en México establece que la Norma Oficial Mexicana NOM-032-STPS-2008 seguridad de minas subterráneas de carbón, en su numeral 12 contiene el tema de dicho evento en el donde se deberá elaborar un análisis de riesgo para determinar e identificar las áreas propensas a desprendimientos instantáneos, contando con un listado de los indicadores para el análisis, al revisar esto, se notaron vacíos en los indicadores, lo que generó sitios de oportunidad para la creación del presente de trabajo; en el inciso a) establece la mención de los antecedentes de explotaciones en la región, sin embargo la disposición y tamaño de los mantos presentes a lo largo de una región no presentaran las mismas condiciones, ya sea por los diferentes elementos estructurales que puedan afectar al yacimiento de carbón, y se considera que se deberá poner mayor atención a aquellos proyectos donde exista evidencia de un desprendimiento instantáneo; el inciso f) pide la presencia de milonita, esta capa no puede ser denominada de esta manera porque la definición geológica no concuerda con lo que se observa en el desarrollo minero, ésta banda que se encuentra entre los mantos de carbón y presenta características frágiles y poco consolidada, se le considera como una cataclasita, por lo que se propone cambiar el nombre a este inciso por “La presencia de salbandas de falla (capa reactiva) en la estratigrafía del manto”.

Para la generación de dicha metodología se procedió a complementar cada indicador, donde se analizó la información a considerarse, el por qué y cómo se utilizaría esa información para establecer la presencia de peligro, para obtener la probabilidad de ocurrencia del riesgo, severidad del fenómeno y la exposición del personal. Se utilizó como referencia el análisis de riesgo que propone la Norma Oficial Mexicana NOM-023-STPS-2012 que en su numeral 7, se presentan cuatro tablas que ayudan a calcular la magnitud de riesgo, el cual se obtiene multiplicando la exposición del personal, severidad del daño y la

probabilidad de ocurrencia del riesgo. Al revisar las Norma Oficial Mexica NOM-023-STPS-2012 se notó un sitio de oportunidad, ya que la tabla que menciona la probabilidad va de remota, aislada, ocasional, recurrente y continua, en base a un trabajo hecho por Belin (1981) sobre el manejo de riesgo de desprendimiento instantáneo, la probabilidad debería evaluarse de muy baja, baja, media, alta y muy alta, estos últimos valores se encuentran en la tabla de exposición al personal, donde las actividades del personal en referencia a un riesgo deberían ser como los valores dados en la probabilidad (remota, aislada, ocasional, recurrente y continua), quedando la probabilidad medida en muy baja, media, alta y muy alta; y la exposición en remota, aislada, ocasional, recurrente y continua, para obtener una mejor evaluación del riesgo.

Para la aplicación y validación de ésta metodología se aplicó a un proyecto minero donde éste tenía antecedentes de desprendimiento instantáneo, se realizó el llenado del análisis de riesgo y se evaluaron las actividades sin restricción, a pesar de que la empresa contaba con medidas de seguridad se notaron zonas que podían mejorar su prevención ante eventos, algunas de las cosas que se observaron, es que el personal ocupacionalmente expuesto necesita mayor concientización sobre los riesgos, con mayor capacitación para detectar zonas de carbón alterado y signos de alerta.

Cabe destacar que el personal ocupacionalmente expuesto no cuenta con un reporte que solo contemplara las condiciones de la frente de trabajo, y algunos signos de alerta que pudieran desencadenar un desprendimiento instantáneo de gas y carbón, al realizar las primeras pruebas de este formato con los supervisores, se hizo la recomendación de eliminar la información de signos de alerta de los demás formatos para que no se volviera repetitivo y tedioso el llenado de cada uno de sus vistos buenos, y se le prestara atención al que contemplaba solo a la frente de trabajo, para que el encargado de hacer el análisis de riesgo tenga un monitoreo constante de la frente de trabajo, y realice una buena toma de decisiones al definir las medidas de prevención ante un evento.

Se sabe que en otras minas que presentan desprendimientos instantáneos se tienen como medida de prevención el desgasamiento previo de los mantos de

carbón, y barrenación en el carbón alterado en las frentes de trabajo, esta técnica no se consideran como un elemento determinante para frenar un desprendimiento instantáneo de gas y carbón, pero si ha ayudado a bajar el estrés que se presenta en los mantos de carbón alterado, y así liberar rápidamente el contenido de gas. En el proyecto minero se llevan a cabo estas actividades, pero como se mencionó en el párrafo anterior, el personal que se encarga de realizar la tarea de desgasar el manto, debe estar entrenado para la identificación de mantos de carbón alterado, detección de los cambios en los mantos de carbón y tener la costumbre de reportar al encargado de realizar el análisis de riesgo o la central de monitoreo.

9.- CONCLUSIONES

Los objetivos planteados en este trabajo fueron alcanzados satisfactoriamente, desarrollar y validar una metodología para el análisis y evaluación de riesgo de desprendimientos instantáneos logro ser más puntual, además de que se identificaron varias áreas de oportunidad para generar un formato para la revisión de las condiciones de la frente de trabajo, aumentando la cultura de prevención en el personal que se encuentra expuesto ante un evento.

Para establecer los tipos de desprendimientos se analizaron varias clasificaciones, sin embargo las que se mencionan son las más completas. La clasificación en la zona de estudio se considera interna, sin embargo ésta es muy útil para la prevención en nuevas zonas a minar.

Durante la elaboración del análisis de riesgo se fortaleció con la implementación del formato, porque el reporte de estas zonas se resolverá con mayor prontitud, sin embargo se requiere más capacitación al personal. Con la implementación de este formato se pretende el monitoreo de las condiciones que desencadenen un desprendimiento instantáneo, y se disminuya su frecuencia con la aplicación de medidas de prevención

En la aplicación del desgasamiento en los mantos de carbón alterado, se notó que ésta es efectiva para disminuir la frecuencia de un desprendimiento instantáneo de gas y carbón, sin embargo, si se realiza fuera de los mantos alterados no es tan efectivo y se tiene mayor riesgo a presentarse un evento.

9.1.- Recomendaciones

Basado en el presente trabajo y las anteriores conclusiones, se hacen las siguientes recomendaciones.

Para elaborar el análisis de riesgo de desprendimiento instantáneo de gas y carbón con la metodología propuesta, se recomienda tener en cuenta los parámetros que pueden desencadenar un evento:

- El contenido de gas, desorción del gas, estructuras geológicas que afecten la presión como fallas normales, zonas de cizalla, fallas inversas, dureza de la roca encajonante, las características del carbón, dureza y permeabilidad.
- Aplicar campañas de concientización y capacitación al personal en general, así ellos entenderán las implicaciones de un evento de desprendimiento instantáneo de gas y carbón, y valorar así las medidas de seguridad que se aplican al realizar las labores preventivas como el desgasamiento de los mantos.
- Delimitar los parámetros recurrentes en eventos pasados y generar información visual para una rápida detección de los trabajadores, ante un posible evento de desprendimiento instantáneo de gas y carbón, enlistando los signos más notables, audibles y promocionar la costumbre de reportar cualquier signo anómalo a la central de monitoreo.
- Se deberá identificar al personal que tenga mayores probabilidades de estar expuesto a un evento de desprendimiento instantáneo de gas y carbón como: los operadores de mineros continuos y personal de barrenación, ellos junto con el supervisor del área deberán realizar el llenado del formato de las condiciones geológicas de la frente de trabajo, al comenzar las actividades y al notar cambios en el desarrollo minero se deberá reportar a la central de monitoreo.
- Para que sea útil el formato anteriormente señalado se deberá eliminar la información de signos de alerta de desprendimientos instantáneos de gas y carbón, para que el personal no sienta que es repetitivo y se vuelva obsoleto.

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

- Los supervisores de barrenación y operación de desarrollos mineros, deberán llenar el formato al iniciar sus actividades y cuando se presenten cambios significativos en la frente de trabajo (Cambios muy notables en los mantos y roca de carbón, presencia de fallas etc.).
- Los supervisores de barrenación y operación de desarrollos mineros, deberán identificar los mantos de carbón que presenten condiciones anómalas, es decir carbón deleznable y muy fracturado, salbandas de falla, fallas, adelgazamiento y engrosamiento de los mantos de carbón y de las rocas encajonantes, con eso identificado, podrán determinar qué áreas del manto de carbón serán las adecuadas para aplicar las plantillas de barrenación.
- El encargado del análisis de riesgo junto con los encargados de los otros departamentos como barrenación, desgasamiento, geología, desarrollo y planeación, deberán analizar las medidas de prevención de desprendimientos instantáneos.
- El geólogo y el encargado del análisis de riesgo, deberán capacitar al personal ocupacionalmente expuesto para la identificación de las condiciones de la frente de trabajo, que puedan desencadenar un evento de desprendimiento instantáneo de gas y carbón.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- **Baimukhametov, D., Polchin, A., Dauov, T., Ogay, S., 2009.** Gate Road Development in High Gas Content Coal Seams at Karaganda Basin Coal Mines, Kazakhstan, Coal Operators' Conference, The AusIMM Illawarra Branch, 12-13 February, pp: 90-95.
- **Beamish, B. B., Crosdale, P. J., 1998.** Instantaneous outbursts in underground coal mines: An overview and association with coal type, International Journal of Coal Geology, Vol. 35, pp: 27-55.
- **Belin, J. 1981.** Prevention of instantaneous outbursts of methane and coal or rock, Comission of the European Communités, Final report CERCHAR, pp, 29
- **Bodziony, J., Kraj, W. 1995.** Investigation of instantaneous outbursts of coal and gas in laboratory conditions, Int. Symp. Cum Workshop on Management and Control of High Gas Emissions and Outbursts in Underground Coal Mines, Wollongong, March 2-24, (Ed. Lama), pp: 31-38.
- **British Geological Survey (BGS), 2010.** Mineral Planning Factsheet: Coal, Natural Envirment Reserch Council, Boletin of British Geologycal Survey, pp: 1-15.
- **Burrola, O. F., 2013.** Estudio petrográfico y geoquímico del carbón y el gas shale de la Cuenca de Sabinas y de Chihuahua al norte de México: Estimación de los recursos de gas metano. (Tesis Doctoral)
- **Canet, M. C., Camprubi I. C. A., 2006.** Yacimientos Minerales: los tesoros de la tierra. Fondo de Cultura Económica, pp: 12.
- **Cashdollar, K. L., 2000.** Overview of dust explosibility characteristics, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, vol. 13, pp: 183-199.
- **CERCHAR, 1972.** "Informe de la misión de desprendimientos instantáneos (D.I)" para Altos Hornos de México S.A. Minas de Barroterán, 30 de Octubre al 16 de Noviembre de 1972, elaborado por J.Belin, L. Lescher.
- **CERCHAR, 1980.** "Informe de la misión de desprendimientos instantáneos (D.I)" para Altos Hornos de México S.A. Minas de Barroterán y Florida, 7 de Enero al 19 de Enero de 1980.
- **Chen, X., Barron, K., Chan, D., 1995.** A few factors influencing outbursts in underground coal mines, Int. Symp. Cum Workshop on Management & Control of High Gas Emisión & Outbursts, Wollongong, 20-24 Marzo, ACARP, FINAL REPORT: C39079, pp: 55-63.
- **Close, J. C., 1993.** Natural fractures in coal. In: Law, Rice (Eds.) AAPG Studies in Geology: Hydrocarbons from coal. Ch. 5. pp: 119-132.

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

- **Comisión Federal de Electricidad (C.F.E.) 1987.** Informe de la Subcuenca de Fuentes Río Escondido, Consejo de Recursos Minerales. Monografía del Estado de Coahuila.
- **Coordinación General de Minería, 2013.** Perfil de Mercado del Carbón, Secretaria de Economía, México.
- **Corona, E. R. Tritlla, J. Benavides, M. E. M, Piedad, S. N. Ferrusquía, V. I., 2006.** Geología, estructura y composición de los principales yacimientos de carbón mineral en México, Boletín de Sociedad Geológica Mexicana, Volumen Conmemorativo del Centenario, Tomo LVII, Núm. 4, pp: 141-160.
- **Corona, M. Camporredondo, J. García, A. Camacho, L. Rumualdo, S. 2014.** Caracterización de Carbones de la región carbonífera de Coahuila (México), para la determinación de dispersión, formas geométricas, concentración y tipos de azufres presentes, Revista Colombiana de Materiales, N. 5. pp: 84-90.
- **Dirección General de Energía (DGE), 1998.** Investigación técnica de carbón: Conversión del carbón, Análisis automático de macerales y reflectividad, Madrid, pp: 14-16.
- **Dumble, E. T., 1982.** Estudio Geológico del área de Santa Clara y Tonichi, Sonora.
- **Doyle, R., 2002.** Geological structures in relation to outburst events, Coal Operators' Conference, Tribute to Dr. Ripu Daman Lama, 6-8 de Febrero, pp: 53-59.
- **Eguiluz de A, S., 2001.** Geologic evolution and gas resources of the Sabinas Basin in northeastern México, in C. Bartolini, R.T. Buffler, and A. Cantú-Chapa, eds., The western Gulf of Mexico Basin: Tectonics, sedimentary basins, and petroleum systems: AAPG Memoir 75, p. 241-270.
- **Eguiluz de A, S., Amezcua., Amezcua, T. N. 2003.** Coalbed Methane Resources of the Sabinas Basin, Coahuila, Mexico in The Circum-Gulf of Mexico and the Carribean: Hydrocarbon hábitats, basin formation, and plate tectonics, American Association of Petroleum Geologists Memoir, Vol. 79, pp: 395-402.
- **Giraldo, H. R. 1998.** Introducción a la Geoestadística, teoría y práctica, Universidad Nacional de Bogotá; pp: 33-40.
- **Goldhammer, R. K., 1999.** Mesozoic sequence stratigraphy and paleogeographic evolution of northeast Mexico, in Bartolini, J. L. Wilson, and T. F, Lawton, eds, Mesozoic sedimentary and tectonic history of north-central Mexico: Geological Society of America, pp:1-58.

- **González, S. F., Puente, S. R., González, P. E. Camprubí, A., 2007.** Estratigrafía del Noroeste de México y su relación con los yacimientos estratoligados de fluorita, barita, celestina y Zn-Pb, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, tomo LIX, núm. 1, pp: 43-62
- **Gotoh, K., Matsui, K., Takemaru, Y., Li, Z, C., 1995.** A theory of mechanics of outburst, In: Lama R.D. (Ed.), Int. Symp. Cum Workshop on Management and Control of High Gas Emissions and Outbursts in Underground Coal Mines. Wollongong, Australia, 20-24 March.
- **Gray, I., 19810 (I).** Overseas Study of Japanese Methane Gas Drainage Practice and Visits to Coal Research Centres, June – August 1980, Australian Coal Industry Research Laboratory Ltd., Published Report 80-15.
- **Gray, I., 1980 (II).** The Mechanism of and Energy Release Associated with Outbursts, Symposium on The Occurrence, Prediction and Control of Outbursts in Coal Mines, AusIMM, Southern Queensland Branch, September 1980.
- **Greaves, K.H., Owen, L.B., McLennan, J.D., Olszewski, A., 1993.** Multi-component gas adsorption–desorption behavior of coal. Proc. 1993 Int. Coalbed Methane Symp. The Univ. of Alabama, Tuscaloosa, AL, pp: 197–205.
- **Hancock, P.L., 1985.** Brittle microtectonics: Principles and practices: J. Struct. Geol., v. 7, pp: 431-457.
- **Hargraves, A. J., 1980.** A review of instantaneous outburst data, in Proceeding The Occurrence, Prediction and Control of Outbursts in Coal Mines, Ed: A J Hargraves, The Australian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne, pp: 1-18.
- **Hong-wei, Z. Wei-hua, S. Heng, Y. Ming-jie, Z, 2008.** Pattern recognition prediction of coal and gas outburst hazards in the sixth mine of Hebi. Journal of Coal Science & Engineering (China). Vol 14. No.2 June 2008, pp: 248-251.
- **Hyman, D. M., 1987.** A Review of the Mechanisms of Gas Outbursts in Coal, Bureau of Mines Information Circular 9155, United States Department Of The Interior, pp:2.
- **Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2009.** Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Progreso, Coahuila de Zaragoza, Clave Geoestadística 0502#
- **Kim, A. G., 1977.** Estimating methane content of bituminous coalbeds from adsorption data, Report of Investigations 8245, United States Department of the Interior.

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

- **Kreiner, K., 1993.** Chemistry of coalification process, Chap. 3, in Wegiel Kamienny Ed. A. Czaplinski, Akademia Gomiczo-Hutnicza, Krakow, pp: 30-4.
- **Lama, R. D., 1995.** Safe gas content threshold value for safety against outbursts in the mining of the Bulli seam. In: Lama R.D. (Ed.), Int. Symp. Cum Workshop on Management and Control of High Gas Emissions and Outbursts in Underground Coal Mines. Wollongong, Australia, 20-24 March, pp: 175-189.
- **Lama, R. D., Bodziony, J., 1996.** Final Report: Sudden Outbursts of Gas and Coal in Underground Coal Mines; Edit. ACARP, Australia.
- **Lama, R. D. Bodziony, J. 1998.** Management of outburst in underground coal mines. Ed. Elsevier, International Journal of Coal Geology, pp: 83-115.
- **Lama, R, Saghafi, A., 2002.** Overview of Gas Outbursts and Unusual Emissions, Edit. ACARP. Coal Operators' Conference, pp: 77-88.
- **Levine, J. R., 1993.** Coalification: The evolution of coal as a source rock and reservoir for rock oil and gas, in Hydrocarbons from Coal (Ed. Law & Rice) AAPG Studies in Geology # 38, Chapter 3, pp: 39-77.
- **Llitas, P. D. O., Sánchez, R. J. A., 2010.** Aprovechamiento y explotación del gas asociado a los yacimientos de carbón (Gas Grisú), Universidad Nacional Autónoma de México, México, DF, pp: 42-62. (Tesis de Licenciatura)
- **López, R. E., 1980.** Paleogeografía y tectónica del Mesozoico en México, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Instituto de Geología, Revista, Vol. 5 núm. 2, pp: 158-177.
- **Meng, Y., Tang, D., Xu, H., Li, C., Li, L., Meng, S., 2014.** Geological controls and coalbed methane production potencial evaluation: A case study in Liulin area, eastern Ordos basin, China. Journal of Natural Gas Science and Engineering, num. 21. pp: 95-111.
- **“Minas subterráneas y minas a cielo abierto - Condiciones de seguridad y salud en el trabajo”,** Norma Oficial Mexicana NOM-023-STPS-2012. Diario Oficial de la Federación. Jueves 11 de Octubre de 2012.
- **Monografías Geológico-Mineras., 1993.** Monografía Geológico-Minera del Estado de Coahuila, Secretaría de energía, Minas e Industria Paraestatal Subsecretaría de Minas e Industria Básica, Consejo de Recursos Minerales, V. 1.
- **Nakajima, I., Asakura, K., Yang, Q., 1995.** Effect of earth temperatura on gas permeability of stressed coal, Int. Symp. Cum Workshop on Management & Control of High Gas Emission & Outbursts, Wollongong, 20-24 Marzo, ACARP, FINAL REPORT: C39079, pp: 315-322.

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

- **Noack, K., Koope, U., Kunz, E., 1995.** Control of High gas emissions in underground coal mines, In: Symp. cum Workshop on Management & Control of High Gas Emission & Outbursts Wollongong, 20-24 Marzo, ACARP, FINAL REPORT: C39079, pp:30-39.
- **OHSAS Project Group., 2007.** Serie de Evaluación en Seguridad y Salud Ocupacional: ISO 18001:2007, Sistema de Gestión en Seguridad y Salud Ocupacional- Requisitos, (Traducido por SGS Colombia).
- **Organización Familia Pasta de Conchos., 2012.** IV Informe de Pasta de Conchos, Informe Adoptado por la Comisión Nacional de los Derechos Humanos, Ciudad de México.
- **Padilla y S, R, J., 1986.** Post-Paleozoic Tectonics of Northeast Mexico and its Role in the Evolution of the Gulf of Mexico, Geofísica Internacional, Vol. 25-1, pp: 157-206.
- **Petróleos Mexicanos (PEMEX)., 1988.** Estratigrafía de la República Mexicana: Mesozoico, Informe PEMEX de exploración y producción, pp: 9-14
- **Pérez, P, E., 2014.** Caracterización Petrográfica de carbones asociados a desprendimientos instantáneos en Mina VII, MIMOSA, Noreste de México, Universidad Autónoma de Coahuila, Escuela Superior de Ingeniería “Licenciado Adolfo López Mateos”, Febrero de 2014 (Tesis de Licenciatura).
- **Pescod, R., 1947-48.** Rock bursts in the western portions of the South Wales coalfield, Trans. Instn. Min. Engrs., 107, pp 512-49.
- **Rionda, A. R., 2010.** El gas asociado a los yacimientos de carbón mineral (GAC), Academia de Ingeniería. pp: 33-56.
- **Robeck, R. C., Pesquera, V. R., Ulloa. A, S., 1956.** Geología y depósitos de carbón de la región de sabinas, Estado de Coahuila, en XX Congreso Geológico Internacional: México, pp:109.
- **Santamaría, O. D., Ortuño, A. F., Adatte, T., Ortíz, U. A., Riba, R. A., & Franco, N.S., 1991.** Evolución geodinámica de la Cuenca de Sabinas y sus implicaciones petroleras, Estado de Coahuila: Instituto Mexicano del Petróleo internal report.
- **Schweinfurth, S., 2000.** Coal-A Complex Natural Resource: An overview of factors affecting coal quality use in the United Status. U. S. Geological Survey, 11 Jan 2013.
- **“Seguridad para minas subterráneas de carbón”,** Norma Oficial Mexicana NOM-032-STPS-2008. Diario Oficial de la Federación. Martes 23 de Diciembre de 2008.

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

- **Shepherd, J., Rixon, L. K., Griffiths, L., 1981.** Rock mechanics review, outbursts and geological structures in coal mines. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Absrt.* 18, pp: 267-283.
- **Sobczyk, J., 2011.** The influence of sorption processes on gas leading to the coal and gas outburst in the laboratory conditions, *Journal of Fuel*, num. 90, pp: 1018-1023.
- **Speight, G. J., 2012.** *The Chemistry and Technology of Coal*, Editorial: CRC Press, Taylor & Francis Group, EE.UU, pp: 14-19.
- **Taylor, T. J., 1852-1853.** Proofs of subsidence of the firedamp of coal mines in a state of high tension in situ. *Trans. N. Engl. Inst. Min. Eng.* 1, pp: 275-299.
- **Teichmiiller, M., 1989.** The genesis of coal from the view point of coal petrology, *Int. J. Coal Geol.*, Vol. 12, pp: 1-87.
- **Trotter, F. M. 1950.** Hilt's Law and the Volatile Contents of Coal Seams *Geological Magazine*, Volume 87, Issue 01, pp: 68-70.
- **Twiss, J. R., Moores, E. M., 1992.** *Structural Geology*, Chapter 12. Kinematic Models of Folding, Edit. W.H. Freeman and Company, New York, USA. pp: 238-241.
- **Valdez, M. G., 2001.** *Geoquímica y petrología de los campos volcánicos Las Esperanzas y Ocampo, Coahuila, México, México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de Maestría, pp:104.*
- **Vejar, H. M. M., 1998.** Manifestaciones de hidrocarburos en ambientes deltaico, de la Formación San Miguel en la Subcuenca Fuentes Río Escondido, Noreste de México, Universidad Autónoma de Nuevo León (Tesis de Maestría).
- **Verdugo, D. F., Ariciaga, M. C., 1985.** Informe Geológico de la Cuenca Carbonífera Fuentes Río Escondido. Dpto. De Estudio Carboníferos C.F.E. México, DF.
- **Verdugo, D. F., Ariciaga, M. C., 1988^a.** Informe Geológico de la cuenca carbonífera Fuentes-Río Escondido Coahuila: Fondo de Cultura Económica, S.A. de C.V., Geología Económica de México, (Salas ed.). pp: 143-170.
- **Verdugo, D. F., Ariciaga, M. C., 1988^b.** Resumen de la exploración y explotación en Río Escondido. In: Salas G. (Editor): *Geología Económica de México*. Fondo de Cultura Económica. México, pp: 171-174.
- **Wang, S., Elsworth, D., Liu, J., 2012.** Mechanical Behavior Infiltrated Coal: the Roles of Gas Desorption, Stress Level and Loading Rate, *Rock Mechanics Rock Engineering*. DOI 10.1007/s00603-012-0324-0.

Metodología para el análisis del riesgo de desprendimiento instantáneo de carbón y gas metano, durante la construcción de galerías en una mina subterránea de carbón

- **Weiji, S., Yaolin, C., Bing, L., 2012.** Experiment Study for Coal and Gas Outburst under Different Coal Methane pressure. The National Basic Research Program China, pp: 1-8.
- **Yang, W., Lin, B., Xu, J., 2014.** Gas outburst affected by original rock stress direction, Nat Hazards, Springer, Vol, 72, pp: 1063-1074, DOI 10.1007/s11069-014-1049-z.

ANEXOS

Anexo 1.-Tabla de relación de presión de iniciación de un desprendimiento entre diferentes autores.

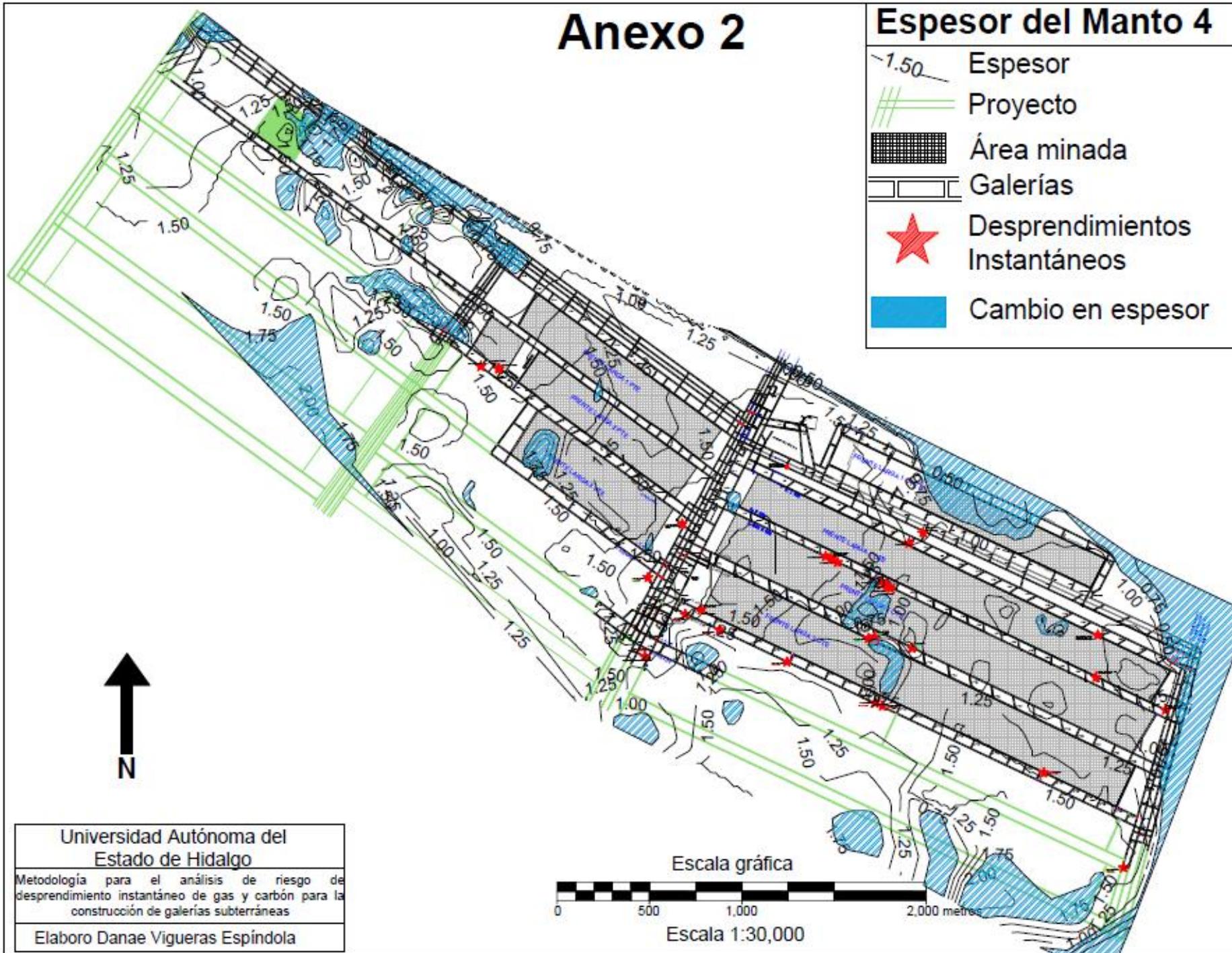
	Lama (1995)	Chen et al., (1995)	Gotoh et al., (1995)	Lama & Bodziony (1996)	Weiji et al. (2012)
Presión de mínima de iniciación de un desprendimiento instantáneo	de 195.8 psi (95% CH ₄) a 108.7 psi (60% CO ₂)	217.5 psi	217.55psi-435.11psi	43.51 psi	de 97.17psi a 37.78psi
Metodología	Experiencia de campo en el control de desprendimientos instantáneos	Modelo computarizado	Modelos computarizados	Experimentos en laboratorio con carbón seco	Pruebas de laboratorio carbón pulverizado
Equivalencia en m ³ /ton*	6.70 m ³ /ton (60% CO ₂) a 10m ³ /ton (95% CH ₄)	14.25m ³ /ton	10.53m ³ /ton a 14.25m ³ /ton	8m ³ /ton	2.27m ³ /ton a 6m ³ /ton

* Según la isoterma de adsorción elaborada por DMT para carbón con 25% de materia volátil

Anexo 2

Espesor del Manto 4

- 1.50 Espesor
- Proyecto
- Área minada
- Galerías
- Desprendimientos Instantáneos
- Cambio en espesor



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Metodología para el análisis de riesgo de desprendimiento instantáneo de gas y carbón para la construcción de galerías subterráneas

Elaboro Danae Viguera Espindola

Escala gráfica

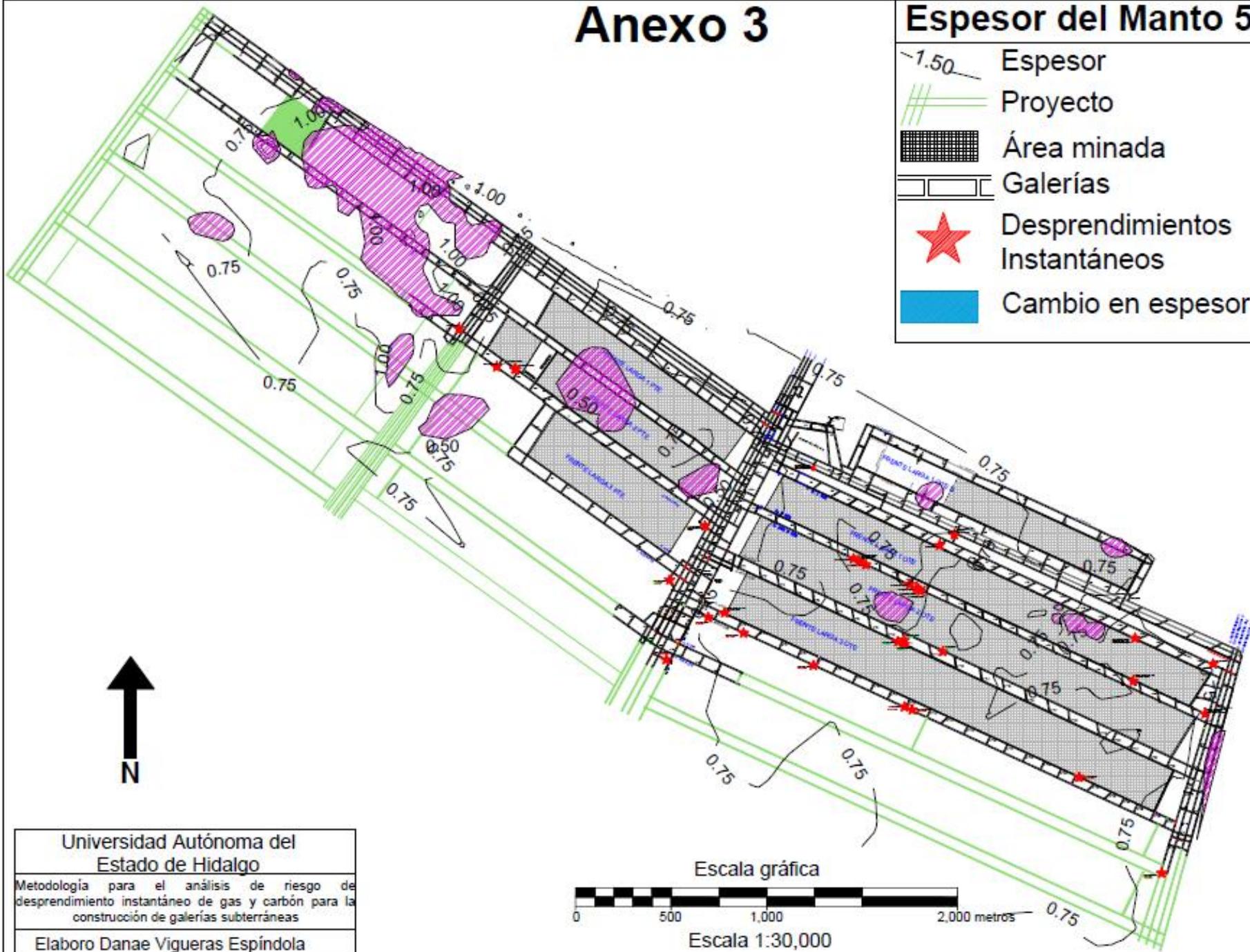


Escala 1:30,000

Anexo 3

Espesor del Manto 5

- 1.50 Espesor
- Proyecto
- Área minada
- Galerías
- Desprendimientos Instantáneos
- Cambio en espesor



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

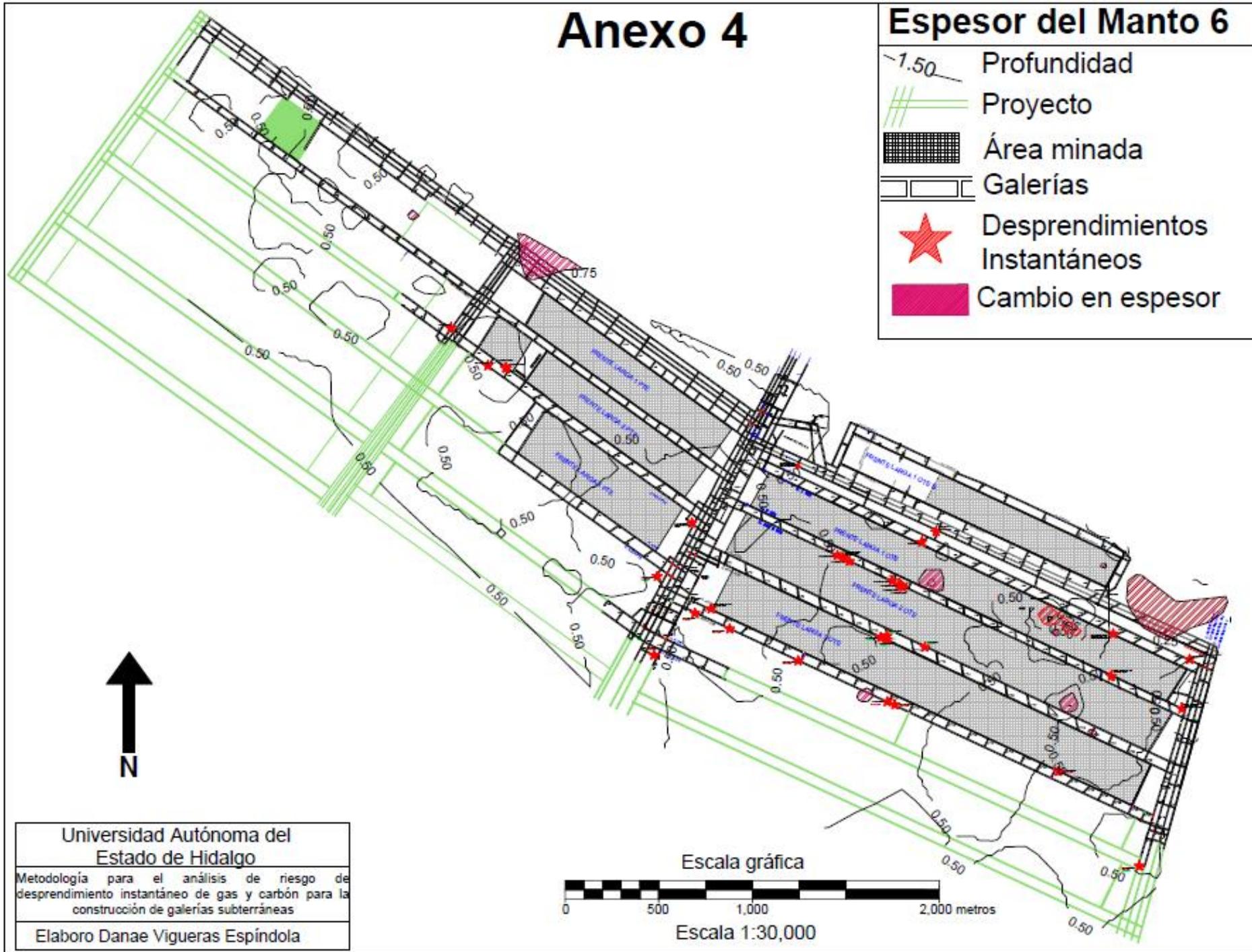
Metodología para el análisis de riesgo de desprendimiento instantáneo de gas y carbón para la construcción de galerías subterráneas

Elaboro Danae Viguera Espíndola

Anexo 4

Espesor del Manto 6

- 1.50 Profundidad
- Proyecto
- Área minada
- Galerías
- Desprendimientos Instantáneos
- Cambio en espesor

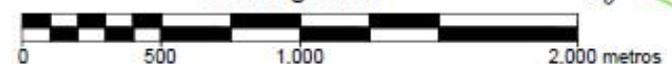


Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Metodología para el análisis de riesgo de desprendimiento instantáneo de gas y carbón para la construcción de galerías subterráneas

Elaboro Danae Viguera Espíndola

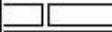
Escala gráfica

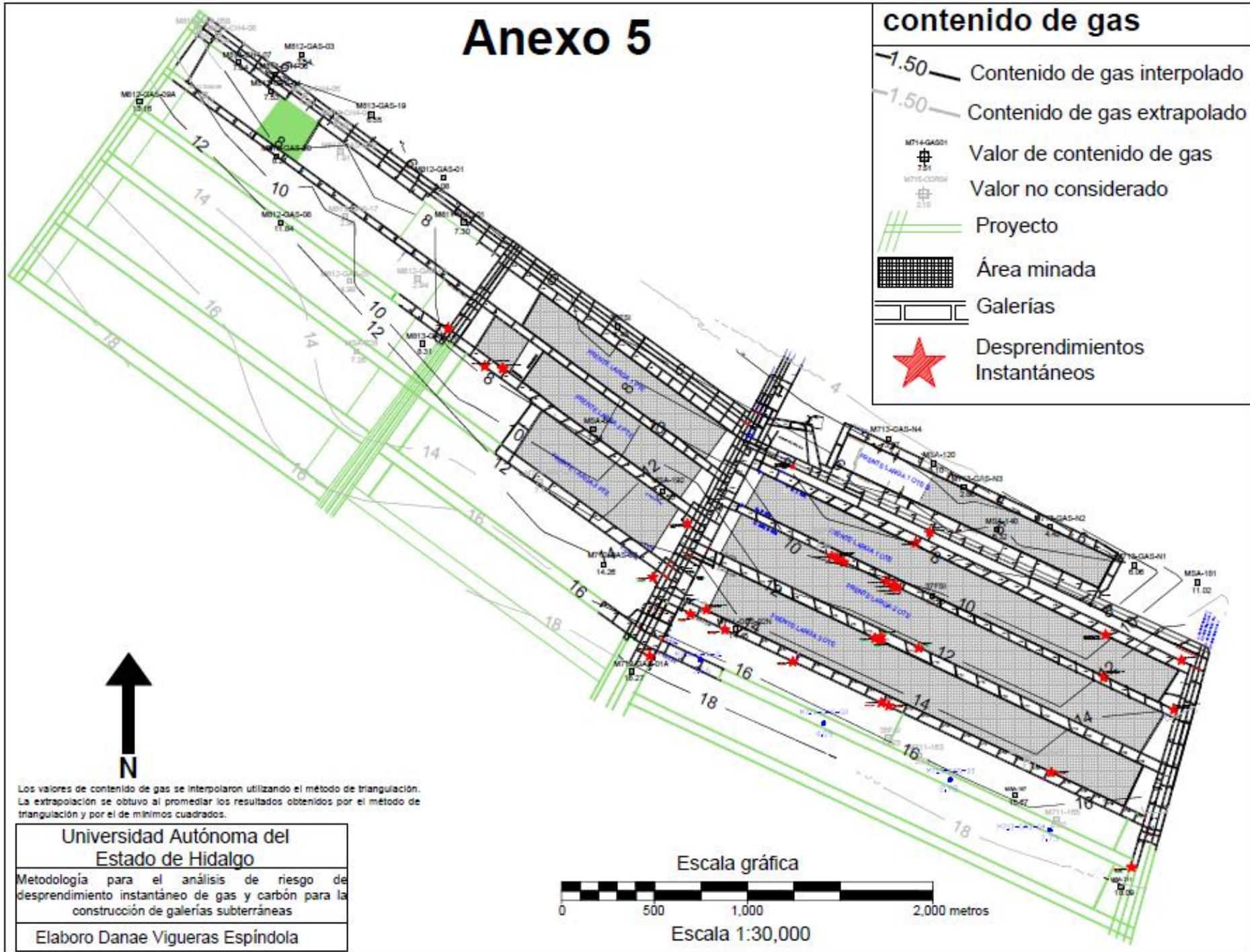


Escala 1:30,000

Anexo 5

contenido de gas

-  Contenido de gas interpolado
-  Contenido de gas extrapolado
-  Valor de contenido de gas
-  Valor no considerado
-  Proyecto
-  Área minada
-  Galerías
-  Desprendimientos Instantáneos



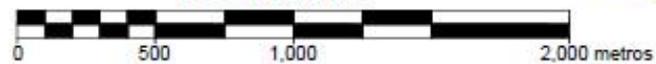
Los valores de contenido de gas se interpolaron utilizando el método de triangulación. La extrapolación se obtuvo al promediar los resultados obtenidos por el método de triangulación y por el de mínimos cuadrados.

Universidad Autónoma del
Estado de Hidalgo

Metodología para el análisis de riesgo de
desprendimiento instantáneo de gas y carbón para la
construcción de galerías subterráneas

Elaboro Danae Viguera Espindola

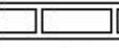
Escala gráfica

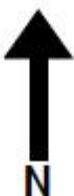
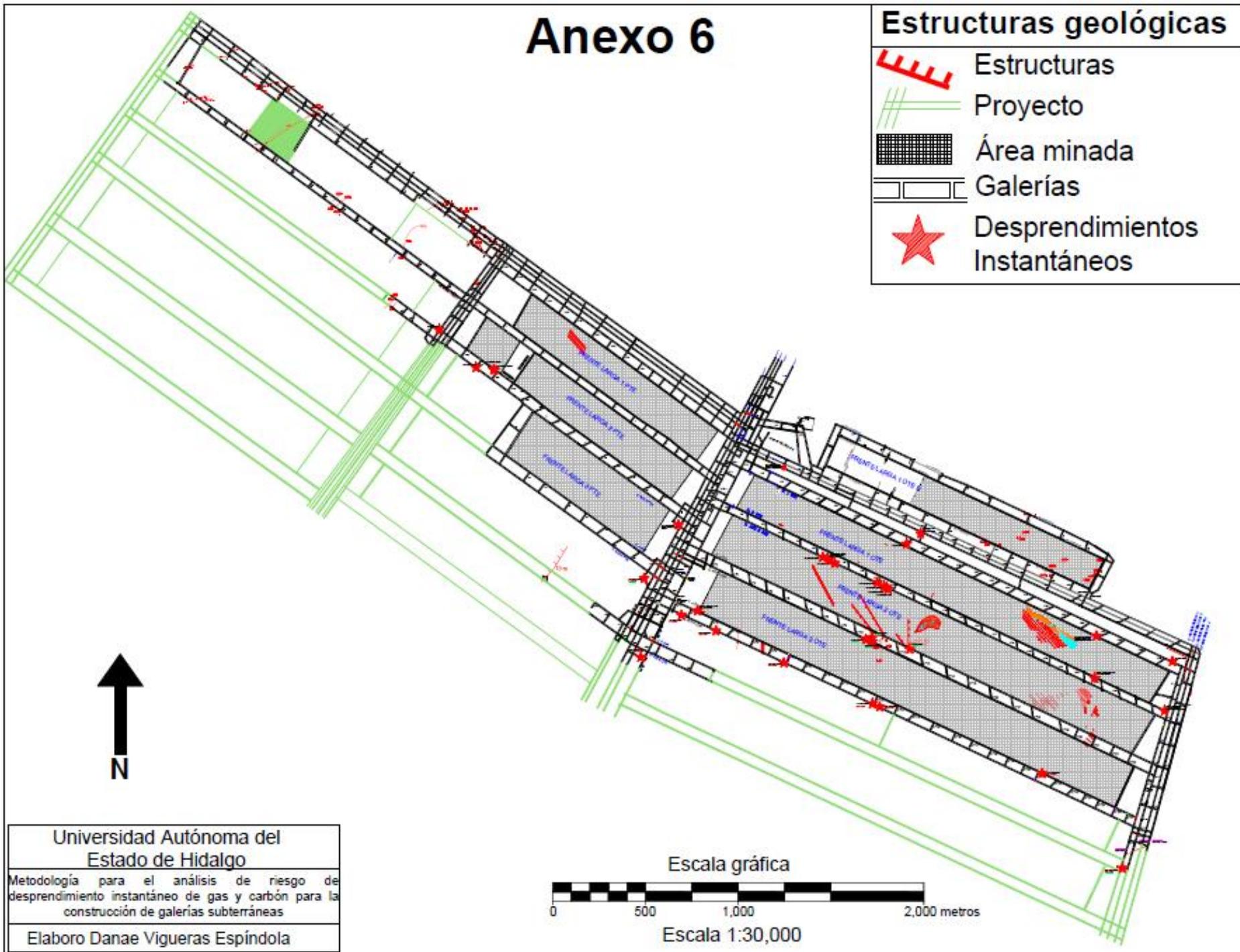


Escala 1:30,000

Anexo 6

Estructuras geológicas

-  Estructuras
-  Proyecto
-  Área minada
-  Galerías
-  Desprendimientos Instantáneos

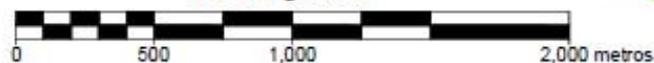


Universidad Autónoma del
Estado de Hidalgo

Metodología para el análisis de riesgo de
desprendimiento instantáneo de gas y carbón para la
construcción de galerías subterráneas

Elaboro Danae Viguera Espindola

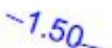
Escala gráfica

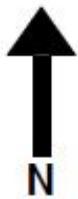
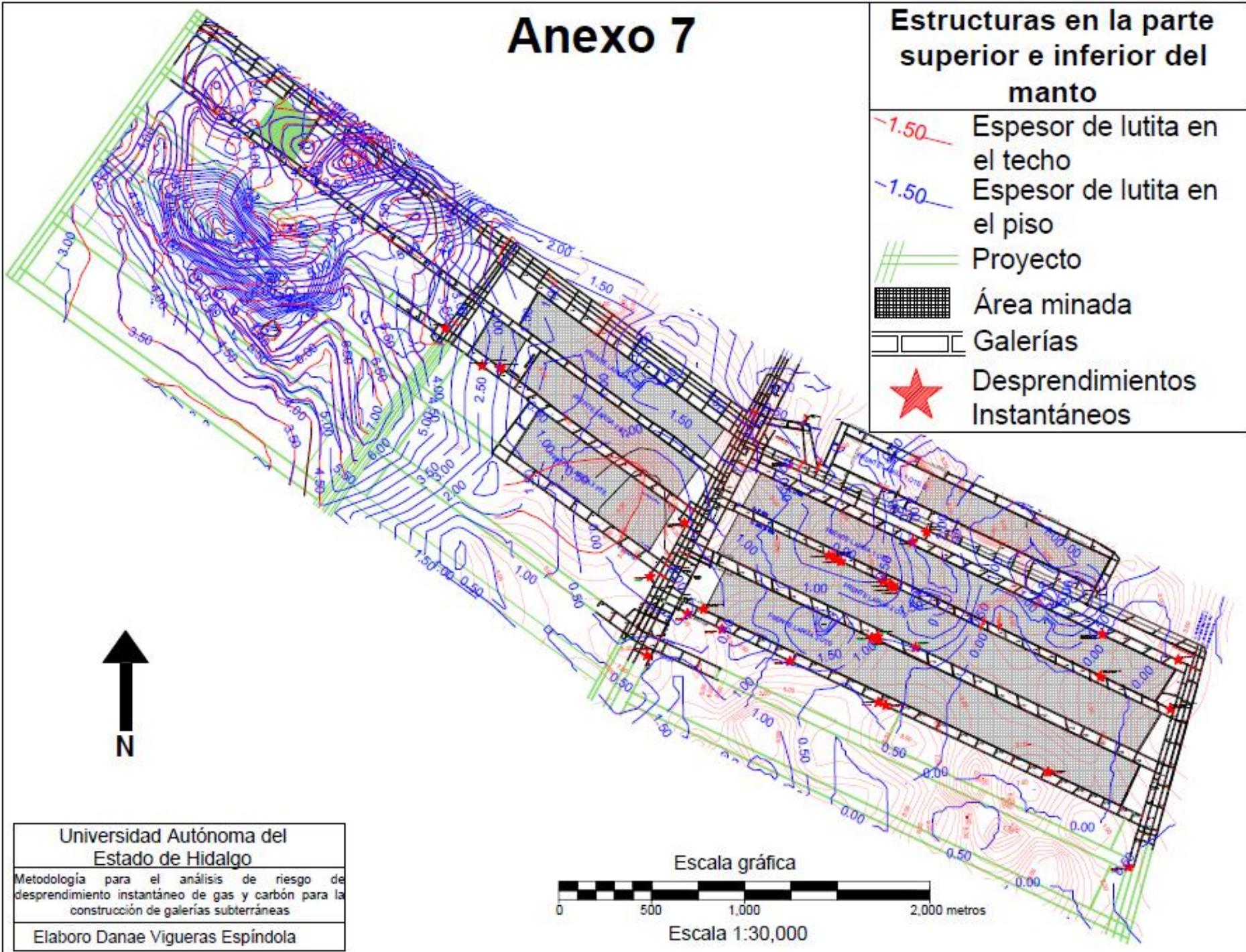


Escala 1:30,000

Anexo 7

Estructuras en la parte superior e inferior del manto

-  -1.50 Espesor de lutita en el techo
-  -1.50 Espesor de lutita en el piso
-  Proyecto
-  Área minada
-  Galerías
-  Desprendimientos Instantáneos

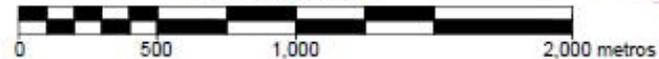


Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Metodología para el análisis de riesgo de desprendimiento instantáneo de gas y carbón para la construcción de galerías subterráneas

Elaboro Danae Viguera Espíndola

Escala gráfica

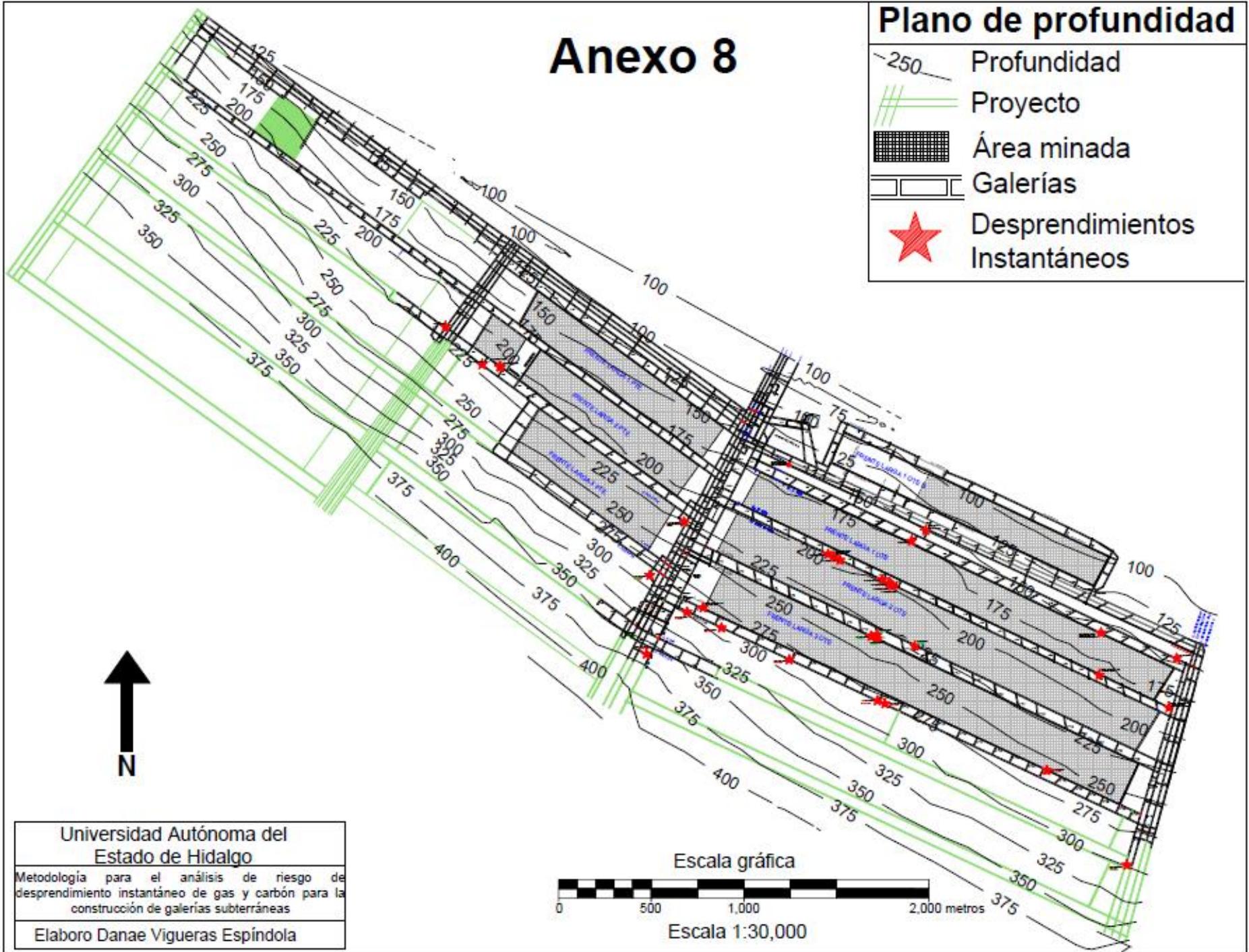


Escala 1:30,000

Anexo 8

Plano de profundidad

- 250 Profundidad
- Proyecto
- Área minada
- Galerías
- Desprendimientos Instantáneos

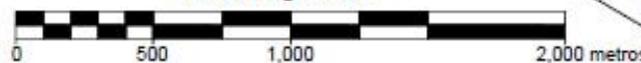


Universidad Autónoma del
Estado de Hidalgo

Metodología para el análisis de riesgo de
desprendimiento instantáneo de gas y carbón para la
construcción de galerías subterráneas

Elaboro Danae Viguera Espíndola

Escala gráfica

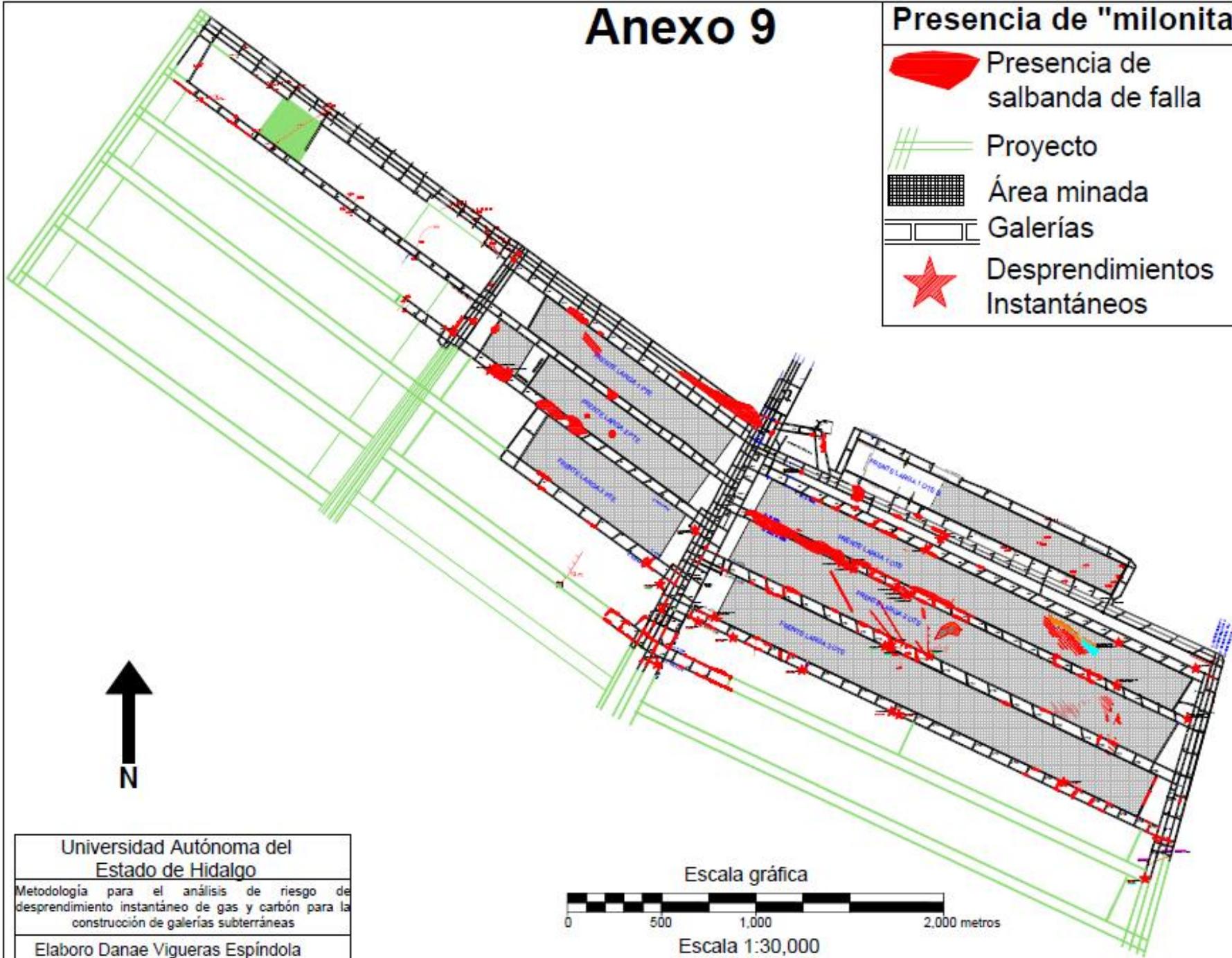


Escala 1:30,000

Anexo 9

Presencia de "milonita"

-  Presencia de salbanda de falla
-  Proyecto
-  Área minada
-  Galerías
-  Desprendimientos Instantáneos

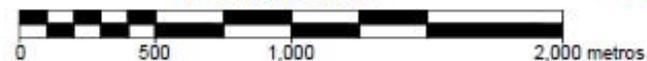


Universidad Autónoma del
Estado de Hidalgo

Metodología para el análisis de riesgo de
desprendimiento instantáneo de gas y carbón para la
construcción de galerías subterráneas

Elaboro Danae Vigueras Espíndola

Escala gráfica

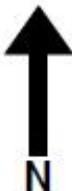
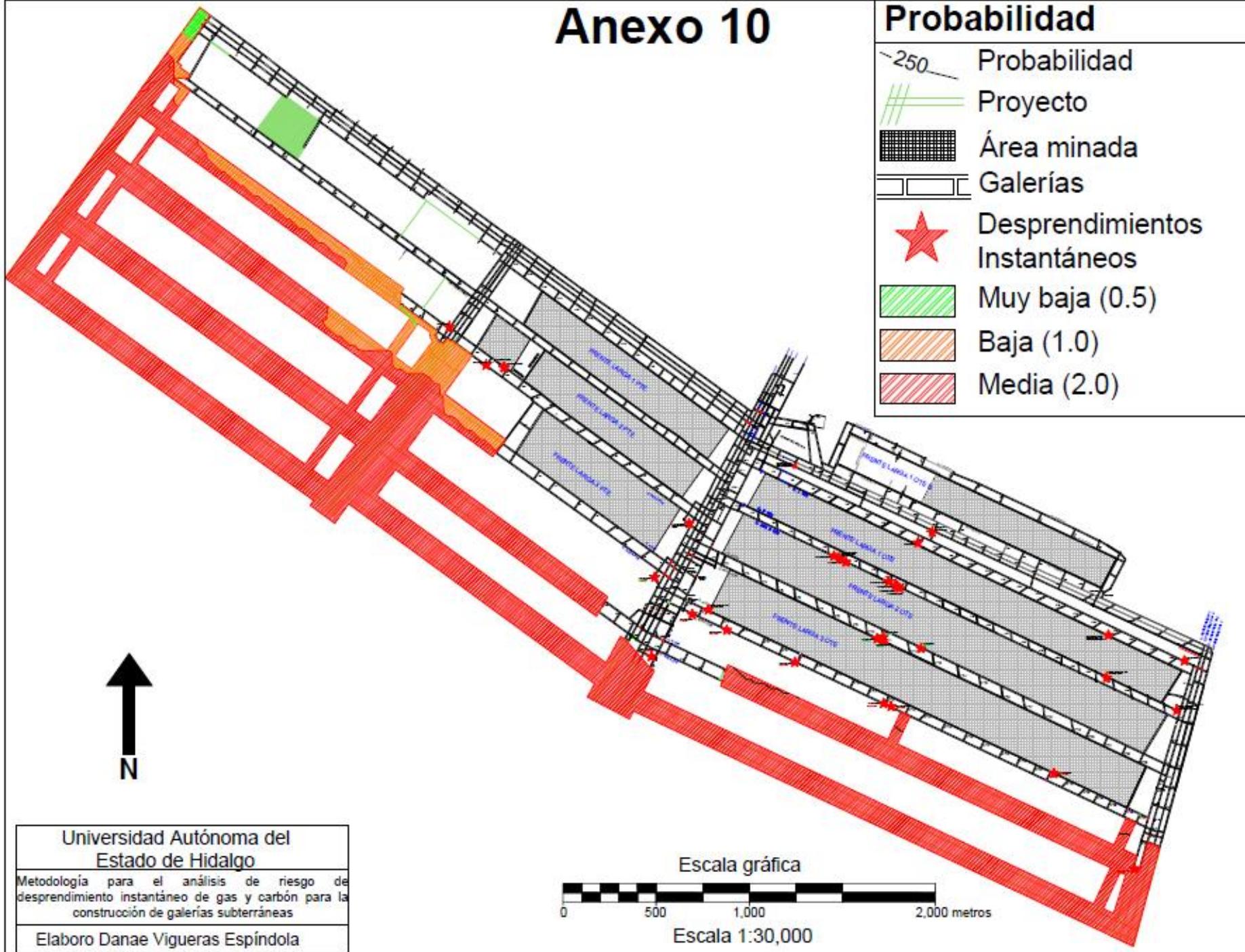


Escala 1:30,000

Anexo 10

Probabilidad

- 250 Probabilidad
- Proyecto
- Área minada
- Galerías
- ★ Desprendimientos Instantáneos
- Muy baja (0.5)
- Baja (1.0)
- Media (2.0)

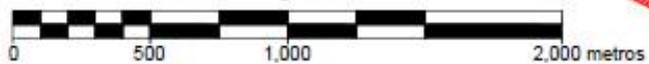


Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Metodología para el análisis de riesgo de desprendimiento instantáneo de gas y carbón para la construcción de galerías subterráneas

Elaboro Danae Viguera Espíndola

Escala gráfica

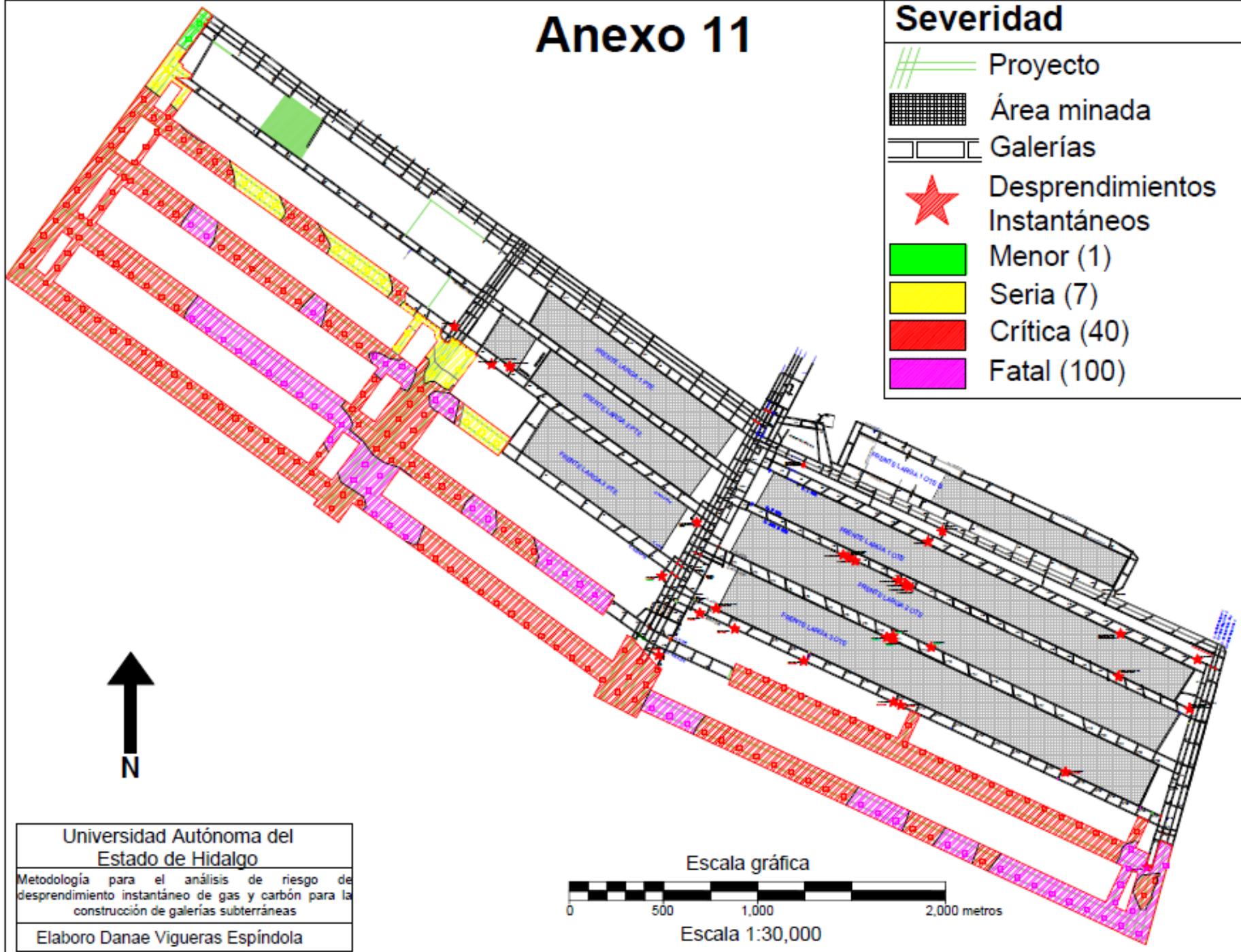


Escala 1:30,000

Anexo 11

Severidad

- Proyecto
- Área minada
- Galerías
- Desprendimientos Instantáneos
- Menor (1)
- Seria (7)
- Crítica (40)
- Fatal (100)

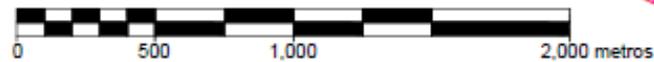


Universidad Autónoma del
Estado de Hidalgo

Metodología para el análisis de riesgo de
desprendimiento instantáneo de gas y carbón para la
construcción de galerías subterráneas

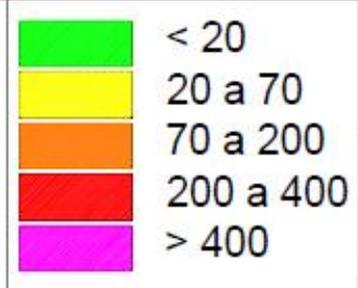
Elaboro Danae Viguera Espíndola

Escala gráfica



Escala 1:30,000

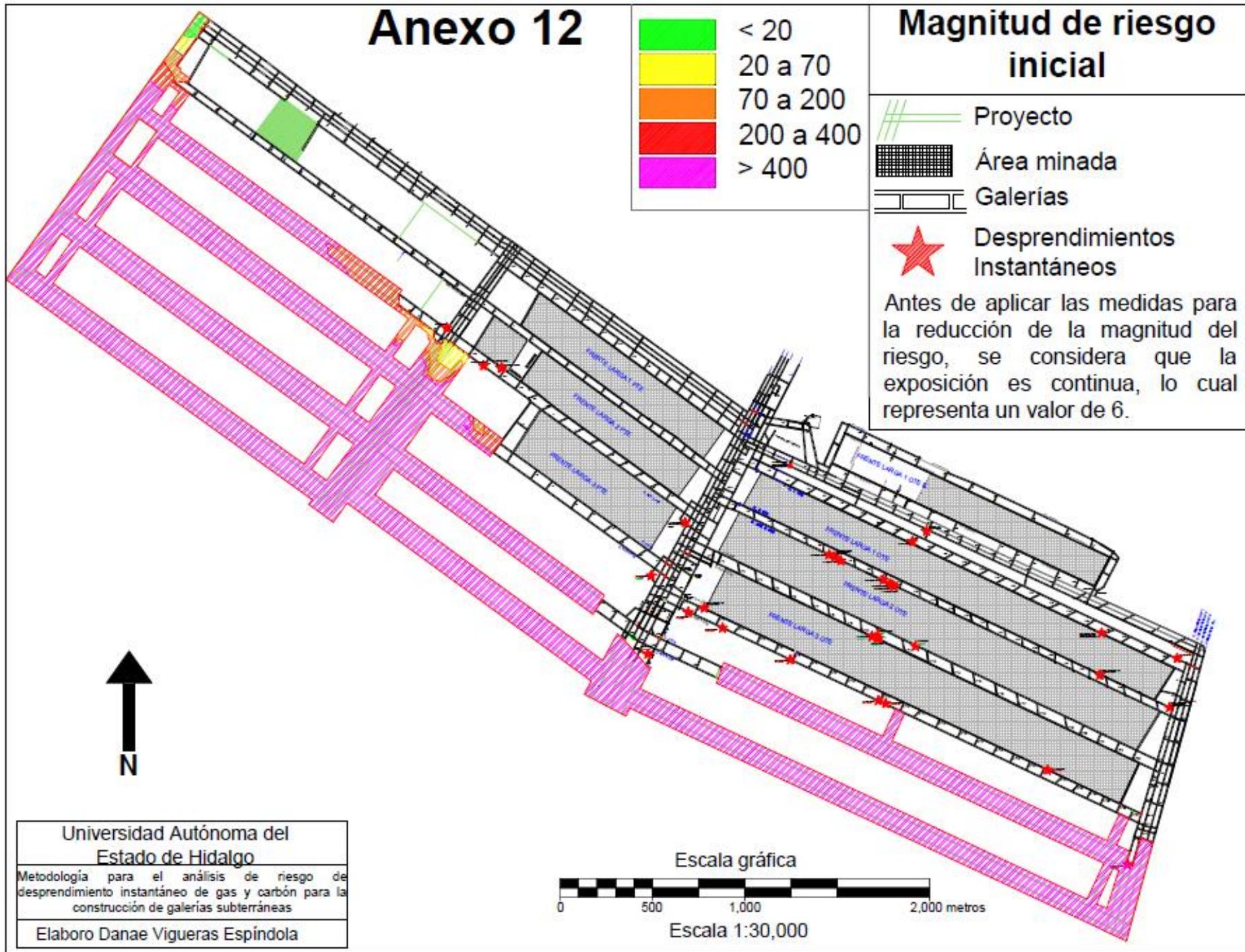
Anexo 12



Magnitud de riesgo inicial



Antes de aplicar las medidas para la reducción de la magnitud del riesgo, se considera que la exposición es continua, lo cual representa un valor de 6.

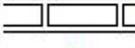


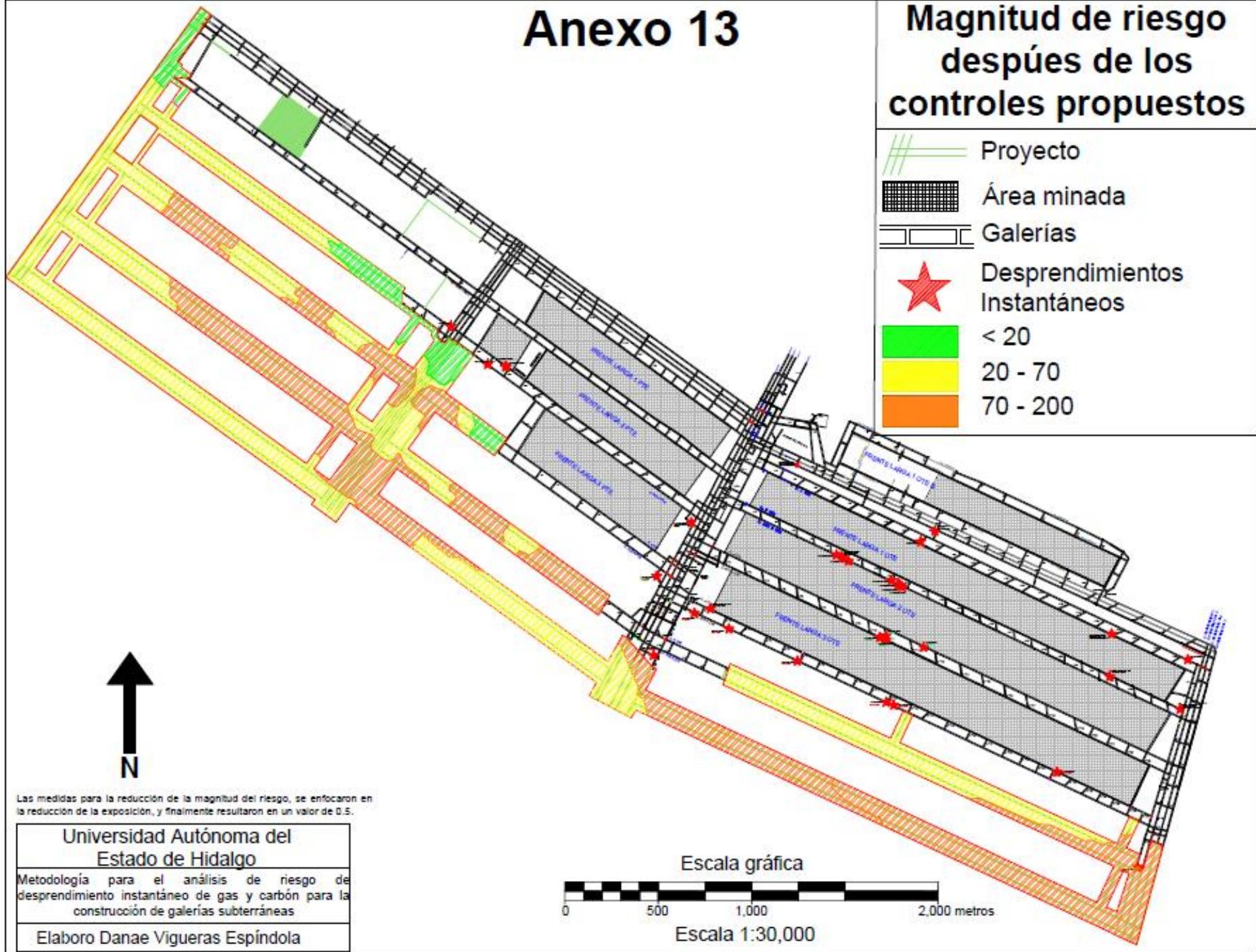
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Metodología para el análisis de riesgo de desprendimiento instantáneo de gas y carbón para la construcción de galerías subterráneas
Elaboro Danae Viguera Espíndola



Anexo 13

Magnitud de riesgo después de los controles propuestos

-  Proyecto
-  Área minada
-  Galerías
-  Desprendimientos Instantáneos
-  < 20
-  20 - 70
-  70 - 200



Anexo 14

Profundidad:	Fecha y hora:	Maquina:	Turno: A	B	C
Localización:		Nombre del supervisor:			
CONDICIONES GEOLÓGICAS					
Presencia de estructuras: <input type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No		Tipo de estructura:	Desplazamiento: <input type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No		
Espesor del desplazamiento:		Presencia de salbandas de falla: <input type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No	Espesor de la salbanda de falla:		
CONDICIONES DEL MANTO DE CARBÓN					
Cambios en las propiedades del carbón: <input type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No		Grado de perturbación del carbón:			
Presencia de agua en la frente de trabajo: <input type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No		Cantidad de agua que se encuentra en la frente de trabajo			
CONDICIONES DE LA ROCA ENCAJONANTE					
Cambios en las propiedades de la roca: <input type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No		Grado de alteración de la roca:			
DIBUJO DE LA FRENTE DE TRABAJO					
Nombre de la cuadrilla: _____			SIGNOS DE ALERTA DE DESPRENDIMIENTOS INSTANTANEOS		
			SIGNOS EN DESARROLLOS		
			<input type="checkbox"/> Sonidos de fracturas en los mantos de carbón y/o roca		
			<input type="checkbox"/> Aumento en la presión del techo		
			<input type="checkbox"/> Protuberancias en los mantos de carbón y/o roca		
			<input type="checkbox"/> Cambio en la dureza del carbón		
			<input type="checkbox"/> Aumento repentino en la emisión de gas		
			SIGNOS EN BARRENACIÓN		
			<input type="checkbox"/> Altas emisiones de gas en los orificios de barrenación		
			<input type="checkbox"/> Empuje o succión de las barras de barrenación		
			<input type="checkbox"/> Cambio en las partículas de barrenación		
<input type="checkbox"/> Neblina de barrenación de color marrón					
<input type="checkbox"/> Deformación de los orificios de barrenación o rapido colapso					
Observaciones: _____					

ANEXO 15

Para responder el formato, se enlistan las siguientes opciones para contestar cada una de las condiciones que se llegarán a presentar durante el desarrollo minero.

Generalidades

El supervisor de barrenación y operación de desarrollo deberá llenarlo en base a los datos ya conocidos por ellos.

Condiciones Geológicas

En esta parte contestara Si o No, si es Si, deberá indicar el tipo de estructura que observa y poniendo el número correspondiente a la estructura presente:

1. Falla: 1.1 Falla Normal, 1.2 Falla Inversa, 1.3 Falla Salto,
2. Zona de Cizalla,
3. Cuerpo Intrusivo,
4. Pliegue: 4.1 Anticlinal, 4.2 Sinclinal.

Si hay presencia de fallas, cizallas o cuerpos intrusivos deberá marcar el desplazamiento que ha sufrido el manto de carbón

- A) <30 cm (menor a 30 cm),
- B) >30 cm (mayor a 30 cm).

En caso de marcar que no hay presencia se pasa al siguiente enunciado.

Al presentarse una salbanda de falla deberá contestar Si o No, en caso de ser Si, deberá indicar el grosor de esta capa como se enlista a continuación:

- a) <30 cm (menor a 30 cm),
- b) >30 cm (mayor a 30 cm).

En caso de marcar que no observarse presencia de salbanda de falla se pasa al siguiente enunciado.

Condiciones del Manto de Carbón

Si el supervisor de barrenación o de operación de desarrollos, observará las condiciones del manto de carbón, y deberá contestar Si o No en base a los cambios que observe con la siguiente tabla:

Clasificación del Carbón

Grado de alteración	Brillo	Fracturamiento del carbón	Mantos	Dureza
A. Sin perturbación	Brillante-Semibrillante	Fracturas notables, mostrando una buena liberación del gas	No presenta variación en el tamaño del manto de carbón	Buena dureza y difícil de romper
B. Perturbado	Brillante-Semibrillante	Fracturas pequeñas, pero aun muestra buena liberación de gas	No presenta variación en el tamaño del manto de carbón	Dureza aceptable
C. Altamente perturbado	Usualmente obscurecido	Fracturas difícilmente observables, bajo nivel de liberación de gas	Presenta poca uniformidad	Fácil de pulverizar, frágil
D. Fracturado	Obscurecido	Sin presencia de fracturas	Usualmente varía el tamaño del manto de carbón	Frágil, fácil de pulverizar, algunas veces como textura masiva
E. Pulverizado	Obscurecido con manchones cafés	Sin presencia de fracturas, no presenta una buena liberación de gas	Gran variación en el tamaño del manto de carbón	Frágil, fácil de pulverizar, fragmentos de carbón café como si fuera depositos en lentes

Se considera que hay cambios a partir de C hacia E, no se considera con cambios significativos en A y B y al observarse estas ultimas condiciones se contesta como No.

La presencia de agua se calificara Si o No, en caso de ser Si se evaluara el tipo de escurrimiento como:

1. Flujo constante de agua
2. Escurrimiento
3. Goteo

En caso de contestar No se pasa al siguiente enunciado.

Condiciones de la Roca Encajonante

El supervisor de barrenación o de operación de desarrollo, observará los manto de roca (Arenisca), que encajona a los mantos de carbón y responderá Si o No dependiendo de la condición, si contesta que Si, deberá poner el grado de alteración que tiene la roca en base a la siguiente tabla:

Clasificación de la Roca Encajonante

Grado de Alteración	Condición de la roca
I. Aceptable	La roca encajonante presenta uniformidad en su estrato, sin variaciones en tamaño, sin presencia de estructuras geológicas que afecten al manto de carbón
II. Moderablemente aceptable	La roca presenta mínima variación en el tamaño de sus estratos, afectando ligeramente el manto de carbón, presenta estructuras geológicas menores sin afectaciones a los otros mantos
III. Alterada	La roca presenta gran variación en el tamaño, afecta al manto de carbón fragmentándolo, presenta estructuras geológicas que afectan al manto de carbón, en algunos casos ha deformado al manto de carbón (adelgazamiento, pérdida del manto de carbón)

El supervisor de barrenación o de operación de desarrollo, calificara con No y pondrá en grado de alteración I. Aceptable si la roca no presenta ningún cambio.

Al finalizar estos apartados deberá dibujar la frente de trabajo y marcar con una "x" aquellos signos que considera: escucho o vio durante el llenado del formato.

Anexo 14

Profundidad: ~ 63		Fecha y hora: 11/01/16 2:30 pm.		Maquina: 7		Turno: <input checked="" type="checkbox"/> A		<input type="checkbox"/> B		<input type="checkbox"/> C	
Localización: Corriente x 9/63						Nombre del supervisor: Enrique Escobar Aguirre					
CONDICIONES GEOLÓGICAS											
Presencia de estructuras: <input type="checkbox"/> Si <input checked="" type="checkbox"/> No				Tipo de estructura:				Desplazamiento: <input type="checkbox"/> Si <input checked="" type="checkbox"/> No			
Espesor del desplazamiento:				Presencia de salbandas de falla: <input type="checkbox"/> Si <input checked="" type="checkbox"/> No				Espesor de la salbanda de falla:			
CONDICIONES DEL MANTO DE CARBÓN											
Cambios en las propiedades del carbón: <input checked="" type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No						Grado de perturbación del carbón: C - Altamente perturbado					
Presencia de agua en la frente de trabajo: <input checked="" type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No						Cantidad de agua que se encuentra en la frente de trabajo: goteo					
CONDICIONES DE LA ROCA ENCAJONANTE											
Cambios en las propiedades de la roca: <input type="checkbox"/> Si <input checked="" type="checkbox"/> No						Grado de alteración de la roca: I					
DIBUJO DE LA FRENTE DE TRABAJO											
Nombre de la cuadrilla: QUIMICOJ						SIGNOS DE ALERTA DE DESPRENDIMIENTOS INSTANTANEOS SIGNOS EN DESARROLLOS <input checked="" type="checkbox"/> Sonidos de fracturas en los mantos de carbón y/o roca <input checked="" type="checkbox"/> Aumento en la presión del techo <input type="checkbox"/> Protuberancias en los mantos de carbón y/o roca <input type="checkbox"/> Cambio en la dureza del carbón <input type="checkbox"/> Aumento repentino en la emisión de gas SIGNOS EN BARRENACIÓN <input checked="" type="checkbox"/> Altas emisiones de gas en los orificios de barrenación <input checked="" type="checkbox"/> Empuje o succión de las barras de barrenación <input checked="" type="checkbox"/> Cambio en las partículas de barrenación <input type="checkbox"/> Neblina de barrenación de color marrón <input checked="" type="checkbox"/> Deformación de los orificios de barrenación o rapido colapso					
<p>The diagram shows a cross-section of a rock face with several layers. The top layer is labeled 'Roca y manto 5' and contains horizontal wavy lines. Below it is another layer with diagonal hatching. The next layer is labeled 'Roca y manto 4' and contains 'X' marks. Below that is a layer with horizontal wavy lines. The bottom layer is labeled 'piro.' and contains diagonal hatching. A bracket on the right side of the 'X' marks is labeled 'Zona de carbón alterado'.</p>											
Observaciones: presentar 70 cm de carbón alterado en la parte superior del manto 4.											