

GUÍA TÉCNICA PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO MINERO CAUSADO POR ATMOSFERAS CONTAMINADAS O VICIADAS

Esta guía práctica fue elaborada en el **marco del convenio interadministrativo N° 643 – 2024 entre la Agencia Nacional de Minería y la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC)**. Orienta el diseño y la construcción de labores mineras con atmósferas seguras, contribuyendo significativamente a la mitigación de riesgos y a la reducción de incidentes derivados de estas condiciones.

GUÍA TÉCNICA PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO MINERO CAUSADO POR ATMOSFERAS CONTAMINADAS O VICIADAS

Ministro de Minas y Energía

Dr. Omar Andrés Camacho Morales

Viceministra de Minas y Energía.

Dra. Kelly Johana Rocha Gómez

Presidente de la Agencia Nacional de Minería

Dr. Luis Álvaro Pardo Becerra

Vicepresidente de Seguimiento, Control y Seguridad Minera

Dr. Fernando Alberto Cardona Vargas

Gerente del Grupo de Seguridad y Salvamento Minero

Ing. María Carolina Galindo Niño

Ingenieros

Ing. Sael José Armenta Meneses

Ing. Luis Ariel Gómez Pulido

Ing. Jaime Luis León Lerma

Ing. Martha Lucía Muñoz González

Ing. Miguel José Valdeblanquez Martínez

Ing. Giovanni Andrés García Ávila

Ing. Henry Alejandro Salazar Pérez

Abogada

Dolly Lucía Grosso Gómez

Equipo técnico de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

Luis Alejandro Fonseca Páez

Luis David Mesa Ríos

Fabian Ricardo Fonseca

Jairo Alonso Cárdenas

Fernando Corredor Rueda

Rodrigo Hernández Buitrago

Julián Fernando Hernández Rincón

Cesar Augusto Cubides

Carlos Alberto Montaña

Francisco Luis Ríos Bayona

Nancy Moreno Chacón

Jorge Eliecer Mariño

Ilustraciones: Luis Heriberto Naranjo Giraldo

Corrección de estilo de textos: Alexandra Cano Álvarez

Diseño y diagramación: Dayre Carolina Parra Valderrama

PRÓLOGO

Nos complace presentar la **“GUÍA TÉCNICA PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO MINERO CAUSADO POR ATMÓSFERAS CONTAMINADAS O VICIADAS”**, un documento desarrollado por la Agencia Nacional de Minería (ANM) con el apoyo de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) a partir de un enfoque técnico especializado. Este material aborda el aspecto crítico de las atmósferas contaminadas o viciadas en la minería subterránea, con el objetivo de contribuir a la implementación de procedimientos y protocolos que permitan prevenir accidentes derivados de este riesgo, propendiendo por la generación de condiciones de ventilación óptima y adecuada calidad del aire en las labores mineras, de acuerdo con lo establecido por los Decretos 1886 de 2015 y 944 de 2022.

Las atmósferas contaminadas o viciadas representan una de las principales causas de accidentalidad en la actividad minera, además, contribuyen significativamente al número de emergencias y fatalidades reportadas a la autoridad minera en los últimos años. Por esta razón, la gestión de la ANM con el grupo de Seguridad y Salvamento, se ha encaminado de manera prioritaria a la prevención de accidentes mineros ocasionados por este tipo de condiciones, con el propósito de preservar la salud y la integridad de los trabajadores mineros. En este contexto, la guía se consolida como una herramienta fundamental, diseñada para apoyar los proyectos mineros subterráneos en la identificación, prevención y control de este tipo de riesgos, asegurando la implementación de medidas efectivas que aseguren condiciones laborales más seguras.

Con el propósito de optimizar la seguridad de los proyectos mineros, la Guía Técnica se desarrolló en 20 capítulos, partiendo de la base estadística de emergencias y fatalidades mineras ocurridas durante los últimos 15 años e igualmente de la investigación de un accidente real, en el cual se identificaron deficiencias críticas relacionadas con la gestión de atmósferas contaminadas o viciadas, particularmente en lo referente a la ventilación subterránea, el monitoreo de la calidad del aire e incumplimiento del Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo SG-SST. Este instrumento propone medidas técnicas diseñadas a partir de pruebas realizadas en laboratorios especializados, idóneas para la prevención de accidentes derivados de atmósferas contaminadas, las cuales se orientan al abordaje efectivo de las causas raíz de este tipo de eventos. Así, esta guía técnica se constituye como un recurso clave para fomentar una actividad cada vez más segura y responsable, que asegure condiciones de dignidad y bienestar a las personas que trabajan en el sector, aportando de esta manera a la construcción de una minería para la vida.

Presidencia de la Agencia Nacional de Minería



TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	24
OBJETIVOS	26
2.1 Objetivo general	26
2.2 Objetivos específicos	26
ANTECEDENTES	28
3.1 Normatividad internacional e instrumentos.....	33
3.2 Componente geológico	34
3.3 Herramientas de análisis disponibles	40
NORMATIVIDAD	42
GENERALIDADES DEL PLAN DE VENTILACIÓN	46
CARACTERÍSTICAS Y PRINCIPIOS DEL PLAN DE VENTILACIÓN	56
6.1 Características esenciales de un plan de ventilación.....	57
MODELO DE GESTIÓN DEL RIESGO DE ATMÓSFERAS EXPLOSIVAS Y VICIADAS EN MINERÍA SUBTERRÁNEA	60
7.1 Identificación del riesgo	61
7.1.1 Contexto externo.....	61
7.1.2 Contexto interno.....	62
7.2 Evaluación de escenarios de riesgo	63
7.2.1 Factor por tipo y característica de los yacimientos.....	63
7.2.2 Factor tectónico estructural	66
7.2.3 Factor propiedades fisicoquímicas de rocas y suelos	70
7.2.3.1 Análisis de composición química.....	70
7.2.3.2 Resistencia promedio a la compresión simple	73
7.2.3.3 Permabilidad y porosidad	74

7.2.3.4 Pruebas de adsorción de gases	78
7.2.4 Factor altura.....	81
7.2.5 Factor de temperatura	82
7.2.6 Factor humedad.....	84
7.2.7 Factor material particulado	87
7.2.8 Factor polvo de carbón	91
7.2.9 Factor de inertización.....	93
7.2.10 Factor de equipos de combustión	93
7.2.11 Factor uso de explosivos.....	94
7.2.12 Factor de gases en la atmósfera minera.....	95
7.2.13 Factor de gases explosivos.....	97
7.2.14 Factores de equipos de medición de gases.....	101
7.2.15 Factor de equipos e instalaciones eléctricas	102
7.2.16 Factor de equipos de generación de energía para emergencia	103
7.2.17 Factor de cantidad de aire requerido.....	103
7.2.18 Factor de riesgo por tipo de arranque.....	104
7.2.19 Resumen de los factores a evaluar en el análisis de riesgo.....	104
7.3 Análisis del riesgo.....	107
7.3.1 Valorar el riesgo	108
7.3.2 Evaluación de los riesgos.....	108
7.3.2.1 Nivel de riesgo (NR).....	108
7.3.2.2 Nivel de deficiencia	108
7.3.2.3 Nivel de exposición	109
7.3.2.4 Nivel de probabilidad.....	109
7.3.2.5 Nivel de consecuencia.....	110
7.4 Priorización de los riesgos.....	111
7.4.1 Monitoreo y revisión	112
7.4.2 Supervisión continua.....	112
7.4.3 Auditorías y revisiones periódicas	115
7.5 Comunicación y consulta	119
7.5.1 Interacción con las partes interesadas	119
7.5.2 Documentación y reporte	121

ATMÓSFERA MINERA Y ASPECTOS DE VENTILACIÓN EN MINERÍA SUBTERRÁNEA _____ 124

8.1 Composición del aire en las minas subterráneas	124
8.2 Contaminantes en el aire minero subterráneo.....	126
8.3 Características de los gases mineros.....	126
8.4 Importancia de la ventilación en la minería subterránea	128
8.5 Sistemas de ventilación	130

PLAN DE VENTILACIÓN _____ 133

9.1 Análisis de la ventilación actual.....	133
9.2 Plan de mejoramiento de la ventilación	135
9.2.1 Responsable de la ventilación	135
9.2.2 Identificación de necesidades	135



9.2.2.1 Caudal por número de personas	135
9.2.2.2 Caudal para dilución del metano (CH ₄).....	136
9.2.2.3 Determinación de la velocidad mínima de ventilación por cada frente de explotación (v) para prevenir la estratificación del gas	136
9.2.2.4 Caudal para dilución de gases tóxicos	137
9.2.2.5 Caudal por explosivos	137
9.2.2.6 Curva característica de la mina	138
9.2.3 Implementación del sistema de ventilación	139
9.3 Sistema de ventilación proyectada.....	141
9.4 Programa de seguimiento y control.....	142
9.4.1 Protocolo medición de aforos de ventilación.....	142
9.4.2 Protocolo de medición de gases.....	143
9.4.3 Protocolo y procedimientos para el chequeo y mantenimiento de los ventiladores.....	145
9.4.3.1 Protocolo de operación o puesta en marcha del ventilador	145
9.4.3.2 Protocolo para el mantenimiento de los ventiladores	146
9.4.4 Protocolo para aislar trabajos abandonados	149
9.4.5 Protocolo de suspensión de la ventilación	150
9.4.6 Protocolo para la activación de la ventilación.....	150
9.5 Formulación del plan de contingencias en ventilación.....	151
9.6 Plan estratégico	151
9.7 Plan operativo	153
9.8 Plan de evacuación.....	154
9.8.1 Procedimientos básicos de la atención o plan de respuesta a una emergencia	154
9.8.2 Acciones generales a tener en cuenta para el correcto funcionamiento del sistema de ventilación.	157
9.8.3 Proceso de evacuación	158
9.8.4 Reporte y evaluación de la contingencia	159
9.8.5 Vías de evacuación	160
9.8.6 Puntos de reunión.....	160
9.8.7 Ubicación de equipos de autorrescate	161
9.9 Plan informativo	162
9.10 Plan de acción	163
9.11 Programa de capacitación	164
9.12 Auditoría del sistema de ventilación de la mina	165

MANTENIMIENTO DE EQUIPOS, ELEMENTOS Y VÍAS DE VENTILACIÓN EN MINAS SUBTERRÁNEAS _____ 167

10.1 Ventiladores	167
10.2 Ductos y tubería.....	171
10.2 Puertas y compuertas.....	175
10.4 Sensores y sistemas de control	178
10.5 Consideraciones del programa de mantenimiento	179

CRITERIOS DE ACEPTACIÓN DE LOS PLANES DE VENTILACIÓN EN MINERÍA SUBTERRÁNEA _____ 181

11.1 Factores por considerar en la evaluación..... 183

REGISTROS DE MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS _____ 185

12.1 Medición de forma móvil o portátil	186
12.1.1 Etapa de registro con libreta de campo	189
12.1.2 Etapa de registro con tablero de control de gases	189
12.1.3 Etapa de socialización y aceptación del registro de gases	190
12.1.4 Etapa de registro en Bitácora o libro de registro de control de gases mineros..	190
12.1.5 Etapa de registro con clasificación de la información.....	190
12.1.6 Etapa de registro con la formulación de medidas correctivas	191
12.1.7 Etapa de registro de verificación.....	193
12.2 Medición de forma estacionaria	194
12.2.1 Etapa de registro con tablero de gases digital	196
12.2.2 Etapa de almacenamiento	197
y clasificación de la información de registro de control de gases mineros.....	197
12.2.3 Etapa de registro con la formulación de medidas correctivas	198
12.2.4 Etapa de registro de verificación.....	198
12.3 Análisis de datos	198
12.3.1 Entrada de datos	199
12.3.2 Preparación de datos.....	200
12.3.3 Exploración de datos	200
12.3.4 Enriquecimiento de datos	205
12.3.5 Generación de informes.....	206
12.4 Análisis de datos con la implementación de softwares mineros	206
12.4.1 Dinámica de Fluidos Computacionales	206
12.4.2 Cálculo de concentración de gases.....	207
12.4.3 Análisis de tendencias y predicción de riesgos.....	208
12.4.4 Aportes del análisis de datos mediante el uso de software minero.....	208

PLAN DE PREVENCIÓN DE INCENDIOS Y EXPLOSIONES _____ 211

13.1 Objetivo del plan.....	211
13.2 Alcance.....	211
13.3 Peligros y riesgos de las explosiones.....	212
13.3.1 Identificación de peligros y riesgos de explosión	212
13.3.1.1 Presencia	212
de gases combustibles	212
13.3.1.2 Polvo combustible	212
13.3.1.3 Fuentes de ignición	213
13.3.1.4 Ventilación inadecuada	214
13.3.1.5 Fallas geomecánicas	214
13.3.1.6 Actividades de minería de carbón	215



13.3.1.7 Relevancia de los peligros en minería de carbón.....	215
13.3.2 Evaluación del riesgo.....	215
13.3.3 Clasificación de zonas de riesgo.....	216
13.4.1 Medidas de ventilación.....	217
13.4.2 Medidas de inertización.....	218
13.4.3 Medidas de monitoreo de gases.....	219
13.4.4 Medidas de control de fuentes de ignición.....	220
13.4.5 Medidas de mantenimiento.....	221
13.5 Procedimientos operativos.....	221
13.5.2 Entrenamiento del personal.....	224
13.6 Monitoreo y mejora continua.....	225
13.7 Registro.....	227
y documentación.....	227
13.7.1 Reportes de incidentes.....	227
13.8 Uso de software para prevención de incendio y explosiones.....	229

PROCEDIMIENTOS DE INTERVENCIÓN FRENTE A CONDICIONES INSEGURAS _____ 233

14.1 Alcance.....	233
14.2 Ámbito de aplicación.....	233
14.3 Documentos asociados al procedimiento.....	233
14.4 Diagrama de flujo.....	234
14.5 Descripción de actividades.....	235

DISPONIBILIDAD DE RECURSOS _____ 241

15.1 Recursos humanos.....	242
15.2 Recursos tecnológicos.....	242
15.3 Recursos materiales.....	242
15.4 Recursos financieros.....	242
15.5 Recursos institucionales.....	243
15.6 Recursos de información.....	243
15.7 Recursos para capacitación.....	243
15.8 Relación de actividades y recursos disponibles.....	244

INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO _____ 246

16.1 Tipos de instrumentos de monitoreo.....	246
16.1.1 Sensores de calidad del aire.....	247
16.1.2 Sensores de flujo y presión de aire.....	247
16.1.3 Equipos de monitoreo remoto.....	247
16.2 Métodos de monitoreo y registro.....	248
16.2.1 Monitoreo continuo.....	248
16.2.2 Monitoreo portátil.....	249
16.2.3 Registro y almacenamiento de datos.....	250
16.3 Normas y protocolos de mantenimiento.....	251
16.3.1 Normativa sobre mantenimiento de sensores y equipos de medición.....	251
16.3.2 Verificación de los equipos, sensores y medidores.....	253

16.3.3 Planes de mantenimiento preventivo de equipos	253
16.3.4 Revisión periódica de los equipos	254
16.4 Procedimientos de alerta y evacuación	254
16.4.1 Activación de alarmas	254
16.4.2 Protocolos de evacuación	255

PLAN DE PREVENCIÓN, PREPARACIÓN Y RESPUESTA ANTE EMERGENCIAS CAUSADAS POR ATMOSFERAS CONTAMINADAS O VICIADAS _____ 257

17.1 Alcance	257
17.2 Importancia del plan	257
17.3 Revisión y actualización	258
17.4 Administración de emergencias	258
17.4.1 Nivel estratégico	258
17.5 Niveles de emergencia	261
17.6 Simulacros de emergencia	262
17.6.1 Objetivos de la realización de los simulacros.....	262
17.7 Identificación de amenazas, análisis de vulnerabilidad y riesgo.....	265
17.7.1 Metodología análisis de vulnerabilidad y riesgos	265
17.7.2 Identificación descripción y calificación de las amenazas.....	266
17.8 Análisis de vulnerabilidad.....	266
17.8.1 Nivel de riesgo.....	269
17.8.2 Interpretación de los prismas.....	271
17.9 Procedimiento operativo normalizado para explosiones en atmósferas mineras subterráneas.....	272
17.10 Procedimiento operativo normalizado para atmosferas viciadas en entornos mineros subterráneos	273
17.11 Procedimiento operativo normalizado para incendios en atmósferas mineras subterráneas.....	278
17.12 Procedimiento operativo normalizado para evacuación en atmósferas mineras subterráneas contaminadas o viciadas.....	284

CAPACITACIÓN, COMUNICACIÓN Y ENTRENAMIENTO _____ 287

18.1 Programas de capacitación	287
18.2 Plan de comunicación	289
18.3 Roles y cronograma del programa de capacitación y plan de comunicación.....	290

AUDITORÍAS INTERNAS Y EXTERNAS _____ 292

19.1 Objetivos de auditorías internas y externas.....	292
19.1.1 Objetivos de auditorías internas	293
19.1.2 Objetivos de auditorías externas	293
19.2 Diferencias entre auditorías internas y externas	293
19.3 Tipos de auditorías y periodicidades.....	294

19.3.1 Auditorías internas.....	294
19.3.2 Auditorías externas.....	295
19.4 Proceso de auditoría.....	295
19.4.1 Planificación de la auditoría.....	296
19.4.2 Revisión de documentación	296
19.4.3 Inspección en campo.....	296
19.4.4 Análisis de cumplimiento	296
19.4.5 Informe de resultados	296
19.4.6 Acciones correctivas.....	296
19.5 Seguimiento y mejora continua	296
19.6 Contenido mínimo de los informes de auditoría.....	297

INVESTIGACIÓN DE ACCIDENTES MINEROS CAUSADOS POR ATMOSFERAS MINERAS CONTAMINADAS O VICIADAS _____ 299

20.1 Criterios para el desarrollo de una investigación causada por atmosfera viciada o contaminada.....	299
20.1.1 Disposiciones generales.....	301
20.1.2 Ventilación en minería subterránea	302
20.1.3 Control de polvos inflamables	303
20.1.4 Explosivos	303
20.1.5 Transporte interno.....	304
20.1.6 Instalaciones eléctricas	304
20.1.7 Máquinas, herramientas y equipos	304
20.1.8 Prevención y extinción de fuegos e incendios.....	305
20.1.9 Higiene y condiciones de trabajo.....	305
20.1.10 Aguas superficiales y aguas subterráneas	305
20.1.11 Estatuto de prevención, capacitación y atención de emergencias mineras y salvamento minero.....	306
20.2 Fases de la investigación	306
20.2.1 Conformación del equipo de investigación.....	307
20.2.2 Recopilación de información y datos.....	307
20.2.3 Análisis de datos.....	314
20.2.3.1 Línea de tiempo.....	314
20.2.3.2 Descripción del accidente.....	315
20.2.4 Análisis causal	316
20.2.4.1 Descripción de los tipos de análisis de causalidad.....	316
20.2.4.2 Identificación y clasificación de causas básicas e inmediatas	318
20.2.4.3 Determinación de los incumplimientos a los títulos del Decreto 1886 de 2015.....	319
20.2.5 Determinación medidas de control y plan de acción.....	319
20.2.6 Informe final	320
20.2.7 Lección aprendida y socialización	321
20.2.8 Seguimiento	321

GLOSARIO _____ 324

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____ 327

ANEXOS _____ 330

Anexo 1.	330
Evaluación de riesgos en atmosferas viciadas o contaminadas	
Anexo 1.1.	336
Anexo 2.	339
Anexo 3.	340
Permiso de trabajo (capítulo 15)	
Anexo 4.	341
Formato reporte de incidentes, actos y condiciones inseguras (capítulo 15)	
Anexo 5.	342
Formato análisis de trabajo seguro (capítulo 15)	
Anexo 6.	343
Identificación de amenazas y análisis de vulnerabilidad	
Anexo 6.1.	351
Anexo 6.2.	354
Anexo 7	358
(anexo accidente minero capítulo 20)	
Anexo 8	359
(anexo accidente minero capítulo 20)	
Anexo 9	362
(anexo accidente minero capítulo 20)	
Anexo 9.1	363
(anexo accidente minero capítulo 20)	
Anexo 10	364
(anexo accidente minero capítulo 20)	
Anexo 11	369
(anexo accidente minero capítulo 20)	
Anexo 12	371
(anexo accidente minero capítulo 20)	
Anexo 13	372
(anexo accidente minero capítulo 20)	
Anexo 14	373
(anexo accidente minero capítulo 20)	

FIGURAS

Figura 1	29
Emergencias y fatalidades mineras en Colombia, ocurridas en el periodo del año 2010 y julio de 2024	
Figura 2	30
Tendencia de fatalidades mineras en Colombia causadas por atmósferas contaminadas. Periodo comprendido entre 2010 y mes de julio de 2024	
Figura 3	31
Fatalidades mineras en Colombia según el tipo de accidente, durante el periodo de enero a julio de 2024	
Figura 4	32
Fatalidades mineras por departamentos en Colombia en 2024	
Figura 5	35
Factores geológicos en atmósferas viciadas	
Figura 6	41
Softwares más comunes aplicados para la ventilación de minas	
Figura 7	42
Línea de tiempo del marco normativo de Colombia en seguridad minera	
Figura 8	46
Ciclo PHVA: Planear, Hacer, Verificar y Actuar	
Figura 9	48
Elementos del circuito de ventilación	
Figura 10	50
Lugares para medición de gases	
Figura 11	54
Plan de contingencia ante emergencias por atmósferas viciadas y contaminadas	
Figura 12	56
Características del plan de ventilación	
Figura 13	57
Elementos de un sistema de ventilación	
Figura 14	64
Relación de factores de riesgo asociados al tipo de yacimiento	
Figura 15	67
Relación de condiciones más y menos propicias para la generación de riesgos por atmósferas viciadas asociadas al espaciamiento entre diaclasas	
Figura 16	69
Ubicación del gas en el núcleo de un anticlinal	
Figura 17	83
Comportamiento de la temperatura según la profundidad de la explotación	
Figura 18	88
Puntos de sedimentación de las fracciones de las partículas en el sistema respiratorio humano	
Figura 19	89
Probabilidad de que las partículas penetren el sistema respiratorio	

Figura 20	90
Comportamientos de las partículas de polvo con relación a la velocidad del aire	
Figura 21	92
Equipo para medición cualitativa de explosividad de polvo de carbón - CDEM 1000.	
Figura 22	97
Relación oxígeno (O ₂) – metano (CH ₄) y los límites de explosividad del metano (CH ₄)	
Figura 23	98
Relación metano (CH ₄) y la temperatura mínima de ignición	
Figura 24	98
Inflamabilidad del metano (CH ₄)	
Figura 25	99
Mecanismo de explosión	
Figura 26	107
Estructura Plan de Gestión del Riesgo	
Figura 27	108
Determinación del Nivel del Riesgo	
Figura 28	125
Composición de aire seco	
Figura 29	128
Localización de los gases mineros en las labores subterráneas	
Figura 30	129
Ventilación natural en minas subterráneas	
Figura 31	130
Ventilación auxiliar en minas subterráneas	
Figura 32	130
Ventilación soplante	
Figura 33	131
Ventilación aspirante	
Figura 34	139
Responsables de la implementación del plan de ventilación	
Figura 35	140
Tableros de registro datos de aforos de ventilación y mediciones diarias de gases	
Figura 36	141
Convenciones recomendadas para la presentación del isométrico de ventilación	
Figura 37	144
Sitios en donde se miden los gases en el frente de trabajo debido a su diversidad	
Figura 38	149
Labor señalizada y sellada de forma hermética	
Figura 39	157
Cronograma implementación	
Figura 40	159
Códigos de emergencia para contingencias	
Figura 41	163
Flujograma del plan de acción de rescate minero	
Figura 42	171
Acciones para el mantenimiento de ventiladores	
Figura 43	174
Acciones para el mantenimiento de ductos y tuberías	





Figura 44	177
Acciones para el mantenimiento de puertas y compuertas	
Figura 45	178
Acciones para el mantenimiento de sensores y sistemas de control	
Figura 46	179
Elementos de un programa de mantenimiento	
Figura 47	182
Diagrama de criterios de aceptación de los planes de ventilación en minería subterránea	
Figura 48	186
Formas de medición de gases mineros	
Figura 49	186
Proceso de medición y registro de gases mineros de forma móvil o portátil	
Figura 50	187
Ejemplo de equipo multi detector de seis gases mineros	
Figura 51	188
Diagrama de flujo para registro de la medición de los gases mineros de forma móvil o portátil	
Figura 52	189
Ubicación tableros de control de gases mineros	
Figura 53	194
Proceso de medición y registro de gases mineros de forma estacionaria	
Figura 54	195
Esquema de monitoreo continuo de gases mineros	
Figura 55	196
Diagrama de flujo para registro de la medición de los gases mineros de forma estacionaria	
Figura 56	199
Proceso de análisis de datos para atmosferas contaminadas o viciadas	
Figura 57	202
Ejemplo de gráfica de comparación de registro de gases con los límites permisibles	
Figura 58	204
Ejemplo de gráfica de regresión lineal en atmosferas contaminadas o viciadas	
Figura 59	207
Visualización dinámica de fluidos computacional	
Figura 60	219
Medidas de inertización	
Figura 61	220
Medidas de monitoreo de gases	
Figura 62	220
Medidas de control de fuentes de ignición	
Figura 63	221
Medidas de mantenimiento	
Figura 64	229
Ilustración del software Ventsim	
Figura 65	234
Diagrama procedimientos de intervención ante condiciones inseguras	
Figura 66	241
Disponibilidad de recursos en manejo de riesgo por atmosferas contaminadas o viciadas	

Figura 67	248
Equipo de monitoreo continuo (Sensor estático)	
Figura 68	249
Equipo de monitoreo portátil (Multidetector)	
Figura 69	259
Combinación de elementos de un SCI	
Figura 70	260
Principios y características SCI	
Figura 71	270
Diamante de riesgo	
Figura 72	277
Diagrama de Flujo PON para atmosferas viciadas en entornos mineros subterráneos	
Figura 73	283
Diagrama de Flujo PON para incendios en atmósferas mineras subterráneas	
Figura 74	285
Diagrama de Flujo PON Evacuación ante una emergencia por atmosferas viciadas o contaminada	
Figura 75	288
Elementos del programa de capacitación	
Figura 76	289
Componentes de del plan de ventilación	
Figura 77	294
Tipos de auditorías a implementar	
Figura 78	295
Proceso de la auditoria	
Figura 79	297
Contenido mínimo de auditorías	
Figura 80	300
Criterios para tener en cuenta para la investigación de un accidente minero por atmosferas contaminadas o viciadas	
Figura 81	306
Fases de investigación en atmosferas contaminadas o viciadas	
Figura 82	308
Componentes en la etapa de recopilación de información y datos	
Figura 83	309
Funciones especiales de las entrevistas	
Figura 84	310
Personas clave para entrevistar en caso de un accidente o evento minero causado por atmósferas contaminadas o viciadas	
Figura 85	315
Línea de tiempo	
Figura 86	320
Jerarquía de controles en un evento minero causado por atmosferas contaminadas o viciadas	
Figura 87	322
Proceso metodológico para realizar el seguimiento	



TABLAS

Tabla 1	47
Perfil profesional para el personal idóneo para la elaboración del Plan de Ventilación	
Tabla 2	52
Tipos de gases	
Tabla 3	52
Clasificación de las minas en relación con la concentración de metano y la materia volátil en el polvo de carbón	
Tabla 4	66
Nivel de riesgo asociado al tipo de yacimiento	
Tabla 5	67
Descripción del espaciado entre diaclasas	
Tabla 6	68
Descripción de la abertura de las diaclasas	
Tabla 7	68
Nivel de riesgo asociado a la relación entre el espaciado y abertura de las diaclasas	
Tabla 8	68
Nivel de riesgo para atmósferas contaminadas asociado a las zonas de fallamiento en operaciones de minería subterránea.	
Tabla 9	69
Nivel de riesgo para atmósferas contaminadas asociado a las estructuras de plegamiento	
Tabla 10	70
Riesgo por factores tectónico – estructurales	
Tabla 11	71
Parámetros químicos	
Tabla 12	72
Clasificación del riesgo por composición química	
Tabla 13	73
Resistencia a la compresión de las rocas a partir de índices de campo	
Tabla 14	74
Clasificación del riesgo por resistencia promedio a la compresión simple	
Tabla 15	76
Relación entre permeabilidad y porosidad en la generación de atmósferas viciadas	
Tabla 16	77
Clasificación del riesgo asociado a los parámetros de porosidad y permeabilidad	
Tabla 17	79
Parámetros en pruebas de adsorción y Cromatografía de gases para minería subterránea	
Tabla 18	80
Parámetros para establecer el nivel de riesgo en función de las concentraciones de gases y la capacidad de adsorción	



Tabla 19	80
Clasificación del riesgo por capacidad de adsorción y concentración de gases	
Tabla 20	82
Volumen de aire requerido según la ubicación de la mina	
Tabla 21	83
Valoración del riesgo humedad - temperatura	
Tabla 22	85
Valores de referencia para el cálculo de la presión de saturación	
Tabla 23	85
Valoración de riesgo de Humedad y temperatura	
Tabla 24	87
Datos de cálculo Pv	
Tabla 25	87
Datos de cálculo Te	
Tabla 26	90
Riesgo por material particulado	
Tabla 27	91
Valoración del riesgo grado de explosividad	
Tabla 28	92
Criterios de evaluación con relación al polvo de carbón	
Tabla 29	93
Riesgo por inertización	
Tabla 30	93
Cálculo de volumen mínimo de aire cuando se usa maquinaria Diesel	
Tabla 31	94
Riesgo por equipos de combustión	
Tabla 32	94
Factor de evaluación para el uso de explosivos	
Tabla 33	96
Factor de evaluación para la presencia de gases	
Tabla 34	99
Relación metano (CH ₄) – oxígeno (O ₂)	
Tabla 35	100
Relación metano (CH ₄) - temperatura de ignición	
Tabla 36	100
Relación según la clasificación de la mina de acuerdo con su nivel de metano (CH ₄) e inflamabilidad	
Tabla 37	100
Desprendimiento de metano (CH ₄) por el método de arranque de carbón	
Tabla 38	101
Límite Inferior de explosividad	
Tabla 39	104
Nivel de riesgo por tipo de arranque	
Tabla 40	105
Tabla resumen de los factores a evaluar en el cálculo del nivel de deficiencia (ND)	
Tabla 41	108
Valoración cuantitativa del Nivel de Riesgo	
Tabla 42	109
Nivel de Exposición	

Tabla 43	109
Nivel de Probabilidad	
Tabla 44	110
Tabla para la determinación del Nivel de Probabilidad	
Tabla 45	110
Nivel de Consecuencia	
Tabla 46	111
Determinación del Nivel de Riesgo	
Tabla 47	112
Criterios para la aceptación del riesgo	
Tabla 48	125
Composición de aire seco	
Tabla 49	126
Clasificación de gases en la atmósfera minera subterránea	
Tabla 50	127
Características y descripción general de los gases más frecuentes en minas subterráneas.	
Tabla 51	134
Indicadores de evaluación de condiciones termo ambientales	
Tabla 52	134
Indicadores de evaluación de gases	
Tabla 53	139
Perfiles mínimos requeridos para la implementación del plan de ventilación	
Tabla 54	142
Aspectos para tener en cuenta en el diseño del plan de ventilación	
Tabla 55	162
Números de emergencia para contingencias	
Tabla 56	165
Formato de inspección y/o auditoría del sistema de ventilación	
Tabla 57	168
Inspecciones regulares de ventiladores	
Tabla 58	169
Limpieza de ventiladores	
Tabla 59	170
Lubricación de ventiladores	
Tabla 60	172
Inspección de ductos y tuberías de ventilación	
Tabla 61	172
Limpieza de ductos y tuberías de ventilación	
Tabla 62	173
Sellado de Ductos y Tuberías de Perforación	
Tabla 63	175
Inspección de puertas y compuertas de ventilación	
Tabla 64	176
Limpieza de puertas y compuertas de ventilación	
Tabla 65	176
Lubricación de puertas y compuertas de ventilación	
Tabla 66	201
Comparación de registro de gases con los límites permisibles	

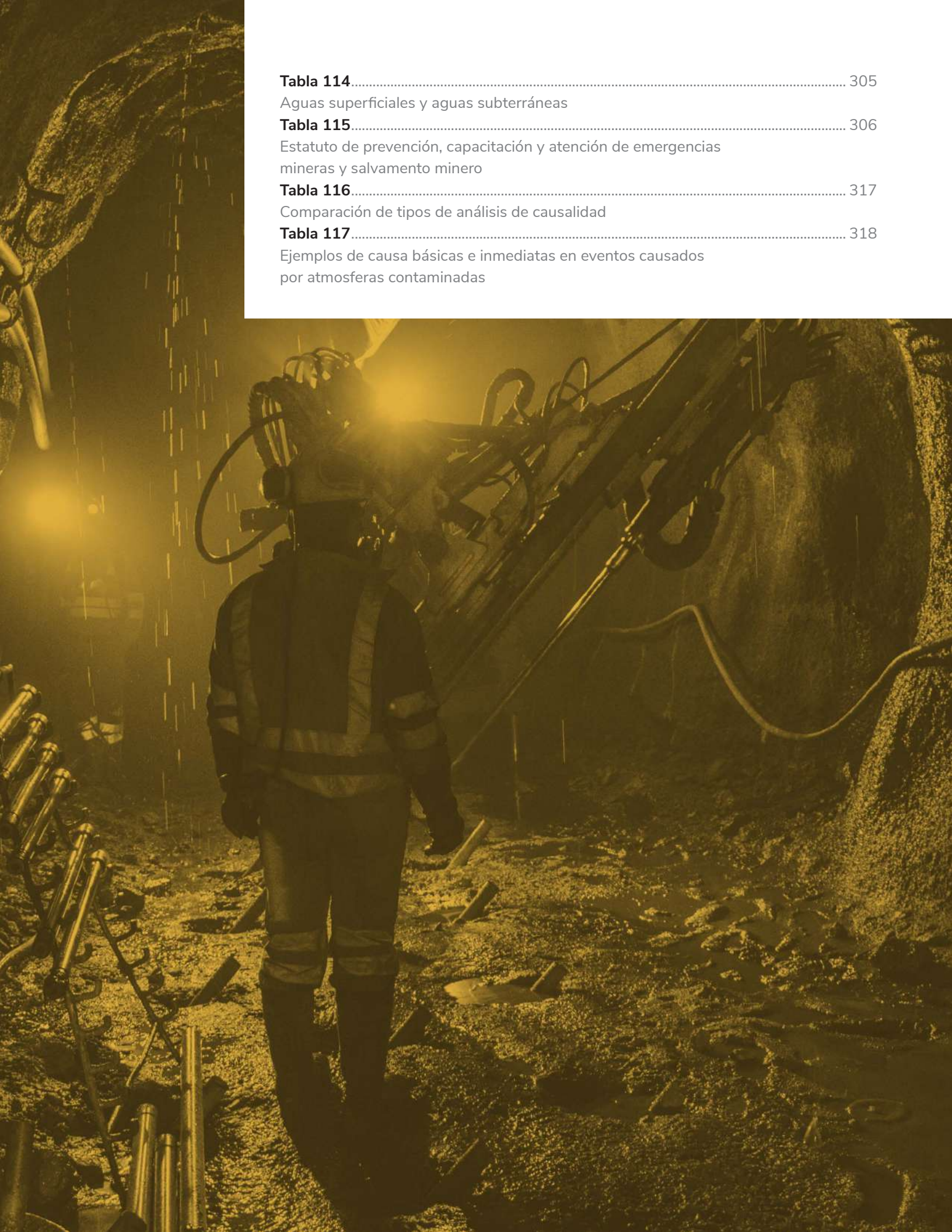
Tabla 67	212
Peligros y riesgos por presencia de gases combustibles	
Tabla 68	213
Peligros y riesgos por polvo combustible	
Tabla 69	213
Peligros y riesgos por fuentes de ignición	
Tabla 70	214
Peligros y riesgos por ventilación inadecuada	
Tabla 71	214
Peligros y riesgos por fallas geomecánicas	
Tabla 72	215
Peligros y riesgos por actividades de minería de carbón	
Tabla 73	216
Clasificación de las zonas riesgo	
Tabla 74	218
Medidas de ventilación	
Tabla 75	223
Propuesta Plantilla Procedimiento de Trabajo Seguro (PTS)	
Tabla 76	228
Ejemplo de formato de reporte	
Tabla 77	235
Descripción de actividades procedimientos de intervención ante condiciones inseguras	
Tabla 78	244
Principales actividades en Gestión del riesgo en atmosferas contaminadas o viciadas y los recursos requeridos	
Tabla 79	246
Análisis de equipos de monitoreo	
Tabla 80	249
Ventajas y desventajas del monitoreo continuo	
Tabla 81	250
Ventajas y desventajas del monitoreo portátil	
Tabla 82	250
Ventajas y desventajas de los registros de datos atmosféricos	
Tabla 83	251
Protocolo de mantenimiento (Decreto 1886, 2015)	
Tabla 84	252
Protocolo de mantenimiento, (Decreto 944, 2022)	
Tabla 85	252
Protocolo de mantenimiento, según ISO 9001:2015	
Tabla 86	252
Protocolo de mantenimiento, según NIOSH	
Tabla 87	253
Protocolo de mantenimiento, según OSHA	
Tabla 88	261
Niveles de emergencia	
Tabla 89	263
Fases para el desarrollo de los simulacros	





Tabla 90	265
Análisis de riesgo	
Tabla 91	266
Identificación descripción y calificación de las amenazas	
Tabla 92	267
Matriz de amenazas y análisis de vulnerabilidad	
Tabla 93	268
Valoración Cuantitativo	
Tabla 94	268
Identificación de amenazas	
Tabla 95	268
Elementos y aspectos de vulnerabilidad	
Tabla 96	269
Interpretación de la vulnerabilidad por cada aspecto	
Tabla 97	269
Interpretación de la vulnerabilidad por cada elemento	
Tabla 98	271
Interpretación de los prismas	
Tabla 99	272
Diagrama de Flujo PON y procedimiento Operativo Normalizado para explosiones	
Tabla 100	273
Procedimiento operativo normalizado para atmosferas viciadas	
Tabla 101	278
Procedimiento Operativo Normalizado para incendios	
Tabla 102	284
Procedimiento operativo normalizado para evacuación	
Tabla 103	290
Periodicidad de los elementos del programa de capacitación y plan de comunicación	
Tabla 104	293
Diferencias entre auditorías internas y externas	
Tabla 105	301
Disposiciones generales	
Tabla 106	302
Ventilación en minería subterránea	
Tabla 107	303
Control de polvos inflamables	
Tabla 108	303
Explosivos	
Tabla 109	304
Transporte interno	
Tabla 110	304
Instalaciones eléctricas	
Tabla 111	304
Máquinas, herramientas y equipos	
Tabla 112	305
Prevención y extinción de fuegos e incendios	
Tabla 113	305
Higiene y condiciones de trabajo	

Tabla 114	305
Aguas superficiales y aguas subterráneas	
Tabla 115	306
Estatuto de prevención, capacitación y atención de emergencias mineras y salvamento minero	
Tabla 116	317
Comparación de tipos de análisis de causalidad	
Tabla 117	318
Ejemplos de causa básicas e inmediatas en eventos causados por atmosferas contaminadas	





0452M

INTRODUCCIÓN

La minería subterránea constituye una actividad económica clave a nivel global, de la cual dependen millones de personas, diversas industrias y múltiples tecnologías. Su aporte al desarrollo económico de numerosos países es significativo. No obstante, esta industria conlleva riesgos inherentes, tanto en materia de seguridad como en el ámbito ocupacional, que exigen una gestión rigurosa para proteger la salud y la integridad de los trabajadores.

Entre los diversos riesgos asociados a esta actividad extractiva, las atmósferas viciadas destacan como uno de los más críticos. Estas se caracterizan por la acumulación de gases tóxicos, material particulado y la deficiencia de oxígeno, condiciones que aumentan significativamente el riesgo de accidentes graves o incluso fatales. Por ello, su prevención y manejo adecuado son fundamentales para garantizar un entorno laboral seguro y minimizar impactos negativos en las operaciones mineras.

El manejo adecuado de la ventilación en minas subterráneas es fundamental para garantizar la calidad del aire y prevenir la formación de atmósferas peligrosas debido a la acumulación de gases. Las deficiencias en los sistemas de ventilación pueden propiciar la concentración de gases tóxicos y peligrosos, metano (CH₄), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂), entre otros. Estas condiciones incrementan significativamente el riesgo de explosiones, asfixia y otras emergencias vinculadas a la calidad del aire, poniendo en peligro la seguridad de los trabajadores y la continuidad de las operaciones mineras.

La implementación de medidas de control adecuadas en la minería subterránea no solo protege la vida y la salud de los trabajadores, sino que también optimiza la eficiencia operativa y disminuye los costos derivados de accidentes y enfermedades ocupacionales. En este contexto,

es fundamental establecer lineamientos claros y efectivos para la gestión de los riesgos asociados con la ventilación y las atmósferas viciadas, garantizando un entorno laboral seguro y sostenible.

El gobierno de Colombia, a través del Ministerio de Minas y Energía y la Agencia Nacional de Minería (ANM), ha implementado diversas medidas orientadas a reducir los riesgos asociados con atmósferas viciadas en operaciones mineras subterráneas. Estas medidas incluyen la exigencia de cumplimiento de la normativa vigente en seguridad y salud en el trabajo, el reglamento de seguridad minera, planes de ventilación, y controles específicos de las atmósferas, entre otras acciones preventivas destinadas a minimizar la ocurrencia de accidentes relacionados.

Esta guía tiene como propósito proporcionar un marco detallado y práctico para la gestión de la ventilación en minas subterráneas, integrando las mejores prácticas y recomendaciones basadas en normativas nacionales e internacionales, así como en estudios científicos recientes. Adicionalmente, se incluye una serie de contenidos formativos específicos, diseñados para capacitar al personal en la identificación, evaluación y mitigación de riesgos asociados con atmósferas viciadas, promoviendo un entorno laboral más seguro y saludable para los trabajadores mineros.

El establecimiento de directrices claras, como las propuestas en esta guía, junto con programas de formación continua, son pilares esenciales para gestionar de manera efectiva los riesgos en la minería subterránea. Este documento tiene como objetivo fortalecer la cultura de seguridad en la industria minera, fomentando la adopción de prácticas seguras y eficientes que prioricen el bienestar y la protección de los trabajadores.



OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Desarrollar una guía técnica que establezca directrices claras para la gestión de riesgos asociados con atmósferas contaminadas o viciadas en operaciones mineras subterráneas, en cumplimiento con los lineamientos establecidos en la normatividad vigente, incluyendo el Decreto 1886 de 2015, el Decreto 35 de 1994, el Decreto 1072 de 2015, la Resolución 368 del 26 de mayo de 2016 y la Resolución 958 de 2016.

2.2 Objetivos específicos

- Verificar que se proporcione aire fresco y limpio, asegurando que las concentraciones de gases tóxicos se mantengan por debajo de los límites permisibles. Esto incluye tanto las concentraciones que representan un riesgo inminente para la vida como aquellas que podrían causar efectos agudos o crónicos durante una jornada laboral, protegiendo así la salud de los trabajadores.
- Identificar la presencia de gases peligrosos, como el metano (CH₄), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂) diluyendo las concentraciones de gases explosivos para evitar la formación de atmósferas potencialmente explosivas.
- Evaluar y controlar la concentración de polvo suspendido en el aire para mejorar la ventilación, aumentar la visibilidad y minimizar riesgos asociados con explosiones e incendios.
- Optimizar los sistemas de ventilación a través del control de la temperatura y la humedad en las áreas de trabajo para lograr confort térmico, aumentar la productividad y proteger la salud y la seguridad de los trabajadores a largo plazo.
- Asegurar el cumplimiento de las regulaciones y normas de seguridad minera, Decreto 1886 de 2015, Decreto 35 de 1994, Decreto 1072 de 2015. Así como las resoluciones de la ANM, Resolución 368 de 2016 y Resolución 958 de 2016.
- Elaborar e implementar un plan de ventilación acorde con la normatividad vigente, adaptado a las características específicas de cada mina y a sus necesidades operativas.
- Identificar y relacionar tecnologías avanzadas para la detección oportuna de peligros, implementando controles predictivos que mejoren la gestión de riesgo.
- Diseñar una metodología de cuantificación y valoración de riesgos asociados con atmósferas contaminadas o viciadas en minería subterránea; considerando criterios geológicos, estructurales, técnicos, mineros y otros relacionados, para gestionar controles efectivos y adaptados a las condiciones particulares de cada operación.



ANTECEDENTES

La minería ha experimentado un notable incremento en los últimos años, especialmente durante la pandemia, cuando fue considerada una actividad esencial para la reactivación económica y la transición energética. Países como México, Honduras, Panamá, Colombia, Ecuador, Perú, Brasil, Chile y Argentina han registrado un aumento en la actividad minera, impulsada por la creciente demanda de metales y minerales necesarios para el desarrollo de infraestructuras energéticas sostenibles (CEPAL, 2018).

El incremento de la actividad minera en varios países latinoamericanos ha conllevado un aumento en el número de accidentes fatales, muchos de los cuales están relacionados con atmósferas peligrosas. En Perú, la minería de oro y cobre ha sido escenario de numerosos incidentes debido a la falta de ventilación adecuada y la presencia de gases tóxicos. Un ejemplo trágico ocurrió en mayo de 2023, cuando 27 mineros perdieron la vida a causa de una explosión en uno de los túneles en construcción (Mundo, 2023). En México, en 2006, una explosión por acumulación de gas metano (CH₄) en la mina Pasta de Conchos resultó en la muerte de 65 mineros, mientras que otros lograron evacuar, aunque con graves lesiones (Humanos, 2020). En Argentina, en 2004, una explosión en la mina Río Turbio, provocada por la acumulación de metano CH₄ y fallos en el sistema de ventilación, cobró la vida de 14 mineros (Zippo, 2016).

La implementación de medidas de seguridad sólidas y la promoción de una cultura de prevención son esenciales para prevenir y mitigar los riesgos asociados con las atmósferas viciadas, con el objetivo de mejorar las condiciones laborales en la minería de América Latina. En este contexto, los gobiernos de diversos países de la región han adoptado medidas legislativas para reducir la ocurrencia de estos eventos indeseados. Entre estas medidas se incluyen la implementación de planes o sistemas de ventilación, el monitoreo continuo de gases, las inspecciones periódicas de los sistemas operativos mineros,

la capacitación del personal sobre los riesgos presentes, el diseño de planes de emergencia y su evaluación, entre otras acciones. Estas estrategias buscan que las empresas mineras enfoquen sus esfuerzos en crear entornos laborales seguros, limpios y libres de accidentes, mitigando eficazmente los riesgos para la salud y la seguridad de los trabajadores.

En Colombia, las atmósferas viciadas constituyen la segunda causa principal de accidentes fatales en la minería, debido a un manejo inadecuado de la ventilación en las minas subterráneas. Esto hace énfasis en la necesidad urgente de mejorar las prácticas de ventilación, con el fin de mitigar los riesgos inherentes a esta actividad y proteger la vida de los trabajadores mineros.

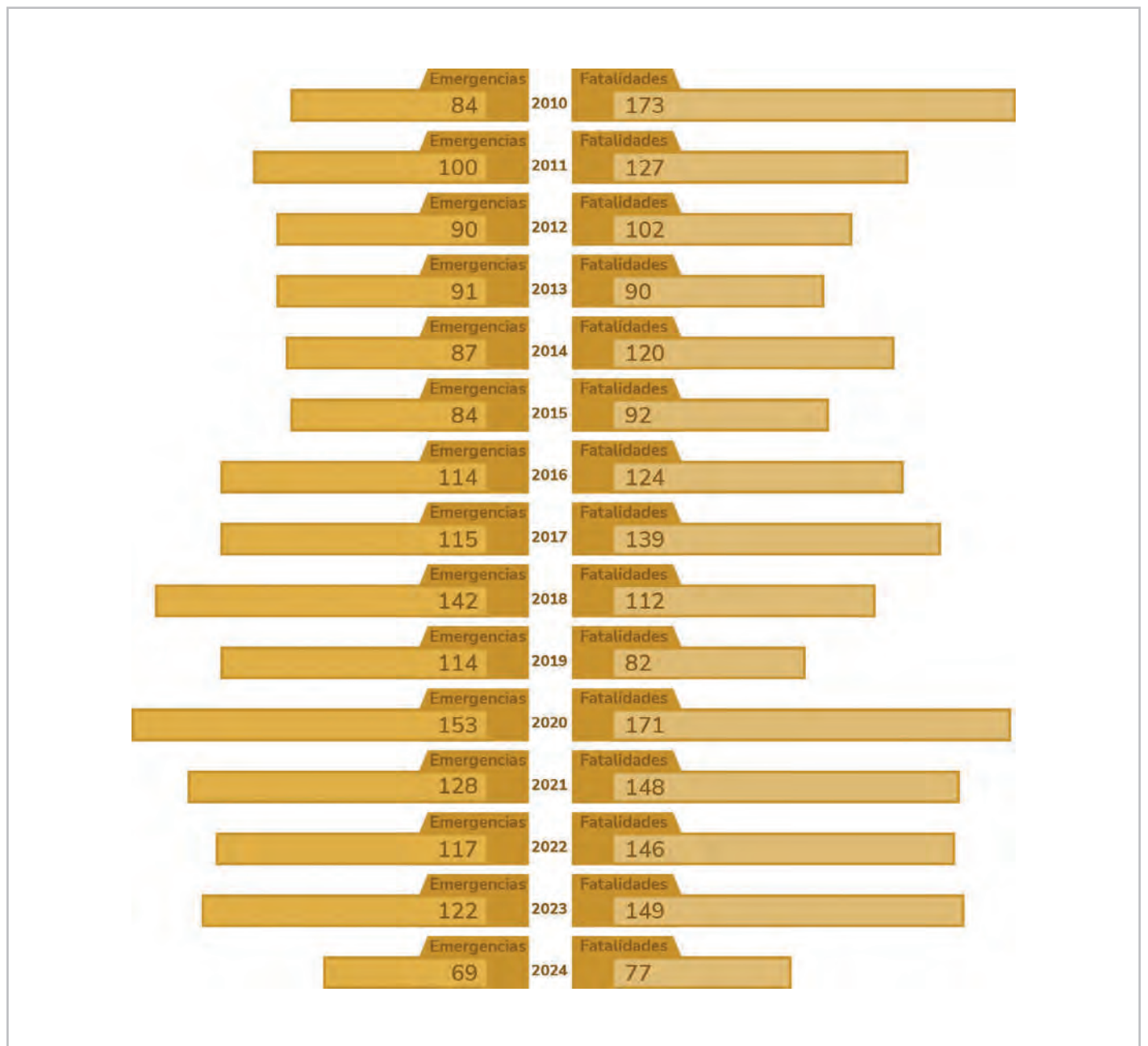
A continuación, se describen los accidentes mineros fatales más relevantes ocurridos en la minería subterránea desde 2010 hasta la fecha, cuyo origen ha sido atribuible a riesgos relacionados con problemas de ventilación, tales como explosiones y la presencia de atmósferas mineras contaminadas o viciadas.

- Junio de 2010, Amagá, Antioquia: causa - acumulación de gases al interior de la mina, con 73 víctimas fatales.
- Enero de 2011, Norte de Santander: causa - explosión de gas metano (CH₄), con 21 víctimas fatales.
- Junio de 2017, Cundinamarca: causa - acumulación de gas metano (CH₄), con 13 víctimas fatales.
- Abril de 2020, Cundinamarca: causa - acumulación de gas metano (CH₄), con 11 personas fallecidas.
- Agosto de 2021, Boyacá: causa - acumulación de gases tóxicos, con 12 mineros fallecidos.

- Febrero de 2022, Boyacá: causa - explosión de gas metano (CH₄), con 15 mineros fallecidos.
 - Mayo de 2022, Norte de Santander: causa - explosión de metano (CH₄) y polvo de carbón, con 15 víctimas fatales.
 - Marzo de 2023, Cundinamarca: causa - acumulación de metano (CH₄) y polvo de carbón, con 21 víctimas fatales.
- A nivel general, según los datos estadísticos registrados por la ANM, entre 2010 y el 28 de julio de 2024 se han reportado un total de 1,610 emergencias mineras, con 1,852 fatalidades registradas (ver figura 1).

Figura 1

Emergencias y fatalidades mineras en Colombia, ocurridas en el periodo del año 2010 y julio de 2024.



Nota. La figura muestra la estadística de emergencias y fatalidades mineras en el periodo de 2010 a julio de 2024. ANM (2024)

Al analizar las causas de las fatalidades ocurridas entre 2010 y julio de 2024, se observa que el 41 % de los casos (752 muertes) está relacionado con accidentes provocados por atmósferas viciadas y explosiones. La tendencia de estos eventos a lo largo de los últimos años se presenta en la figura 2.

Figura 2

Tendencia de fatalidades mineras en Colombia causadas por atmósferas contaminadas. Periodo comprendido entre 2010 y mes de julio de 2024.



Nota. La figura muestra la estadística de tendencia de fatalidad minera causada por atmósferas mineras contaminadas y explosiones, Vs la totalidad de fatalidades en el periodo de 2010 a julio de 2024. ANM (2024)

En el periodo comprendido entre enero a julio del año 2024, se registraron un total de 77 fatalidades en labores mineras en Colombia, de las cuales 32 se atribuyen a atmósferas contaminadas y 3 a explosiones. Estas cifras se concentran principalmente en cuatro departamentos: Boyacá con 26 fatalidades, Antioquia con 19, Cundinamarca con 12 y Norte de Santander con 6. Adicionalmente, se reportaron 14 fallecimientos distribuidos en otros departamentos del país (figura 3).

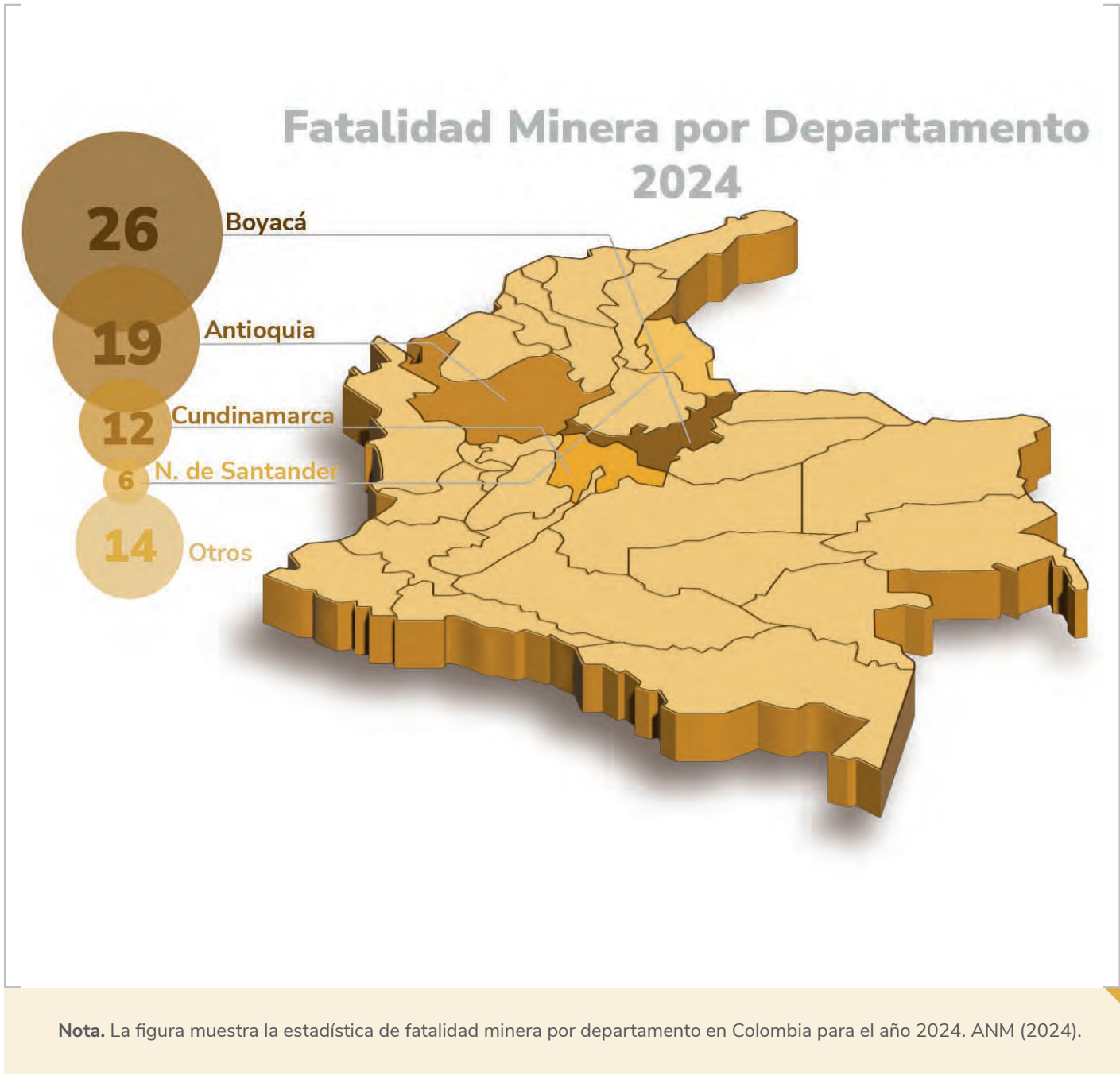
Figura 3

Fatalidades mineras en Colombia según el tipo de accidente, durante el periodo de enero a julio de 2024.



Lo anterior evidencia la importancia de aunar esfuerzos que permitan desarrollar y fomentar el uso de herramientas, procedimientos y metodologías que permitan mejorar las condiciones atmosféricas dentro de las labores subterráneas.

Figura 4
Fatalidades mineras por departamentos en Colombia en 2024



3.1 Normatividad internacional e instrumentos

La seguridad en la minería subterránea es un pilar fundamental para salvaguardar la vida y el bienestar de los trabajadores. En este sentido, países como Chile, Perú, México y Argentina han implementado regulaciones específicas orientadas a promover prácticas mineras seguras y responsables, con el objetivo de minimizar los riesgos inherentes a esta actividad y proteger a quienes laboran en ella.

En este análisis se examinarán las normativas vigentes en cada uno de estos países, con un enfoque particular en aspectos fundamentales como la ventilación en minas y la gestión de riesgos laborales. Estas regulaciones están orientadas a prevenir accidentes relacionados con atmósferas contaminadas o viciadas, así como a mitigar los riesgos derivados de las condiciones propias de las labores subterráneas.

A continuación, se presenta un análisis detallado de las normativas en países con extracción subterránea de carbón y otros minerales, enfatizando las mejores prácticas y los instrumentos legales implementados para garantizar la seguridad en estas actividades.

Chile: el Decreto Supremo N° 72 aprueba el reglamento de seguridad minera en Chile en el año 1985. En especial el Título VIII Explotación Minera de Carbón, Capítulo segundo: Ventilación.

Guía Metodológica de Seguridad para Proyectos de Ventilación de Minas. Antecedentes: Decreto Supremo N° 72, “Reglamento de Seguridad Minera”, del año 1985, cuyo texto refundido, coordinado y sistematizado fue fijado mediante Decreto Supremo N° 1.

Perú: Decreto Supremo N°24 – 2016, modificado por el Decreto Supremo N°23 - 2017 – EM. Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería. En especial título cuarto: Gestión de las Operaciones Mineras, Capítulo I: Estándares de las Operaciones Mineras Subterráneas, Subcapítulo VIII y IX: Ventilación en minas.

México: Norma Oficial Mexicana NOM – 121 – STPS – 1996, 7. Requisitos de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 7.4. en Minas Subterráneas, 7.5. En Minas de Carbón,

Apéndice B. Manuales y Procedimientos de Seguridad e Higiene en el Trabajo.

Argentina: Manual de Buenas Prácticas en Minería Subterránea – 2019. Ministerio de Producción y Trabajo – Presidencia de la Nación. Elaborado por la Mesa Cuatripartita Regional de Minería en Argentina.

EE. UU: Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional de EE. UU (NIOSH). Las publicaciones y guías técnicas de NIOSH, proporcionan métodos y recomendaciones específicas para el monitoreo de gases peligrosos, como metano (CH₄), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂) y otros gases presentes en minas subterráneas. Estos incluyen tecnologías para la recolección continua de datos y la interpretación de esos datos para garantizar la seguridad en las minas.

Los informes de NIOSH también establecen métodos de análisis de datos de atmósferas viciadas, incluyendo el uso de sistemas de monitoreo en tiempo real para prevenir exposiciones peligrosas.

Por otro lado, la Administración de Seguridad y Salud en las Minas de EE. UU (MSHA, por sus siglas en inglés), mediante la norma 30 CFR Part 57, Subpart D aborda aspectos específicos de ventilación en minas subterráneas para controlar contaminantes del aire, como polvo, gases tóxicos y partículas derivadas de actividades mineras.

Ventilación en minas subterráneas de metal, requiere que se monitoreen los niveles de gases peligrosos y que se mantengan registros precisos. Establece directrices para la recolección de datos, incluyendo la frecuencia del monitoreo y las tecnologías utilizadas.

MSHA exige que las minas mantengan registros detallados del análisis de los gases y otros contaminantes, y los empleen para mejorar los sistemas de ventilación y respuesta a emergencias.

Por su parte, la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional de EE. UU (OSHA), mediante la 29 CFR 1910.146: espacios confinados, aplicable a minas subterráneas, establece normas para el monitoreo, registro y análisis de la calidad del aire, especialmente en cuanto a gases peligrosos, y la implementación de sistemas para documentar estos datos.

España

La norma UNE 22480:1993 titulada Seguridad en minas subterráneas de carbón - Control de gases, establece las condiciones para la medición y registro de gases, como metano (CH₄), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂) y otros. También establece los procedimientos para el análisis y registro de datos de estos gases.

Además, la UNE-EN 689:2019 titulada Atmósferas en el lugar de trabajo - Evaluación de la exposición mediante la comparación con los valores límite de exposición profesional, establece principios que pueden aplicarse en el entorno minero para medir y registrar la calidad del aire.

Por otro lado, la Organización Internacional de Normalización (ISO) propone la ISO 14001:2015: Sistemas de gestión ambiental, aunque es una norma más amplia, incluye directrices sobre la recolección de datos ambientales, que pueden aplicarse al monitoreo y análisis de la calidad del aire en minas subterráneas.

Asimismo, la ISO 23875:2021: Minería - Cabinas de operadores móviles - Control de la calidad del aire en la cabina, ventilación y control de presurización, establece los requisitos para el monitoreo y control de la calidad del aire, incluyendo el registro y análisis de datos en cabinas de maquinaria minera.

Directiva ATEX (Europa)

- ATEX 137 (Directiva 1999/92/CE) aunque se centra en la protección contra atmósferas explosivas, esta norma también establece requisitos para el monitoreo continuo y el registro de los datos atmosféricos en minas subterráneas para prevenir la acumulación de gases inflamables como el metano (CH₄). Las empresas deben implementar sistemas de monitoreo y análisis continuo de atmósferas potencialmente explosivas.
- Organización Internacional del Trabajo (OIT): Convenio N.º 176 sobre seguridad y salud en las minas (1995), establece la obligación de monitorear y analizar la calidad del aire de manera continua, con registros sistemáticos de las condiciones atmosféricas. Esto incluye tanto la identificación de contaminantes como su análisis para garantizar un ambiente seguro.

3.2 Componente geológico

La minería subterránea en Colombia ha desempeñado un papel fundamental en el desarrollo económico del país, destacándose especialmente en la extracción de recursos como el carbón y el oro. No obstante, esta actividad implica riesgos significativos, entre ellos la generación de atmósferas viciadas provocadas por la liberación de gases naturales atrapados en las formaciones geológicas.

Gases como el metano (CH₄), comúnmente presentes en ciertos depósitos minerales, pueden acumularse y crear condiciones potencialmente explosivas o tóxicas. En este contexto, resulta indispensable llevar a cabo un análisis exhaustivo de la geología del área minera. Pues este conocimiento permite diseñar e implementar medidas de seguridad efectivas y estrategias de mitigación que minimicen los riesgos, garantizando así un entorno de trabajo más seguro y sostenible.

Diversos factores geológicos y ambientales influyen directamente en la liberación de gases tóxicos dentro de las minas subterráneas, contribuyendo a la formación de atmósferas viciadas o contaminadas (ver figura 5). Entre estos, destacan la geología estructural, la presencia de aguas subterráneas, los ambientes de mineralización, el origen y tipo de las rocas, y las condiciones de los suelos y las formaciones rocosas.

La composición de las rocas y los suelos, particularmente aquellos que contienen materiales orgánicos y sulfuros, puede favorecer la generación de gases como metano (CH₄) y dióxido de azufre (SO₂). Asimismo, las condiciones hidrogeológicas desempeñan un papel clave, ya que la infiltración de agua reactiva puede interactuar con los minerales, aumentando la emisión de contaminantes.

Por otro lado, las estructuras geológicas, como fallas y fracturas, actúan como canales naturales que facilitan el escape de gases atrapados en las formaciones geológicas. Estas características estructurales agravan el riesgo al crear rutas preferenciales para la liberación de gases hacia las zonas de trabajo minero.

En el siguiente apartado, se resumen los principales factores geológicos que contribuyen a la liberación de gases, destacando su impacto en la generación de atmósferas peligrosas dentro de las explotaciones mineras subterráneas.

Figura 5

Factores geológicos en atmósferas viciadas



Nota. La figura integra los diferentes aspectos geológicos que influyen en la generación de atmósferas viciadas o contaminadas en la explotación minera subterránea.

Geología estructural

Se centra en el estudio de las deformaciones y estructuras de la corteza terrestre, como fallas, pliegues y diaclasas, las cuales tienen un impacto significativo en la seguridad de las operaciones de minería subterránea. Estas estructuras pueden influir en aspectos críticos como la ventilación y la acumulación de gases tóxicos o explosivos. Por tanto, es esencial analizar detalladamente cómo cada una de estas configuraciones geológicas afecta las condiciones de trabajo en las minas subterráneas, identificando los riesgos potenciales que representan y estableciendo medidas preventivas adecuadas.

- **Fallas:** son fracturas en la corteza terrestre que presentan desplazamientos significativos entre sus bloques. En el contexto de la minería subterránea, estas estructuras pueden desempeñar un papel dual en la dinámica de los gases. Por un lado, las fallas actúan como conductos que permiten el flujo de gases desde niveles más profundos hacia las labores mineras, incrementando el riesgo de acumulaciones peligrosas que podrían derivar en explosiones o generar problemas respiratorios para los trabajadores. Por otro lado, también pueden funcionar como barreras que restringen la circulación del aire, favoreciendo la formación de zonas estancadas donde se concentran gases tóxicos o explosivos.
- **Pliegues:** son deformaciones en las capas de roca que generan ondulaciones de forma convexa o cóncava, influyendo significativamente en la dinámica de los gases en la minería subterránea. En el caso de los anticlinales (pliegues convexos), estas estructuras suelen actuar como trampas naturales para la acumulación de gases, particularmente metano (CH_4), debido a las condiciones de alta presión que se generan en sus puntos superiores. Por su parte, los sinclinales (pliegues cóncavos) tienden a concentrar líquidos y gases en sus zonas más bajas, lo que puede complicar las condiciones de trabajo si no se implementan medidas adecuadas para su monitoreo y evacuación.
- **Las diaclasas:** son fracturas naturales en las rocas que, aunque no presentan desplazamiento significativo, pueden desempeñar un papel crítico en la liberación de gases atrapados en el subsuelo. Estas discontinuidades actúan como conductos que conectan vacíos dentro de las formaciones rocosas, facilitando la migración de gases hacia las áreas de trabajo minero. Su

impacto es especialmente relevante en zonas de minería intensiva, donde actividades como la perforación y la voladura pueden generar nuevas fracturas o ampliar las existentes. Esto incrementa significativamente la liberación de gases.

Hidrogeología y aguas subterráneas

Estudia el comportamiento de las aguas subterráneas, abarcando su distribución, movimiento e interacción con las formaciones rocosas. En el contexto de la minería subterránea, el agua desempeña un papel crucial en la formación de atmósferas viciadas al contribuir a la liberación y transporte de gases peligrosos. Las aguas subterráneas tienen la capacidad de disolver y movilizar gases como el metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y el ácido sulfhídrico (H_2S). Cuando estas aguas entran en contacto con las labores mineras, liberan dichos gases al ambiente, alterando la calidad del aire y elevando los riesgos para los trabajadores.

A continuación, se analizan tres factores fundamentales relacionados con este fenómeno:

- **Acuíferos:** reservorios naturales de agua subterránea que pueden actuar como depósitos de gases disueltos, liberándolos en las minas a medida que son perturbados. Por ejemplo, el metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) pueden encontrarse disueltos en las aguas subterráneas y liberarse durante la despresurización de los acuíferos al excavar túneles o galerías en las minas. Este proceso puede provocar la emisión de grandes volúmenes de gases peligrosos que, al mezclarse con el aire, alcanzan concentraciones críticas que representan riesgos para la seguridad de los trabajadores. Asimismo, la extracción de agua de los acuíferos no solo afecta la disponibilidad hídrica, sino que también altera el equilibrio hidrogeológico de la zona. Esto genera cambios en las presiones del subsuelo, lo que puede liberar gases atrapados en las formaciones rocosas adyacentes, incrementando el riesgo de atmósferas viciadas dentro de las labores mineras.
- **Flujo de agua subterránea:** la dinámica del movimiento del agua en el subsuelo puede transportar gases desde áreas más profundas hacia las labores mineras, como galerías y túneles. Su flujo puede ser influenciado por la topografía, la permeabilidad y las actividades mineras.

- **Infiltración:** el ingreso de agua superficial al subsuelo a través de fracturas y porosidad en las rocas puede facilitar reacciones químicas que generan o liberan gases peligrosos, como el ácido sulfhídrico (H_2S) y dióxido de carbono (CO_2). Un ejemplo de esto es la oxidación de sulfuros minerales como la pirita (FeS_2), un proceso que puede producir y liberar H_2S , un gas altamente tóxico y corrosivo.

Ambientes de formación de mineralizaciones

Los ambientes de formación de mineralizaciones juegan un papel crucial en la presencia de gases, debido a su composición mineralógica y a las reacciones químicas que se producen durante su formación. Estos ambientes se pueden clasificar en dos categorías principales: endógenos (hipogénicos) y exógenos (supergénicos):

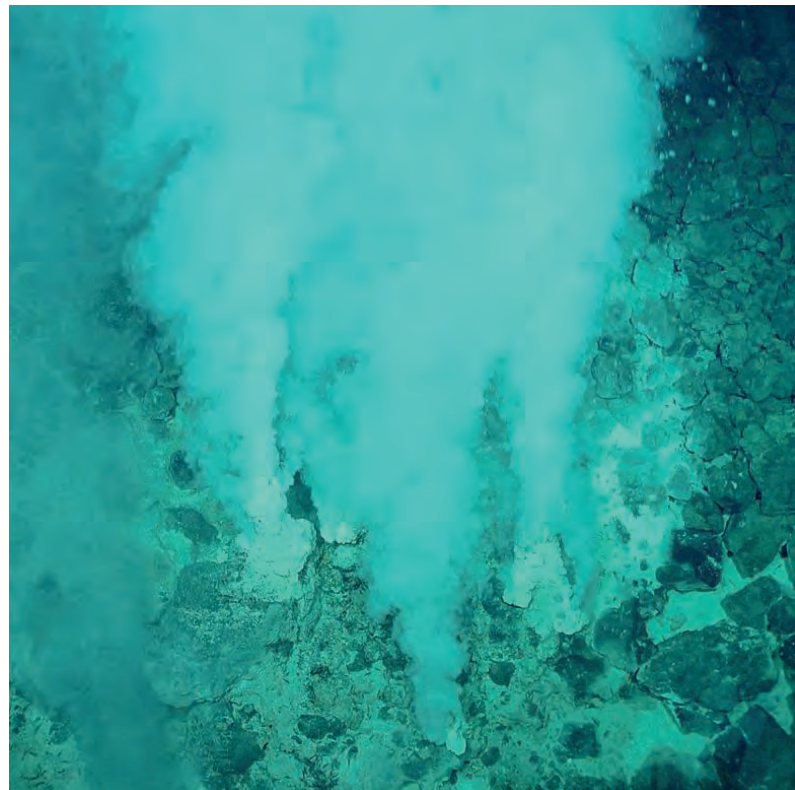
1. Ambientes endógenos (hipogénicos)

Se desarrollan a grandes profundidades dentro de la corteza terrestre, donde las altas temperaturas y presiones favorecen procesos como la cristalización de magmas, la actividad hidrotermal y la metamorfosis de las rocas. La mineralización en estos ambientes suele estar asociada con sulfuros metálicos como pirita (FeS_2) y calcopirita (CuFeS_2), cuya oxidación puede generar gases tóxicos como dióxido de azufre (SO_2) y ácido sulfhídrico (H_2S). Estas formaciones, al ser perturbadas durante la explotación minera, pueden liberar dichos gases, incrementando el riesgo de atmósferas contaminadas en las galerías subterráneas. En esta categoría se encuentran ambientes que contribuyen a la formación de atmósferas viciadas o contaminadas:

- **Ambientes magmáticos:** se forman a partir de la solidificación y cristalización del magma en las profundidades de la corteza terrestre. Durante estos procesos, se liberan gases volátiles como dióxido de azufre (SO_2) y dióxido de carbono (CO_2), los cuales pueden quedar atrapados en inclusiones fluidas dentro de los minerales generados. Estos gases representan un riesgo significativo, ya que pueden liberarse de manera abrupta cuando las formaciones minerales son perturbadas durante las actividades extractivas, como perforación, voladura o excavación.

- **Cristalización y segregación magmática:** es el proceso mediante el cual los minerales se separan a medida que el magma se enfría, puede provocar la liberación de gases atrapados durante la cristalización de los minerales. Este fenómeno ocurre cuando el magma se enfría de manera desigual, lo que da lugar a la segregación de componentes volátiles. La liberación de gases, como dióxido de azufre (SO_2) y dióxido de carbono (CO_2), puede producirse en grandes volúmenes, especialmente si la cristalización ocurre a partir de soluciones magmáticas ricas en volátiles.

- **Ambientes hidrotermales:** se caracterizan por la circulación de fluidos calientes a través de las rocas, los cuales transportan y depositan minerales. Dichos fluidos pueden contener gases disueltos, como metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y ácido sulfhídrico (H_2S). Las áreas hidrotermales activas son fuentes significativas de estos gases, que pueden migrar hacia las labores mineras.



- **Metamórfico:** implican la recristalización de minerales bajo condiciones de alta presión y temperatura, pueden liberar gases atrapados en las rocas. A menudo se liberan durante la fracturación de las rocas metamórficas.

2. Ambientes exógenos (supergénicos)

Se forman cerca de la superficie terrestre como resultado de la meteorización, erosión y procesos de lixiviación. En estos ambientes, la interacción del agua con los minerales oxidados puede generar dióxido de carbono (CO_2) y otros compuestos gaseosos. Además, los depósitos supergénicos pueden contener materiales orgánicos que, bajo ciertas condiciones, liberan metano (CH_4).

- **Sedimentario:** son aquellos donde se depositan sedimentos que, con el tiempo, se litifican para formar rocas sedimentarias. Estas rocas pueden albergar gases atrapados, como el metano (CH_4) en depósitos de carbón o esquistos bituminosos. La descomposición de la materia orgánica en estos sedimentos puede generar grandes cantidades de metano.
- **Meteorización:** consiste en el proceso de descomposición química y física de las rocas en la superficie terrestre. A través de este proceso, se pueden liberar gases como el dióxido de carbono (CO_2) y ácido sulfhídrico (H_2S), resultantes de la oxidación de minerales sulfúricos.
- **Exhalativo volcanogénico:** están asociados con la actividad volcánica, donde se emiten grandes volúmenes de gases como el dióxido de azufre (SO_2), dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4). Estos gases pueden migrar hacia las galerías mineras, creando atmósferas potencialmente peligrosas.

38

Rocas según su origen

El tipo de roca, determinado por su origen, tiene un impacto significativo en la liberación de gases peligrosos durante las operaciones mineras. Las rocas se clasifican en tres categorías principales: ígneas, sedimentarias y metamórficas, y cada una presenta características específicas que influyen en la formación de atmósferas viciadas o contaminadas. A continuación, se detallan las propiedades de cada tipo de roca y su relación con los riesgos de gas en el entorno subterráneo.

Rocas ígneas

Intrusivas: se originan a partir de la solidificación del magma que se enfría lentamente en el interior de la corteza terrestre. Este proceso gradual permite la formación de cristales grandes y visibles. Durante las operaciones mineras, como la fractura o perforación de estas rocas, pueden liberarse gases atrapados, tales como dióxido de azufre (SO_2), dióxido de carbono (CO_2) y vapor de agua, lo que contribuye a la creación de atmósferas potencialmente peligrosas. Además, la descomposición de ciertos minerales en estas rocas puede liberar, en menor cantidad, otros gases tóxicos que incrementan el riesgo de contaminación atmosférica.

Extrusivas: estas rocas se forman cuando el magma llega a la superficie y se solidifica rápidamente. Durante este proceso, pueden liberarse gases como dióxido de azufre (SO_2) y vapor de agua. La fractura de estas rocas y su exposición al aire pueden desencadenar la liberación de estos gases, lo que aumenta el riesgo de la formación de atmósferas viciadas. Además, en el proceso de extracción y procesamiento de estas rocas, pueden liberarse otros gases tóxicos que se encuentran atrapados dentro de la estructura de la roca.



Intrusivas: se forman a partir de la solidificación del magma que se enfría lentamente en el interior de la corteza terrestre. Este enfriamiento gradual permite el crecimiento de cristales grandes y visibles. Al fracturar o perforar estas rocas durante las operaciones mineras, pueden liberarse gases atrapados como anhídrido sulfuroso (SO_2), dióxido de carbono (CO_2) y vapor de agua, lo que crea atmósferas peligrosas. Además, la descomposición de ciertos minerales en estas rocas puede liberar en menor medida otros gases tóxicos.

Extrusivas: su formación se da cuando el magma llega a la superficie y se solidifica rápidamente. Durante este proceso, pueden emitir gases como anhídrido sulfuroso (SO_2) y vapor de agua. La fractura de estas rocas y su exposición a la atmósfera pueden liberar estos gases, aumentando el riesgo de atmósferas viciadas. Asimismo, durante el procesamiento y la extracción de estas rocas, pueden liberarse gases tóxicos que estaban atrapados.

Rocas sedimentarias

Continental: se forman a partir de sedimentos acumulados en ambientes terrestres como ríos, lagos y desiertos. Los depósitos aluviales y lacustres, que incluyen arenas, limos y arcillas, pueden contener materia orgánica descompuesta que puede producir metano (CH₄). Los depósitos de carbón, en particular, pueden ser grandes reservorios de este gas, que se libera durante la extracción y puede crear atmósferas viciadas dentro de la mina.

Transicionales: los ambientes mixtos, como los deltas y estuarios, representan zonas de transición entre ambientes continentales y marinos. En estos lugares se acumula materia orgánica que, al descomponerse, puede liberar metano (CH₄) y otros gases. La interacción entre agua dulce y agua salada en estos ambientes también puede influir en la formación y emisión de gases.

Marino: las rocas sedimentarias marinas se forman en ambientes oceánicos y pueden incluir depósitos de limos, arena y caliza. En los sedimentos marinos profundos, la descomposición de materia orgánica y la interacción con minerales puede producir gases como el metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂). Durante las operaciones mineras en estas formaciones, estos gases pueden liberarse, contribuyendo a la creación de atmósferas viciadas.

Rocas metamórficas

Se originan a partir de la transformación de rocas pre-existentes bajo condiciones extremas de alta presión y temperatura. Durante este proceso, los minerales pueden recrystalizarse, lo que a su vez puede liberar gases atrapados en la estructura rocosa debido a la descomposición o alteración química de los minerales. Estos gases, liberados durante la fracturación o exposición de las rocas, pueden contribuir a la formación de atmósferas viciadas y aumentar los riesgos asociados con las operaciones mineras.



Condiciones de rocas y suelos

Las características físicas y químicas de las rocas y suelos son determinantes clave en la ventilación y la acumulación de gases peligrosos en la minería subterránea. Factores como la permeabilidad, la porosidad, la composición química y la estabilidad de las rocas tienen un impacto directo en la seguridad y la eficiencia de las operaciones mineras. A continuación, se abordarán tres aspectos fundamentales que influyen en estas condiciones y en la formación de atmósferas viciadas dentro de las minas subterráneas:

Permeabilidad y porosidad: estos dos parámetros determinan la facilidad con la que los gases y los fluidos se desplazan a través de las rocas y suelos. Las formaciones con alta permeabilidad favorecen una circulación más eficiente de fluidos, lo que puede facilitar la dispersión de gases peligrosos en el entorno subterráneo. En contraste, las rocas de baja permeabilidad, como las arcillas o ciertos tipos de rocas ígneas, tienden a atrapar los gases, lo que favorece su acumulación en las labores mineras. Este confinamiento de gases aumenta significativamente el riesgo de la formación de atmósferas viciadas.

Composición química: la composición mineral de las rocas influye directamente en la liberación de gases peligrosos. Por ejemplo, las rocas que contienen sulfuros, como pirita (FeS₂), pueden generar ácido sulfúrico (H₂SO₄) y ácido sulfhídrico (H₂S) al reaccionar con agua y oxígeno. Este tipo de reacciones químicas puede liberar gases tóxicos y corrosivos, creando un riesgo considerable para la salud y seguridad de los trabajadores mineros.

Estabilidad de las rocas: la estabilidad estructural de las rocas afecta la ventilación en las labores mineras. Las rocas inestables o fracturadas pueden colapsar, bloqueando las rutas de ventilación y creando zonas donde los gases peligrosos pueden concentrarse. Además, el colapso de las rocas puede inducir la formación de nuevas fracturas, facilitando la liberación de gases atrapados en las formaciones rocosas.

Evaluación de riesgos geológicos

La evaluación de riesgos geológicos es fundamental para la identificación y mitigación de atmósferas viciadas en la minería subterránea. Este proceso incluye diversas estra-

tegias y métodos orientados a garantizar la seguridad en las labores mineras, descritas a continuación.

- **Monitoreo continuo:** implementar sistemas de monitoreo en tiempo real para detectar la presencia de gases peligrosos como metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y ácido sulfhídrico (H₂S) dentro de las labores mineras. Los sensores de gases deben ser ubicados estratégicamente para garantizar una cobertura completa, alertando a los trabajadores sobre niveles peligrosos antes de que se conviertan en una amenaza significativa.
- **Monitoreo hidrogeológico:** utilizar sensores y estaciones de monitoreo para medir los niveles y la calidad del agua subterránea. Este monitoreo permite anticipar posibles liberaciones de gases derivados de la interacción entre el agua y los minerales presentes.
- **Drenajes y bombeo:** controlar y dirigir el flujo de agua subterránea mediante sistemas de drenaje y bombeo, minimizando su impacto en la calidad del aire dentro de la mina y evitando la liberación de gases peligrosos.
- **Modelamiento hidrogeológico:** utilizar modelos hidrogeológicos para simular el flujo del agua subterránea y su impacto en la liberación de gases. Estos modelos ayudan a predecir cómo los cambios en el régimen de flujo pueden influir en la concentración de gases en las labores mineras, facilitando la planificación de medidas correctivas para mantener la seguridad.
- **Mapeo geológico:** realizar un mapeo detallado de las estructuras geológicas presentes en el área minera, integrándolas en los planes de ventilación y seguridad. Esto permite identificar zonas de riesgo y diseñar estrategias de mitigación. Además, el mapeo geológico ayuda a prever la ubicación de posibles acumulaciones de gases, lo que permite implementar medidas preventivas.
- **Monitoreos sísmicos:** son una herramienta esencial para garantizar la seguridad y la salud de los trabajadores en entornos subterráneos. Estos monitoreos permiten detectar áreas de acumulación de gases peligrosos como metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), así como otros gases tóxicos generados por procesos de mineralización. Junto con sensores de gas, el monitoreo sísmico facilita el diseño de sistemas de ventilación adecuados para diluir y dispersar las atmósferas viciadas.

- **Sellado de grietas y fracturas:** es esencial para prevenir la infiltración de gases peligrosos. Este proceso no solo ayuda a evitar la entrada de estos gases, sino que también permite el diseño de sistemas de ventilación eficientes, garantizando así la circulación de aire fresco y la expulsión de gases tóxicos.
- **Pruebas de permeabilidad y porosidad:** estas pruebas, realizadas tanto en laboratorio como en campo, son esenciales para evaluar las propiedades físicas de las rocas y suelos. Permiten determinar la permeabilidad y porosidad de los materiales, ayudando a identificar posibles cambios en las condiciones geológicas que podrían afectar la seguridad de las labores mineras. Se recomienda realizar estas pruebas periódicamente para asegurar la vigilancia constante de las condiciones geológicas y de seguridad.

3.3 Herramientas de análisis disponibles

En la actualidad, los métodos históricos de evaluación de la ventilación minera han evolucionado considerablemente gracias al desarrollo de software avanzado y modelos de gestión de ventilación. Estos sistemas permiten, mediante simulaciones computacionales de fluidos dinámicos, determinar parámetros clave que calculan en tiempo real la dinámica de los flujos de aire, incluso en condiciones climáticas o geológicas complejas. De esta forma, se optimiza la producción, se mitigan los riesgos y se reducen los costos operativos.

Los programas de ingeniería especializados en ventilación minera simulan ambientes subterráneos, lo que facilita la mitigación de los riesgos asociados a la calidad del aire y la seguridad en las labores. Estos softwares permiten la simulación de peligros bajo la superficie, ayudando a establecer sistemas de ventilación subterráneos seguros y eficientes que controlan los flujos de aire, la presión y las condiciones climáticas dentro de las minas.

Con el avance tecnológico, también se han integrado aplicaciones modernas que incorporan inteligencia artificial y análisis predictivo, mejorando la optimización de los

sistemas de ventilación y la eficiencia operativa general. Entre las características más comunes y aplicaciones de los softwares de ventilación minera, se incluyen:

Modelado de flujo de aire: permite simular y analizar el comportamiento del aire dentro de las labores mineras, identificando puntos críticos y optimizando el diseño del sistema de ventilación.

Monitoreo en tiempo real: ofrece datos actualizados sobre la calidad del aire, las concentraciones de gases peligrosos y otras variables relevantes para la seguridad de los trabajadores.

Control de ventiladores y extractores: facilita el ajuste y control de ventiladores y extractores, asegurando que el flujo de aire se mantenga en niveles adecuados y constantes.

Análisis de datos: proporciona herramientas avanzadas para analizar datos históricos y generar informes detallados sobre el rendimiento y la eficiencia del sistema de ventilación, permitiendo la toma de decisiones informadas para mejorar la seguridad y la operatividad de la mina. Modelado de flujo de aire: permite simular y analizar cómo fluye el aire a través de las labores mineras, ayudando a identificar puntos críticos y mejorar el diseño del sistema de ventilación

Figura 6

Softwares más comunes aplicados para la ventilación de minas



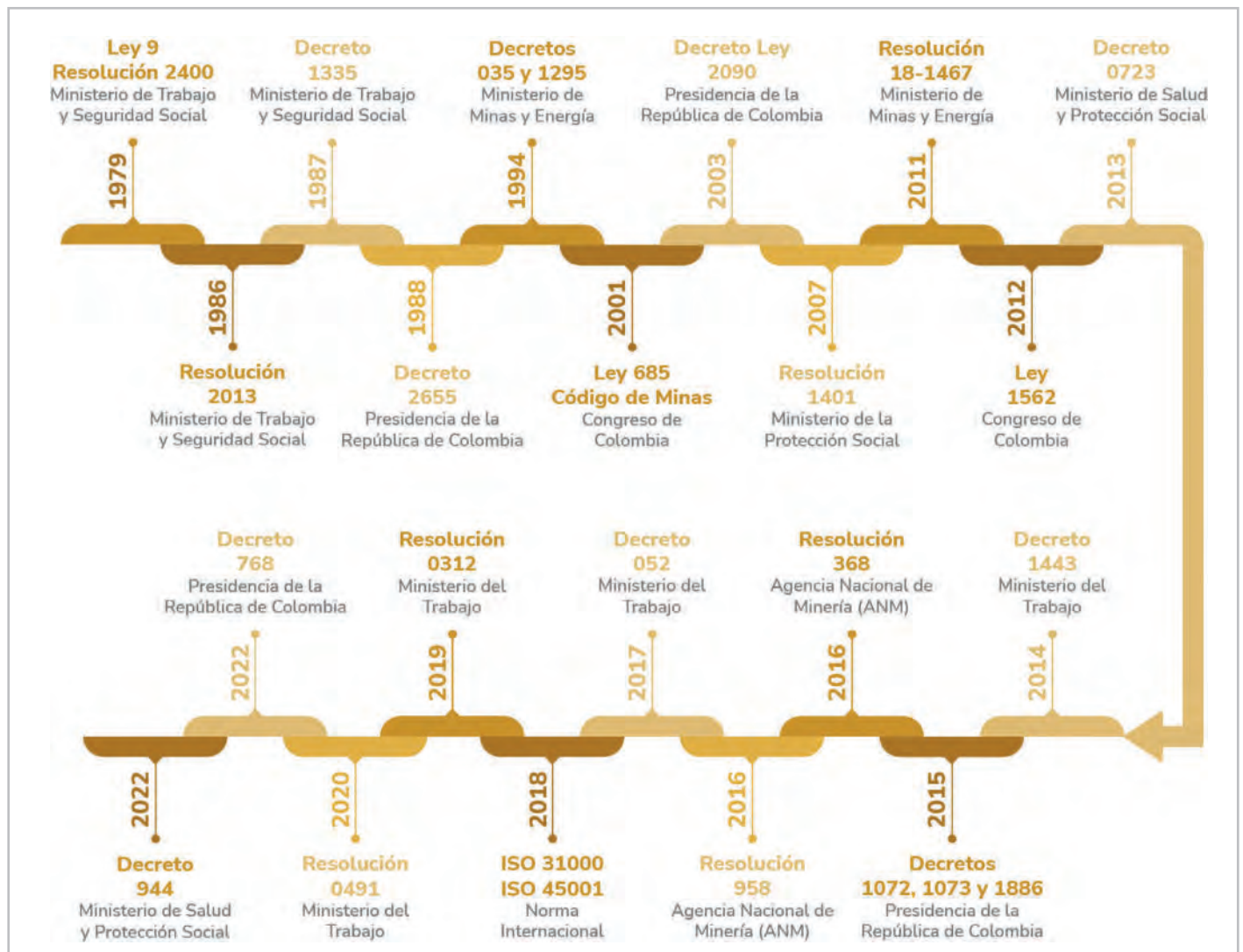
Nota. La figura integra los diferentes softwares más comunes, implementados para el desarrollo de los sistemas de ventilación a nivel internacional.

NORMATIVIDAD

El marco normativo que regula el riesgo minero en atmósferas subterráneas contaminadas o viciadas en Colombia está compuesto por un conjunto de normativas vigentes que establecen parámetros específicos para garantizar la seguridad en las operaciones mineras. En la **figura 7**, se describen de manera cronológica las principales normas de carácter general que abordan este tema.

Figura 7

Línea de tiempo del marco normativo de Colombia en seguridad minera



Nota. Se aprecia en una línea de tiempo la evolución de la normatividad en cuanto a la seguridad minera en Colombia.

A continuación, se detalla la línea de tiempo que ilustra la evolución de la normatividad relacionada con la seguridad minera en Colombia:

1979: (Ministerio de Trabajo y Seguridad Social, Resolución 2400 de 1979, art. 1) estableció disposiciones sobre vivienda, higiene y seguridad en los lugares de trabajo. Asimismo, definió el campo de aplicación para todos los establecimientos laborales, con el objetivo de preservar y mantener la salud física y mental de los trabajadores, así como prevenir accidentes y enfermedades laborales.

1986: (Ministerios de Trabajo y Seguridad Social y de Salud, Resolución 2013 de 1986) reglamentó la organización y funcionamiento de los Comités de Medicina, Higiene y Seguridad Industrial en los lugares de trabajo.

1994: el Gobierno Nacional expidió el Decreto 035, 1994, con disposiciones sobre seguridad minera, cuyo objetivo era preservar y mejorar las condiciones de vida, salud, higiene y seguridad de las personas que desarrollan labores en excavaciones subterráneas o explotaciones mineras. Ese mismo año, el Gobierno expidió el Decreto 1295, que estableció la organización y administración del Sistema General de Riesgos Profesionales, destinado a prevenir, proteger y atender a los trabajadores frente a los efectos de enfermedades y accidentes derivados de su actividad laboral.

2001: mediante la (Ley 685, 2001, art. 60) estableció la obligación de los concesionarios mineros de cumplir estrictamente con las normas de seguridad e higiene para los trabajadores.

2003: con el Decreto Ley 2090 del 26 de junio de 2003, se definieron las actividades de alto riesgo para la salud de los trabajadores, y se modificaron los requisitos y beneficios del régimen de pensiones para quienes laboran en dichas actividades. Además, se reguló explícitamente la minería subterránea como actividad de alto riesgo.

2007: el Ministerio de la Protección Social expidió la Resolución 1401 del 14 de mayo de 2007, que reglamentó la investigación de incidentes y accidentes laborales, estableciendo las obligaciones y requisitos para investigar estos eventos y aplicar medidas correctivas para eliminar o reducir los riesgos y prevenir su recurrencia.

2011: (Ministerio de Minas y Energía, Resolución 18-1467 de 2011) “Por la cual se adopta la Política Nacional de Seguridad Minera”. Además, en este año, se adoptó la norma internacional ISO 31000, que establece el marco de referencia para integrar la gestión del riesgo en todas las actividades humanas, y que está sujeta a actualizaciones periódicas.

2012: con la expedición de la Ley 1562, 2012, se modificó el Sistema de Riesgos Laborales y se dictaron nuevas disposiciones en materia de salud ocupacional.

2013: el Gobierno Nacional expidió el Decreto 0723, 2013, que reglamentó la afiliación al Sistema General de Riesgos Laborales de trabajadores vinculados por contrato formal con entidades públicas o privadas, así como de los trabajadores independientes en actividades de alto riesgo.

2014: con el Decreto 1443, 2014, el Gobierno Nacional estableció disposiciones para la implementación del Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST).

2015: el Gobierno Nacional expidió los Decretos 1072 y 1073, los cuales unificaron las normas reglamentarias de los sectores de trabajo y de minas y energía. De especial relevancia en este año, el 21 de septiembre se expidió el Decreto 1886, que establece el Reglamento de Seguridad en las Labores Mineras Subterráneas. Esta norma regula de manera específica la actividad minera en espacios subterráneos, como se puede evidenciar en los artículos 1° y 2° de dicho decreto, que se citan textualmente a continuación:

Artículo 1°. Objeto

“Este Reglamento tiene como objetivo establecer las normas mínimas para la prevención de riesgos en las labores mineras subterráneas. Además, establece los procedimientos para la inspección, vigilancia y control de todas las actividades mineras subterráneas, así como aquellas de superficie relacionadas con ellas, con el fin de preservar las condiciones de seguridad y salud en los lugares de trabajo donde se desarrollen tales labores”.

Artículo 2°. Ámbito de aplicación

“El presente reglamento es aplicable a las personas naturales y jurídicas que realicen labores mineras subterráneas, así como a aquellas de superficie que estén directamente relacionadas con estas”.

2016: (ANM, Resolución 368 de 2016) regula las características técnicas mínimas de los equipos autorrescatadores, para el personal que ingrese a labores mineras subterráneas.

2017: con la expedición del (Decreto 052, 2017) el Gobierno Nacional modificó el Decreto Único Reglamentario del Sector Trabajo, sobre la transición para la implementación del (SG-SST).

2018: adopción de la norma internacional NTC ISO 45001, para sistemas de gestión de seguridad y salud en el trabajo, destinada a proteger a los trabajadores y visitantes de accidentes y enfermedades laborales, norma que también está sujeta a ser actualizada permanentemente.

Con la expedición de la (Ministerio de Trabajo, Resolución 1796 de 2018) se actualizó el listado de las actividades peligrosas que por su naturaleza o condiciones de trabajo son nocivas para la salud e integridad física o psicológica de los menores de 18 años y se dictan otras disposiciones.

2019: expedición por parte del (Ministerio de Trabajo, Resolución 0312) definió los estándares mínimos del SG-SST, que reguló el conjunto, normas, requisitos y procedimientos de obligatorio cumplimiento de los empleadores y contratantes, mediante los cuales se establecen, verifican y controlan las condiciones básicas de capacidad técnico-administrativa y de suficiencia patrimonial y financiera indispensables para el funcionamiento, ejercicio y desarrollo de actividades en el SG- SST.

2022: a través del Decreto 768, el Gobierno Nacional adoptó la Tabla de Clasificación de Actividades Económicas para el Sistema General de Riesgos Laborales.

Igualmente, y de especial interés el Gobierno Nacional expidió el Decreto 944 de 2022, que modificó el Decreto 1886 de 2015 por el cual se estableció el Reglamento de Seguridad en las Labores Mineras Subterráneas”.

Este año el Gobierno Nacional a través del Ministerio de Minas y Energía también expidió la Resolución 40209 del 10 de junio de 2022, que actualizó la Política Nacional de Seguridad Minera.





GENERALIDADES DEL PLAN DE VENTILACIÓN

El plan de ventilación, en concordancia con lo estipulado en el Decreto 1886 de 2015 y el Decreto 944 de 2022, constituye un elemento fundamental en la gestión de las minas subterráneas. Su desarrollo inicia con una fase de planificación integral, que abarca factores geológicos, mineros, operacionales y normativos. Además, es necesario considerar otros aspectos adicionales que el responsable de la operación considere pertinentes, con el propósito de asegurar un control eficiente de las atmósferas contaminadas y explosivas en las diversas etapas de la actividad minera. A continuación, se enumeran los aspectos clave que deben tenerse en cuenta para el diseño del Plan de Ventilación (ver figura 8)

Figura 8

Ciclo PHVA: Planear, Hacer, Verificar y Actuar



Nota. En esta figura se resumen las generalidades del plan de ventilación mediante ciclo PHVA.

Aspectos importantes en el diseño del plan de ventilación

El diseño de un plan de ventilación en operaciones mineras subterráneas es una tarea crítica que combina aspectos técnicos, operativos y normativos con un enfoque centrado en la seguridad de los trabajadores. Este proceso no solo debe ser explícito en su objetivo principal sino que también requiere un profundo entendimiento de los factores geológicos y socioculturales involucrados. A continuación, se detallan los aspectos relevantes en el diseño del plan.

Objetivo principal: mitigar y/o controlar aquellas atmósferas clasificadas como peligrosas y a las cuales está expuesta el trabajador, y que en condiciones especiales pueden generar incidentes o accidentes con consecuencias leves, graves y hasta mortales.

Estudios geológicos: las minas subterráneas deben tener un estudio geológico identificando las zonas o mantos susceptibles a desprendimientos súbitos de gas metano (CH₄) de acuerdo con los resultados prospectivos que permitan identificarlos antes del inicio de la etapa productiva.

Para el diseño del plan de ventilación, el titular, explotador, operador o empleador minero debe contar con personal altamente capacitado desde el punto de vista técnico y operativo. Esto no solo garantiza el cumplimiento de la normativa vigente, sino que también permite integrar aspectos socioculturales, así como las perspectivas y conocimientos del personal involucrado en la operación. Esta participación facilita la identificación de los riesgos asociados a cada actividad minera, lo cual es esencial para la estructuración del plan de gestión de riesgos. Este plan, a su vez, permitirá la implementación de controles eficaces sobre las atmósferas viciadas y contaminadas. Los perfiles profesionales requeridos se presentan en la siguiente tabla (**ver tabla 1**).

Tabla 1

Perfil profesional para el personal idóneo para la elaboración del Plan de Ventilación

NIVEL EDUCATIVO	Profesional: Ingeniero de minas, Ingeniero en minas y metalurgia.
CONOCIMIENTOS ESPECÍFICOS	Cálculos y diseño de ventilación en minería subterránea, maquinaria y equipos, y manejo de software de ventilación
EXPERIENCIA	Mínimo 5 años de experiencia en minería subterránea y control de ventilación dependiendo el tipo de minería.
COMPETENCIAS	<p>Trabajo en equipo: considerar todas las potencialidades del personal, y aprovecharlas para alcanzar los objetivos propuestos.</p> <p>Capacidad de análisis: percepción del riesgo a través de la experiencia y el conocimiento adquirido.</p> <p>Comunicación efectiva: comunicar de manera positiva y clara un mensaje, junto a la capacidad de escucha activa.</p> <p>Responsabilidad: habilidad necesaria que tiene el responsable del Plan de ventilación para realizar su trabajo de forma seria y rigurosa.</p> <p>Liderazgo e iniciativa: habilidades para usar las herramientas de comunicación oral, escrita, documental para alcanzar los objetivos propuestos.</p>

Nota. En esta tabla se muestra el perfil profesional del responsable del Plan de Ventilación basado en los Decretos 1886 de 2015 y 944 de 2022.

Clasificación de las minas según su peligrosidad: la clasificación de las minas según su nivel de peligrosidad se fundamenta en una evaluación integral que considere aspectos geológicos, morfológicos, estructurales, de proceso y los resultados derivados de dichos procesos. Es crucial analizar el comportamiento de los gases y el material particulado, teniendo en cuenta su origen y características específicas. Además, se deben realizar estudios previos sobre el polvo de carbón, su explosividad y la desorción de metano, así como evaluar su incidencia en las operaciones mineras. Estos análisis permiten establecer un plan de gestión del riesgo sólido y efectivo, orientado a mitigar los peligros asociados con las atmósferas subterráneas contaminadas o viciadas.

Plan de Gestión del Riesgo: debe fundamentarse en la adopción de una metodología integral y adecuada, diseñada para identificar, analizar y valorar los peligros asociados con las atmósferas viciadas o contaminadas presentes en las labores mineras. Este enfoque permite cuantificar los niveles de riesgo y establecer controles

efectivos que contribuyan a su reducción o mitigación, garantizando así la seguridad de los trabajadores y la sostenibilidad de las operaciones mineras.

Proyección del circuito de ventilación forzada: Todas las minas subterráneas deben contar con un circuito de ventilación diseñado y calculado por personal competente, asegurando una adecuada circulación de aire. Este sistema debe garantizar la entrada de aire limpio por una labor y la salida de aire viciado por otra, promoviendo condiciones seguras en el ambiente laboral. En los frentes de avance, vías de retorno, frentes de explotación y otros puntos críticos determinados por el profesional encargado del plan de ventilación, se deben instalar ventiladores principales, ventiladores auxiliares y demás accesorios necesarios para mantener las concentraciones de gases y material particulado dentro de los Valores Límite Permisibles (VLP). El diseño del circuito de ventilación debe ser consignado en un plano detallado, el cual debe incluir los elementos descritos en la **figura 9**.

Figura 9

Elementos del circuito de ventilación



Nota. Esta tabla detalla los elementos de control que deben incluirse en el plano del circuito de ventilación, asegurando una gestión integral y eficiente del flujo de aire en las labores mineras subterráneas.

Además, debe ser considerado:

1. Topografía actualizada en 3D
 - Distancia entre estaciones
 - Sección (área libre)
 - Características elementos de sostenimiento
 - Características elementos de ventilación.
 - Altura msnm
 - Responsable de la toma de datos

2. Datos de las mediciones (aforos) en cada punto medido o estaciones de ventilación. Estos datos deben estar georreferenciados
 - Temperatura seca
 - Temperatura humedad
 - Humedad relativa
 - Velocidad del aire
 - Caudal

3. Características de los equipos utilizados
 - Certificados de calibración recientes

Cálculo del volumen mínimo de aire

El responsable del plan de ventilación debe determinar el volumen mínimo de aire limpio necesario para garantizar la seguridad y la salud de los trabajadores en las diferentes labores subterráneas. Este cálculo debe considerar los siguientes factores clave:

- Número máximo de personal: cantidad de trabajadores presentes durante el turno más concurrido.
- Método de extracción o explotación: perforación y voladura, mecanizado o semi mecanizado, según aplique.
- Altura sobre el nivel del mar: a mayor altitud, disminuye la densidad del aire, lo que afecta la capacidad de ventilación.
- Tipo de gases presentes: identificación de gases nocivos o explosivos en la atmósfera.
- Equipos de combustión interna: consideración de los gases emitidos por estos equipos, si están presentes.
- Porcentaje de material particulado: evaluación del nivel de partículas suspendidas en el aire.
- Altura de las labores subterráneas: dimensiones físicas de las áreas a ventilar.

El volumen de aire limpio requerido debe ser ajustado en caso de incrementos en el número de trabajadores o cambios en la calidad y cantidad de gases nocivos o tóxicos presentes en la atmósfera. Este ajuste es fundamental para asegurar la prevalencia de condiciones de trabajo seguras y mantener las concentraciones de contaminantes dentro de los VLP.

Un monitoreo constante y una actualización periódica del cálculo garantizarán la efectividad del sistema de ventilación y la protección de los trabajadores.

Mantenimiento en vías de ventilación

Es fundamental establecer un plan integral de mantenimiento que abarque las modalidades preventiva, predictiva y correctiva, enfocándose especialmente en las vías de ventilación principal. Dicho mantenimiento debe garantizar las siguientes condiciones:

Dimensiones mínimas: las vías deben mantener un área de excavación mínima de 3 m² y una altura de 1.8 m, asegurando un flujo de aire adecuado.

Trazabilidad: es imprescindible llevar registros detallados de los mantenimientos realizados, incluyendo la revisión de elementos de sostenimiento, equipos de ventilación, sistemas de control y demás accesorios.

Condiciones de limpieza: las vías de ventilación y las rutas de evacuación deben mantenerse completamente libres de obstáculos que puedan interferir con el flujo de aire o dificultar el tránsito del personal.

Medición y registro de gases

El responsable de la ventilación debe realizar mediciones periódicas en todos los frentes de trabajo de la mina, considerando el tipo de mineralización y las concentraciones de gases derivadas de la génesis del yacimiento. Es fundamental que el plan de gestión del riesgo incluya medidas preventivas enfocadas en el control del material particulado, especialmente de aquellos polvos con características explosivas o deflagrantes.

Las mediciones de gases deben efectuarse al menos cuatro veces por turno en los puntos críticos previamente identificados (ver Figura 10). Este monitoreo constante asegura condiciones seguras de operación, minimizando riesgos asociados a la acumulación de gases peligrosos y al material particulado en suspensión.

Figura 10

Lugares para medición de gases



50

Para la medición de gases, se utilizarán equipos denominados multi detectores, los cuales deben ser adquiridos por el titular, explotador, operador o empleador minero, teniendo en cuenta los tipos de gases presentes en la mina y el tipo de operación que se gestiona, particularmente los métodos de arranque empleados. Es esencial que los tableros de control estén ubicados en todos los frentes de trabajo para garantizar una supervisión constante.

Los registros de las mediciones deben llevarse a cabo en el siguiente orden:

1. Bitácora de operación diaria: esta debe estar disponible en la oficina de los responsables de la operación de cada turno y debe ser revisada por los responsables antes del inicio de cada jornada laboral.
2. Libro de gases: este debe estar resguardado en el departamento de ventilación o, en su defecto, en la oficina o cubículo del responsable de la ventilación.

Los registros diarios deberán realizarse siguiendo este orden:

- Libreta del responsable: en el momento de la toma de los datos, la medición se debe registrar en la libreta correspondiente al responsable.
- Tableros de gases: se debe actualizar el tablero de control con los datos de las mediciones.
- Bitácora de operación: debe anotarse la medición en la bitácora correspondiente a la jornada.
- Libro de gases: finalmente, se debe registrar la medición en el libro de gases, asegurando que todos los registros sean completos y accesibles para su revisión.

Plan de Gestión del Riesgo

El plan de gestión del riesgo, que deben elaborar todas las minas subterráneas independientemente del mineral que exploten, debe incluir, como mínimo, los siguientes elementos:

Análisis de riesgo: una vez identificadas las concentraciones de gases presentes en los yacimientos, a partir de los estudios geológicos previos, se iniciará el análisis de los riesgos. Este análisis debe considerar el tipo de gas, las características mineralógicas y estructurales del yacimiento que dieron origen a dichos gases, así como la potencial afectación a la salud y seguridad de los trabajadores. También se deben considerar:

- Antecedentes de desprendimientos súbitos de gas en minas cercanas.
- Investigaciones de accidentes ocurridos por gases nocivos, explosivos y material particulado.
- Tipo de desprendimientos.
- Estudios de distribución de gas metano en mantos de carbón m³/Ton.
- Granulometría de material particulado (polvo de carbón y calcáreo).

Valoración del riesgo: el análisis de riesgo se traduce en términos cuantitativos, teniendo en cuenta una serie de límites de evaluación. Los resultados permiten determinar y valorar el nivel de riesgo presente en la explotación

minera. A partir de esta valoración, el riesgo se clasifica como alto, medio o bajo, y se establece si es aceptable o no para las condiciones de trabajo.

Plan de prevención

Es una herramienta fundamental para gestionar los riesgos asociados con las actividades en minas subterráneas. Este plan tiene como objetivo principal prevenir accidentes y enfermedades profesionales, garantizando un entorno de trabajo seguro. En términos generales, consta de los siguientes elementos clave:

- Control del riesgo: una vez priorizados los riesgos según su nivel de peligrosidad, se deben implementar acciones para controlarlos o mitigarlos. Es fundamental comenzar con aquellos clasificados como no aceptables o de alto riesgo, para luego abordar los de menor nivel. Finalmente, se debe llevar a cabo una nueva evaluación y valoración, lo cual permitirá determinar si el riesgo ha sido adecuadamente controlado o si es necesario seguir implementando mejoras hasta alcanzar un nivel de seguridad aceptable.
- Capacitación del personal: es fundamental que todos los trabajadores estén plenamente informados sobre los peligros y riesgos derivados de la explotación de los yacimientos a los que están expuestos, especialmente aquellos relacionados con atmósferas viciadas, explosivas y la presencia de material particulado. Asimismo, deben comprender las graves consecuencias para la salud que pueden surgir si no se realiza un control adecuado de estos riesgos. En el caso de minas con una elevada presencia de material particulado (polvo), inflamable o explosivo, es crucial desarrollar protocolos y procedimientos específicos que aseguren un control efectivo de estos riesgos.

Tipos de gases nocivos y explosivos

Es esencial realizar un monitoreo constante de los gases presentes en la mina, teniendo en cuenta su grado de peligrosidad, el cual debe estar determinado a partir de los resultados del análisis de riesgos y los VLP establecidos

por las normas de higiene y seguridad pertinentes. El conocimiento de los tipos de gases y su impacto en la salud de los trabajadores es crucial, especialmente en relación con las atmósferas viciadas, explosivas y el material particulado. Las consecuencias de no controlar adecuadamente estos riesgos pueden ser graves. Además, en minas donde se presenta una alta concentración de material particulado (polvo), inflamable o explosivo, es imperativo diseñar protocolos y procedimientos específicos para un control efectivo. En la tabla 2 se detallan los tipos de gases presentes y sus características de peligrosidad.

En las minas de carbón, es fundamental considerar tanto los niveles de concentración de gas metano como la cantidad de polvo inflamable presente durante la explotación. A continuación, en la tabla 3, se presenta la clasificación de las minas en función de la concentración de metano (CH₄) y la materia volátil en el polvo de carbón.

Tabla 2

Tipos de gases

GASES	FÓRMULA	TLV-TWA (PPM)	TLV-STEL (PPM)
Dióxido de Carbono	CO ₂	5000	30000
Monóxido de Carbono	CO	25	
Ácido Sulphídrico	H ₂ S	1	5
Anhídrido sulfuroso	SO ₂		0.25
Óxido Nítrico	NO	25	
Dióxido de Nitrógeno	NO ₂	0.2	

Nota. Elaborado conforme a lo establecido en el Decreto 1886 de 2015.

Tabla 3

Clasificación de las minas en relación con la concentración de metano y la materia volátil en el polvo de carbón

CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN	CONTENIDO MV	CLASIFICACIÓN
I. Minas o frentes de trabajo No Grisituosas	Concentración de metano (CH ₄) en toda la mina es de 0%	Mayor al 16%	MINA PULVERULENTA INFLAMABLE
II. Minas o frentes de trabajo débilmente Grisituosas	Concentración de metano (CH ₄) en toda la mina es igual o inferior a 0.3%	Mayor al 14%	
III. Minas o frentes de trabajo altamente Grisituosas	Concentración de metano (CH ₄) en toda la mina es superior a 0.3%		

Nota. Elaborado conforme a lo establecido en el Decreto 1886 de 2015.

Sistema de monitoreo permanente

El sistema de monitoreo permanente es esencial para minas con alta presencia de grisutidad, para las cuales es crucial definir el método más adecuado que garantice el cumplimiento de este requisito. Además, se debe realizar monitoreo en minas que utilicen el método de perforación y voladura, con el fin de evaluar la concentración de gases nocivos como los óxidos de nitrógeno (NOx) y monóxido de carbono (CO), especialmente en la explotación de calcáreos y otros gases que estipula el Decreto 1886 de 2015. Es fundamental contar con los registros y soportes correspondientes de todas las mediciones realizadas para asegurar el seguimiento adecuado de los niveles de gases.

Calibración y verificación de equipos

La calibración de los equipos de medición de gases debe realizarse conforme a las recomendaciones del fabricante. En caso de que la calibración no cumpla con los estándares establecidos, deberá ser realizada por personal calificado. La verificación de estos equipos debe llevarse a cabo siguiendo el plan de mantenimiento correspondiente, cumpliendo con los procedimientos y recomendaciones especificadas (Decreto 944 de 2022). Además, se deberá llevar un registro detallado en la hoja de vida de los equipos y máquinas utilizados en las minas subterráneas, asegurando su adecuado funcionamiento y control.

Verificación de caudales de ventilación

Es imprescindible realizar mediciones de los caudales de ventilación de manera semanal, o con una frecuencia ajustada según la clasificación de peligrosidad de la mina. Durante estas mediciones, se debe monitorear la concentración de oxígeno, los niveles de gases, las temperaturas y la cantidad de material particulado en toda la mina. Es fundamental llevar un registro detallado de estos datos, y lo más importante es asegurar que todo el personal operativo esté debidamente informado sobre los resultados y medidas correspondientes.

Auditoría al plan de ventilación

La auditoría del plan de ventilación debe realizarse teniendo en cuenta los criterios normativos aplicables, los resultados del plan de prevención, auditorías previas y otros elementos pertinentes. Este proceso puede ser ejecutado por el profesional en ingeniería de minas responsable de la operación, en conjunto con el encargado de la ventilación, supervisores, jefes de turno, trabajadores y el personal adicional necesario. El informe de auditoría constituye una herramienta clave para la gestión, permitiendo la implementación de acciones orientadas a la mejora continua de los procesos requeridos para el control de los riesgos derivados de atmósferas viciadas y contaminadas. Se recomienda que esta auditoría se lleve a cabo cada seis meses o con mayor frecuencia, según lo exijan las condiciones del sistema de ventilación.

Suspensión de labores

En caso de que las concentraciones de gases y material particulado en la atmósfera de trabajo superen los valores límites permisibles, o si se presentan fallos en el sistema de ventilación debido a problemas eléctricos, técnicos u otras causas imprevistas, será necesario suspender las labores. Bajo estas circunstancias, se deberá evacuar el frente de trabajo o, si las condiciones de peligro no pueden ser controladas, evacuar la mina en su totalidad. Esta medida busca garantizar la seguridad de todo el personal, priorizando la protección de la salud y la vida de los trabajadores ante situaciones de riesgo inminente.

Plan de mejora de la ventilación

Este plan abarca todas las acciones, ajustes y modificaciones que debe implementar el responsable de la ventilación para cumplir con los parámetros de control establecidos tanto por la normativa aplicable como por los lineamientos del plan de gestión del riesgo. Es crucial hacer énfasis en el plan de mantenimiento que debe ser ejecutado por la empresa minera, ya que este es un factor clave en la mejora continua de los procesos de ventilación. Además, se deben considerar otros aspectos fun-

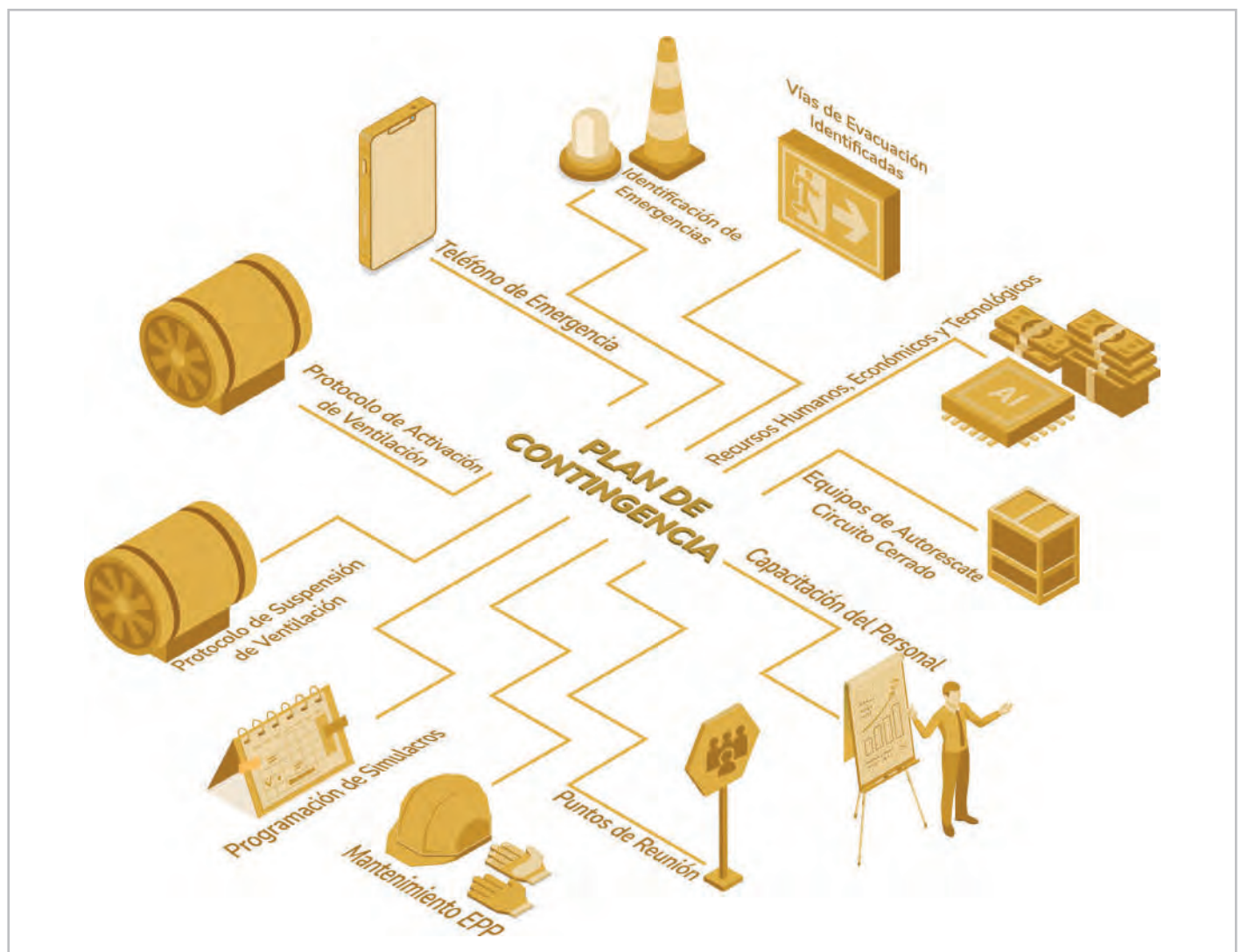
damentales como el Plan de Trabajo Operativo (PTO), el Plan de Trabajo Interno (PTI), el Plan de Sostenimiento y la capacitación del personal, con el fin de garantizar la efectividad y sostenibilidad del sistema de ventilación.

Plan de contingencia

Este plan incluye todos los protocolos, procedimientos y documentación que el área de Gestión de Salud y Seguridad en el Trabajo (SST), con el apoyo del responsable de la ventilación, debe diseñar para enfrentar situaciones de peligro relacionadas con la ventilación, especialmente aquellas asociadas a la presencia de atmósferas viciadas y contaminadas. Como mínimo, el plan debe contemplar (ver figura 11) los procedimientos y acciones a seguir para mitigar los riesgos y garantizar la seguridad de los trabajadores.

Figura 11

Plan de contingencia ante emergencias por atmósferas viciadas y contaminadas



Nota. Se presentan los aspectos mínimos que debe incluir el plan de contingencia para emergencias derivadas de atmósferas viciadas y contaminadas, conforme a lo estipulado en el Decreto 1886 de 2015.



CARACTERÍSTICAS Y PRINCIPIOS DEL PLAN DE VENTILACIÓN

El plan de ventilación es un documento esencial en toda operación minera, particularmente en aquellas desarrolladas en ambientes subterráneos. Este instrumento técnico define las estrategias y procedimientos destinados a garantizar un entorno laboral seguro y saludable para los trabajadores, mediante el control eficiente de la calidad del aire. Su propósito principal es la eliminación de gases nocivos y la regulación de las condiciones ambientales.

Figura 12

Características del plan de ventilación.



6.1 Características esenciales de un plan de ventilación

- **Objetivos claros:** definir objetivos específicos para el sistema de ventilación, como mantener niveles adecuados de oxígeno, controlar la temperatura y la humedad, y diluir o extraer contaminantes del ambiente laboral.
- **Análisis geológico:** considerar las características geológicas de la mina y la naturaleza de los minerales extraídos. Estos factores influyen significativamente en la generación de contaminantes y, por ende, en las estrategias de ventilación necesarias.
- **Análisis minero:** considerar las características del método de explotación utilizado en la mina para garantizar que el plan de ventilación se ajuste a las necesidades operativas. Entre los aspectos clave está el uso de agentes químicos, como explosivos, que generan gases tóxicos, así como la posible liberación de gases naturales, como el metano (CH_4). Este análisis es fundamental para clasificar la mina según su nivel de explosividad.
- **Diseño del sistema de ventilación:** detallar la red de túneles, conductos y equipos de ventilación necesarios para garantizar un flujo de aire adecuado en todas las áreas de la mina.
- **Cálculos de ventilación:** incluir cálculos detallados sobre los caudales de aire requeridos, las pérdidas de presión en el sistema y la selección de equipos de ventilación adecuados.
- **Monitoreo y control:** establecer un sistema de monitoreo continuo de la calidad del aire y los parámetros ambientales, así como los procedimientos para controlar el sistema de ventilación en caso de emergencias.
- **Mantenimiento:** detallar el programa de mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos de ventilación, con el fin de garantizar su correcto funcionamiento.

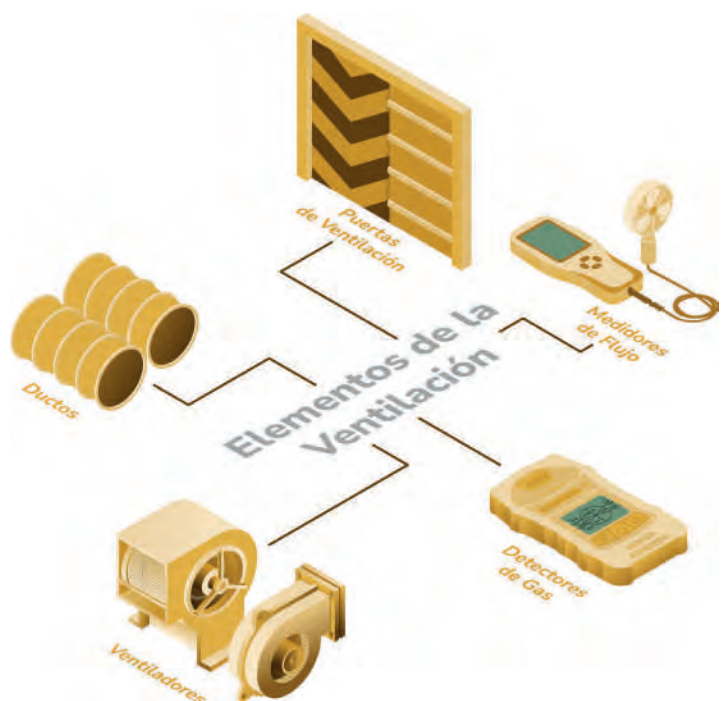
- **Emergencias:** describir los procedimientos a seguir en caso de emergencias, como incendios, explosiones o inundaciones, que puedan afectar la calidad del aire y la seguridad de los mineros.

Elementos clave de un sistema de ventilación

La ventilación en minas subterráneas es esencial para garantizar la seguridad y la salud de los trabajadores, además de optimizar la eficiencia operativa. Los siguientes elementos son componentes clave de un sistema de ventilación efectiva.

Figura 13

Elementos de un sistema de ventilación



Componentes clave de un plan de ventilación

Un plan de ventilación típico debe incluir los siguientes componentes:

Introducción

- Objetivo del plan.
- Alcance del plan (áreas cubiertas y actividades incluidas).
- Resumen de las condiciones geológicas y mineras de la mina.
- Identificación de los peligros potenciales relacionados con la ventilación (gases, polvo, temperatura, humedad).

Descripción del sistema de ventilación

- Diseño del circuito: diagramas detallados que muestren el flujo de aire a través de la mina, incluyendo ventiladores, conductos, puertas y aberturas.
- Equipos de ventilación: especificaciones técnicas de los ventiladores (caudal, presión, eficiencia), conductos, puertas y otros equipos.
- Sistemas de medición: descripción de los instrumentos utilizados para medir el caudal de aire, la presión, la temperatura, la humedad y los contaminantes.

Cálculos de ventilación

- Caudales de aire requeridos: cálculos detallados para determinar el volumen de aire necesario para diluir y extraer los contaminantes, mantener niveles aceptables de oxígeno (O₂) y controlar la temperatura y humedad.
- Pérdidas de presión: cálculos de las pérdidas de presión en el sistema de ventilación.
- Selección de equipos: justificación de la selección de los equipos de ventilación basados en los cálculos realizados.

Monitoreo y control

- Puntos de monitoreo: ubicación de los puntos de monitoreo para medir la calidad del aire y otros parámetros ambientales.
- Frecuencia de monitoreo: programa de muestreo y análisis para evaluar la efectividad del sistema de ventilación.
- Procedimientos de alarma y emergencia: procedimientos a seguir en caso de detectar niveles peligrosos de contaminantes o fallas en el sistema de ventilación.

Mantenimiento

- Programa de mantenimiento: plan detallado para el mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos de ventilación.
- Registros de mantenimiento: formatos para registrar las actividades de mantenimiento.

Procedimientos operativos

- Procedimientos de arranque y parada: procedimientos detallados para el arranque y parada segura de los equipos de ventilación.
- Procedimientos de emergencia: procedimientos para responder a emergencias como incendios, explosiones o inundaciones.
- Capacitación del personal: requisitos de capacitación para el personal encargado de operar y mantener el sistema de ventilación.

Importancia de un buen plan de ventilación

Un plan de ventilación bien diseñado y ejecutado es esencial para garantizar la seguridad y la salud de los trabajadores mineros. Además, contribuye a:

- Aumentar la productividad: un ambiente de trabajo saludable y seguro mejora la eficiencia, reduce el ausentismo laboral y aumenta la empatía laboral.
- Proteger el medio ambiente: un sistema de ventilación adecuado ayuda a prevenir la emisión de contaminantes al exterior de la mina.
- Extender la vida útil de la mina: un buen control de la calidad del aire ayuda a preservar los equipos y las infraestructuras mineras.

En resumen, un plan de ventilación es un documento técnico crucial para garantizar la operación segura de una mina. Su elaboración demanda conocimientos especializados en áreas clave como ventilación, geología, minería y seguridad industrial.



MODELO DE GESTIÓN DEL RIESGO DE ATMÓSFERAS EXPLOSIVAS Y VICIADAS EN MINERÍA SUBTERRÁNEA



El modelo de gestión del riesgo para atmósferas viciadas en minería subterránea tiene un enfoque sistemático y estructurado que se aplica para identificar, evaluar y mitigar los riesgos asociados con las condiciones atmosféricas adversas en las operaciones mineras subterráneas. Este modelo se basa en los principios y directrices generales de la gestión del riesgo establecidos en la NTC-ISO 31000 y se adapta específicamente a las condiciones particulares de la minería subterránea, donde la calidad del aire es crucial para la seguridad de los trabajadores. El principal objetivo de este modelo es aumentar la seguridad en las operaciones mineras subterráneas mediante la gestión efectiva de los riesgos asociados con atmósferas viciadas. Por lo tanto, este modelo busca:

- Prevenir accidentes y enfermedades laborales relacionadas con la exposición a ambientes inseguros.
- Cumplir con la normativa legal y regulatoria específica del sector minero.
- Optimizar los recursos destinados a la ventilación y el control de la calidad del aire dentro de las operaciones mineras.
- Mejorar la eficiencia operativa al reducir las interrupciones por incidentes de seguridad.

Razón por la que el modelo de gestión del riesgo en atmósferas viciadas mineras es crucial para garantizar un ambiente de trabajo seguro en las labores subterráneas, protegiendo la salud y la vida de los trabajadores, así como la continuidad de las operaciones

7.1 Identificación del riesgo

La identificación de riesgos es un componente fundamental dentro del modelo de gestión del riesgo en la minería subterránea. Este proceso tiene como objetivo principal reconocer y describir todos los posibles riesgos que puedan influir o alterar la calidad del aire durante las operaciones mineras subterráneas. Los riesgos pueden originarse tanto en condiciones internas, relacionadas directamente con las operaciones de la mina, como en condiciones externas, derivadas del entorno más amplio en el que se desarrolla la actividad minera.

7.1.1 Contexto externo

El contexto externo abarca todos aquellos factores fuera del control inmediato de la operación minera, pero que pueden influir significativamente en la calidad del aire subterráneo y, por ende, en la seguridad de los trabajadores.

Tipos y características de los yacimientos

La importancia de considerar los tipos de yacimiento para evaluar los riesgos asociados con la presencia de gases dentro de una mina radica en que las características geológicas y mineralógicas de cada yacimiento influyen directamente en la generación y liberación de gases potencialmente peligrosos. A continuación, se describen ejemplos destacados:

Yacimientos de carbón

Conocidos por su alta propensión a la liberación de metano (CH₄), un gas inflamable y explosivo. Este fenómeno, denominado "desgasificación", ocurre como resultado de la descomposición orgánica de la materia vegetal que dio origen al carbón.

Yacimientos sulfurosos

En minas que explotan minerales sulfurosos, como la pirita (FeS₂), es común la generación de gases tóxicos como el anhídrido sulfuroso (SO₂). Este gas, liberado durante procesos de oxidación o reacción química, representa un riesgo crítico para la salud de los trabajadores, al ser altamente irritante para las vías respiratorias y los ojos.

Yacimientos con rocas carbonatadas

- La interacción de los carbonatos presentes en estas rocas con agua o ácidos puede liberar dióxido de carbono (CO₂). Debido a la interacción de los carbonatos con agua o con ácidos. La acumulación de este gas en espacios confinados puede desplazar el oxígeno disponible, incrementando el riesgo de asfixia para los trabajadores.

- Altura en la operación minera**

La altitud sobre el nivel del mar de una operación minera tiene un impacto significativo en la ventilación debido a las variaciones en la presión atmosférica y la densidad del aire a grandes alturas. Estos factores reducen la disponibilidad de oxígeno (O₂) y la eficiencia de los sistemas de ventilación. Como resultado, es necesario mover un mayor volumen de aire para mantener condiciones de trabajo seguras, lo que incrementa la demanda de energía y exige ajustes en el diseño del sistema de ventilación. Además, la menor cantidad de oxígeno disponible puede provocar hipoxia y fatiga en los trabajadores, lo que refuerza la importancia de contar con un sistema de ventilación optimizado que garantice un entorno laboral seguro y saludable.

- Temperatura de la región**

La temperatura ambiente es un factor crucial que considerar en el diseño de los circuitos de ventilación, ya que influye directamente en la capacidad del sistema para regular el calor dentro de la mina. En zonas cálidas, es fundamental que el sistema disponga de la capacidad necesaria para disipar eficientemente el calor generado por la maquinaria, las operaciones y la actividad geotérmica. Esto es esencial para prevenir el estrés térmico en los trabajadores y mantener la operatividad de los equipos. En cambio, en zonas frías, el sistema debe asegurar que el aire introducido no enfríe excesivamente las galerías, lo que podría afectar negativamente la salud de los trabajadores y reducir la eficiencia operativa.



▪ Humedad del sitio minero

La humedad es otro factor que puede afectar tanto la calidad del aire como la durabilidad de los equipos dentro de la mina. En áreas con alta humedad, el aire húmedo puede reducir la capacidad de enfriamiento del sistema de ventilación y acelerar la corrosión de estructuras y maquinaria, lo que incrementa los costos de mantenimiento y reduce la vida útil de los equipos. En climas secos, en cambio, es crucial evitar que la ventilación introduzca aire excesivamente seco, ya que esto podría causar problemas respiratorios en los trabajadores y generar polvo en suspensión, lo que aumenta el riesgo de explosiones de polvo. Por lo tanto, el sistema de ventilación debe estar diseñado para gestionar adecuadamente los niveles de humedad, garantizando un ambiente seguro, saludable y óptimo para las operaciones.

7.1.2 Contexto interno

El contexto interno se refiere a los factores de riesgo dentro de la operación de la organización minera que pueden influir en la calidad del aire subterráneo, y por ende la salud y seguridad de los trabajadores.

Atmósferas mineras

Mantener unas condiciones atmosféricas adecuadas dentro de la mina son fundamentales, debido a que las concentraciones de gases peligrosos y niveles de oxígeno (O₂) variables pueden afectar la seguridad de trabajadores y de las operaciones. En un entorno con acumulación de gases como metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y monóxido de carbono (CO), que pueden ser liberados desde el propio yacimiento o generados por la actividad minera, representa un grave riesgo de explosiones, intoxicaciones o asfixia si no se gestionan adecuadamente. Además, el difícil desplazamiento del oxígeno (O₂) por estos gases puede crear un ambiente insuficiente de aire limpio, poniendo en riesgo la salud y seguridad de los trabajadores.

Según lo establecido en el Decreto 1886 de 2015, se tienen identificados los gases peligrosos y tóxicos que

deben ser controlados dentro de las atmósferas mineras subterráneas, así como las concentraciones de oxígeno (O₂) suficientes para una atmósfera minera adecuada.

Gas peligros tóxico	Fórmula
Dióxido de carbono	CO ₂
Monóxido de carbono	CO
Ácido Sulfhídrico	H ₂ S
Anhídrido Sulfuroso	SO ₂
Óxido Nítrico	NO
Dióxido de Nitrógeno	NO ₂
Oxígeno	O ₂
Metano	CH ₄

Operaciones mineras

Las condiciones operativas en minería subterránea, como el uso de explosivos, la manipulación de maquinaria pesada, y el arranque de material, pueden generar atmósferas viciadas debido a la liberación inmediata de gases tóxicos y explosivos, como el monóxido de carbono (CO) y metano (CH₄), durante estas actividades. Además, la generación de polvo de carbón y otros materiales particulados puede reducir la calidad del aire y contribuir a la deficiencia de oxígeno al desplazar o al facilitar la combustión de gases inflamables. Estas condiciones crean un ambiente peligroso, aumentando el riesgo de asfixia, intoxicación y explosiones, lo que pone en peligro la salud y seguridad de los trabajadores si no se gestionan adecuadamente.

- Material particulado
- Polvo de carbón
- Inertización
- Equipos de combustión
- Uso de explosivos
- Gases en la atmósfera minera
- Gases explosivos
- Estructura de ventilación

Una infraestructura de ventilación ineficiente o inexistente en una mina subterránea puede incrementar significativamente los riesgos para los trabajadores, ya que un

mal funcionamiento o la presencia de otros peligros aumenta la probabilidad de eventos indeseados durante las operaciones mineras. El deterioro del cableado eléctrico, que puede generar chispas, y la falta de equipos certificados a prueba de explosiones elevan el riesgo de detonaciones. Además, los equipos de medición de gases mal calibrados no son capaces de detectar concentraciones peligrosas a tiempo, lo que impide la implementación de medidas preventivas. Estos factores combinados generan un entorno extremadamente peligroso, incrementando la probabilidad de accidentes graves y comprometiendo la seguridad de los trabajadores.

- Equipos de medición de gases portátiles o estacionarios
- Equipos eléctricos
- Subestaciones eléctricas
- Redes eléctricas
- Equipos de generación de energía para emergencias

Formación del personal

El personal minero debe estar debidamente capacitado sobre los riesgos a los que está expuesto, especialmente aquellos asociados con atmósferas viciadas y explosivas, y debe contar con una planificación de controles para mitigar dichos riesgos. Es esencial que los trabajadores comprendan la cantidad de aire necesaria para mantener condiciones seguras dentro de la mina, y estén capacitados en la identificación y manejo de gases tóxicos e inflamables, entendiendo los peligros que estos representan y cómo controlarlos.

El uso adecuado de equipos de medición de gases y de los equipos de protección individual (EPI) es crucial para detectar peligros y riesgos de manera oportuna. Además, es fundamental que los trabajadores estén familiarizados con la señalización de la mina, para poder identificar las zonas de riesgo y las rutas de escape, garantizando que todos conozcan los procedimientos de emergencia y actúen de manera efectiva en situaciones críticas.

- Aforos de ventilación
- Tableros de registros de gases
- Planos de rutas de evacuación
- Señalización de evacuación y emergencia
- Formación sobre los riesgos

7.2 Evaluación de escenarios de riesgo

La evaluación de escenarios de riesgos en minería subterránea es un proceso fundamental para identificar y anticipar situaciones que podrían poner en peligro la seguridad de los trabajadores. Este proceso debe ser sistemático y detallado, considerando las particularidades de cada operación minera y los riesgos específicos asociados.

A continuación, se expondrán los factores externos e internos que pueden modificar o afectar el buen funcionamiento de un circuito de ventilación en minería subterránea, junto con sus respectivas implicaciones.



7.2.1 Factor por tipo y característica de los yacimientos

La evaluación de los riesgos en minería subterránea derivado de las atmósferas viciadas se puede abordar a partir de la clasificación de los yacimientos por su ambiente de formación. Las atmósferas viciadas o contaminadas se componen de gases tóxicos, asfixiantes y explosivos; tanto la existencia como la concentración de estos, depende en parte del tipo de yacimiento.

Figura 14

Relación de factores de riesgo asociados al tipo de yacimiento.

FACTORES DE RIESGO ASOCIADOS AL TIPO DE YACIMIENTO POR SU ORIGEN			
YACIMIENTOS MAGMATICOS	YACIMIENTOS HIDROTERMALES	YACIMIENTOS SEDIMENTARIOS	YACIMIENTOS METAMORFICOS
Gases volcánicos residuales.	Gases derivados hidrotermales.	Gases de origen organico.	Liberacion de gases atrapados.
Bajos contenidos de oxigeno.	Riesgo de explosion.	Liberacion de CO ₂ .	Descomposicion de minerales.
	Condiciones acidas.	Oxigeno reducido.	
GASES ASOCIADOS			
Dioxido de azufre SO ₂	Ácido sulfídrico H ₂ S	Metano CH ₄	Diooxido de carbono CO ₂
Monoxido de carbono CO	Diooxido de carbono CO ₂	Diooxido de carbono CO ₂	Ácido sulfídrico H ₂ S
Diooxido de carbono CO ₂	Metano CH ₄		
Ácido sulfídrico H ₂ S			

Nota. La figura muestra la relación existente entre los factores de riesgo por atmósferas viciadas con los diferentes tipos de yacimientos, además los gases asociados a estos yacimientos.

A continuación, se describen algunos elementos de riesgo asociados a las atmósferas viciadas en diferentes tipos de depósitos, abordados desde su clasificación genética o por ambiente de formación, estos son, magmático, hidrotermal, sedimentario y metamórfico.

Yacimientos magmáticos

Se pueden identificar dos factores de riesgo principales en el contexto de las operaciones mineras subterráneas:

1. Gases volcánicos residuales

Presentes en depósitos asociados con sistemas volcánicos o cámaras magmáticas. Entre ellos, se pueden encontrar anhídrido sulfuroso (SO₂), monóxido

de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) y ácido sulfhídrico (H₂S). La migración de estos gases hacia las labores mineras puede verse facilitada por la presencia de fallas y fracturas en las rocas, lo que aumenta el riesgo de acumulaciones peligrosas.

2. Bajo contenido de oxígeno

La liberación de dióxido de carbono (CO₂) y otros gases puede desplazar y reducir significativamente la concentración de oxígeno en el aire de la mina. Esto no solo afecta la respiración de los trabajadores, sino que también incrementa los riesgos de hipoxia y otros problemas asociados con atmósferas deficientes en oxígeno (O₂).

Yacimientos hidrotermales

Los yacimientos hidrotermales presentan tres factores de riesgo principales:

1. Gases derivados de la actividad hidrotermal

Estos yacimientos se forman debido a la circulación de fluidos calientes a través de la corteza terrestre, liberando gases como ácido sulfhídrico (H₂S), dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄). Estos gases pueden acumularse en las formaciones rocosas, creando atmósferas peligrosas.

2. Riesgo de explosión

El metano (CH₄), altamente inflamable, representa un riesgo significativo. En concentraciones elevadas, su interacción con oxígeno (O₂) y una fuente de ignición puede desencadenar explosiones, lo que subraya la necesidad de monitorear y controlar estrictamente sus niveles.

3. Condiciones ácidas

La presencia de gases como el ácido sulfhídrico (H₂S) tiende a generar ambientes ácidos. Estas condiciones no solo representan un riesgo químico para el personal, sino que también pueden acelerar la corrosión de equipos, herramientas y estructuras de sostenimiento, incrementando los costos de mantenimiento y los riesgos operativos.

Yacimientos sedimentarios

En los yacimientos sedimentarios, se identifican tres factores de riesgo principales que deben ser considerados dentro de la evaluación de este tipo de yacimientos:

1. Gases derivados de la descomposición orgánica

Los depósitos sedimentarios que contienen material orgánico, como el carbón, tienden a liberar gases peligrosos como monóxido de carbono (CO) y metano (CH₄). El metano, debido a su alta inflamabilidad, es especialmente preocupante por su potencial de explosividad, lo que lo convierte en un factor crítico de evaluación y control.

2. Liberación de dióxido de carbono (CO₂)

Este fenómeno ocurre como resultado de la descomposición de carbonatos o de la presencia de rocas calcáreas en los depósitos sedimentarios. La acumulación de dióxido de carbono (CO₂) en el aire puede generar atmósferas asfixiantes, afectando tanto la seguridad como la eficiencia operativa.

3. Condiciones de oxígeno reducido

La oxidación de minerales y materia orgánica en estas formaciones consume oxígeno (O₂), reduciendo su concentración en el ambiente y aumentando el riesgo de hipoxia. Este factor requiere un monitoreo continuo y un diseño eficiente del sistema de ventilación para mantener condiciones seguras.

Yacimientos Metamórficos

En los yacimientos metamórficos, los riesgos se concentran principalmente en dos factores:

1. Liberación de gases atrapados

Durante la formación de estos yacimientos, es posible que gases como ácido sulfhídrico (H₂S), dióxido de carbono (CO₂) y, ocasionalmente, metano (CH₄) queden atrapados en las rocas. Durante la explotación minera, la liberación de estos gases puede generar atmósferas peligrosas, lo que requiere monitoreo constante y medidas de mitigación.

2. Descomposición de minerales

Algunos minerales formados en estos yacimientos pueden descomponerse durante las actividades de extracción, liberando gases peligrosos, como el dióxido de carbono (CO₂). Este fenómeno incrementa los riesgos para la seguridad y la salud de los trabajadores, además de plantear desafíos operativos adicionales.

Tabla 4

Nivel de riesgo asociado al tipo de yacimiento.



Nota. La tabla muestra la relación de los diferentes niveles de riesgo por atmósferas viciadas, relacionadas con los diferentes tipos de yacimiento según su origen.

7.2.2 Factor tectónico estructural

El factor tectónico-estructural desempeña un papel crucial en la formación, acumulación y migración de gases peligrosos en los depósitos minerales y las estructuras geológicas circundantes. Los movimientos tectónicos en la corteza terrestre, como fallamientos y fracturas, son responsables de crear vías de escape y migración para los gases atrapados.

Las diaclasas son fracturas presentes en las rocas que, al interconectarse entre sí o con cavidades dentro de la estructura rocosa, facilitan el tránsito y la liberación de gases. Este fenómeno adquiere especial relevancia en entornos de minería intensiva, donde las actividades de perforación y voladura pueden inducir la formación de nuevas fracturas o ampliar las ya existentes. Dicha alteración estructural aumenta el riesgo de liberación súbita de gases peligrosos hacia las áreas de trabajo.

Espaciamiento de las diaclasas

El espaciamiento se define como la distancia entre dos diaclasas o discontinuidades contiguas, bajo este entendido se pueden presentar dos escenarios, uno para las condiciones más propicias para la generación de atmósferas viciadas; otro escenario, para las condiciones menos propicias.



Figura 15

Relación de condiciones más y menos propicias para la generación de riesgos por atmósferas viciadas asociadas al espaciamiento entre diaclasas

ESPACIAMIENTO ENTRE DIACLASAS	
CONDICIONES MAS PROPICIAS PARA GENERACIÓN DE ATMÓSFERAS VICIADAS	CONDICIONES MENOS PROPICIAS PARA GENERACIÓN DE ATMÓSFERAS VICIADAS
Espaciamiento reducido entre diaclasas.	Amplio espaciado entre las diaclasas.
Orientación de las diaclasas en dirección favorable a la acumulación de gases.	Diaclasas orientadas perpendicularmente al sentido de las corrientes de ventilación.
Fallamiento en zonas diaclasadas.	Zonas diaclasadas sin fallamiento.

Se pueden establecer tres diferentes tipos de espaciamientos en función del grado de familiaridad entre las diaclasas, por lo que es importante definir que una familia de diaclasas es un conjunto de fracturas o fisuras en la roca que comparten características comunes, tales como, orientación, tipo, y origen. Es importante destacar que las diaclasas no presentan desplazamiento visible entre los bloques de roca adyacentes y son generadas por eventos tectónicos.

- **Espaciado total:** es la distancia medida entre dos o más diaclasas o discontinuidades consecutivas en una dirección determinada, independientemente de si pertenecen o no a la misma familia.
- **Espaciado de familia:** se refiere a la distancia entre dos diaclasas consecutivas que pertenecen a la misma familia. Esta medición se realiza en una dirección específica, sin que necesariamente sea perpendicular a las discontinuidades.
- **Espaciado normal de familia:** es el espaciado de familia medido de forma perpendicular a los planos de discontinuidad de una misma familia. Este tipo de medición es particularmente relevante para evaluar la densidad y distribución uniforme de las fracturas dentro de una familia específica.

Tabla 5

Descripción del espaciado entre diaclasas.

ESPACIADO (cm)	DESCRIPCIÓN
0 a 2	Extremadamente cerrado
2 a 6	Muy cerrado
6 a 20	Cerrado
20 a 60	Moderado
60 a 200	Amplio
200 a 600	Muy amplio
> 600	Extremadamente amplio

Nota. La tabla muestra la descripción de la distancia de espaciado en centímetros del espaciado entre diaclasas. ISRM (1981).

La abertura de las diaclasas se define como la distancia perpendicular entre cada una de las dos superficies separadas por la discontinuidad, es la separación entre dos labios de una misma diaclasa o discontinuidad. La descripción de discontinuidades en función de la abertura se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 6

Descripción de la abertura de las diaclasas.

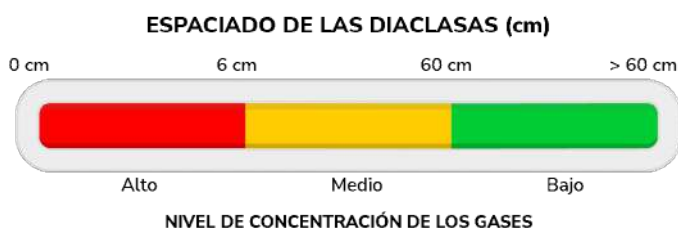
ABERTURA (mm)	DESCRIPCIÓN
0 a 0,1	Muy cerrada
0,1 a 0,25	Cerrada
0,25 a 0,5	Parcialmente abierta
0,5 a 2,5	Abierta
2,5 a 10	Moderadamente ancha
10 a 100	Muy ancha
100 a 1000	Extremadamente ancha
> 1000	Cavernosa

Nota. La tabla muestra la descripción de la abertura de las diaclasas medida en milímetros. ISRM (1981).

El comportamiento de los fluidos, ya sean líquidos o gaseosos dentro de la roca depende en gran medida de la abertura y espaciado de las diaclasas y las estructuras de falla, se propone los siguientes criterios para la evaluación del riesgo por atmósferas viciadas o contaminadas en la minería subterránea.

Tabla 7

Nivel de riesgo asociado a la relación entre el espaciado y abertura de las diaclasas.



Nota. La figura muestra los diferentes niveles de riesgo asociados a los posibles volúmenes y concentraciones de gas por el espaciado y abertura de las diaclasas.

Fallamiento

Las fallas geológicas pueden actuar como conductos que facilitan el flujo de gases a lo largo de las rocas afectadas, permitiendo que estos alcancen las labores mineras. Adicionalmente, a lo largo de estas estructuras pueden liberarse gases atrapados en los estratos rocosos. En este contexto, la presencia de zonas de falla en operaciones de minería subterránea representa riesgos significativos relacionados con atmósferas contaminadas. Entre estos riesgos se encuentran la concentración y migración de gases, así como la posible ocurrencia de desprendimientos o derrumbes que podrían obstruir las vías de ventilación.

Es posible clasificar los niveles de riesgo según el grado de fallamiento en una zona específica. Esta evaluación depende de factores como la presencia de zonas de falla, el tamaño de dichas estructuras y el nivel de actividad tectónica asociado.

Tabla 8

Nivel de riesgo para atmósferas contaminadas asociado a las zonas de fallamiento en operaciones de minería subterránea.



Nota. La figura muestra los niveles de riesgo por concentración y migración de gases asociados al fallamiento y actividad tectónica.

Plegamiento

Los pliegues son estructuras geológicas capaces de crear trampas naturales para los gases, especialmente en los anticlinales, pliegue convexo hacia arriba, donde se pueden acumular gases que pueden viciar el aire de la mina. También y dependiendo de la geometría del plegamiento, la roca puede tener mayor grado de fractura hacia el núcleo debido a la compresión intensa, incrementando la permeabilidad, que a su vez favorece la migración de gases peligrosos.

Figura 16

Ubicación del gas en el núcleo de un anticlinal



Nota. La figura muestra cómo los gases más ligeros, tienden a ascender y acumularse en la parte superior del pliegue anticlinal.

De acuerdo con lo anterior, se puede clasificar el grado de riesgo de acuerdo con el tipo de estructura o plegamiento.



Tabla 9

Nivel de riesgo para atmósferas contaminadas asociado a las estructuras de plegamiento.

NIVEL DE RIESGO POR PLEGAMIENTO		
Bajo	Medio	Alto
Flancos de pliegues o monocinales.	Estructura plegada sinclinal.	Estructura plegada anticlinal.

Nota. La expresan los niveles de riesgo por concentración de gases asociados al tipo de plegamiento.

Tabla 10

Riesgo por factores tectónico – estructurales.

RIESGO POR FACTORES TECTÓNICO - ESTRUCTURALES	
NIVEL DE RIESGO	DEFINICIÓN
Bajo	Levemente fracturada, ≤ 3 sistemas de discontinuidad. Muy espaciadas entre sí. (RQD 75% -90%). (2-6 fract/m).
Moderado	Moderadamente fracturada, muy bien trabada, no disturbada, bloques cúbicos formados por tres sistemas discontinuidades ortogonales, (RQD 50-75%) , (6 -12 fract/m).
Alto	Muy fracturada / Intensamente fracturada. Plegamiento y fallamiento, con muchas discontinuidades intersectadas formando bloques angulosos o irregulares. (RQD 25-50%), (12-20 fract/m).

7.2.3 Factor propiedades fisicoquímicas de rocas y suelos

El análisis fisicoquímico de rocas y suelos es esencial en entornos mineros subterráneos, ya que permite identificar la presencia de contaminantes y la generación de gases que podrían comprometer la calidad del aire. Estas propiedades son clave para detectar atmósferas viciadas, las cuales representan un riesgo tanto para la salud de los trabajadores como para la seguridad de las operaciones mineras.

Mediante la evaluación de variables como la composición mineralógica, la porosidad y la permeabilidad, es posible prever las condiciones que favorecen la acumulación de gases explosivos y tóxicos, tales como el metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Este conocimiento resulta crucial para la implementación de medidas preventivas y de control, asegurando un entorno de trabajo más seguro y saludable.

Con base a lo anterior, se proponen los siguientes criterios para la evaluación del riesgo, de acuerdo con los parámetros obtenidos en laboratorio:

7.2.3.1 Análisis de composición química

El análisis de la composición química de las rocas es un proceso esencial para comprender su comportamiento en entornos mineros subterráneos. Este análisis implica la identificación y cuantificación de los minerales presentes en las rocas, lo que permite evaluar su potencial reactividad con gases, como el oxígeno (O_2), metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2).

Los minerales, como los sulfuros, carbonatos y silicatos, pueden interactuar de diversas maneras con los gases presentes en el ambiente. Por ejemplo, las rocas que contienen sulfuros, como la pirita (FeS_2) pueden generar ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido sulfhídrico (H_2S) al reaccionar con agua y oxígeno (O_2), lo que puede llevar a la formación de atmósferas viciadas y la liberación de gases tóxicos. Asimismo, los carbonatos pueden reaccionar con ácidos, afectando la estabilidad del suelo y la liberación de gases tóxicos. Asimismo, los carbonatos pueden reaccionar con ácidos, afectando la estabilidad del suelo y la liberación de dióxido de carbono (CO_2).

A continuación, se presenta una tabla con ejemplos de parámetros químicos y sus rangos de riesgo.

Tabla 11

Parámetros químicos.

PARÁMETRO QUÍMICO	RANGO DE VALORES	NIVEL DE RIESGO	OBSERVACIONES
Concentración de Metano (CH ₄)	0 – 0.1%	Bajo	Sin riesgo significativo.
	0.1 – 0.5%	Moderado	Precauciones necesarias; monitoreo continuo.
	> 0.5%	Alto	Riesgo inminente; evacuación y ventilación urgente.
Concentración de Monóxido de Carbono (CO)	0 – 0.0025%	Moderado	Considerado seguro; monitoreo continuo.
	0.0025 – 0.005% y > 0.005	Alto	Requiere acción Inmediata
Concentración de Dióxido de Carbono (CO ₂)	0 - 0.03%	Bajo	Sin riesgo significativo.
	0.03 – 0.5%	Moderado	Precauciones necesarias; monitoreo continuo.
	> 0.5%	Alto	Riesgo inminente; evacuación y ventilación urgente.
Concentración de Oxígeno (O ₂)	20.9% (normal)	Bajo	Condiciones normales.
	19.5 - 20.9%	Moderado	Monitoreo recomendado.
	< 19.5%	Alto	Riesgo de asfixia; evacuación inmediata.
Presencia de Sulfuros	Ninguno	Bajo	Sin riesgo significativo.
	Presente, bajo contenido	Moderado	Monitoreo de gases tóxicos.
	Presente, alto contenido	Alto	Riesgo de generación de ácido y gases tóxicos.
pH del Suelo	6.0 - 8.0	Bajo	Condiciones normales.
	5.0 - 6.0	Moderado	Posible riesgo de corrosión.
	< 5.0	Alto	Riesgo de generación de gases ácidos.

A continuación, se presenta la tabla 12 que refleja una estimación aproximada del nivel de riesgo por composición química de suelos y rocas a partir de índices de campo y laboratorio.

Tabla 12

Clasificación del riesgo por composición química.

RIESGO POR COMPOSICIÓN QUÍMICA			
NIVEL DE RIESGO	DEFINICIÓN	EJEMPLO	OBSERVACIÓN
Bajo	No se presentan condiciones que puedan causar daño significativo a la salud humana o al medio ambiente.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Concentraciones de metano (CH₄) entre 0 y 0.1%. ▪ Concentraciones de dióxido de carbono (CO₂) entre 0 y 0.03%. ▪ pH del suelo entre 6.0 y 8.0. 	En este nivel, no se requieren medidas de seguridad especiales, aunque se recomienda un monitoreo constante para asegurar que las condiciones se mantengan estables. Estas medidas son particularmente relevantes si las concentraciones de gases, en función de los rangos estimados para la calificación de riesgo bajo, superan los límites permisibles, elevando su nivel de riesgo a moderado e incluso a alto. Además, se sugiere realizar mediciones del pH del suelo, un parámetro clave para evaluar su acidez o alcalinidad. Un pH inferior a 5.0 indica que el suelo es ácido, lo que puede señalar un riesgo asociado con la posible presencia de gases ácidos.
Moderado	Existen condiciones que podrían representar un riesgo potencial, requiriendo atención y monitoreo continuo.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Concentraciones de metano (CH₄) entre 0.1 y 0.5%. ▪ Concentraciones de monóxido de carbono (CO) entre 0 y 0.0025%. ▪ Concentraciones de oxígeno (O₂) entre 19.5% y 20.9%. ▪ pH del suelo entre 5.0 y 6.0. 	Se recomienda implementar medidas de seguridad, tales como el monitoreo regular y la preparación para posibles evacuaciones o acciones correctivas en caso de que las condiciones cambien. Esto es especialmente relevante si las concentraciones de gases, en función de los rangos estimados para la calificación de riesgo moderado, superan los límites permisibles y su nivel de riesgo asciende a alto. Además, se sugiere realizar mediciones del pH del suelo, un parámetro clave para evaluar su acidez o alcalinidad. Un pH inferior a 5.0 indica que el suelo es ácido, lo que puede señalar un riesgo asociado con la posible presencia de gases ácidos.
Alto	Situaciones que representan un peligro inmediato para la salud y la seguridad, requiriendo acciones urgentes.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Concentraciones de metano (CH₄) superiores al 0.5% ▪ Concentraciones de monóxido de carbono (CO) superiores a 0.005%. ▪ Concentraciones de dióxido de carbono (CO₂) superiores al 0.5%. ▪ Concentraciones de oxígeno (O) por debajo del 19.5%. ▪ Presencia de sulfuros en alto contenido. ▪ pH del suelo por debajo de 5.0. 	En este nivel, se deben tomar medidas inmediatas, como la evacuación de personas y la ventilación del área afectada, para prevenir daños graves a la salud. Esto es especialmente relevante si las concentraciones de gases, basadas en los rangos estimados para la calificación de riesgo alto, son iguales o superiores a los límites establecidos para este rango. Además, se sugiere realizar mediciones del pH del suelo, un parámetro clave para evaluar su acidez o alcalinidad. Un pH inferior a 5.0 indica que el suelo es ácido, lo que puede señalar un riesgo asociado con la posible presencia de gases ácidos.

7.2.3.2 Resistencia promedio a la compresión simple

Determina la resistencia de la roca, permite evaluar la competencia o dureza que tienen los respaldos de los mantos explotables. En una roca poco competente hay una mayor probabilidad de que se generen desprendimientos de gases, que una de mayor competencia. Existen muchas metodologías para determinar la resistencia a la compresión, pero aquí se va a dar relevancia al método a partir de índices de campo, sin embargo, hay que recordar que existen otros igual de prácticos como por ejemplo la medición utilizando el martillo Schmidt o más exhaustivos que se desarrollan en laboratorio, entre ellos el ensayo puntual y el de compresión uniaxial.

En la tabla 13 se presenta una estimación aproximada de la resistencia a la compresión de las rocas a partir de índices de campo.

Tabla 13

Resistencia a la compresión de las rocas a partir de índices de campo

CLASE	DESCRIPCIÓN	IDENTIFICACIÓN DE CAMPO	APROXIMACIÓN AL RANGO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE (MPA)	NIVEL DE RIESGO
R0	Roca extremadamente blanda	Se puede marcar con una uña	0.25 - 1.0	ALTO
R1	Roca muy blanda	La roca se desmenuza al golpear con la punta del martillo. Con una navaja se talla fácilmente	1 - 5.0	ALTO
R2	Roca Blanda	Se talla con dificultad con una navaja, con la punta del martillo se producen pequeñas marcas.	5 - 25	MODERADO
R3	Roca moderadamente dura	No puede tallarse con la navaja. Puede fracturarse con un golpe fuerte de martillo	25 - 50	MODERADO
R4	Roca dura	Se requiere más de un golpe con el martillo para fracturarla	50 - 100	BAJO
R5	Roca muy dura	Se requieren muchos golpes con el martillo para fracturarla	100 - 250	BAJO
R6	Roca extremadamente dura	Al golpearla con el martillo solo saltan esquirlas.	>250	BAJO

Nota. Normas de clasificación de rocas establecidas por el International Society for Rock Mechanics (ISRM).

En la tabla 14 se proponen criterios para la evaluación del riesgo por resistencia a la compresión simple.

Tabla 14

Clasificación del riesgo por resistencia promedio a la compresión simple.

RIESGO POR RESISTENCIA PROMEDIO A LA COMPRESIÓN SIMPLE	
NIVEL DE RIESGO	DEFINICIÓN
Bajo	Roca con alta resistencia, bajo riesgo de desprendimientos y fallas.
Moderado	Roca con resistencia moderada, riesgo controlable, pero sujeto de consideración.
Alto	Roca con baja resistencia, alta probabilidad de desprendimientos y fallas.

El Rock Quality Designation (RQD) o índice de calidad de la roca en español, es una metodología de clasificación que permite evaluar la calidad del macizo rocoso mediante la medición de su resistencia a la rotura cuando se someten a esfuerzos o tensiones internas, así como en presencia de otras estructuras geológicas. Estos fenómenos físicos se simulan en el laboratorio utilizando testigos de sondeos prospectivos o muestras recolectadas en afloramientos. Por lo tanto, antes de iniciar las fases mineras (desarrollo, preparación y explotación), es indispensable conocer las características geológicas, estructurales y fisicoquímicas tanto del yacimiento como de las rocas circundantes.

Los sondeos realizados en el área de estudio también permiten identificar los fenómenos de gasificación presentes en el yacimiento. A partir de esta información, se pueden delimitar zonas de riesgo que deben considerarse en el planeamiento minero, especialmente en la elaboración del plan de ventilación. El RQD está directamente relacionado con la presencia de gases en la mina. Si el yacimiento o las rocas circundantes presentan una mala calidad estructural, caracterizada por diaclasamiento, fallas o baja resistencia a la compresión, existe una mayor probabilidad de desprendimiento de gases, lo que puede comprometer la atmósfera de la mina.

7.2.3.3 Permeabilidad y porosidad

Permeabilidad

La permeabilidad es la capacidad de un material para permitir el paso de fluidos a través de él. En el contexto de las rocas, la permeabilidad afecta la migración de gases y líquidos. Las rocas con alta permeabilidad permiten un flujo más fácil de aire, lo que puede diluir gases nocivos. Sin embargo, también pueden facilitar la entrada de contaminantes.

- Factores que afectan la permeabilidad
- Estructura geológica: la fracturación y la disposición de las capas rocosas influyen en la permeabilidad.
- Tipo de roca: rocas sedimentarias suelen tener mayor permeabilidad que rocas ígneas o metamórficas.
- Condiciones ambientales: la presión y temperatura del entorno minero pueden alterar la permeabilidad.

Porosidad

La porosidad se refiere al volumen de espacios vacíos dentro de un material. Una alta porosidad en las rocas puede significar una mayor capacidad para almacenar gases, lo que podría contribuir a la generación de atmósferas viciadas.

Tipos de porosidad

- Porosidad Primaria: espacios que se forman durante la deposición de la roca.
- Porosidad Secundaria: espacios creados por procesos como la fracturación o disolución.

Relación entre permeabilidad y porosidad en la generación de atmósferas viciadas

Estos parámetros determinan la facilidad con que los gases y fluidos pueden trasladarse a través de las rocas y suelos. Las formaciones con alta permeabilidad facilitan una mejor circulación de fluidos, lo que puede contribuir a la dispersión de gases peligrosos. En contraste, las rocas con baja permeabilidad, como las arcillas o ciertos tipos de rocas ígneas, pueden atrapar gases, provocando su acumulación en algunas labores mineras. Este confinamiento aumenta el riesgo de la aparición de atmósferas viciadas.

La interacción entre la permeabilidad y la porosidad de las rocas es crucial para entender la generación de atmósferas viciadas. Rocas con alta porosidad y baja permeabilidad pueden actuar como reservorios de gases, mientras que aquellas con alta permeabilidad pueden facilitar la dispersión de estos gases.

La cantidad de ensayos y el área de cobertura se determinan con base en normativas internacionales, como las establecidas por la ISO, y normativas locales, como el Decreto 1886 de 2015. Estos ensayos se llevan a cabo de acuerdo con la evaluación geológica y geotécnica del yacimiento, requiriendo una mayor cantidad de pruebas en áreas geológicamente heterogéneas.

Las recomendaciones técnicas de la Society for Mining, Metallurgy & Exploration sugieren realizar ensayos trimestrales de permeabilidad y porosidad. La frecuencia de estos ensayos varía en función de la extensión del área de

explotación, la densidad de las operaciones y el historial de acumulación de gases o incidentes previos en la mina.



Cantidad y frecuencia de ensayos

1. Ensayos de permeabilidad

- Exploración: 3 ensayos por cada 1000 m² cuadrados para obtener una línea base antes de las operaciones.
- Producción: 2 ensayos por cada 1000 m², realizados trimestralmente para monitorear cambios en las condiciones de la roca.

1. Ensayos de porosidad

- Exploración: 3 ensayos por cada 1000 m² para evaluar el volumen de los poros en las rocas.
- Producción: 2 ensayos por cada 1000 m², realizados trimestralmente para asegurar una monitorización constante.

Estos ensayos permiten obtener una imagen precisa de las propiedades de las rocas y su capacidad para mover y almacenar gases. La frecuencia y número de ensayos aseguran una monitorización constante de las condiciones de la atmósfera minera, garantizando la seguridad de las operaciones y de los trabajadores.

A continuación, se presentan las características generales de estos parámetros para yacimientos magmáticos, metamórficos, hidrotermales y sedimentarios.

Yacimientos magmáticos

- Porosidad: generalmente baja, ya que las rocas ígneas suelen ser densas y compactas. La porosidad puede variar dependiendo de la presencia de fracturas o vesículas en rocas volcánicas.
- Permeabilidad: también baja, aunque puede aumentar en áreas con fracturas. La permeabilidad es limitada debido a la estructura cristalina de las rocas.

Yacimientos metamórficos

- Porosidad: típicamente baja, ya que el proceso metamórfico compacta las rocas. Sin embargo, algunas rocas metamórficas pueden tener porosidad significativa si contienen minerales como la mica.

- Permeabilidad: generalmente baja, pero puede ser variable en función de la presencia de fracturas o foliaciones. Las rocas metamórficas pueden ser más permeables en zonas de deformación.

Yacimientos hidrotermales

- Porosidad: puede ser variable, dependiendo de la mineralogía y la historia térmica. Las rocas hidrotermales pueden tener porosidad significativa debido a la alteración mineral.
- Permeabilidad: puede ser alta en zonas donde se han formado fracturas o cavidades por procesos hidrotermales. La permeabilidad es crucial para la circulación de fluidos.

Yacimientos sedimentarios

- Porosidad: en general alta, especialmente en rocas como areniscas y limolitas. La porosidad puede variar dependiendo del tamaño de los granos y la cementación.
- Permeabilidad: también alta en rocas bien clasificadas y poco cementadas. Sin embargo, puede ser baja en rocas con alta cementación o en lutitas.

Tabla 15

Relación entre permeabilidad y porosidad en la generación de atmósferas viciadas.

TIPO DE YACIMIENTO	POROSIDAD	PERMEABILIDAD	FACTORES ADICIONALES	TIPOS DE ROCAS
Yacimientos Magmáticos	0.1% - 5% (baja)	0.01 - 1 mD (baja)	La porosidad puede ser mayor en rocas volcánicas con vesículas. Las fracturas pueden permitir la circulación de fluidos, aumentando la permeabilidad.	Granito, Basalto, Diorita
Yacimientos Metamórficos	<1% (muy baja)	<0.01 mD (muy baja)	La presencia de fracturas o foliaciones puede aumentar la permeabilidad, aunque la porosidad sigue siendo baja.	Gneis, Mármol, Esquisto
Yacimientos Hidrotermales	5% - 15% (variable)	1 - 1000 mD (alta en zonas de fracturamiento)	La actividad hidrotermal puede crear poros adicionales y aumentar la permeabilidad a través de fracturas y cavidades, facilitando el flujo de fluidos y gases.	Cuarzo, Calcita, Sulfuros

Yacimientos Sedimentarios	10% - 30% (alta en areniscas y carbonatos)	10 - 1000 mD (alta en areniscas y calizas porosas)	Variable, puede ser alto en rocas clásticas y carbonatadas, bajo en lutitas. La porosidad y permeabilidad son altamente dependientes de la historia diagenética; la cementación puede reducir ambos parámetros, mientras que la presencia de fracturas puede mejorarlos.	Arenisca, Caliza, Lutita, Carbón
----------------------------------	--	--	--	----------------------------------

En la tabla 16 se agrupan los parámetros de porosidad y permeabilidad en función de su nivel de riesgo, facilitando la identificación de los riesgos asociados en la generación de atmósferas viciadas.

Tabla 16

Clasificación del riesgo asociado a los parámetros de porosidad y permeabilidad.

RIESGO ASOCIADO A LOS PARÁMETROS DE POROSIDAD Y PERMEABILIDAD		
NIVEL DE RIESGO	PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN DEL RIESGO
Alto	Porosidad Alta	Puede actuar como reservorio para gases peligrosos, aumentando el riesgo de acumulación.
	Permeabilidad Alta	Facilita la migración rápida de gases tóxicos hacia el espacio de trabajo.
	Fracturas en Rocas	Aumentan la permeabilidad y pueden permitir la rápida entrada de gases peligrosos.
Moderado	Porosidad Baja	Menor riesgo de acumulación de gases, pero puede limitar la ventilación adecuada.
	Permeabilidad Baja	Reduce la migración de gases, pero puede generar presión acumulada en zonas confinadas.
	Variabilidad en Porosidad	Puede llevar a zonas de acumulación de gases, creando puntos de riesgo.

7.2.3.4 Pruebas de adsorción de gases

Las pruebas de adsorción de gases son esenciales para medir la capacidad de las rocas para adsorber gases. Este proceso puede indicar la susceptibilidad de las rocas a la acumulación de gases, lo cual es crucial en diversas aplicaciones, como la exploración de hidrocarburos y la evaluación de la seguridad en minas. La adsorción puede ser de dos tipos:

- Fisisorción: adsorción física donde el gas se adhiere a la superficie de la roca sin cambiar su naturaleza química.
- Quimisorción: adsorción química donde el gas reacciona con la superficie de la roca, formando una nueva especie química.

Uso de pruebas de adsorción de gases en minería subterránea

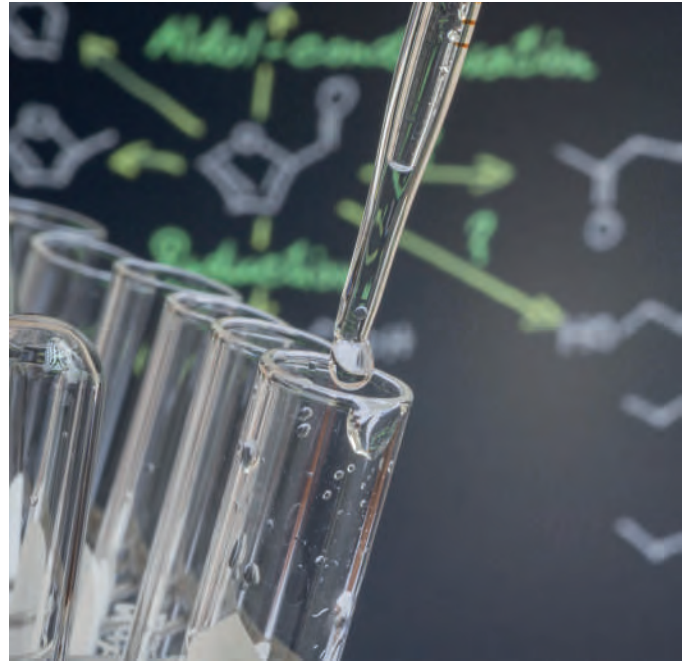
Identificación de Riesgos: las pruebas de adsorción de gases se utilizan para identificar la presencia de gases en las rocas, lo cual es esencial para evaluar los riesgos asociados a la acumulación de gases en las minas.

1. **Evaluación de Seguridad:** estas pruebas ayudan a determinar la seguridad de las operaciones mineras al medir la capacidad de las rocas para adsorber gases. Esto es crucial para prevenir explosiones y otros incidentes relacionados con gases.
2. **Monitoreo Continuo:** las pruebas de adsorción de gases deben realizarse de manera continua para monitorear los niveles de gases en las rocas y asegurar que no se acumulen en cantidades peligrosas.

¿Cuándo usarlas?

1. **Durante la Exploración:** antes del inicio de las operaciones mineras, se deben realizar pruebas de adsorción de gases para evaluar la presencia en las rocas y determinar los riesgos potenciales.
2. **Durante la Producción:** a lo largo de las operaciones mineras, estas pruebas deben realizarse regularmente para monitorear los niveles de gases y asegurar que no se acumulen en cantidades peligrosas.

En Caso de Incidentes: si se detecta una acumulación de gases peligrosa, se deben realizar pruebas adicionales para evaluar la situación y tomar medidas necesarias para mitigar los riesgos.



Frecuencia de las pruebas

- Exploración: antes de iniciar las operaciones mineras.
- Producción: de forma continua y regular, al menos una vez por semana o según las normativas locales.
- Incidentes: en cualquier momento en que se detecte una acumulación de gases peligrosa.

Cromatografía de gases

La Cromatografía de Gases (CG) es una técnica analítica que se utiliza para separar y analizar los componentes de una mezcla de gases. Funciona mediante la volatilización de la muestra y su transporte a través de una columna cromatográfica por un gas portador (como helio o nitrógeno). Los componentes se separan en función de su interacción con la fase estacionaria de la columna.

Existen dos tipos principales:

- Cromatografía Gas-Sólido (CGS): utiliza una fase estacionaria sólida.
- Cromatografía Gas-Líquido (CGL): utiliza una fase estacionaria líquida, siendo la más común

En la tabla 17 se presentan algunos parámetros en pruebas de adsorción y cromatografía de gases para minería subterránea:

Tabla 17

Parámetros en pruebas de adsorción y Cromatografía de gases para minería subterránea.

PARÁMETRO	PRUEBAS DE ADSORCIÓN DE GASES	CROMATOGRAFÍA DE GASES
Objetivo	Medir capacidad de adsorción (e.g., metano (CH ₄), dióxido de carbono (CO ₂))	Separar y analizar componentes
Tipo de adsorción	Fisorción, Quimisorción	No aplica
Fase estacionaria	No aplica	Sólida (CGS), Líquida (CGL)
Gas portador	No aplica	Helio, Nitrógeno
Temperatura	Variable según la roca	Alta (para volatilizar muestra)
Presión	Variable según la roca	Atmosférica o controlada
Tiempo de análisis	Variable	Rápido
Aplicaciones	Exploración de hidrocarburos, seguridad en minas	Análisis de mezclas de gases
Detección de gases tóxicos	Sí	Sí
Evaluación de seguridad	Sí	Sí



En la tabla 18 se propone los siguientes criterios para la evaluación del riesgo por capacidad de adsorción y concentración de gases:

Tabla 18

Parámetros para establecer el nivel de riesgo en función de las concentraciones de gases y la capacidad de adsorción.

GAS	CONCENTRACIÓN PERMISIBLE	CONCENTRACIÓN DE ALARMA	CONCENTRACIÓN CRÍTICA	EVALUACIÓN DEL RIESGO
Metano (CH ₄)	< 1% v/v	1% - 2% v/v	> 2% v/v	Nivel Bajo: < 1%
				Nivel Medio: 1% - 2%
				Nivel Alto: > 2%
Monóxido de Carbono (CO)	< 35 ppm	35 - 100 ppm	> 100 ppm	Nivel Bajo: < 35 ppm
				Nivel Medio: 35 - 100 ppm
				Nivel Alto: > 100 ppm
Dióxido de Carbono (CO ₂)	< 1.5% v/v	1.5% - 3% v/v	> 3% v/v	Nivel Bajo: < 1.5%
				Nivel Medio: 1.5% - 3%
				Nivel Alto: > 3%
Ácido Sulfhídrico (H ₂ S)	< 10 ppm	10 - 20 ppm	> 20 ppm	Nivel Bajo: < 10 ppm
				Nivel Medio: 10 - 20 ppm
				Nivel Alto: > 20 ppm
Oxígeno (O ₂)	> 19.5% v/v	18% - 19.5% v/v	< 18% v/v	Nivel Bajo: > 19.5%
				Nivel Medio: 18% - 19.5%
				Nivel Alto: < 18% v/v

80 Tabla 19

Clasificación del riesgo por capacidad de adsorción y concentración de gases.

RIESGO POR CAPACIDAD DE ADSORCIÓN Y CONCENTRACIÓN DE GASES	
NIVEL DE RIESGO	DEFINICIÓN
Bajo	Concentraciones de gases dentro de los límites permisibles y una capacidad de adsorción adecuada.
Moderado	Concentraciones de gases cercanas a los límites de alarma, con una capacidad de adsorción moderada.
Alto	Las concentraciones de gases superan los niveles de alarma o críticos y la capacidad de adsorción es baja.

Recomendaciones

Para aplicar la cromatografía de gases en la evaluación de atmósferas viciadas o contaminadas en minería subterránea, se deben seguir ciertas recomendaciones, detalladas a continuación.

¿Cómo?

1. Preparación de la Muestra: la muestra de aire debe ser recolectada de manera representativa de la atmósfera minera.
2. Análisis: la muestra se volatiliza y se transporta a través de una columna cromatográfica por un gas portador. Los componentes se separan en función de su interacción con la fase estacionaria de la columna.

¿Cuándo?

1. Durante la exploración: antes de iniciar las operaciones mineras, para evaluar la presencia de gases.
2. Durante la producción: regularmente, para monitorear los niveles de gases y asegurar que no se acumulen en cantidades peligrosas.
3. En caso de incidentes: al detectar una acumulación de gases peligrosa, para evaluar la situación y tomar medidas necesarias.

¿Dónde?

1. En puntos estratégicos: áreas clave de la mina donde se espera una mayor acumulación de gases.
2. En zonas de trabajo: áreas donde los trabajadores están presentes y donde se realizan actividades mineras.

Frecuencia

1. Exploración: una vez antes de iniciar las operaciones.
2. Producción: de forma continua y regular, al menos una vez por semana o según las normativas locales.
3. Incidentes: en cualquier momento en que se detecte una acumulación de gases peligrosa.

Estas recomendaciones ayudan a garantizar la seguridad y la eficiencia en las operaciones mineras subterráneas.

7.2.4 Factor altura

La altura a la que se encuentra ubicada una mina influye significativamente en las condiciones ambientales dentro de la operación, especialmente en lo referente a la cantidad de aire necesaria para mantener un ambiente seguro para los trabajadores. A continuación, se detalla cómo la altitud impacta estas condiciones:

- Densidad del aire: a medida que la altitud aumenta, la presión atmosférica disminuye, reduciendo la densidad del aire. Esto implica que, en una mina situada a gran altura, cada metro cúbico de aire contiene menos oxígeno y otros gases en comparación con las condiciones a nivel del mar. Para compensar esta menor densidad, es necesario un mayor volumen de aire para proporcionar la misma cantidad de oxígeno a los trabajadores.
- Eficiencia de la ventilación: los sistemas de ventilación en minas subterráneas están diseñados para diluir y remover contaminantes como polvo, gases tóxicos y calor. Sin embargo, en altitudes elevadas, la menor densidad del aire puede reducir la eficiencia de estos sistemas, requiriendo ajustes en los caudales de ventilación para garantizar un ambiente seguro.
- Efectos fisiológicos en los trabajadores: en altitudes mayores, los trabajadores pueden experimentar efectos fisiológicos derivados de la baja disponibilidad de oxígeno, tales como fatiga, disminución de la capacidad física y mental, e incluso el riesgo de padecer mal de altura. Esto incrementa la necesidad de una ventilación adecuada que mantenga los niveles de O₂ dentro de rangos seguros.
- Cálculos de ventilación: los cálculos de ventilación deben adaptarse a la altitud específica de la mina. Esto implica ajustar los caudales de aire para asegurar que, a pesar de la menor densidad del aire, se suministre suficiente O₂ y se eliminen eficientemente los contaminantes.

Esta es la importancia de clasificar las operaciones mineras subterráneas de acuerdo con el sitio donde se encuentra ubicada en altura. El (Decreto 1886, 2015, art. 54) define 2 condiciones de cantidad de aire que se debe introducir en una operación minera con relación a cada trabajador.

Tabla 20

Volumen de aire requerido según la ubicación de la mina.

ALTURA DE LA OPERACIÓN MINERA	CAUDAL DE AIRE POR PERSONA (m ³ /min)
Excavaciones minerales hasta mil quinientos metros sobre el nivel del mar. (1.500 m.s.n.m)	3 m ³ /min
Excavaciones mineras de mil quinientos metros en adelante sobre el nivel del mar. (1.500 m.s.n.m)	6 m ³ /min

7.2.5 Factor de temperatura

La ubicación de la operación minera es un aspecto clave para establecer si el volumen de aire que ingresa a las diferentes labores mineras es suficiente, no solo para diluir las concentraciones de gases y material particulado peligroso, sino también para controlar el aumento de temperatura ambiente a medida que se profundice en la explotación. De acuerdo a lo anterior se debe tener en cuenta:

- Temperatura del exterior
- Calentamiento por compresión del aire durante el descenso a la mina.
- Temperatura de la roca
- Procesos endotérmicos
- Procesos exotérmicos
- Caudal de ventilación.

82 La temperatura dentro de la mina debe ser calculada de tal manera que se asegure una sensación térmica confortable, aspecto que depende principalmente de la humedad relativa y la velocidad del aire.



Aumento de la temperatura por compresión

La ley de los gases ideales establece la relación que existe entre la temperatura, el volumen y la presión. Cuando la presión aumenta también lo hace la temperatura en la misma proporción;

$$T = T_0 + 0.0098H$$

Donde:

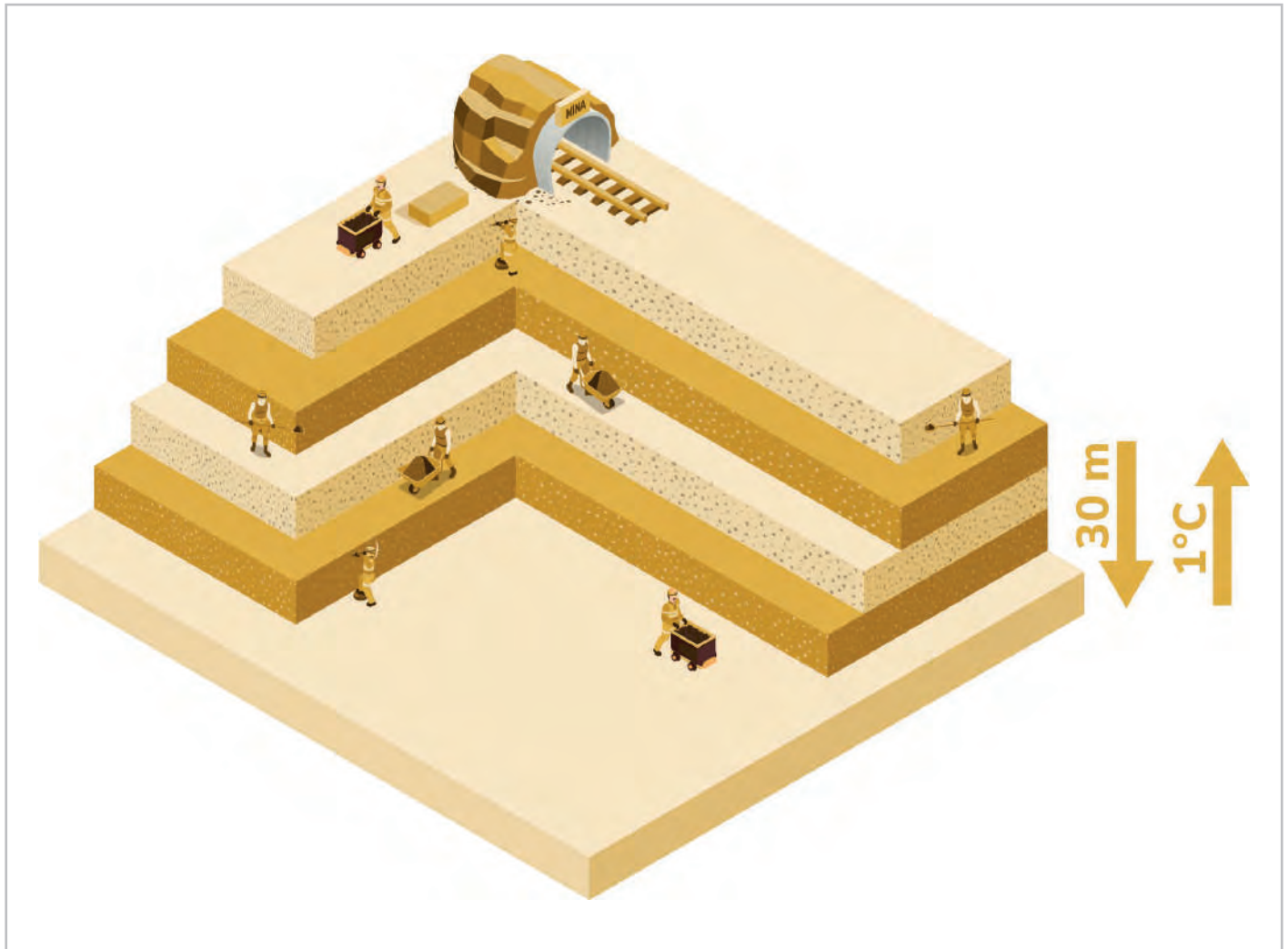
T_0 = Temperatura inicial (Temperatura ambiente)

H = Altura vertical en profundidad medida desde la superficie

De acuerdo con lo establecido en las definiciones dadas por el artículo 7 del Decreto 1886 de 2015, dentro de las leyes de ventilación, por cada 30 metros verticales que se descienda en la mina, medidos desde superficie la temperatura aumenta en 1°C.

Figura 17

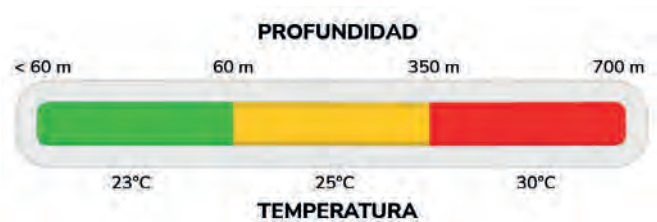
Comportamiento de la temperatura según la profundidad de la explotación.



Para hacer una clasificación del nivel de riesgo se propone trabajar con una temperatura ambiente promedio de partida de 23°C, y de acuerdo con las variaciones de profundidad y el límite máximo de temperatura, en el cual un trabajador puede adelantar actividades de manera segura y cómoda. En la tabla 21 se proponen los siguientes criterios de evaluación.

Tabla 21

Valoración del riesgo humedad - temperatura.



Para una profundidad mayor a 700 m en las condiciones iniciales propuestas únicamente se puede ingresar a la mina con un sistema de refrigeración, y/o optimizando la ventilación. Estas variables se relacionan, para definir los efectos directos que tienen en la porosidad de las rocas acompañantes de la mineralización y el confort térmico de los trabajadores. Según lo establecido por Juan Herrera Herbert, en su libro Introducción a la Ventilación Minera, el aire no es seco, sino que es húmedo ya que tiene vapor de agua, por ello es necesario definir la concentración de humedad en el aire de la mina. En la práctica se han establecido las siguientes condiciones: humedad absoluta, humedad relativa y grado de saturación.

El contenido de humedad en el aire se puede determinar a partir de la temperatura seca y temperatura húmeda. Para esta medición usualmente se usan los termómetros de bulbo húmedo y seco, y un termohigroanemómetro. Con base en lo anterior es posible calcular la Temperatura equivalente así:

$$Te = 0.7th + 0.33ts - V$$

Donde:

- Te= Temperatura equivalente
- Th=Temperatura Húmeda
- Ts=Temperatura seca
- V= velocidad de circulación de aire

El aumento en el flujo de aire en la ventilación juega un papel importante en la velocidad (m/s), y para la reducción de la ts y th.

De acuerdo con lo expuesto, se puede evaluar el grado de comodidad o confort térmico del trabajador. Para tal fin, se propone utilizar la siguiente formulación:

$$\text{Confort} = 40 + 72\%(ts + th)$$

Análisis de resultados de confort térmico:

- 30-50: muy satisfactorio
- 50-70: satisfactorio
- >70; insatisfactorio.

También es posible medir el factor de Confort térmico evaluando la temperatura efectiva Te;

Te < th y ts: aceptable

Te = th y ts: aceptable con control

Te > th y ts; inaceptable.

7.2.6 Factor humedad

La humedad absoluta corresponde a la relación entre el peso de vapor de agua Pv en kilogramos, mezclado con el peso del aire seco Pa.

$$X = Pv/Pa$$

El peso del aire seco Pa permanece constante, mientras que el vapor de agua Pv varía a causa de la evaporación o de la condensación del agua presente en la mezcla. Una cantidad de aire húmedo podrá ser definida por el peso del aire seco Pa que contenga:

$$Pa * (1 + X) \text{ kg}$$

Humedad relativa: la humedad relativa en el aire se obtiene comparando la presión parcial Pv de vapor en la mezcla con la presión de saturación Psh del vapor de agua a la misma temperatura. Existen muchos métodos para calcular la humedad relativa, en la presente guía se propone la fórmula de Sprung, ya que se puede determinar la humedad del aire a partir de mediciones realizadas con el psicrómetro.

$$Pv = Psh - a * P * (ts - th) = Psh - 0.00066 * P * (ts - th)$$

Donde:

- Pv= Presión de vapor
- Psh= Presión de saturación
- a= Constante psicrométrica (0.00066)
- th=Temperatura húmeda
- ts= Temperatura seca

Tabla 22

Valores de referencia para el cálculo de la presión de saturación

TABLA DE REFERENCIA PARA EL CÁLCULO DE LA PRESIÓN DE SATURACIÓN DE AGUA EN mm Hg									
°C	Tensión de vapor en mm Hg	°C	Tensión de vapor en mm Hg	°C	Tensión de vapor en mm Hg	°C	Tensión de vapor en mm Hg	°C	Tensión de vapor en mm Hg
1	4.92	11	9.83	21	18.64	31	33.68	41	58.33
2	5.29	12	10.51	22	19.82	32	35.65	42	61.49
3	5.68	13	11.22	23	21.05	33	37.72	43	64.79
4	6.09	14	11.98	24	22.36	34	39.88	44	68.25
5	6.53	15	12.78	25	23.75	35	42.17	45	71.87
6	6.99	16	13.52	26	25.20	36	44.45	46	75.64
7	7.51	17	14.52	27	26.73	37	47.06	47	79.59
8	8.04	18	15.46	28	28.34	38	49.68	48	83.72
9	8.60	19	16.46	29	30.03	39	52.43	49	88.02
10	9.20	20	17.52	30	31.81	40	55.31	49.9	92.06
$P_v = P_{sh} - 0.00066 * P_{barometrica} * (t_s - t_h)$									
$P_{barometrica} = 760 * ((1 - 0.0065 * h) / (273 + t_s))^{5.255}$									
Nota. Introducción a la ventilación minera de Juan Herrera Herbert. Cálculo de humedad y temperatura.									

Por lo anterior, en la tabla 23 se plantean los criterios para evaluar.

Tabla 23

Valoración de riesgo de Humedad y temperatura.



T (°C)	HR (Pv)	H. Absoluta (g/m ³)	H. Absoluta (kg/m ³)	Valoración
15	<10,38 < 81%	<0,36	39,26	Baja
15-20	10,38<=20,02 81%-86%	0,36<=0,67	39,26<=50	medio
20-31	20,02<=36,18 y > 38,18 86%-93% y >93%	0,67<=1,21 y >1,21	50<=66,15 y > 66,15	Alto

Determinación de valores para la valoración del riesgo por variaciones de Temperatura y Humedad:

1. Se definen las temperaturas promedio a las que un trabajador puede estar expuesto. Este promedio se establece mediante la recopilación de información primaria y secundaria obtenida de mediciones realizadas en aforos de ventilación.
2. Se evalúa el comportamiento de la Humedad Relativa (HR), Humedad Absoluta (x) y el peso de agua presente en la mezcla de aire. Para el cálculo de la HR, se toma como referencia específica la presión de vapor de agua contenido en el aire (Pv), la humedad absoluta X, se calcula mediante la relación del contenido de vapor de agua en el aire seco.
3. Se realizan iteraciones para el cálculo de HR a partir de Pv, y la Humedad Absoluta. También se toma como referencia las T (Temperatura ambiente), ts, th, la profundidad de la excavación (H), presión barométrica del punto donde se hace la medición, la presión de saturación y las constantes de cálculo referidas en la fórmula empírica de Sprung.
4. Los resultados de las iteraciones permiten establecer una valoración del riesgo donde HR máxima sería del 93%, por encima de este porcentaje se debe establecer controles específicos de ventilación.

Ejemplo de aplicación

En una mina de carbón subterránea, se busca medir la humedad relativa y absoluta, así como determinar el grado de confort térmico al que están expuestos los trabajadores. Para ello, se realiza un aforo de ventilación midiendo el caudal y la temperatura mediante un higroanemómetro. En este ejemplo, se utilizan únicamente los resultados de las mediciones de (Ts) y la (Th).

$$Pv = Psh - 0,00066 * Pbarometrica * (ts - th)$$

$$Pbarometrica = 760 * ((1 - 0.0065 * H) / (273 + ts))$$

^{Λ5.255}

ts y th= Temperatura seca y temperatura húmeda: Estos valores son resultado de la medición de temperatura efectuada en el aforo de ventilación.

HR(Pv): presión de vapor de agua en la atmosfera minera
Para calcular la Pv en la atmósfera minera, se hacen diferentes iteraciones en base a la medición de temperatura ambiente en el lugar donde se hizo la medición.

En las mediciones realizadas en el aforo de ventilación se obtuvieron los siguientes datos

th= 31°C
ts= 36°C
H= 500 m verticales
T= 31°C

Psh: valores de referencia para el cálculo de la presión de saturación en el agua, a partir de la temperatura ambiente

Cálculo de la presión barométrica

Pbarometrica: presión total en el sitio de la medición y se calcula:

$$Pbarometrica = 760 * ((1 - 0.0065 * H) / (273 + ts)) ^{5.255}$$

- Pbarometrica: 701,16
- H: 700
- ts: 26

Nota. Datos de Cálculo

$$Pv = Psh - 0,00066 * Pbarometrica * (ts - th)$$

Tabla 24

Datos de cálculo Pv

Ts>th; H= 700 m profundidad de excavación									
Pv	°C	Psh	K	P barométrica	Ts	Th	H. Absoluta	Pa (kg)	H. Absoluta (kg)
29,50	31	31,817	0,00066	701,16	36	31	0,98	29,97	59,47

Nota. Datos de Cálculo

Entonces podemos concluir que en esta mina la HR calculada luego de hacer el aforo está dentro del parámetro de aceptación < 93%. Sin embargo, si la profundidad de la excavación sigue aumentando entonces tanto la HR como la H. Absoluta se incrementarán también.

Cálculo de la Temperatura equivalente (Te)

Para el cálculo de la Te, se tomarán los valores de th y ts obtenidos en el aforo relacionado anteriormente, además se mide una velocidad de aire en frentes de explotación de V= 3.5 m/s.

$$Te=0.7th+0.33ts-V$$

Tabla 25

Datos de cálculo Te

Te (°C)	th	ts	V(m/s)
30,08	31	36	3,5

Nota. Datos de Cálculo

La Temperatura equivalente Te= 30.08°C, con base en este resultado se puede definir el grado de confort térmico al que está expuesto el trabajador durante su jornada laboral.

Cálculo del Confort Térmico

Confort: 40+72%(ts+th)

Confort:40+72% (31+36)

Confort: 88.24

Análisis de resultados de confort térmico:

- 30-50: muy satisfactorio
- 50-70: satisfactorio
- >70: insatisfactorio.

El confort térmico en el ejemplo nos da 88.24>70; un ambiente de trabajo insatisfactorio, que requiere de la implementación de controles que permitan disminuir la humedad y mejorar el ambiente de trabajo o confort térmico.

7.2.7 Factor material particulado

El convenio de Johannesburgo de 1979 define el polvo respirable como la fracción de partículas en suspensión dentro de una nube de polvo que puede atravesar los mecanismos de filtración del sistema respiratorio y llegar a los alvéolos pulmonares. Este polvo incluye el 98% de partículas de 1 μ (micra) de diámetro; el 75% de las de 3 μ; el 50% de las de 5 μ y ninguna por encima de 7 μ.

Dicho convenio también caracteriza el polvo respirable con base al tamaño y cantidad de la partícula.

- Fracción inspirable: fracción de partícula que se inspira de todo el conjunto de partículas en suspensión presente en el aire que respira el trabajador.
- Fracción respirable: es la parte de la fracción inspirable que penetra a los alvéolos pulmonares.

El Comité Europeo de Normalización (CEN) publicó en el año de 1993 la norma UNE 481, llamada "Atmósferas en

puestos de trabajo" la cual profundiza en la caracterización del material particulado, priorizando la incidencia de las partículas en el sistema respiratorio del trabajador.

Figura 18

Puntos de sedimentación de las fracciones de las partículas en el sistema respiratorio humano

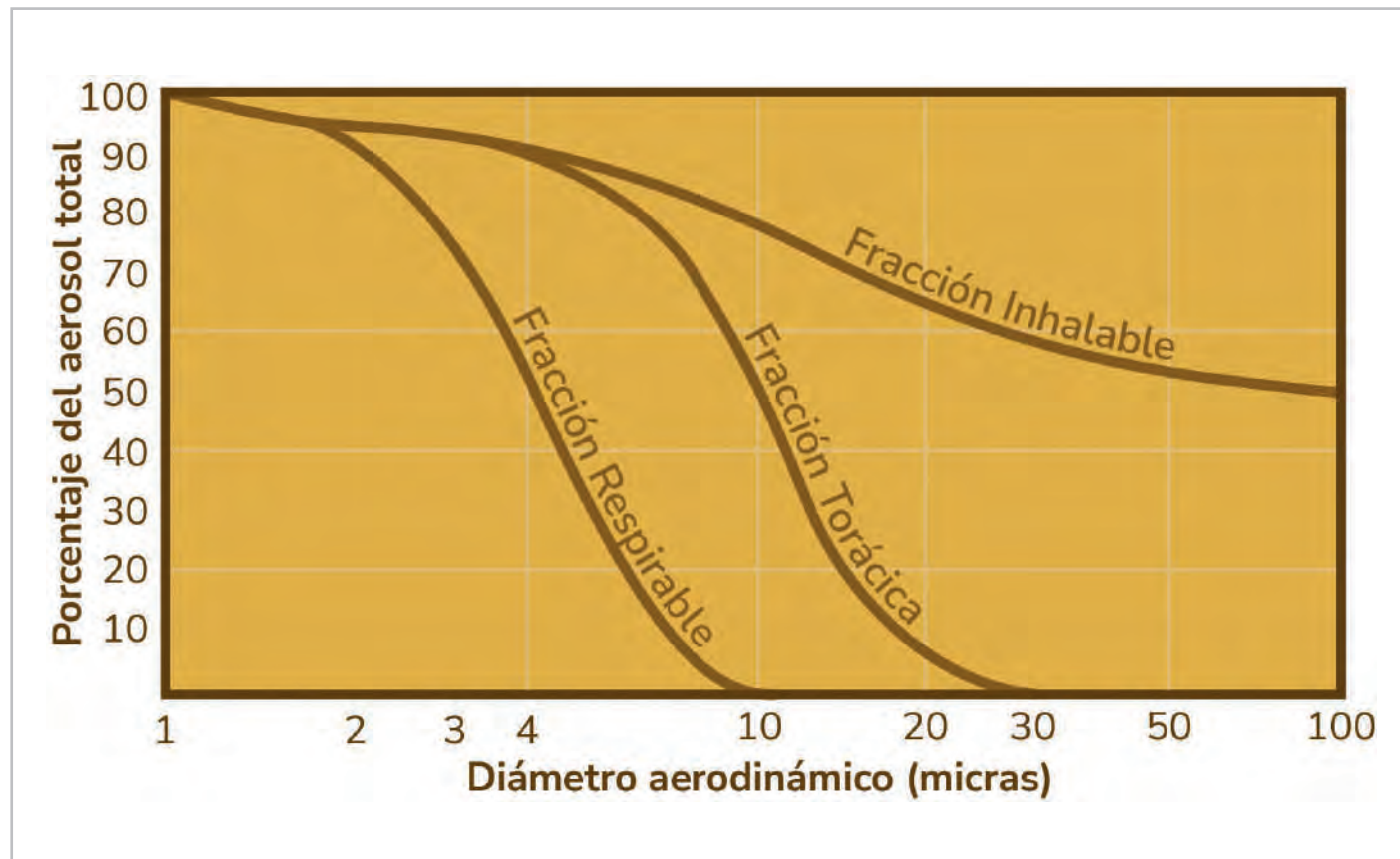


88

La norma de seguridad minera española define el polvo respirable como la fracción de material particulado con un tamaño inferior a 7 micras ($7\ \mu\text{m}$), capaz de impactar negativamente en la salud de los trabajadores. Para valorar el riesgo asociado a la concentración de material particulado, se propone utilizar esta variable de medición como referencia, junto con la velocidad del aire generada por los sistemas de ventilación, ya que esta influye directamente en la dispersión del material particulado en el ambiente laboral.

Figura 19

Probabilidad de que las partículas penetren el sistema respiratorio



Nota. Fundación Estatal Para la Prevención de Riesgos Laborales (2018).

En la figura 19 se describen los valores de concentración de sólidos en suspensión que pueden impactar negativamente la atmósfera de trabajo y, consecuentemente, la capacidad pulmonar de los trabajadores. Las afectaciones según el tamaño de las partículas se clasifican de la siguiente manera:

Fracción respirable: afecta partículas con tamaños inferiores a 10 μm .

Fracción torácica: comprende partículas mayores a 30 μm .

Fracción inhalable: incluye partículas en el rango de 30 a 100 μm .

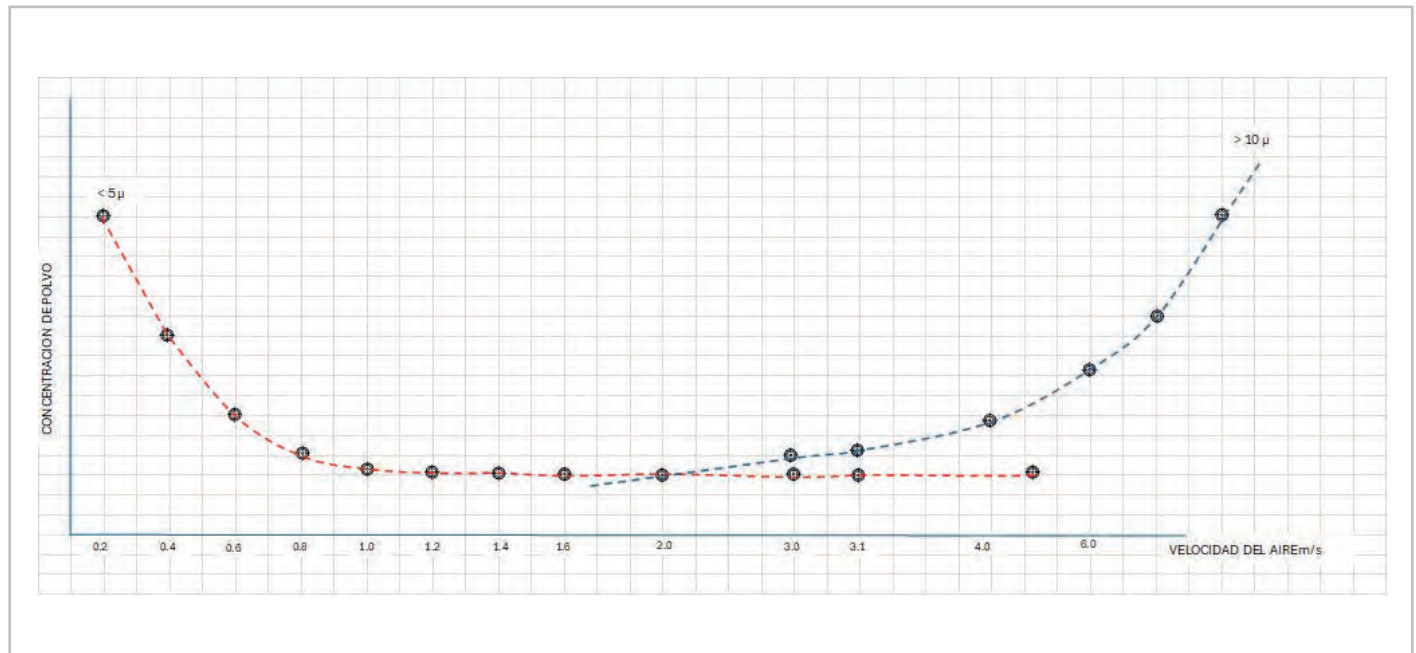
Uno de los compuestos químicos que requiere control estricto en actividades mineras es el dióxido de sílice (SiO_2), en especial la sílice cristalina, que es liberada por mine-

rales como el cuarzo y el carbón durante operaciones de perforación, explotación y trituración. Este compuesto es común en minas de carbón, minerales calcáreos y metales preciosos, representando un riesgo significativo para la salud respiratoria.

Adicionalmente, la velocidad del aire inyectado mediante ventilación mecanizada es una variable clave en la valoración del riesgo. En la figura 20 se ilustra el comportamiento de las concentraciones de polvo en relación con la velocidad del aire.

Figura 20

Comportamientos de las partículas de polvo con relación a la velocidad del aire



Nota. Esta figura muestra el comportamiento de las concentraciones de partículas de polvo con relación a la velocidad del caudal de aire. (Herrera) 2019.

- En partículas < 5 μm, la relación velocidad- concentración es inversamente proporcional, es decir que a mayor la velocidad del aire, menor es la concentración polvo en los frentes de trabajo, y a menor velocidad mayor será la concentración de polvo
- En partículas >10 μm, la relación velocidad -concentración es directamente proporcional, es decir que a mayor velocidad de aire mayor será la concentración de polvo, y a menor velocidad menor concentración de polvo.

En minería subterránea y otros espacios confinados, los VLP de material particulado en el aire son esenciales para proteger la salud de los trabajadores. El Instituto Valenciano de Seguridad y Salud clasificó el VLP para material particulado (ver tabla 26).

Tabla 26

Riesgo por material particulado.

RIESGO POR MATERIAL PARTICULADO	
NIVEL DE RIESGO	RANGO DE VALORES
Bajo	< 0.025 mg/m ³
Moderado	Entre 0.025 mg/m ³ a 0.1 mg/m ³
Alto	> 0.1 mg/m ³



7.2.8 Factor polvo de carbón

De acuerdo con el Decreto 1886 de 2015, el polvo de carbón es considerado explosivo en función del porcentaje de metano (CH₄) presente y el nivel de inflamabilidad de la atmósfera en la mina. No obstante, un estudio realizado en 2012 por la Universidad Nacional de Colombia, titulado “Análisis de los factores que influyen en la explosividad del polvo de carbón en las minas subterráneas”, concluyó que existen otros factores determinantes a tener en cuenta. Por esta razón, se llevaron a cabo estudios y análisis de laboratorio basados en muestreos realizados en minas ubicadas principalmente en el municipio de Amagá, así como en regiones de Norte de Santander, Boyacá y Antioquia. Los análisis incluyen las siguientes variables:

- **Análisis próximo:** se determina humedad residual, cenizas, poder calorífico, materia volátil y carbono fijo y azufre total, de acuerdo con la Norma ASTM.
- **Análisis granulométricos:** se llevó a cabo un análisis de distribución del tamaño de grano utilizando mallas 70, 100, 140 y 200, siguiendo las recomendaciones de Cybulsky (1975), Michelis et al. (1987, 1996), Lebecky (1991) y Reed et al. (1989). Estas mallas se consideran representativas para definir el comportamiento explosivo del carbón.
- **Análisis de índice de molienda Hardgrove:** este análisis determina la dureza del carbón en función de su facilidad de molienda, un factor clave para evaluar su comportamiento en procesos de explotación y manipulación.
- **Pruebas de Ignición del carbón:** permiten establecer la temperatura a la cual el carbón genera chispas, un indicador crucial para anticipar riesgos de explosión.
- **Análisis petrográfico:** identifica el porcentaje de mace- rales y otros minerales presentes en el manto de carbón, proporcionando información sobre su composición y propiedades químicas.
- **Análisis de explosividad de los polvos de carbón:** para determinar el rango de explosividad, se utilizó un medi- dor de explosividad de polvos de carbón (CDEM, Coal Dust Explosibility Meter), desarrollado por el NIOSH.

Según el estudio “Análisis de los factores que influyen en la explosividad del polvo de carbón en las minas subterráneas” de la Universidad Nacional, el CDEM es un instrumento manual que mide el potencial explosivo del polvo de carbón independientemente del tamaño de sus partículas.

El dispositivo incluye un sensor óptico conectado a una caja electrónica con pantalla digital. Este mide la radiación infrarroja reflejada en una mezcla de dos sustancias con diferentes reflectancias ópticas, como polvo de roca y polvo de carbón. El CDEM no solo mide de manera cuantitativa la explosividad del polvo de carbón, sino que también es útil como herramienta complementaria para mejorar la seguridad en minas. Esto se logra determinando la cantidad necesaria de polvo de caliza para inertizar el polvo de carbón.

Los resultados del dispositivo se presentan en tres indicadores de color que reflejan el nivel de explosividad:

- **Rojo (Red):** altamente explosivo.
- **Amarillo (Yellow):** moderadamente explosivo.
- **Verde (Green):** no explosivo.

Este sistema, descrito por Harris et al. (2008), es esencial para controlar y mitigar riesgos en operaciones mineras.

Tabla 27

Valoración del riesgo grado de explosividad.



Nota. Se puede apreciar los indicadores del nivel de explosividad usando el medidor CDM (Harris et al. 2008). Ingeniería y competitividad (2012).

Como referencia tenemos el equipo CDEM 1000: un instrumento portátil manual, fácil de usar el cual está dise-

ñado para proveer una indicación directa de la explosividad potencial de una mezcla de carbón y polvo de roca. A continuación, se describen sus ventajas:

- El CDEM 1000 es el único equipo en el mundo avalado por la NIOSH (National Institute Occupational Safety and Health) y MSHA (Mine Safety and Health 18 A 110002-0), para realizar esta medición en minas de carbón.
- Determina si las condiciones al interior de las minas son adecuadas para trabajar o si se requieren medidas correctivas.
- Es una herramienta eficaz para ayudar a determinar el equilibrio más eficiente entre el polvo de carbón y el polvo de roca (ManualSlib, 2011).

Figura 21

Equipo para medición cualitativa de explosividad de polvo de carbón - CDEM 1000.



Nota. Permite la medición cualitativa de explosividad de polvo de carbón (ManualSlib) 2011.

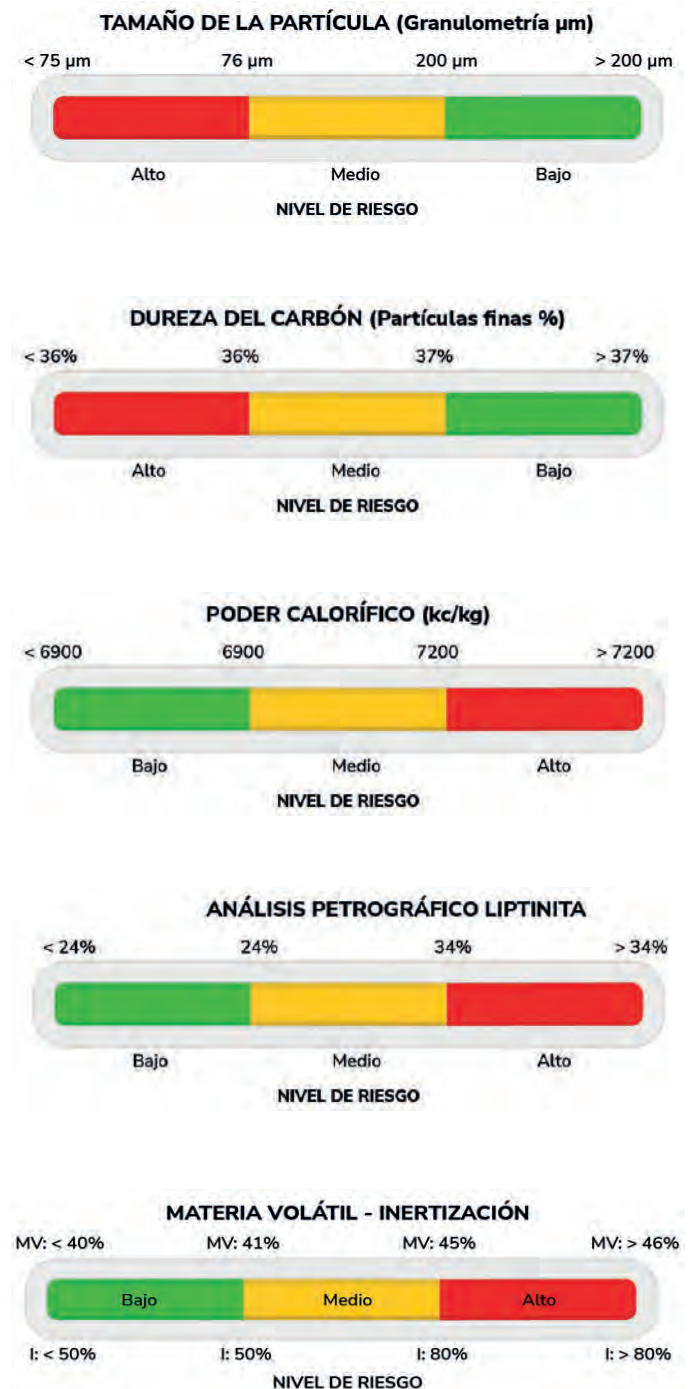
Las valoraciones propuestas se basan en el estudio realizado en las minas del municipio de Amagá. Este estudio identificó que las minas de esta región presentan un nivel de peligrosidad significativamente mayor por polvo de carbón en comparación con otras áreas mineras evaluadas. Este

riesgo incrementado se atribuye principalmente a las condiciones secas y pulverulentas que caracterizan la región.

A partir de estos hallazgos, se establecen criterios de evaluación para el polvo de carbón presente en las explotaciones en la tabla 28.

Tabla 28

Criterios de evaluación con relación al polvo de carbón



7.2.9 Factor de inertización

La inertización de minas se refiere al proceso de neutralizar el polvo de carbón con polvo inerte de caliza, con características de granulometría a malla 400 y con un contenido de sílice menor del 3% (Decreto 1886, 2015, art. 68). La clasificación de la inertización en minas se aprecia en la tabla 29.

Tabla 29

Riesgo por inertización

RIESGO POR INERTIZACIÓN	
NIVEL DE RIESGO	DEFINICIÓN
Bajo	Cuando se ha inertizado más del 80% de las labores mineras. Este nivel indica un control óptimo del ambiente subterráneo, reduciendo significativamente los riesgos de explosión o incendios.
Moderado	Cuando entre el 50% y el 80% de las labores mineras han sido inertizadas. Este nivel indica un esfuerzo considerable en el control del polvo de carbón, aunque existe margen para mejorar la seguridad.
Alto	Cuando menos del 50% de las labores mineras han sido inertizadas. Este nivel es preocupante, ya que implica una mayor exposición a riesgos de explosión o incendio debido a la presencia de polvo de carbón en la mayor parte de las labores.

7.2.10 Factor de equipos de combustión

Cuando las operaciones mineras cuentan con equipos de maquinaria Diésel (locomotoras, transcargadores, motores, entre otros) deben asegurar la cantidad de m³ por minuto de acuerdo con cada caballo de fuerza - Hp de cada máquina, como se muestra en la tabla 30.

Tabla 30

Cálculo de volumen mínimo de aire cuando se usa maquinaria Diesel.

CO EMITIDO POR MAQUINARIA	CAUDAL DE AIRE POR Hp (m ³ /min)
CO = 0.12% o 1200 ppm	6 m ³ /Hp
CO = 0.08% o 800 pmm	4 m ³ /Hp

Tabla 31

Riesgo por equipos de combustión

RIESGO POR EQUIPOS DE COMBUSTIÓN	
NIVEL DE RIESGO	DEFINICIÓN
Bajo	Si la concentración de monóxido de carbono (CO) es menor al 0.08% (800 ppm) entonces se debe asegurar un caudal de aire de 4 m ³ /min por Hp.
Moderado	Si la concentración de monóxido de carbono (CO) esta entre 0.08% (800 ppm) y 0.12% (1200 ppm) entonces se debe asegura un caudal de aire mínimo de 5 m ³ /min por Hp.
Alto	Si la concentración de monóxido de carbono (CO) es superior al 0.12% (1200 ppm) entonces se debe asegurar un ingreso de aire de 6 m ³ /min por Hp.

7.2.11 Factor uso de explosivos

El uso de explosivos en operaciones mineras subterráneas debe considerar dos aspectos fundamentales:

Uso adecuado de explosivos

Implica cumplir estrictamente con los requisitos establecidos por el Decreto 1886 de 2015 y demás normativas aplicables. Las buenas prácticas incluyen el almacenamiento, transporte y manejo seguro de los explosivos, garantizando que todas las operaciones se desarrollen bajo las condiciones más seguras posibles y minimizando los riesgos asociados.

Condiciones en ambientes grisutosos

Cuando se trabaja en ambientes con presencia de metano (CH₄) u otros gases inflamables (grisutosos), es indispensable asegurar condiciones controladas de las atmósferas mineras. Esto incluye la correcta ventilación, medición continua de los niveles de gases inflamables y la implementación de medidas preventivas que aseguren que las actividades de voladura no generen fuentes de ignición.

Este factor se clasifica de la siguiente manera:

- Bajo: cuando no se utilice explosivo en las operaciones mineras y la medición de gas metano (CH₄) sea igual a 0%.
- Medio: cuando se cumple alguna de las dos condiciones. No se utilizan explosivos, pero en la atmósfera minera se identifica gas metano (CH₄) por encima del 0.5%, o se utiliza explosivos y el metano (CH₄) está por debajo de 0.5%.
- Alto: cuando se utilice explosivos y el contenido de gas metano (CH₄) este igual o por encima de 0.5%

Tabla 32

Factor de evaluación para el uso de explosivos.



7.2.12 Factor de gases en la atmósfera minera

Mantener una atmósfera adecuada en la minería subterránea es fundamental para proteger la vida de los trabajadores y garantizar operaciones seguras. En este entorno, pueden acumularse gases tóxicos, asfixiantes, contaminantes y explosivos que representan graves peligros si no se controlan adecuadamente.

Gases tóxicos como el monóxido de carbono (CO) pueden causar envenenamiento y muerte en poco tiempo. Gases asfixiantes, como el dióxido de carbono (CO₂), desplazan el oxígeno (O₂) del aire, creando un ambiente donde la respiración se vuelve imposible. Por otro lado, gases explosivos como el metano (CH₄) pueden desencadenar explosiones catastróficas si alcanzan ciertas concentraciones y se encuentran con una fuente de ignición. Estos gases pueden clasificarse en tres categorías principales según su efecto:

1. **Gases tóxicos:** el monóxido de carbono (CO) es altamente peligroso. Su inhalación puede causar envenenamiento y la muerte en un periodo muy corto debido a su capacidad de bloquear el transporte de O₂ en la sangre.
2. **Gases asfixiantes:** el monóxido de carbono (CO) y otros gases asfixiantes desplazan el oxígeno del aire, creando ambientes donde la respiración es imposible. La exposición prolongada a estos gases puede ser letal.
3. **Gases explosivos:** el metano (CH₄) presente en muchas minas, es altamente inflamable. Si alcanza concentraciones críticas y se encuentra con una fuente de ignición, puede provocar explosiones catastróficas.

En este contexto, un sistema de ventilación eficaz es esencial para diluir y remover estos gases peligrosos, asegurando que las condiciones atmosféricas en la mina se mantengan dentro de parámetros seguros y previniendo accidentes mortales.

Para esto, se debe asegurar que las atmósferas mineras no superen los VLP que describe el Decreto 1886 de 2015; y, en lo posible mantener estos valores en cero en todas las labores mineras (ver tabla 2, capítulo 5).

En una mina subterránea, mantener condiciones adecuadas de oxígeno (O₂) es fundamental para garantizar la seguridad y la salud de los trabajadores. La concentración de oxígeno (O₂) debe permanecer dentro de un rango seguro, generalmente establecido entre el 19.5% y el 23% en volumen, para permitir una respiración normal.

Concentraciones por debajo de este rango pueden generar hipoxia, una condición en la que el cuerpo no recibe suficiente oxígeno. Esto puede manifestarse con síntomas como mareos, confusión, pérdida de conciencia y, en casos extremos, incluso la muerte.



Tabla 33

Factor de evaluación para la presencia de gases

GASES EXISTENTES						
Factor a evaluar	Bajo	Explicación	Medio	Explicación	Alto	Explicación
Dióxido de carbono CO ₂ - 5000 ppm	1	Cuando la medición está entre 0 a 400 ppm	2	Cuando la medición está entre 400 a 5000 ppm	3	Cuando la medición está por encima de 5000 ppm
Monóxido de carbono CO - 25 ppm	1	Cuando la medición esta entre 0 a 10 ppm	2	Cuando la medición está entre 11 y 25 ppm	3	Cuando la medición está por encima de 25 ppm
Ácido Sulfhídrico H ₂ S - 1 ppm	1	Cuando la medición esta entre 0 a 0.3 ppm	2	Cuando la medición está entre 0.4 a 0.9 ppm	3	Cuando la medición está por encima de 1 ppm
Anhídrido Sulfuroso SO ₂ - 5 ppm	1	Cuando la medición está entre 0 a. 0.007 ppm	2	Cuando la medición está entre 0.007 y 4.9 ppm	3	Cuando la medición está por encima de 5 ppm
Óxido Nítrico NO - 25 ppm	1	Cuando la medición está entre 0.3 a 1 ppm	2	Cuando la medición está entre 1 y 25 ppm	3	Cuando la medición está por encima de 25 ppm
Dióxido de Nitrógeno NO ₂ - 0.2 ppm	1	Cuando la medición está entre 0 a 0.052 ppm	2	Cuanto la medición está entre 0.053 y 0.2 ppm	3	Cuando la medición está por encima de 0.2 ppm
Oxígeno O ₂ - 21%	1	Cuando el oxígeno está dentro de 19.5 % a 23.5%	2	Cuando está entre 19 % a 19.4% o de 23 % a 23.5%	3	Menor a 19.5% mayor a 23.5%

GASES EXPLOSIVOS						
Factor a evaluar	Bajo	Explicación	Medio	Explicación	Alto	Explicación
Metano CH ₄ - 1%	1	Cuando la medición de metano (CH ₄) está entre 0 % a 0.3%	2	Cuando la medición está entre 0.3 % - 0.9%	3	Mayor a 1%

7.2.13 Factor de gases explosivos

Una atmósfera se considera explosiva por la existencia en el aire de sustancias inflamables que en contacto con una fuente de ignición provoca una explosión. En Colombia las estadísticas de accidentalidad muestran que es la minería de carbón el proceso industrial que más aporta en el incremento de esta medición, especialmente por la presencia casi permanente de gas metano (CH_4) en su explotación.

Es fundamental comprender los principales parámetros que contribuyen a la generación de una explosión por gas

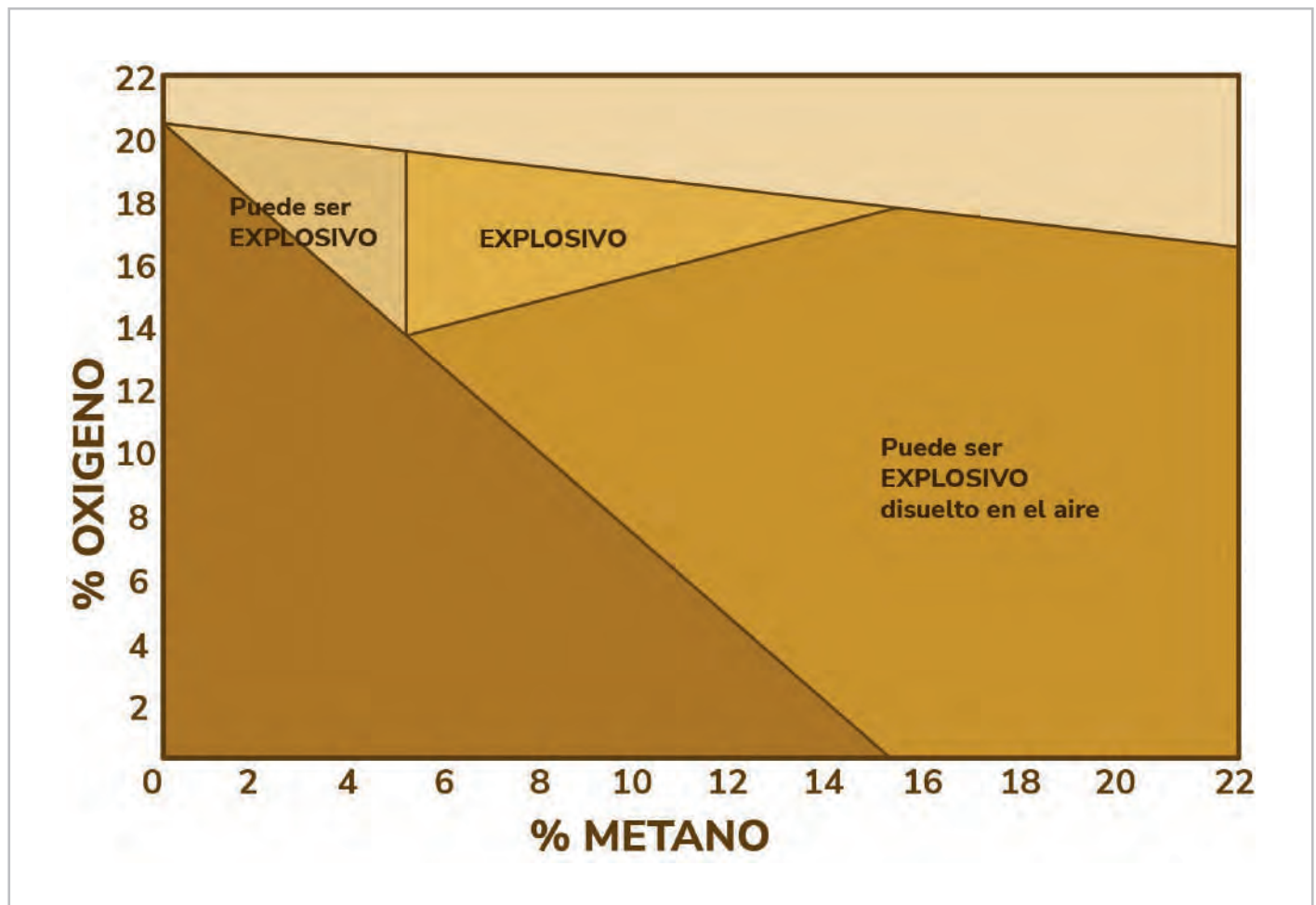
metano (CH_4), con el fin de evaluar su interacción con la clasificación de las labores mineras subterráneas, según las categorías definidas en el Decreto 1886 de 2015. Los parámetros por considerar son:

- Concentración de metano (CH_4).
- El Volumen de oxígeno (O_2).
- Cantidad de polvo de carbón presente en la mezcla.
- Temperatura de ignición.
- Fuente de ignición.

En la figura 22 se muestra la relación oxígeno (O_2) y metano (CH_4) en el origen de una explosión.

Figura 22

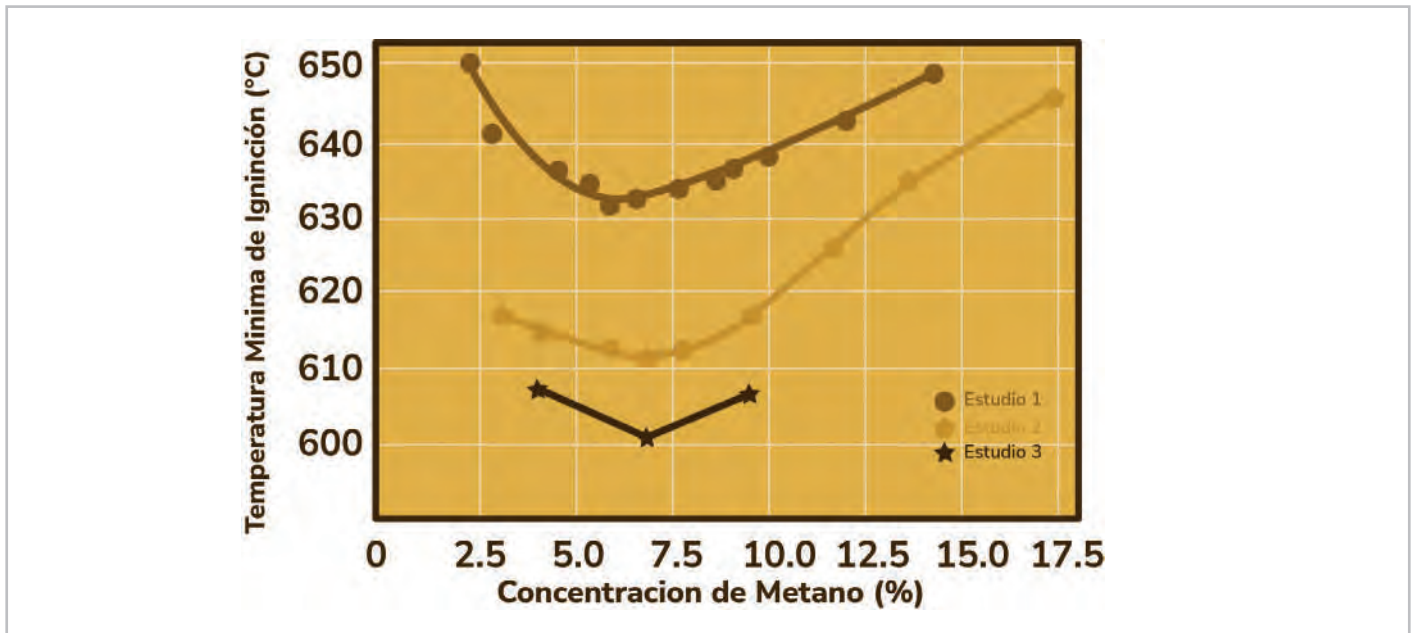
Relación oxígeno (O_2) – metano (CH_4) y los límites de explosividad del metano (CH_4).



Nota. Muestra el comportamiento del oxígeno (O_2) y metano (CH_4) en el origen de las explosiones en minas de carbón. Universidad Nacional de Colombia (2020).

Figura 23

Relación metano (CH_4) y la temperatura mínima de ignición



Nota. Muestra el comportamiento de la temperatura y metano (CH_4) en el origen de las explosiones en minas de carbón. Universidad Nacional de Colombia (2020).

Inflamabilidad del metano (CH_4)

- Por encima del 15% la mezcla de metano (CH_4) y aire tienen menos probabilidad de causar una explosión. Sin embargo, en presencia de más aire la situación cambia y la probabilidad aumenta.
- Por debajo del 5% de mezcla de metano (CH_4) y aire no se pueden encender.

98 Figura 24

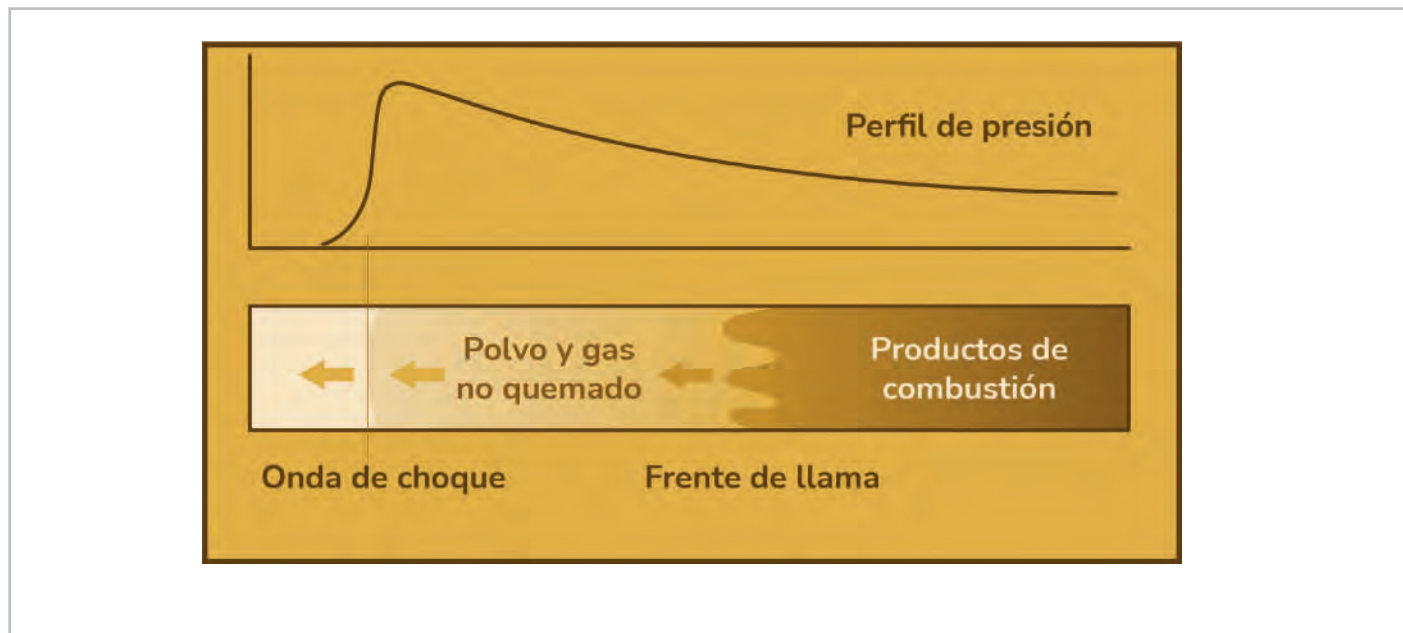
Inflamabilidad del metano (CH_4)



Nota. Esta figura muestra los límites de explosividad de acuerdo con la mezcla de metano (CH_4) y aire. Universidad Nacional de Colombia (2020).

Figura 25

Mecanismo de explosión



Nota. Esta figura muestra el mecanismo desde el punto de vista físico de una explosión. Universidad Nacional de Colombia (2020).

El Decreto 1886 de 2015 establece una clasificación de las labores subterráneas en relación con la concentración de metano (CH_4) y la materia volátil del carbón en las minas o frentes de trabajo (tabla 3, Capítulo 5).

En términos del agente de ignición, las explosiones pueden iniciarse por diferentes fuentes. Por ejemplo: llamas

abiertas, cortocircuitos, circuitos eléctricos no sellados intrínsecamente, electricidad estática, equipos y máquinas no certificados en antiexplosión.

Para hacer la valoración del riesgo de explosión por la concentración de metano (CH_4), oxígeno (O_2) y temperatura de ignición se adoptan los criterios descritos en la tabla 34.

Tabla 34

Relación metano (CH_4) – oxígeno (O_2).

Metano CH_4 (%)	Oxígeno O_2 (%)	Criterio a nivel de explosividad
0-5	0-14	Bajo
5-15	12-21	Alto
>15	0-19	Medio

Nota. Dinámica de explosiones en minas de carbón y la influencia de la ventilación.

Tabla 35

Relación metano (CH₄) - temperatura de ignición

Metano CH ₄ (%)	Temperatura mínima de Ignición(°C) (%)	Criterio a nivel de explosividad
2.5-15	630-650	Alto
2.5-17.5	610-645	Alto
3-10	600-610	Alto

Nota. Dinámica de explosiones en minas de carbón y la influencia de la ventilación.

Tabla 36

Relación según la clasificación de la mina de acuerdo con su nivel de metano (CH₄) e inflamabilidad.

Metano CH ₄ (%)	Materia Volátil (%)	Criterio a nivel de explosividad
0	<16	Bajo
0.1-0.3	14-16	Medio
>0.31	>16	Alto

Nota. Dinámica de explosiones en minas de carbón y la influencia de la ventilación.

Método de arranque del mineral

Otro criterio que se debe tener en cuenta para evaluar el riesgo por atmósferas viciadas y explosivas por metano (CH₄), es el método de arranque del mineral en las diferentes fases mineras. Los más utilizados en la minería local son: tradicional (pico y pala); semi-mecanizado (martillo neumático); y mecanizado (perforación y voladura, rozadoras, minadores etc.).

Tabla 37

Desprendimiento de metano (CH₄) por el método de arranque de carbón.

Tipo	Método de Arranque De Mineral	Evaluación de Presencia de Metano (CH ₄)
Tradicional	Pico y pala	Bajo
Semi-mecanizado	Martillo neumático	Medio
Mecanizado	Rozadora, Minador etc.- perforación y voladura	Alto

Nota. La tabla muestra los métodos de arranque más peligrosos en relación con la presencia de metano (CH₄).

También es importante evaluar el riesgo asociado a la aplicación de los métodos de arranque, especialmente en lo que respecta a la emanación de gases generados por la perturbación que el proceso extractivo provoca en los yacimientos. Para ello, se proponen los criterios de la tabla 38, considerando el límite inferior de explosividad (LIE) de los gases.

Tabla 38

Límite Inferior de explosividad.

LEL (Límite Inferior de explosividad metano (CH ₄) % Volumen)	Criterio Evaluativo Por Explosividad	Observaciones
< 2.5	Bajo	Si el Método aplicado causa menos perturbación al manto de carbón.
2.5 a 3.3	Medio	Si hay un Desprendimiento espontáneo de metano (CH ₄) y dilución rápida de este.
3.3 a 10	Alto	Se tiene un desprendimiento constante de metano (CH ₄) lo que genera una acumulación mayor.

Nota. Esta tabla relaciona los riesgos de explosión de CH₄ por los métodos de arranque utilizados y la perturbación al yacimiento.

7.2.14 Factores de equipos de medición de gases

Contar con equipos de medición de gases, ya sean portátiles o estacionarios, en la minería subterránea es esencial para garantizar la seguridad y la salud de los trabajadores. Estos equipos deben encontrarse en óptimas condiciones operativas, estar debidamente calibrados y ser capaces de detectar todos los gases potencialmente peligrosos presentes en las labores mineras. La importancia de estas mediciones radica en los siguientes aspectos:

- **Detección temprana de Peligros:** los equipos de medición permiten la detección temprana de gases tóxicos, asfixiantes y explosivos. Esto es crucial para tomar medidas inmediatas que eviten situaciones de riesgo, como explosiones o intoxicaciones.
- **Prevención de accidentes:** equipos en buen estado y correctamente calibrados garantizan mediciones precisas, lo que es indispensable para detectar desviaciones peligrosas en la composición de la atmósfera. Una falla en las mediciones puede conducir a accidentes graves, ya que errores en la detección podrían permitir la exposición a concentraciones peligrosas de gases.

- **Cumplimiento Normativo:** las normativas de seguridad minera exigen que las condiciones atmosféricas sean monitoreadas y controladas constantemente. Tener equipos confiables y calibrados ayuda a cumplir con estos requisitos legales, evitando sanciones y asegurando un entorno de trabajo seguro.

De acuerdo con lo anterior, es de gran importancia contar con un Plan de Medición Constante de los gases dentro de las labores mineras subterráneas y llevar un registro de la información. De esta manera, se asegura un control eficiente de las atmósferas mineras, como se describe a continuación:

- **Monitoreo continuo:** un plan de medición constante permite monitorear las condiciones atmosféricas en tiempo real, lo que es esencial para detectar cualquier cambio que pueda indicar un aumento en los niveles de gases peligrosos. Esto facilita una respuesta rápida y adecuada.

- **Trazabilidad y análisis:** registrar las mediciones de forma sistemática permite tener un historial detallado de las condiciones atmosféricas en la mina. Esta información es valiosa para analizar tendencias, predecir posibles riesgos y mejorar las estrategias de ventilación y seguridad.
- **Mejora continua:** con un registro constante de la información, es posible revisar y ajustar las prácticas de gestión de riesgos. Los datos históricos ayudan a identificar patrones y áreas de mejora, optimizando así las operaciones mineras y reduciendo el riesgo de incidentes.
- **Documentación de soporte:** los registros de mediciones son esenciales para reportes ante las diferentes autoridades. Proveen evidencia de que la mina está operando dentro de los límites seguros y cumpliendo con las normativas establecidas.

7.2.15 Factor de equipos e instalaciones eléctricas

Tanto el Decreto 1886 de 2015, como el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) establece directrices específicas para asegurar que las instalaciones eléctricas en minas subterráneas, especialmente en atmósferas peligrosas, no presenten riesgos que puedan causar accidentes graves, como explosiones o incendios. A continuación, se detallan las condiciones clave:

- **Clasificación de áreas peligrosas**
Las zonas dentro de las minas deben clasificarse de acuerdo con el tipo y la concentración de gases o polvos explosivos presentes. Esta clasificación determina el tipo de equipos eléctricos que pueden instalarse en cada área.
- **Equipos a Prueba de Explosiones (Ex)**
Los equipos eléctricos instalados en atmósferas explosivas deben ser a prueba de explosiones (certificados Ex). Estos equipos están diseñados para contener cualquier explosión interna y evitar que se propague a la atmósfera exterior.

▪ **Sellado y aislamiento**

Los cables y conexiones eléctricas deben estar adecuadamente sellados y aislados para evitar la entrada de gases explosivos. Esto es crucial para prevenir el riesgo de chispas que puedan encender una atmósfera peligrosa.

▪ **Protección contra sobrecargas y cortocircuitos**

Las instalaciones eléctricas deben contar con sistemas de protección contra sobrecargas y cortocircuitos que puedan generar calor excesivo o chispas. Estos sistemas deben estar diseñados para operar en condiciones severas y deben ser inspeccionados por lo menos una vez al mes. Además, se debe contar con un plan anual, según IEC 60079-17 que permita contar con la información actualizada de los equipos de protección.

▪ **Conexión a tierra**

Todas las instalaciones eléctricas deben estar correctamente conectadas a tierra para evitar la acumulación de cargas estáticas, que pueden ser una fuente de ignición en atmósferas con gases inflamables.

▪ **Inspección y mantenimiento regular**

Los equipos eléctricos deben ser inspeccionados y mantenidos regularmente para asegurar que están en buenas condiciones operativas y que continúan cumpliendo con los requisitos de seguridad establecidos en el RETIE y demás normas que apliquen. Como mínimo se deben realizar inspecciones mensuales y el mantenimiento debe estar alineado a las recomendaciones de los fabricantes.

▪ **Uso de sistemas de ventilación**

Debe asegurarse una adecuada ventilación en áreas donde se utilizan equipos eléctricos para evitar la acumulación de gases explosivos. La ventilación ayuda a mantener las concentraciones de gases peligrosos por debajo de los límites explosivos.

▪ **Interruptores y equipos de corte rápido**

Se deben instalar interruptores y dispositivos de corte rápido que permitan desconectar el suministro eléctrico en caso de emergencia; reduciendo así el riesgo de incendios o explosiones.

▪ **Iluminación segura**

Las lámparas y sistemas de iluminación en áreas pe-

ligrosas deben ser seguras para uso en atmósferas explosivas. Es decir, deben ser equipos Ex o encapsulados de manera que no generen chispas o calor suficiente para provocar una ignición.

▪ Planos actualizados

Se debe contar con planos de ubicación de la distribución eléctrica dentro de las minas subterráneas, ubicando además los diferentes equipos, máquinas y herramientas eléctricas utilizadas. Riesgos que se pueden presentar por generación de calor o incendios por los equipos eléctricos, además de las rutas de evacuación para el caso de ocurrencia de un evento.

Estas condiciones son esenciales para minimizar los riesgos asociados con atmósferas peligrosas en minas subterráneas. Las instalaciones eléctricas, si no se gestionan adecuadamente, pueden convertirse en fuentes de ignición para los gases o polvos explosivos presentes en el entorno minero.

El cumplimiento riguroso del RETIE es indispensable para garantizar que los equipos eléctricos funcionen de manera segura, protegiendo la integridad de los trabajadores y previniendo accidentes de carácter catastrófico.

Además, la aplicación de estos estándares no solo contribuye a la seguridad de las operaciones, sino que también asegura el cumplimiento de las normativas legales vigentes y permite la continuidad operativa de las actividades mineras de manera segura y eficiente.



7.2.16 Factor de equipos de generación de energía para emergencia

La generación de energía de respaldo en minas subterráneas es esencial para garantizar la seguridad y la continuidad operativa ante fallas del suministro eléctrico principal. La interrupción de la energía puede desactivar los sistemas de ventilación, provocando la acumulación de gases peligrosos como metano (CH_4) y monóxido de carbono (CO), y reduciendo el flujo de aire respirable. Esto incrementa el riesgo de asfixias, intoxicaciones y explosiones, poniendo en peligro la vida de los trabajadores en minutos.

Además, la operación minera subterránea depende de equipos eléctricos críticos, tales como bombas de agua, sistemas de iluminación y maquinaria de extracción. La falta de un suministro energético constante puede detener estos equipos, ocasionando inundaciones, accidentes por baja visibilidad y la detención de la producción, con severas repercusiones económicas.

En situaciones de emergencia, como incendios o derrumbes, mantener operativos los sistemas de ventilación y otros sistemas críticos es crucial para una evacuación segura. Los generadores de respaldo aseguran la continuidad de la ventilación, proporcionando aire respirable y previniendo condiciones peligrosas.



7.2.17 Factor de cantidad de aire requerido

Asegurar un caudal de aire suficiente en las minas subterráneas es de suma importancia para disipar gases peligrosos, asegurando condiciones atmosféricas seguras para los trabajadores. Este flujo de aire también regula la temperatura y la humedad, previniendo el estrés térmico y reduciendo el riesgo de incendios y explosiones, además de mantener niveles adecuados de oxígeno, lo que permite que las operaciones mineras se desarrollen de manera segura y eficiente.



Razón por la que se debe determinar el caudal de aire necesario. Es esencial realizar un cálculo que considere varios factores clave:

- Volumen y extensión de las labores mineras: se debe calcular el tamaño y la longitud de las galerías y frentes de trabajo, ya que áreas más grandes requieren un mayor caudal de aire para garantizar una ventilación adecuada.
- Número de trabajadores y maquinaria operativa: la cantidad de trabajadores y equipos en operación afecta la generación de calor, gases y polvo, lo que a su vez influye en la cantidad de aire requerida para diluir y eliminar estos contaminantes.
- Concentración de gases peligrosos: se deben considerar las concentraciones de gases explosivos, tóxicos y asfixiantes presentes, asegurando que el caudal de aire sea suficiente para mantener estos gases por debajo de los límites seguros.
- Condiciones geológicas y de ventilación natural: factores como la permeabilidad del terreno y la presencia de corrientes de aire naturales pueden afectar la ventilación y deben ser incorporados en el cálculo.
- Humedad y confort térmico: afectan la disipación de calor corporal y la capacidad de los sistemas de ventilación para controlar temperaturas y gases, evitando riesgos de estrés térmico o fatiga.
- Presencia de agua: afecta la calidad del aire al incrementar la humedad, dificulta la disipación de calor y puede generar nieblas o gases disueltos, requiriendo mayor caudal para mantener condiciones seguras y confort térmico
- Uso de explosivos: se debe calcular la cantidad de caudal de aire requerido para disipar los gases generados, luego de las voladuras dentro de las labores subterráneas.

104

El cálculo preciso del caudal de aire es esencial para garantizar que las operaciones mineras se realicen en un ambiente seguro, minimizando los riesgos y asegurando el bienestar de los trabajadores.

7.2.18 Factor de riesgo por tipo de arranque

El desprendimiento de gas metano (CH_4) según el método de arranque en el carbón tiene implicaciones críticas para la seguridad y la ventilación en la minería subterránea. Métodos como la voladura generan concentraciones significativamente más altas de metano en comparación con técnicas como el uso de pico y pala o martillos. Esto ocurre porque la voladura provoca una perturbación considerable en el manto de carbón, lo que facilita una liberación masiva y rápida del gas.

Este fenómeno es particularmente peligroso debido al aumento en el riesgo de explosiones de grisú, una mezcla explosiva de metano con el oxígeno presente en el aire. Por lo tanto, es fundamental seleccionar cuidadosamente el método de arranque, evaluando el riesgo que representa para la ventilación y la gestión de atmósferas contaminadas.

Tabla 39

Nivel de riesgo por tipo de arranque.



7.2.19 Resumen de los factores a evaluar en el análisis de riesgo

La tabla 40 presenta un resumen que destaca los factores que pueden modificar o afectar el funcionamiento óptimo de un circuito de ventilación en minería subterránea, junto con sus parámetros correspondientes. Estos parámetros son fundamentales para determinar el nivel de deficiencia y facilitar el cálculo en el análisis de riesgos.

Tabla 40

Tabla resumen de los factores a evaluar en el cálculo del nivel de deficiencia (ND).

Factores para evaluar Cualitativos	Bajo	Factores para evaluar Cuantitativos	Medio	Factores para evaluar Cuantitativos	Alto	Factores para evaluar Cuantitativos
Factor por tipo y característica de los yacimientos	2	Yacimientos Residuales Yacimientos Sedimentarios (Rocas Carbonáticas y Otros)	6	Yacimientos metamórficos	10	Yacimientos Sedimentarios (Carbón) Hidrotermales, Magmáticos
Factor Tectónico-Estructural	2	Levemente fracturada, ≤ 3 sistemas de discontinuidad. Muy espaciadas entre sí. (RQD 75% -90%). (2-6 fract/m).	6	Moderadamente fracturada, muy bien trabada, no disturbada, bloques cúbicos formados por tres sistemas discontinuidades ortogonales, (RQD 50-75) , (6 -12 fract/m).	10	Muy fracturada / Intensamente fracturada. Plegamiento y fallamiento, con muchas discontinuidades intersectadas formando bloques angulosos o irregulares. (RQD 25-50%), (12-20 fract/m).
Factor propiedades físicas de rocas y suelos	2	Yacimientos Sedimentarios (Materiales de Construcción) Porosidad-- 10 - 30%. Permeabilidad-- 10 - 1000 mD	6	Yacimientos metamórficos Porosidad < 1% Permeabilidad <0,01 mD Yacimientos magmáticos Porosidad-- 0,1 - 5,0% Permeabilidad-- 0,01 - 1,0 mD	10	Yacimientos Hidrotermales Porosidad-- 5,0 - 15% Permeabilidad-- 1 - 1000 mD (Altas zonas de fracturamiento). Yacimientos Sedimentarios (Carbón y Rocas Accesorio) Porosidad-- 10 - 30% . Permeabilidad-- 10 - 1000 mD
Factor propiedades químicas de rocas y suelos	2	Metano (CH ₄) -- 0 - 0,1 % Dióxido de Carbono (CO ₂)-- 0 - 0,03% Oxígeno (O ₂)-- 20,9% Presencia de Sulfuros-- Ninguno pH del Suelo--6,0 - 8,0	6	Metano (CH ₄) -- 0,1 - 0,5% Monóxido (CO)-- 0 - 0,0025% Dióxido de Carbono (CO ₂)-- 0,03 - 0,5% Oxígeno (O ₂)-- 19,5 - 20,9% Presencia de Sulfuros-- presente. Bajo contenido pH del Suelo-- 5,0 - 6,0	10	Metano (CH ₄) -- >0,5% Monóxido (CO)-- 0,0025 - 0,005%; >0,005% Dióxido de Carbono (CO ₂)-- >0,5% Oxígeno (O ₂)-- <19,5 % Presencia de Sulfuros-- presente. Alto contenido pH del Suelo-- <5,0
Adsorción y cromatografía de gases	2	Concentraciones de gases dentro de los límites permisibles y una capacidad de adsorción adecuada.	6	Concentraciones de gases cercanas a los límites de alarma, con una capacidad de adsorción moderada.	10	Las concentraciones de gases superan los niveles de alarma o críticos y la capacidad de adsorción es baja.
Factor Temperatura	2	Cuanto la temperatura promedio dentro de la mina está alrededor de 23 °C	6	Cuanto la temperatura promedio dentro de la mina está alrededor de 25 °C	10	Cuanto la temperatura promedio dentro de la mina está alrededor de 30 °C
Factor Humedad Absoluta	2	Humedad Absoluta: Menor de 0.36 g/m ³ (poca acumulación de vapor)	6	Humedad Absoluta: Entre 0.36 g/m ³ y 0.67 g/m ³	10	Humedad Absoluta: Desde 0.67 g/m ³ hasta más de 1.21 g/m ³
Factor Confort térmico	2	Temperatura efectiva es menor que Temperatura húmeda y la temperatura seca	6	Temperatura efectiva es igual que Temperatura húmeda y la temperatura seca	10	Temperatura efectiva es mayor que Temperatura húmeda y la temperatura seca
Factor Material particulado	2	VPL < a 0.025 mg/m ³	6	Entre 0.025 mg/m ³ a 0.1 mg/m ³	10	VPL > 0.1 mg/m ³
Factor polvo de carbón	2	Materia Volátil: Menor de 41% de materia volátil	6	Materia Volátil: Entre 41% y 45 % materia volátil	10	Materia Volátil: Igual o mayor a 46%
	2	Tamaño de Partícula: Mayor 200 micras	6	Tamaño de Partícula: Entre 76 y 200 micras	10	Tamaño de Partícula: Menor a 75 micras
	2	Dureza del Carbón: Mayor a 37% de dureza	6	Dureza del Carbón: Entre 36% y 37% de dureza.	10	Dureza del Carbón: Igual o menor a 36% de dureza
	2	Poder Calorífico: Menor a 9600 Kcal/Kg	6	Poder Calorífico: Entre 6900 y 7200 Kcal/Kg	10	Poder Calorífico: Mayor a 7200 Kcal/Kg

Factores para evaluar Cualitativos	Bajo	Factores para evaluar Cuantitativos	Medio	Factores para evaluar Cuantitativos	Alto	Factores para evaluar Cuantitativos
Factor Neutralización del polvo de carbón	2	80% de las labores mineras	6	Entre el 50% y 80% de las labores mineras	10	<50% de las labores mineras
Factor Equipos de combustión	2	Si la concentración de CO es menor al 0.08% (800 ppm) entonces se debe asegurar un caudal de aire de 4 m ³ /min por Hp.	6	Si la concentración de CO esta entre 0.08% (800 ppm) y 0.12% (1200 ppm) entonces se debe asegurar un caudal de aire mínimo de 5 m ³ /min por Hp.	10	Si la concentración de CO es superior al 0.12% (1200 ppm) entonces se debe asegurar un ingreso de aire de 6 m ³ /min por Hp.
Factor Uso de Explosivos	2	No uso de explosivos CH ₄ = 0%	6	No uso de explosivo y CH ₄ = 0.5% o más Utiliza explosivo y CH ₄ < 0.5%	10	Uso de explosivos CH ₄ = 0.5%
Factor Equipos de medición de gases portátiles o estacionarios	2	Se tiene una calibración certificada de acuerdo con lo recomendado por fabrica	6	No tiene una calibración certificada en los últimos 6 meses	10	No tiene una calibración certificada en los últimos 12 meses
Factor Equipos e instalaciones eléctricas	2	Los equipos e instalaciones eléctricas son certificados anti-explosión y/o aseguran condiciones óptimas operativas	6	Se cuenta con equipos en buen estado, pero no certificados anti-explosión	10	No cuenta con equipos certificado anti-explosión,
Factor Equipos de generación de energía de emergencia	2	Cuentan con equipos de generación de energía capaz de sostener la ventilación en caso de corte de energía	6	Puede abastecer un tiempo corto la ventilación de la mina	10	No cuenta con equipos de generación de energía que puedan sostener la ventilación en caso de corte de energía
Factor de cantidad de aire requerido	2	No cuenta con una entrada y salida de aire en la mina que asegura la cantidad suficientes de acuerdo con los requerimientos operativos	6	Algunos sitios cuentan con el caudal suficiente y otros no se conoce	10	El caudal de aire que ingresa y sale de la mina corresponde al requerido o no se conoce
Factor de riesgo por tipo de arranque.	2	Arranque realizado por medio de pica y pala, sin mecanización	6	Arranque realizado por medio de martillos neumáticos y/o eléctricos	10	Arranque realizado con equipos mecanizados y voladuras
Metano CH ₄ - 1%	2	Cuando la medición de metano esta entre 0 % a 0.3%	6	Cuando la medición está entre 0.3 % - 0.9%	10	Mayor a 1%
Monóxido de carbono CO - 25 ppm	2	Cuando la medición esta entre 0 a 10 ppm	6	Cuando la medición está entre 11 y 25 ppm	10	Cuando la medición está por encima de 25 ppm
Ácido Sulfhídrico H ₂ S - 1 ppm	2	Cuando la medición esta entre 0 a 0.3 ppm	6	Cuando la medición está entre 0.4 a 0.9 ppm	10	Cuando la medición está por encima de 1 ppm
Anhídrido Sulfuroso SO ₂ - 5 ppm	2	Cuando la medición está entre 0 a. 0.007 ppm	6	Cuando la medición está entre 0.007 y 4.9 ppm	10	Cuando la medición está por encima de 5 ppm
Óxido Nítrico NO - 25 ppm	2	Cuando la medición está entre 0.3 a 1 ppm	6	Cuando la medición está entre 1 y 25 ppm	10	Cuando la medición está por encima de 25 ppm
Dióxido de Nitrógeno NO ₂ - 0.2 ppm	2	Cuando la medición está entre 0 a 0.052 ppm	6	Cuanto la medición está entre 0.053 y 0.2 ppm	10	Cuando la medición está por encima de 0.2 ppm
Oxigeno O ₂ - 21%	2	Cuando el oxígeno está dentro de 19.5 % a 23.5%	6	Cuando esta entre 19 % a 19.4% o de 23 % a 23.5%	10	menor a 19.5% mayor a 23.5%

7.3 Análisis del riesgo

El objetivo principal del análisis es valorar los riesgos para priorizarlos y clasificarlos de acuerdo con la afectación que estos puedan generar en el trabajador. Así establecer los controles que lleven a mitigarlos de manera eficiente (ver anexos 1 y 1.1). Para realizar un análisis de riesgos objetivo que contemple la realidad de los procesos mineros desarrollados en cualquier tipo de explotación subterránea, se propone seguir la estructura de la figura 26.

Figura 26

Estructura Plan de Gestión del Riesgo



Nota. Estructura Plan de Gestión del Riesgo. (Norma ISO 31000).

7.3.1 Valorar el riesgo

Valorar el riesgo en la minería subterránea, especialmente en atmósferas viciadas, es esencial para proteger a los trabajadores y asegurar la operación continua. Este proceso permite identificar y priorizar peligros críticos, prevenir accidentes graves como explosiones o intoxicaciones, y optimizar recursos al enfocar medidas de seguridad donde más se necesitan. Además, garantiza el cumplimiento de normativas legales y facilita la mejora continua de las condiciones de seguridad en la mina.

Esta valoración puede incluir:

- Evaluación de los riesgos teniendo en cuenta la suficiencia de los controles existentes en las minas.
- El Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo y el grado de implantación de este.
- La información disponible sobre los riesgos y su origen.
- Los criterios establecidos para la evaluación y la decisión de aceptabilidad o no de los riesgos.

7.3.2 Evaluación de los riesgos

Para hacer la evaluación de los riesgos se proponen los factores cuantitativos de la figura 27.

Figura 27

Determinación del Nivel del Riesgo.



Nota. Esta figura representa los factores para tener en cuenta para la determinación del nivel de riesgo.

7.3.2.1 Nivel de riesgo (NR)

La evaluación del nivel de riesgo corresponde al proceso de determinar la probabilidad de la materialización de los riesgos y la magnitud de las consecuencias mediante el uso de la información disponible (GTC 45 de 2012).

Para evaluar el Nivel de Riesgo (NR) se debe determinar:

$$NR = NP \times NC$$

Donde:

NP: Nivel de probabilidad

NC: Nivel de consecuencia

Para establecer el Nivel de Probabilidad (NP) se requiere definir:

NP: $ND \times NE$

ND: Nivel de deficiencia

NE: Nivel de exposición

7.3.2.2 Nivel de deficiencia

El Nivel de Deficiencia (ND) permite cuantificar la eficiencia de los controles existentes para los riesgos identificados en los diferentes peligros a los que está expuesto el trabajador (ver tabla 41).

Para la determinación del ND se propone:

Tabla 41

Valoración cuantitativa del Nivel de Riesgo.

NIVEL DE DEFICIENCIA (ND)	VALOR
BAJO (B)	2
MEDIO (M)	6
ALTO (A)	10

Nota. Esta tabla muestra el valor que se asigna al riesgo por atmósferas viciadas de acuerdo con el nivel de deficiencia de los controles que se tienen en las labores mineras subterráneas.

7.3.2.3 Nivel de exposición

El Nivel de exposición (NE) permite cuantificar el riesgo mediante la evaluación de la situación de exposición que tiene el trabajador durante un tiempo determinado durante la jornada laboral. Para la determinación del NE se proponen los valores descritos en la tabla 42.

Tabla 42

Nivel de Exposición

NIVEL DE EXPOSICIÓN (NE)	VALOR	DESCRIPCIÓN
ESPORÁDICO (EE)	1	La exposición al riesgo se presenta de manera eventual
OCASIONAL (EO)	2	La situación de exposición se presenta alguna vez dentro de la jornada laboral
FRECUENTE (EF)	3	La situación de exposición se presenta varias veces durante la jornada laboral por tiempos cortos
PERMANENTE (EP)	4	La situación de exposición al riesgo se presenta sin interrupción o varias veces por tiempos prolongados

Nota. Esta tabla muestra el valor que se asigna de acuerdo con el tiempo de exposición al riesgo durante la jornada laboral. GTC-45 (2012).

7.3.2.4 Nivel de probabilidad

El Nivel de Probabilidad (NP) de materialización del riesgo se puede cuantificar relacionando el tiempo de exposición y la posibilidad de ocurrencia. Para determinar el NP se proponen los valores descritos en la tabla 43.

Tabla 43

Nivel de Probabilidad

NIVEL DE PROBABILIDAD (NP)	VALOR	DESCRIPCIÓN
BAJO	2	No es esperable que se materialice el riesgo, pero se puede presentar de manera esporádica.
MEDIO	4	Situación deficiente con exposición al riesgo ocasional o esporádica. El riesgo se puede materializar varias veces durante la jornada laboral.
ALTO	18	Situación deficiente con exposición continua o frecuente. La materialización del riesgo ocurre frecuentemente.
MUY ALTO	40	Situación crítica con exposición constante y altamente probable. El riesgo se materializa de forma casi segura.

Nota. Esta tabla muestra el valor que se asigna de acuerdo con la probabilidad de ocurrencia o manifestación del riesgo y la exposición del trabajador durante la jornada laboral. GTC-45 (2012).

Tabla 44

Tabla para la determinación del Nivel de Probabilidad

NIVEL DE PROBABILIDAD (NP) NP= ND X NE		NIVEL DE EXPOSICIÓN (NE)			
		4	3	2	1
NIVEL DE DEFICIENCIA (ND)	10	40(A)	30(A)	20(A)	10(M)
	6	24(A)	18(M)	12(M)	6(B)
	2	8(B)	6(B)	4(B)	2(B)

Nota. Esta tabla muestra el valor que se asigna de acuerdo con la probabilidad de ocurrencia o manifestación del riesgo, el nivel de deficiencia de los controles existentes y la exposición. GTC-45 (2012).

7.3.2.5 Nivel de consecuencia

El nivel de consecuencia permite evaluar y cuantificar el efecto que causa la materialización del riesgo en la integridad física del trabajador, y que puede resultar en un accidente o enfermedad laboral.

Para determinar el NC se proponen los valores descritos en tabla 45.

Tabla 45

Nivel de Consecuencia

NIVEL DE CONSECUENCIA (NC)	VALOR	DESCRIPCIÓN
LEVE (L)	10	Lesiones o enfermedades que no requieren incapacidad
GRAVE (G)	25	Lesiones o enfermedades con incapacidad laboral temporal
MUY GRAVE (MG)	60	Lesiones o enfermedades graves irreparables (Incapacidad permanente parcial o invalidez)
MORTAL O CATASTRÓFICO (M)	100	Muerte(s)

Nota. Esta tabla muestra el valor que se asigna de acuerdo con las consecuencias que puede dejar la ocurrencia o manifestación del riesgo, que puede resultar en un accidente o enfermedad laboral. GTC-45 (2012).

La determinación del NR dependerá de la evaluación (NP x NC) de los riesgos identificados en cada una de las matrices establecidas en esta guía, y que tendrá la estructura descrita en la tabla 46.

Tabla 46

Determinación del Nivel de Riesgo.

NIVEL DE RIESGO Y DE INTERVENCIÓN		NIVEL DE PROBABILIDAD (NP)			
NIVEL DE RIESGO (NR)= NP * NC		40	18	4	2
NIVEL DE CONSECUENCIA (NC)	100	4000	1800	400	200
	60	2400	1080	240	120
	25	1000	450	100	50
	10	400	180	40	20

Nota. Esta tabla describe la propuesta para determinar el NR en cada una de las matrices con base a la evaluación de los riesgos identificados. GTC-45 (2012).

Controles existentes: revisar la eficacia de los sistemas de ventilación actuales y su capacidad para mitigar los riesgos identificados.

7.4 Priorización de los riesgos

Luego de identificar y evaluar los riesgos en la minería subterránea derivados de atmósferas viciadas, es crucial realizar un proceso de priorización. Este enfoque permite dirigir los esfuerzos hacia los peligros más críticos para implementar acciones correctivas y/o preventivas de forma inmediata, sin descuidar los demás riesgos presentes, los cuales deben ser gestionados progresivamente. A continuación, se detalla la importancia de realizar la priorización de los riesgos:

- **Prevención de accidentes mayores:** al enfocar las medidas de control en los riesgos con mayor probabilidad de ocurrencia y consecuencias más severas, se minimiza la posibilidad de accidentes graves que puedan afectar la seguridad de los trabajadores y la operación.
- **Mejora en la toma de decisiones:** la priorización proporciona una base clara para decidir qué acciones deben implementarse primero, asegurando que los riesgos más peligrosos sean abordados antes de que se conviertan en emergencias.

- **Optimización de recursos:** priorizar los riesgos permite asignar recursos limitados, como tiempo, personal y presupuesto, de manera eficiente hacia los problemas más graves que requieren atención inmediata.
- **Cumplimiento de normativas:** contribuye a cumplir con las regulaciones de seguridad, que a menudo requieren que los riesgos más significativos sean gestionados de manera prioritaria para asegurar un entorno de trabajo seguro.

Una vez que se ha comprendido la importancia de realizar un análisis detallado de los riesgos más significativos en la operación minera subterránea, y de priorizarlos según su nivel de exposición y las posibles consecuencias, se procederá a la priorización considerando los criterios de la tabla 47.

Tabla 47

Criterios para la aceptación del riesgo.

ACEPTABILIDAD DEL RIESGO			
NIVEL DE RIESGO	VALOR	SIGNIFICADO	
BAJO	200 - 20	No intervenir, salvo que un análisis mas preciso lo justifique.	Aceptable
MEDIO	1079 - 201	Mejorar el control existente	Mejorable
ALTO	2400 - 1080	Corregir o adaptar medidas de control	No aceptable o aceptable con control específico
MUY ALTO	Mayor a 2400	Situación crítica, corrección urgente.	No aceptable

Nota. Esta tabla describe la aceptabilidad o no del riesgo. (GTC-45) 2012.

Ver anexo 1.1. Ejemplo de cuantificación del riesgo de una mina.

7.4.1 Monitoreo y revisión

Normas internacionales, como la ISO 31000, destacan la importancia de un seguimiento constante y dinámico de los riesgos, asegurando que las medidas de control implementadas sean efectivas y se mantengan actualizadas. Este principio adquiere especial relevancia en el contexto de la minería subterránea; pues suponen la obligación de realizar un monitoreo continuo de la calidad del aire y una revisión periódica de los sistemas de ventilación (Decreto 1886, 2015, art. 48).

De igual forma, el Decreto 1072 de 2015 integra estas actividades dentro del marco del SG-SST, promoviendo una gestión sistemática y documentada de los riesgos asociados a atmósferas viciadas.

La correcta aplicación de estos lineamientos es crucial para la protección de los trabajadores y el cumplimiento de las normativas vigentes, permitiendo una operación minera más segura y eficiente.

7.4.2 Supervisión continua

En el contexto de atmósferas viciadas en minería subterránea, la supervisión o monitoreo debe ser un proceso continuo para asegurar que los controles de riesgo sean efectivos y estén siendo implementados correctamente, esto implica la implementación de diversos procedimientos, que se describen a continuación.

Sistemas de monitoreo en tiempo real: instalar sistemas de monitoreo de gases en tiempo real en las áreas críticas identificadas. Estos sistemas deben ser capaces de detectar niveles peligrosos de metano (CH₄), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), y otros gases tóxicos o explosivos, configurados con alarmas automáticas que se activen cuando los niveles de gas excedan los límites seguros establecidos por el Decreto 1886 de 2015. Las alarmas deben ser visibles y audibles, y estar conectadas a un sistema de notificación que informe a los supervisores y a la sala de control central.

Es obligatorio realizar mediciones diarias de la concentración de gases en el aire y registrar estos datos de forma precisa. En caso de que los niveles excedan los límites permitidos, se deben tomar acciones correctivas inmediatas.

Estas mediciones de atmósferas viciadas deben ser incorporadas dentro de las revisiones periódicas del SG-SST, para asegurar que los riesgos se están gestionando adecuadamente, asegurando que todas las mediciones y datos de calidad del aire se registren y almacenen de manera sistemática. Esto es esencial para cumplir con los requisitos del Decreto 1072 de 2015.

Evaluación constante de la efectividad de las medidas de control: revisar regularmente la efectividad de los sistemas de ventilación y de detección, asegurando que están operando de manera óptima. Para esto, los equipos de detección de gases deben ser revisados y calibrados regularmente para asegurar su precisión y fiabilidad.

Adicionalmente, se deben establecer procedimientos para la revisión regular de los datos recopilados por los sistemas de monitoreo. Analizar tendencias a lo largo del tiempo para identificar patrones que puedan indicar un aumento en los riesgos.

En lo concerniente al Sistema de Gestión y Seguridad en el Trabajo y el Decreto 1886 de 2015, se debe realizar las respectivas evaluaciones de ejecución implementando indicadores de desempeño específicos para la gestión del riesgo de atmósferas viciadas y evaluar su cumplimiento de forma periódica.

A continuación, se presentan algunos indicadores importantes para tener en cuenta, en la posterior evaluación:

A. Concentración de gases tóxicos: medición de la concentración de gases tóxicos como monóxido de carbono (CO), metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y niveles de O₂ en las áreas subterráneas.

B. Aforos de ventilación: Medición, determinación y control de los siguientes aspectos para asegurar un ambiente seguro:

- Velocidad del Aire (m/s);
- Caudal de Aire (m³/s o m³/min).
- Temperatura y Humedad del Aire.
- Dirección del Aire.

C. Tiempo de respuesta ante alarmas de gases: tiempo transcurrido desde que se activa una alarma de gas hasta que se inicia una acción correctiva (evacuación, ventilación, etc.).

- **Tiempo de activación de la alarma:** se mide desde el momento en que los sensores de gases detectan una concentración peligrosa hasta la activación automática de la alarma sonora o visual.
- **Cobertura de alerta:** porcentaje de alarmas activadas correctamente frente a las falsas alarmas o fallas del sistema.

D. Eficiencia del sistema de ventilación: incorporando los parámetros de aforos de ventilación y los registros de medición de gases intrínsecos en el plan de ventilación, se debe evaluar el flujo de aire y la capacidad del sistema de ventilación para mantener la calidad del aire dentro de los límites seguros.

- **Presión Diferencial (Pa):** Presión diferencial entre labores principales y secundarias.
- **Eficiencia energética del sistema de ventilación:** relación entre el consumo de energía (kWh) y el caudal de aire generado (m³/s).
- **Distribución del aire:** porcentaje de cobertura de ventilación en las zonas de trabajo.
- **Recirculación de aire:** porcentaje de recirculación de aire en las labores mineras.
- **Cumplimiento del plan de ventilación:** porcentaje de cumplimiento con las rutas de ventilación, ubicaciones de ventiladores y caudales planificados.
- Porcentaje de cumplimiento de los caudales de aire requeridos y concentración de gases en los niveles permitidos.

E. Frecuencia de calibración y mantenimiento de equipos de monitoreo: verificación de la frecuencia de calibración y mantenimiento de los equipos de monitoreo de gases.

- **Frecuencia de mantenimiento preventivo:** número de mantenimientos preventivos realizados al año de ventiladores, ductos, y equipos de medición.
- Porcentaje de equipos de ventilación operativos.
- **Frecuencia de Calibración de los sensores:** número de calibraciones realizadas al año por cada sensor o dispositivo.

- **Tasa de fallos o averías de equipos:** número de fallos por cada 100 horas de operación o número de incidentes por año. Se busca entender cuán confiable es el equipo en ambientes agresivos, donde la corrosión, polvo, humedad y gases pueden acelerar el desgaste y las averías. Un alto índice de fallos indica que el equipo no está bien adaptado o necesita mejoras en su mantenimiento. Este indicador permite prever cuándo es probable que ocurra una falla, así como establecer calendarios de mantenimiento.
- Disponibilidad operativa de los equipos de Monitoreo: porcentaje de disponibilidad operativa de los equipos (tiempo en funcionamiento dividido por el tiempo total).
- Precisión de los equipos tras la calibración: desviación entre las lecturas del equipo calibrado y los estándares de referencia.

F. Incidencias relacionadas con atmósferas viciadas:

- número de incidentes o casi incidentes relacionados con atmósferas viciadas (intoxicaciones, evacuaciones de emergencia, etc.).
- Número de incidentes relacionados con gases tóxicos: número de incidentes de intoxicación registrados por año o mes.
 - Número de incidentes relacionados con gases asfixiantes: Número de casi incidentes por gases asfixiantes mensual y anual.
 - Número de incidentes relacionados con gases explosivos: número de incidentes por gases explosivos registrados por año o mes.

G. Capacitación y conocimiento del personal:

porcentaje de personal que ha recibido capacitación específica en la gestión de atmósferas viciadas y en los procedimientos de emergencia.

- Cobertura de capacitación sobre atmósferas viciadas: porcentaje de personal capacitado.
- Frecuencia de capacitación: número de sesiones de capacitación por semestre o año.

G. Cumplimiento de auditorías y revisiones periódicas:

cumplimiento del cronograma de auditorías y revisiones periódicas del sistema de gestión de riesgos.

I. Ruta de evacuación

- Tiempo de evacuación de los trabajadores: tiempo promedio (en minutos) que tardan los trabajadores en llegar a una zona segura o un refugio, según lo establecido en el plan de emergencia.
- Cumplimiento de procedimientos de evacuación: porcentaje de trabajadores que cumplieron con los tiempos de evacuación según lo previsto.

G. Respuesta del equipo de emergencia:

tiempo que tarda el equipo de emergencia o personal especializado en llegar a la zona afectada tras la activación de la alarma de gases y neutralizar o mitigar el riesgo de gases (ventilación, reparación de fugas, etc.).

- Tiempo de activación del equipo de respuesta: tiempo promedio (en minutos) de activación del equipo de respuesta en emergencias.
- Tiempo de resolución de la emergencia: tiempo promedio de mitigación del riesgo (en minutos u horas) desde la activación de la alarma.

G. Socorredores mineros:

es fundamental que al menos el 10% del personal esté capacitado para la atención de emergencias mineras. Este equipo debe estar estratégicamente distribuido entre los diferentes turnos operativos de la mina, garantizando que, en caso de un evento, haya personal preparado disponible para apoyar en la gestión de la emergencia.



7.4.3 Auditorías y revisiones periódicas

Las atmósferas viciadas, caracterizadas por la presencia de gases tóxicos o explosivos, representan un riesgo significativo en las operaciones mineras subterráneas. Para mitigar estos riesgos, es imprescindible implementar auditorías y revisiones periódicas que garanticen la efectividad de las medidas de control y el cumplimiento de las normativas vigentes.

Auditorías de seguridad: se recomienda realizar al menos una auditoría anual para evaluar la correcta implementación de los controles establecidos y el cumplimiento de la normativa aplicable.

Revisiones del sistema de ventilación: estas deben efectuarse trimestralmente para verificar que el sistema de ventilación elimine eficazmente los gases peligrosos y mantenga una atmósfera segura en las labores mineras. **Mantenimiento de equipos de detección de gases:** los equipos deben ser inspeccionados y calibrados mensualmente para asegurar su funcionamiento óptimo y la precisión de las mediciones.

Actualización del plan de emergencias y contingencia: este plan debe revisarse anualmente o después de cualquier cambio significativo en las operaciones para mantenerlo alineado con las necesidades actuales de la mina. **Simulacros de emergencia:** se deben realizar de forma trimestral o semestral para evaluar y fortalecer la capacidad de respuesta del personal ante situaciones críticas, asegurando una adecuada preparación ante emergencias.

Normatividad aplicable

La norma ISO 31000 proporciona un marco de referencia para la gestión del riesgo, promoviendo un enfoque sistemático, continuo y dinámico. En el contexto colombiano, el Decreto 1886 de 2015 establece disposiciones específicas para la seguridad minera, incluyendo la gestión de atmósferas viciadas, mientras que el Decreto 1072 de 2015 regula el Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST), integrando estas medidas dentro de la gestión organizacional.



A continuación, se presenta un paso a paso detallado para realizar auditorías y revisiones periódicas de la gestión de atmósferas viciadas en minería subterránea, alineado con estos marcos normativos.

A. Planificación de la auditoría

- **Definición del alcance:** determinar los aspectos específicos a auditar, como los sistemas de detección de gases, la efectividad de la ventilación, la capacitación del personal y el cumplimiento de los procedimientos de seguridad.
- **Establecimiento de los criterios de auditoría:** los criterios deben basarse en las directrices de la ISO 31000; las obligaciones legales del Decreto 1886, y los requisitos del Decreto 1072. Estos criterios deben cubrir la identificación de riesgos, las medidas de control y la respuesta ante emergencias.
- **Selección del equipo auditor:** conformar un equipo multidisciplinario que incluya expertos en seguridad minera, ingenieros, y representantes del SG-SST para asegurar una evaluación integral y objetiva.

B. Realización de la auditoría

- **Recopilación de datos:** recoger información relevante a través de la revisión de registros, entrevistas con el personal, y observaciones in situ. Esto incluye analizar las mediciones de gases, los registros de mantenimiento de equipos, y los informes de incidentes relacionados con atmósferas viciadas.
- **Evaluación de la conformidad:** comparar las prácticas actuales con los criterios establecidos, identificando desviaciones, incumplimientos o áreas de riesgo no adecuadamente gestionadas.
- **Identificación de no conformidades:** documentar las no conformidades encontradas, tales como fallos en el sistema de ventilación, equipos de detección no calibrados o deficiencias en la capacitación sobre atmósferas viciadas.

C. Elaboración del informe de auditoría

- **Documentación de hallazgos:** redactar un informe detallado que incluya todas las no conformidades, áreas de mejora y las recomendaciones necesarias para corregir las deficiencias.
- **Revisión y validación del informe:** presentar el informe a la alta dirección y a los responsables del SG-SST para su revisión y validación. Es fundamental que el informe sea claro, con recomendaciones prácticas y viables.

D. Implementación de acciones correctivas

- **Desarrollo de un plan de acción:** elaborar un plan de acción que detalle las medidas correctivas, los responsables de su implementación y los plazos específicos para su ejecución. El plan debe priorizar las acciones de acuerdo con el nivel de riesgo asociado a cada no conformidad. Para la creación de este plan de acción, se deben considerar los siguientes aspectos:
- **Identificación del problema:** determinar con precisión el problema específico relacionado con las atmósferas viciadas.

Parámetros:

- Tipo y fuente de atmósferas viciadas: gases tóxicos, deficiencia de oxígeno (O₂), etc.
- Ubicación y extensión del problema: en qué ubicación de la mina se encuentra el problema.
- Datos y evidencias que respalden la identificación del problema: registro de gases y toma de datos en la labor minera tomadas por el personal responsable y documentados en sus respectivas planillas y tableros.
- Evaluación de causas: analizar las causas de origen del problema para asegurar que las acciones correctivas aborden las fuentes subyacentes.

Parámetros:

- Causas inmediatas y básicas del problema.
- Factores contribuyentes, como fallos en equipos o procedimientos inadecuados.
- Evaluación de eventos previos que hayan podido contribuir al problema.
- Desarrollo de medidas correctivas: crear acciones correctivas específicas basadas en la evaluación de causas para resolver el problema identificado.

Parámetros:

- **Tipo de medida correctiva:** cambio en procedimientos, reparación o reemplazo de equipos, ajustes en el sistema de ventilación, etc.
- **Responsables de implementar cada medida:** involucrar a todos los responsables del plan de ventilación y SG-SST.
- **Plazos para la implementación:** realizar el debido cronograma de control y seguimiento y responsables.

E. Seguimiento de las acciones correctivas:

establecer un mecanismo de seguimiento para asegurar que las acciones correctivas se implementen según lo planificado y que se resuelvan las no conformidades en el plazo estipulado.

A continuación, se presenta una descripción del proceso para realizar el seguimiento del plan de acción a implementar.

Desarrollo del plan de seguimiento: crear un plan de seguimiento detallado que establezca cómo se supervisarán las acciones correctivas.

Parámetros:

- Objetivos y criterios de éxito del plan de acción.
- Actividades específicas de seguimiento.
- Cronograma y frecuencia de revisiones.

Asignación de responsabilidades: asignar responsabilidades claras para cada aspecto del seguimiento.

Parámetros:

- Personas o equipos responsables del monitoreo de cada acción correctiva.
- Roles y funciones específicas en el proceso de seguimiento.

Monitoreo continuo: realizar un monitoreo constante de las atmósferas viciadas para verificar la efectividad de las acciones correctivas.

El monitoreo continuo de las atmósferas viciadas es esencial para garantizar la seguridad en las minas subterráneas, especialmente en aquellas donde los riesgos asociados con la acumulación de gases tóxicos o explosivos, como el monóxido de carbono (CO), metano (CH₄) o dióxido de carbono (CO₂), son significativos. Este monitoreo también es crucial en minas situadas en condiciones geológicas inestables, donde el riesgo de derrumbes o la liberación de gases peligrosos puede ser mayor. Además, en actividades mineras que incluyen procesos como voladuras, los cuales alteran la circulación del aire y pueden liberar gases o partículas, un sistema de monitoreo continuo es fundamental para detectar de manera temprana cualquier condición peligrosa.

La implementación de un sistema de monitoreo continuo debe ser cuidadosamente planificada. En primer lugar, es necesario realizar una evaluación de los riesgos específicos, considerando factores como la geología de la mina, la profundidad de las galerías, el tipo de mineral extraído y las condiciones operativas. Estos factores son clave para determinar las áreas de la mina que podrían ser más

propensas a la acumulación de gases nocivos. Adicionalmente, es relevante analizar el historial de incidentes relacionados con la calidad del aire para identificar zonas críticas que puedan requerir atención especial.

Otro aspecto fundamental es el cumplimiento de los requisitos normativos y las mejores prácticas de la industria, que especifican los estándares para la cantidad y tipo de equipos de monitoreo necesarios. Asimismo, se debe considerar el presupuesto disponible y la capacidad técnica para instalar, operar y mantener el sistema de monitoreo a largo plazo.



La cantidad de sensores a instalar depende de diversos factores, como el tamaño de la mina, la configuración de las galerías y los riesgos identificados. Como directriz general, se recomienda instalar al menos un sensor cada 100 a 200 metros de galería, asegurando una cobertura adecuada. No obstante, en áreas de alto riesgo, como en cercanía a frentes de trabajo o zonas de extracción intensiva, es aconsejable aumentar la densidad de sensores. Además, en lugares donde se prevé un cambio rápido en la concentración de gases, la instalación de sensores adicionales permitirá obtener datos más precisos y en tiempo real.

La distribución de los sensores debe ser estratégica para maximizar su efectividad. Estos deben instalarse en puntos críticos donde se anticipa la presencia de gases, tales como cerca de los frentes de trabajo, áreas de almacenamiento y zonas de perforación o voladuras. Además, es importante ubicar los sensores en puntos de entrada y salida de aire, teniendo en cuenta los cambios en la topografía y la ventilación natural de la mina. Se debe poner

especial atención a las zonas de posible acumulación de gases, como pozos de ventilación y espacios confinados. Para garantizar el correcto funcionamiento del sistema, se recomienda realizar pruebas en condiciones reales de la mina y ajustar la distribución de los sensores según sea necesario.

Parámetros:

- **Instrumentos de monitoreo:** utilizar sensores y equipos de medición para detectar niveles de gases y otros parámetros relevantes.
- **Frecuencia de monitoreo:** determinar la frecuencia de las mediciones según el riesgo y las condiciones operativas.

Registro y documentación: mantener un registro detallado de todas las actividades de seguimiento y resultados obtenidos.

- **Documentación:** registrar datos de monitoreo, inspecciones realizadas, y cualquier cambio en el plan de acción.
- **Informes:** generar informes periódicos sobre el estado de las acciones correctivas y su efectividad.

F. Evaluación de la efectividad: una vez implementadas las acciones correctivas, realizar una evaluación para verificar si las medidas han sido efectivas en la reducción del riesgo asociado a atmósferas viciadas.

Para hacer la evaluación de la efectividad se debe implementar:

Análisis comparativo: comparar los datos obtenidos antes y después de la implementación de las acciones correctivas.

Parámetros:

- **Niveles de gases:** comparar las concentraciones de gases peligrosos antes y después de la implementación.
- **Frecuencia de incidentes:** analizar cambios en la frecuencia de incidentes relacionados con atmósferas viciadas.

- **Mejora en ventilación:** evaluar si las medidas han mejorado la ventilación y reducido la acumulación de gases.
- **Análisis de tendencias y patrones:** identificar tendencias y patrones en los datos de monitoreo para evaluar la efectividad de las acciones.

Parámetros:

- **Tendencias temporales:** analizar cambios en los niveles de gases y otros parámetros a lo largo del tiempo.
- **Patrones de incidencias:** identificar patrones en los datos de incidentes y su relación con las acciones correctivas.
- **Revisión de impacto en la seguridad:** evaluar el impacto de las acciones correctivas en la seguridad y salud del personal.
- **Reducción de riesgos:** determinar si la implementación ha reducido significativamente los riesgos asociados con atmósferas viciadas.
- **Mejora en condiciones de trabajo:** evaluar si las condiciones de trabajo han mejorado en términos de seguridad y confort.

G. Comunicación y documentación

Difusión de resultados: comunicar los resultados de las auditorías y las acciones correctivas a todo el personal, especialmente a aquellos directamente involucrados en las operaciones subterráneas. Esta comunicación debe incluir tanto las áreas de mejora como los éxitos alcanzados, indicando como esta las condiciones atmosféricas desde lo planeado en plan de ventilación y lo hallado en campo.

Mantenimiento de registros: documentar todos los procesos de auditoría, las acciones correctivas y las revisiones periódicas en el SG-SST. Estos registros son esenciales para la trazabilidad y el cumplimiento normativo:

- Registro de formatos de gases.
- Registros de datos de aforo de ventilación.
- Tableros de gases en mina.
- Planillas o formatos de diligenciamiento.
- Toma de datos almacenado en los respectivos equipos de medición.

- Almacenamiento de datos de campo en equipos de cómputo.
- Registros y datos almacenados dentro del plan de ventilación (equipos y herramientas).

Reporte a las autoridades: de ser necesario, enviar informes de cumplimiento a las autoridades reguladoras según los requisitos de los Decretos 1886 y 1072 de 2015, asegurando que todas las acciones y hallazgos estén documentados adecuadamente.

Tener en cuenta que, la autoridad minera en cualquier momento podrá requerir los respectivos reportes de ventilación, establecidos en el plan de ventilación y la normatividad nacional. Entre los que se destacan:

- Plan de ventilación de minas (actualizado mínimo cada 6 meses).
- Reporte de control de gases.
- Reporte de evaluación de riesgos asociados a la ventilación minera.
- Reporte de inspección y mantenimiento de equipos de ventilación.
- Informe sobre incidentes y emergencias relacionadas con la ventilación.
- Informe sobre la capacitación del personal en procedimientos de ventilación y manejo de atmósferas viciadas.

H. Mejora continua

Monitoreo de las mejoras implementadas: establecer un sistema de monitoreo continuo para evaluar la efectividad de las mejoras a largo plazo, asegurando que los riesgos de atmósferas viciadas se mantengan controlados.

Revisión y ajuste de procesos: ajustar los procesos operativos y de gestión del riesgo para incorporar las mejores prácticas y cualquier cambio normativo.

Capacitación y sensibilización continua: implementar programas de capacitación continua para todo el personal, basados en los hallazgos de las auditorías, para fortalecer la cultura de seguridad y mejorar la respuesta ante posibles riesgos.

Incorporación de lecciones aprendidas: actualizar los procedimientos y documentos de gestión basándose en las lecciones aprendidas de incidentes, auditorías o cambios en procedimientos y en las normativas.



7.5 Comunicación y consulta

La comunicación y consulta no solo implican la transmisión de información, sino también la interacción continua con todas las partes interesadas, como trabajadores, supervisores, autoridades regulatorias, y la comunidad. Con el fin de garantizar que todos estén al tanto de los riesgos y de las medidas de control implementadas.

7.5.1 Interacción con las partes interesadas

Mantener una comunicación fluida con todas las partes interesadas, aseguran que estén informadas sobre los riesgos y las medidas de control implementadas. La interacción efectiva con estas partes es crucial para obtener su apoyo, asegurar el cumplimiento normativo y mejorar la seguridad en el trabajo. A continuación, se presenta un paso a paso sobre cómo gestionar esta interacción, basándose en la ISO 31000 y los Decretos 1886 y 1072 de 2015.

A. Identificación de las partes interesadas

- **Mapa de partes interesadas:** identificar todas las partes interesadas relevantes, como trabajadores, contratistas, supervisores, sindicatos, autoridades locales y reguladoras, y la comunidad afectada. Este mapa debe incluir sus roles, expectativas y preocupaciones específicas respecto a la gestión de atmósferas viciadas.
- **Clasificación de las partes:** agrupar las partes interesadas según su nivel de influencia y el impacto que pueden tener en la gestión del riesgo. Esto permite definir las estrategias de interacción más apropiadas para cada grupo.

B. Definición de canales de comunicación

- **Establecimiento de canales formales de comunicación:** asegurar que las partes interesadas tengan acceso a canales formales de comunicación como reuniones regulares, boletines informativos, reportes técnicos y plataformas digitales. Estos canales deben ser accesibles y adaptados a las necesidades de cada grupo.
- **Comunicación personalizada:** adecuar el lenguaje y el nivel de detalle según la parte interesada. Por ejemplo, las comunicaciones técnicas dirigidas a autoridades reguladoras deben diferir de las charlas operativas con los trabajadores en terreno.
- **Frecuencia de la comunicación:** definir la frecuencia con la que se actualizará a cada grupo. Por ejemplo, los trabajadores deben recibir información diaria sobre la calidad del aire, mientras que las autoridades reguladoras pueden requerir informes trimestrales.

C. Participación de los trabajadores

- **Capacitación continua:** involucrar a los trabajadores en programas de capacitación sobre los riesgos de atmósferas viciadas, los procedimientos de seguridad y el uso de equipos de detección. Esto asegura que estén al tanto de los peligros y sepan cómo responder en caso de emergencia.

- **Promoción del reporte de condiciones peligrosas:** implementar un sistema para que los trabajadores puedan informar de manera rápida y confidencial cualquier condición insegura o irregularidad detectada en los sistemas de ventilación o monitoreo de gases. A continuación, unos ejemplos explícitos:

- Realizar campañas para informar al personal sobre la importancia de reportar condiciones peligrosas.
- Ofrecer un sistema de reporte anónimo para que los empleados se sientan cómodos reportando problemas sin temor a represalias.
- Capacitar al personal sobre cómo identificar y reportar condiciones peligrosas en la ventilación.
- Establecer y comunicar procedimientos claros para el reporte de condiciones peligrosas.
- Crear un programa de incentivos para motivar a los empleados a reportar condiciones peligrosas.
- Realizar sesiones periódicas para revisar los reportes de condiciones peligrosas y proporcionar retroalimentación sobre las acciones tomadas.
- Realizar simulacros para practicar el proceso de reporte de condiciones peligrosas.
- Proveer múltiples canales para el reporte de condiciones peligrosas.
- Incorporar la revisión de condiciones peligrosas en las reuniones diarias de turno.
- Mostrar datos y resultados de las condiciones peligrosas reportadas para aumentar la conciencia y transparencia.
- Involucrar a líderes y supervisores en la promoción del reporte de condiciones peligrosas.

Reuniones periódicas: organizar reuniones regulares entre los trabajadores, supervisores y el equipo de seguridad para discutir la gestión de atmósferas viciadas. Estas reuniones permiten la retroalimentación directa y la participación en la toma de decisiones.

D. Participación de las autoridades reguladoras

- **Cumplimiento normativo y reporte:** mantener una comunicación fluida con las autoridades reguladoras para garantizar que todas las medidas de seguridad cumplan con las normativas del Decreto 1886 de 2015 y del Decreto 1072 de 2015. Esto incluye la presentación periódica de informes sobre la calidad del aire, incidentes relacionados con atmósferas viciadas y auditorías de seguridad.

- Auditorías e inspecciones conjuntas: facilitar la participación de las autoridades en auditorías de seguridad, inspecciones regulares y revisiones de los sistemas de control de atmósferas viciadas. Esto garantiza la transparencia y el cumplimiento regulatorio.

E. Retroalimentación y consulta

- Implementación de mecanismos de retroalimentación: crear mecanismos formales para que todas las partes interesadas puedan proporcionar retroalimentación sobre la gestión de atmósferas viciadas.
- Reuniones periódicas donde el personal discute problemas, incidentes y sugerencias. Plataformas para que el personal reporte incidentes y casi incidentes.
- Encuestas periódicas para recopilar opiniones del personal sobre las condiciones de trabajo y la seguridad.
- Revisión regular de los procedimientos y condiciones operativas.
- Canales donde los empleados pueden presentar sugerencias para mejorar la seguridad y las operaciones.
- Sesiones de capacitación y talleres para el personal sobre procedimientos de seguridad y nuevas prácticas.
- Comités formados por representantes de diferentes áreas para discutir y abordar temas de seguridad.
- Ejercicios prácticos para preparar al personal para situaciones de emergencia.
- Reuniones para analizar incidentes después de que ocurran y discutir las lecciones aprendidas.

Análisis de la retroalimentación recibida: evaluar la retroalimentación obtenida y utilizarla para identificar áreas de mejora. Se debe asegurar que se documente toda la retroalimentación y se realicen los ajustes necesarios en los procedimientos operativos y de seguridad.

- **Respuesta a las consultas:** responder de manera oportuna y clara a cualquier consulta o inquietud planteada por las partes interesadas, demostrando un compromiso activo con la seguridad y la gestión del riesgo.

7.5.2 Documentación y reporte

La documentación y consulta no solo aseguran que las prácticas de seguridad estén claramente definidas y seguidas, sino que también permiten una trazabilidad y un análisis continuo que son esenciales para la mejora de la gestión de riesgos.

El objetivo es asegurar que todos los procedimientos, evaluaciones y acciones sean documentados y reportados adecuadamente a las autoridades y al personal involucrado.

Para una buena documentación y reporte de la gestión del riesgo para atmósferas viciadas en minería subterránea, se debe llevar a cabo las siguientes actividades:

- **Mantenimiento de registros de interacción:** documentar todas las interacciones con las partes interesadas, incluyendo reuniones, capacitaciones, inspecciones, y consultas. Estos registros deben ser parte del SG-SST para garantizar la trazabilidad y el cumplimiento de las normativas.
- **Elaboración de informes de progreso o avances:** producir informes regulares sobre la gestión de atmósferas viciadas, destacando las medidas implementadas, los resultados obtenidos y las interacciones con las partes interesadas. Estos informes deben estar disponibles tanto para los trabajadores como para las autoridades reguladoras.



- Actualización y distribución de informes: asegurarse de que los informes y documentos relevantes se distribuyan a todas las partes interesadas pertinentes y que se actualicen de acuerdo con los resultados de auditorías y cambios normativos.

A continuación, se detalla un paso a paso sobre cómo implementar, la gestión documental y reporte en trabajos de atmósferas viciadas bajo tierra.

A. Identificación y recolección de información

- **Identificación de información crítica:** determinar qué información es esencial para la gestión de atmósferas viciadas, incluyendo registros de medición de gases, procedimientos de emergencia, y reportes de incidentes.
- **Recolección sistemática:** implementar un sistema de recolección de datos que asegure que toda la información relevante se capture de manera continua y precisa. Esto incluye los datos de monitoreo de gases, inspecciones de equipos de ventilación, y capacitaciones realizadas (con énfasis en lo establecido en el Decreto 1886).

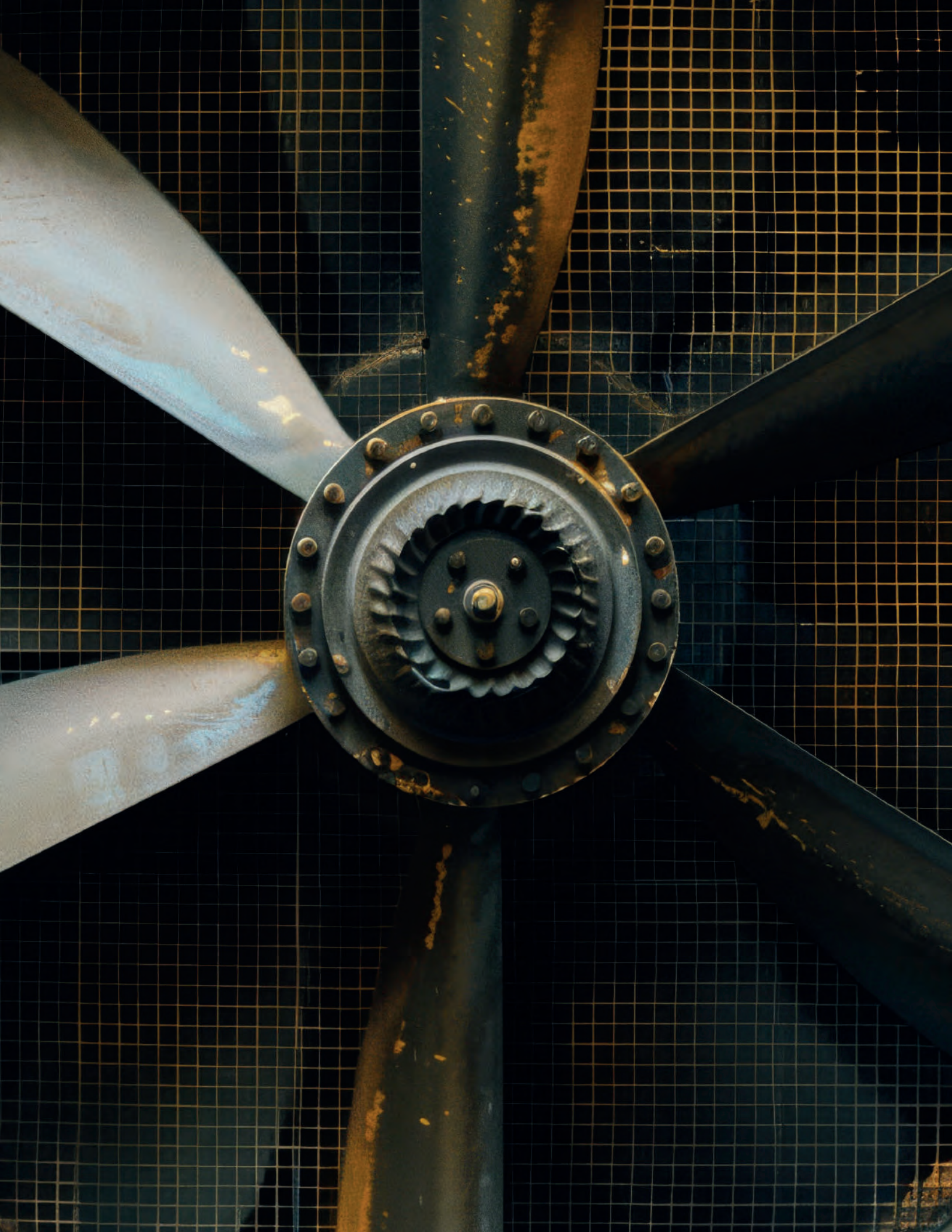
B. Registro y almacenamiento de datos

- Establecimiento de un Sistema de Gestión Documental: crear un sistema de gestión documental que permita almacenar y organizar toda la información relacionada con atmósferas viciadas. Este sistema debe estar integrado en el SG-SST, conforme al Decreto 1072 de 2015 y Decreto 1886 de 2015.
- Mantenimiento de registros actualizados: asegurar que todos los registros, incluyendo mediciones de calidad del aire, mantenimiento de equipos, evaluaciones de riesgo, y el plan de ventilación se mantengan actualizados y accesibles.
- Control de acceso: definir quiénes tienen acceso a diferentes tipos de documentación, asegurando que la información crítica esté protegida pero accesible para quienes la necesiten.

C. Elaboración de procedimientos documentados

- Desarrollo de procedimientos documentados: documentar procedimientos de la implementación del plan de ventilación y la gestión de atmósferas viciadas, que cubran desde la detección y respuesta a incidentes hasta la revisión y mantenimiento de equipos.
- Aprobación y distribución: someter los procedimientos documentados a una revisión y aprobación formal por parte de la alta dirección. Una vez aprobados, difundirlos a todo el personal relevante, asegurando que todos estén informados de los protocolos a seguir.





ATMÓSFERA MINERA Y ASPECTOS DE VENTILACIÓN EN MINERÍA SUBTERRÁNEA

La atmósfera minera y los aspectos relacionados con la ventilación en la minería subterránea son elementos cruciales para garantizar la salud y seguridad de los trabajadores. En Colombia, la regulación de estos aspectos se encuentra enmarcada en el Código de Minas, establecido en la Ley 685 de 2001, el Decreto 1886 de 2015 y el Decreto 944 de 2022, este último centrado en las disposiciones para el manejo adecuado de la ventilación en las minas. Estos marcos normativos aseguran que se mantengan condiciones óptimas para la circulación de aire, el control de gases nocivos y la prevención de incendios. Además, el Ministerio de Minas y Energía, en colaboración con la (ANM), fomenta la implementación de planes de ventilación eficientes y el monitoreo continuo de la calidad del aire. Los lineamientos establecidos en estas normativas buscan minimizar los riesgos laborales y mejorar las condiciones de trabajo dentro del sector minero. Dichos esfuerzos son fundamentales para promover un entorno seguro y saludable en la minería subterránea, contribuyendo así al bienestar de los trabajadores y a la sostenibilidad de la industria minera en Colombia.

124

La atmósfera minera subterránea hace referencia al conjunto de gases, aerosoles y partículas que circulan en el aire de las minas subterráneas. Esta atmósfera varía en función del tipo de yacimiento que se esté explotando, las actividades mineras realizadas y los sistemas de ventilación implementados en la operación.

Los componentes del aire presente en este entorno minero subterráneo se originan de diversas fuentes, las cuales incluyen:

- **Oxidaciones:** estas se llevan a cabo por procesos naturales como la respiración de los organismos presentes, la descomposición de materia orgánica, el funciona-

miento de motores de combustión interna y el uso de explosivos durante las labores mineras.

- **Gases intrínsecos:** cada yacimiento mineral libera características químicas que contribuyen a la composición del aire.
- **Polvos de roca:** la fragmentación de la roca durante la extracción genera partículas que se mezclan con el aire.
- **Otras sustancias:** diferentes actividades mineras pueden introducir a la atmósfera sustancias adicionales que afectan su calidad.

8.1 Composición del aire en las minas subterráneas

Para entender mejor la atmósfera minera, es crucial conocer la composición del aire que se encuentra en las minas subterráneas. El aire atmosférico normal, en condiciones secas, está compuesto principalmente por nitrógeno y oxígeno, junto con otros gases que influyen tanto en la seguridad como en la salud de los trabajadores. A continuación, se presenta la composición del aire en este entorno en la tabla 48 y figura 28.

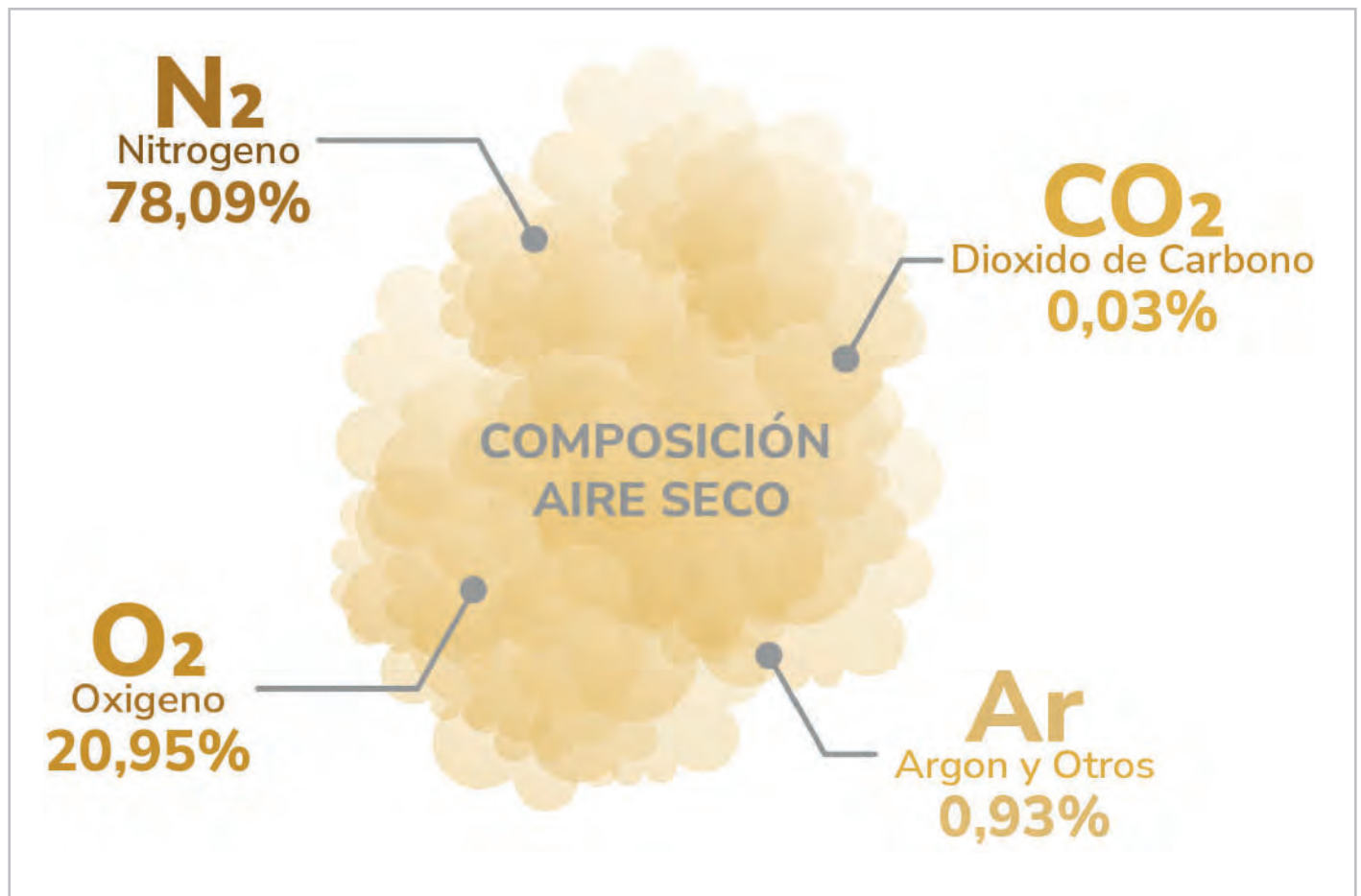
Tabla 48

Composición de aire seco.

COMPOSICIÓN DE AIRE SECO		
Nombre del gas	Símbolo	Porcentaje (%) en volumen
Nitrógeno	N ₂	78,09
Oxígeno	O ₂	20,95
Dióxido de Carbono	CO ₂	0,03
Argón y otros	Ar.	0,93

Figura 28

Composición de aire seco.



El aire también contiene pequeñas cantidades de dióxido de carbono (CO₂) y vapor de agua en porcentajes variables, así como menores cantidades de gases raros como helio (He), neón (Ne), argón (A) y criptón (Kr).

Cuando el aire se introduce en la mina subterránea, sufre un cambio en su composición y son varias las razones que conllevan a este cambio, las más relevantes se describen a continuación:

- Gases propios de la formación del yacimiento mineral, emanaciones generadas en el macizo rocoso hacia la superficie que se está excavando debido a la actividad minera. Entre los gases más representativos se encuentran el metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), nitrógeno (N₂), anhídrido sulfuroso (SO₂) y ácido sulfhídrico (H₂S).
- Gases generados por las voladuras en el avance minero: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), el óxido nítrico (NO) y ácido sulfhídrico (H₂S).
- Oxidaciones y descomposición de madera, hierro, carbón, etc.
- Respiración humana.
- Material particulado (polvo) proveniente de las labores mineras.
- Gases que proceden de aguas subterráneas.
- Fuegos y explosiones: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄).
- Niveles elevados de humedad.

8.2 Contaminantes en el aire minero subterráneo

Los principales contaminantes del aire en un entorno subterráneo de una mina son: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) en forma de grisú, anhídrido sulfuroso (SO₂), hidrógeno (H₂), gases nitrosos (NO + NO₂), polvo de roca y, en el caso de minerales radiactivos, el radón y el torio, que son isótopos radiactivos de vida corta más frecuentes, provenientes de la desintegración de isótopos de radio pertenecientes a las familias de actinio y torio. Estos componentes del aire, dependiendo de su grado de concentración, pueden representar un peligro tanto por su propia nocividad como por la disminución de oxígeno que puedan causar. En la tabla 49 se presentan los principales gases que se encuentran en la atmósfera subterránea de la mina.

Tabla 49

Clasificación de gases en la atmósfera minera subterránea.

TIPO DE GAS	GASES ASOCIADOS
Tóxicos: Provocan una disminución de O ₂ , penetrando a los pulmones y luego al resto del organismo.	- Monóxido de carbono (CO) - Ácido sulfhídrico (H ₂ S) - Dióxido de nitrógeno (NO ₂) - Anhídrido sulfuroso (SO ₂)
Asfixiantes: Son todos los gases que producen una disminución de O ₂ en el aire, debido a que ocupan el volumen de este en la atmósfera del lugar.	- Nitrógeno (N) - Dióxido de carbono (CO ₂) - Metano (CH ₄)
Explosivos e Inflamables: Son los gases que mezclados con el aire producen en presencia de un iniciador (chispa) explosión.	- Metano (CH ₄) - Monóxido de carbono (CO) - Ácido sulfhídrico (H ₂ S) - Acetileno (HC)

8.3 Características de los gases mineros

A continuación, se presentan de forma resumida las características de la atmósfera minera. Se mostrarán los gases más frecuentes en las labores subterráneas, considerando su peso específico respecto al aire, su origen en los trabajos mi-

neros, algunas propiedades físicas, sus efectos nocivos sobre el cuerpo humano, así como los dispositivos que permiten medirlos de manera práctica y operativa. En la tabla 50 se incluye una descripción general de los gases mineros más comunes en las minas subterráneas.

Tabla 50

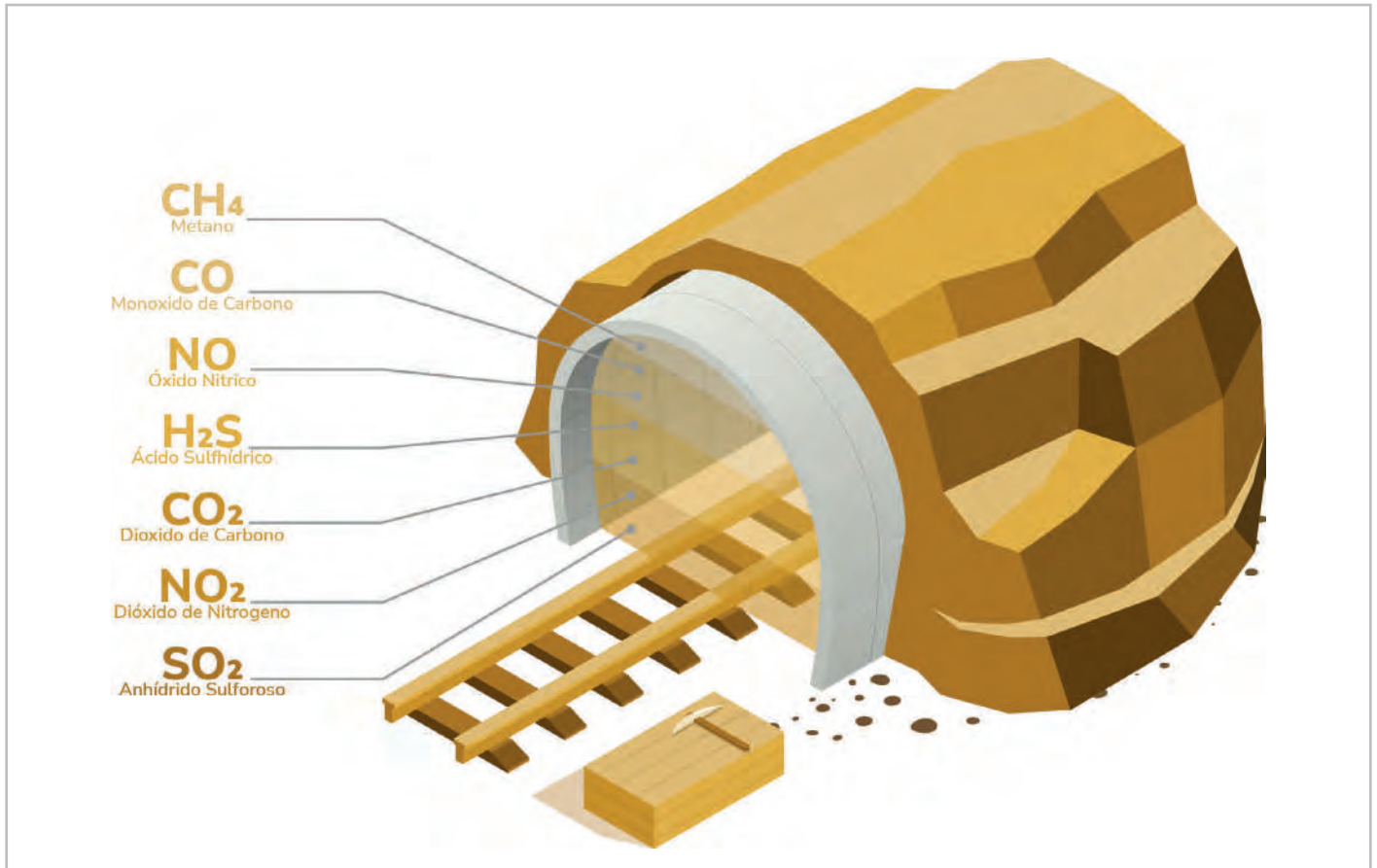
Características y descripción general de los gases más frecuentes en minas subterráneas.

CARACTERÍSTICAS Y DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS GASES MÁS FRECUENTES EN MINAS SUBTERRÁNEAS							
GAS	FÓRMULA QUÍMICA	PESO ESPECÍFICO KG/M ³	PROPIEDADES FÍSICAS	EFFECTOS NOCIVOS	EFFECTOS SOBRE LA VIDA	ORIGEN EN LOS TRABAJOS MINEROS	DETECCIÓN Y APARATOS USADOS
Oxígeno	O ₂	1.1056	<ul style="list-style-type: none"> Incoloro Inodoro Insaboro 	No es tóxico	Oxigena los tejidos a través de los glóbulos rojos.	Aire normal	Respiracion oxigenometro, multidetector, sensor de monitoreo permanente y continuo
Dióxido de carbono	CO ₂	1.5291	<ul style="list-style-type: none"> Incoloro Inodoro Sabor ligeramente ácido Irrita la vista 	Asfixiante	Elimina el oxígeno de la sangre; fuerte dolor de cabeza, daño neurologico y pérdida del sostenimiento del cuerpo. Muerte por asfixia.	Respiración estratos incendios voladuras combustión interna de máquinas, cualquier combustión	Respiración, bomba de aspiración y tubos, multidetector
Metano	CH ₄	0.5545	<ul style="list-style-type: none"> Incoloro inodoro insaboro 	Explosivo asfixiante	El metano entre 1% y 5% es combustible genera quemaduras en el cuerpo. Entre >5% y 15% genera daños internos y quemaduras graves en el cuerpo. >15% Genera asfixia	Estratos, mantos de carbón, putrefacción materias orgánicas	Metanómetro, multidetector y medidor de mezclas explosivas, sensor de monitoreo permanente y continuo
Monóxido de carbono	CO	0.9672	<ul style="list-style-type: none"> Incoloro Inodoro Insaboro 	Veneno y explosivo	Superando el vlp; el (co) excluye el oxígeno de la sangre, generando fatiga, sueño y posteriormente la muerte.	Voladuras, motores de combustión, incendios	Bomba de aspiración y tubos, multidetector, sensor de monitoreo permanente y continuo
Nitrógeno Óxido nítrico Dióxido de nitrógeno	N ₂ /NO/ NO ₂ /	1.5895 1.5192 1.0358	<ul style="list-style-type: none"> Olor irritante Pardo rojizo Sabor amargo 	Veneno	Los óxidos de nitrógeno son capaces de disolverse en el agua de los pulmones, , capaces de corroer las mucosas de las vías respiratorias.	Voladuras, motores de combustión, combustión incompleta	Olor, color, bomba de aspiración y tubos, multidetector
Anhídrido sulfuroso	SO ₂	2,26	<ul style="list-style-type: none"> Incoloro Irrita la vista 	Asfixiante tóxico	Irritación ocular y de vías respiratorias, en altas concentraciones causa edema pulmonar.	Combustión de la piritas motores térmicos	Tubo de control, bomba de aspiración
Ácido sulfhídrico	H ₂ S	1.1912	<ul style="list-style-type: none"> Olor a huevos podridos Sabor ácido 	Veneno y explosivo	Superando el vlp es muy veneno; destruye el nervio del olfato	Agua de estratos, voladuras	Olor, bomba de aspiración, multidetector

Si durante el avance de las labores subterráneas se identifican otros gases mineros, se recomienda que sean monitoreados y controlados por el encargado de la gestión y supervisión de la ventilación en la mina. De acuerdo con sus características, los principales gases mineros se ubican en las labores subterráneas como se ilustra en la siguiente figura 29.

Figura 29

Localización de los gases mineros en las labores subterráneas.



128

8.4 Importancia de la ventilación en la minería subterránea

La ventilación adecuada es esencial para garantizar un ambiente seguro y saludable en las minas subterráneas. Sus principales objetivos incluyen:

- **Dilución de contaminantes:** la ventilación ayuda a reducir la concentración de gases, previniendo la exposición de los trabajadores a niveles peligrosos.
- **Cumplimiento de la normatividad:** mantener el cumplimiento de las normas establecidas en los decretos 1886 de 2015 y 944 de 2022 en referencia a concentraciones de polvo, gases, radiación y condiciones climáticas.

- **Control de temperatura:** este sistema juega un papel clave en la regulación térmica del entorno laboral, especialmente en operaciones donde se generan calor y humedad, mejorando las condiciones de trabajo.
- **Concentraciones de polvo:** se debe garantizar que las concentraciones de polvo en el aire estén dentro de los valores límites permisibles, que no generen efectos nocivos para los trabajadores que desarrollan la actividad minera subterránea.
- **Aporte de oxígeno:** Es fundamental mantener niveles adecuados en $O_2 > 19,5 \%$ para que se pueda respirar y se pueda neutralizar completamente los agentes nocivos que se encuentren en la atmósfera minera y se garantice la salud efectiva de los trabajadores.

8.5 Sistemas de ventilación

La ventilación tiene como objetivo mantener una atmósfera adecuada en la mina, que permita trabajar en condiciones ambientales y de seguridad confortables. Existen diferentes métodos y sistemas de ventilación utilizados en la minería subterránea:

- **Ventilación natural:** este tipo de ventilación se basa en las diferencias de presión y temperatura para facilitar la circulación del aire. Para el uso de este método se debe contar con un acceso para la entrada del aire limpio y otro para la salida del aire viciado, (figura 30). Sin embargo, su efectividad disminuye en minas profundas, donde resulta difícil mantener un flujo de aire adecuado. En Colombia a partir de la reglamentación del Decreto 1886 de 2015 en su artículo 40, este tipo de ventilación no es suficiente en minas bajo tierra, para lo cual se indica que toda labor subterránea debe contar con un circuito de ventilación forzada.

Figura 30

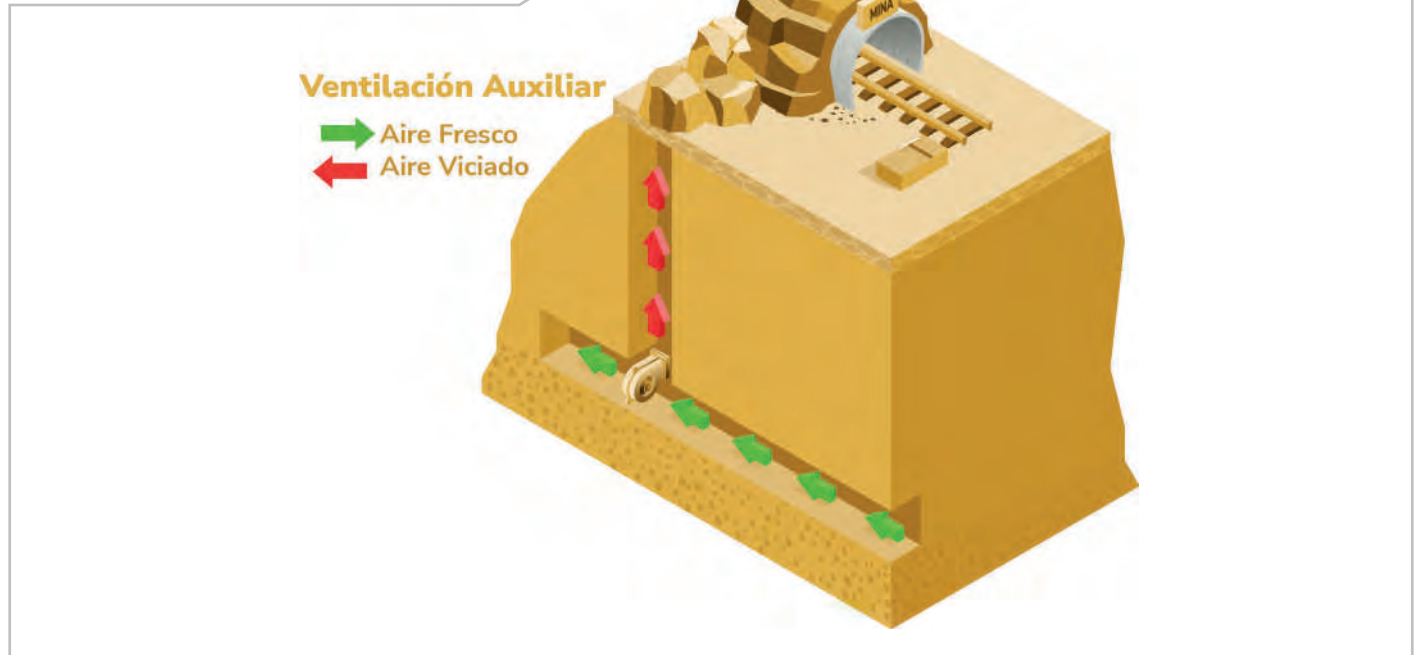
Ventilación natural en minas subterráneas.



- **Ventilación auxiliar:** utiliza ventiladores y compresores para forzar el aire fresco en el sistema, (ver figura 31). Es el método más utilizado en minas subterráneas y requiere un diseño por personal capacitado para garantizar su efectividad.

Figura 31

Ventilación auxiliar en m

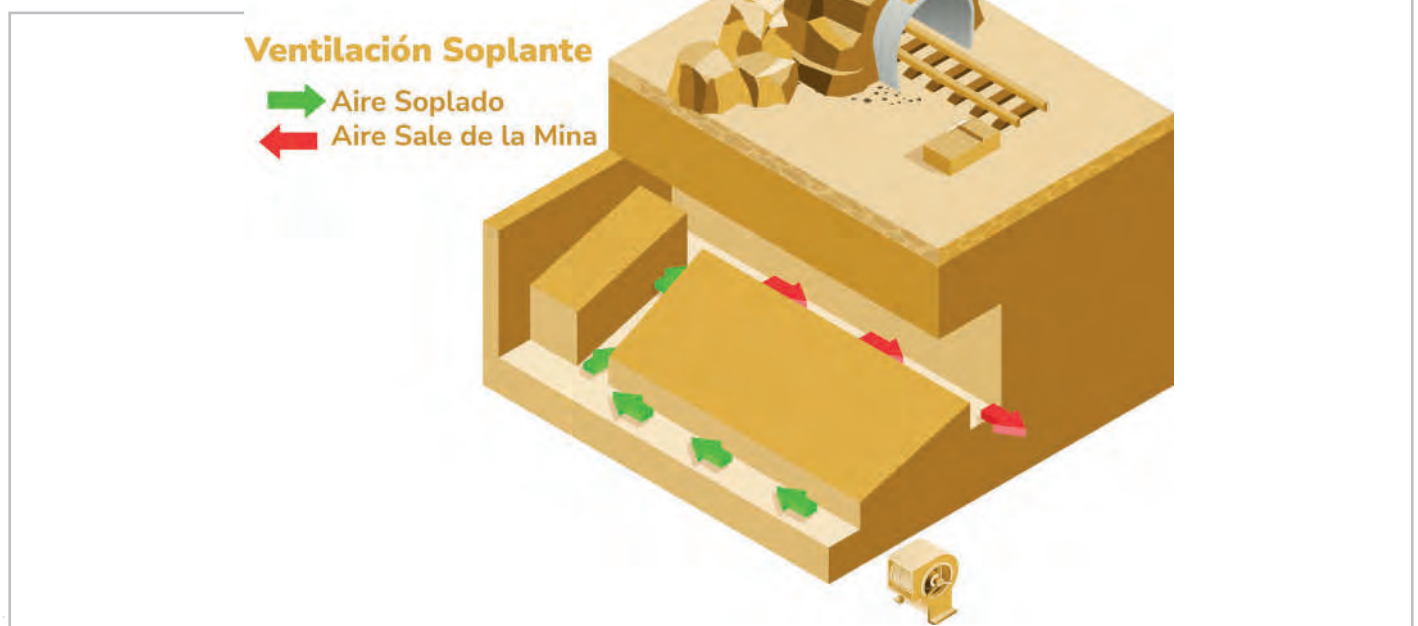


Este tipo de ventilación se puede clasificar en dos categorías, según la forma en que el ventilador genera el flujo de aire:

- **Ventilación soplante:** en este caso, se emplea un ventilador que inyecta aire fresco al interior de la mina o a los frentes de trabajo, sitios regularmente ciegos. El recorrido del flujo del aire se representa en la figura 32.

Figura 32

Ventilación soplante



- **Ventilación aspirante:** en este sistema se emplean ventiladores que crean una depresión, el aire es succionado por el ventilador, lo que influye en la ventilación general de la mina. A continuación, se presenta la figura 33 que ilustra la dirección del flujo de aire.

Figura 33

Ventilación aspirante.



- **Ventilación mixta:** este tipo combina elementos de ventilación natural y auxiliar, optimizando así el flujo de aire y mejorando la calidad de este.
- **Ventilación principal:** es la que lleva el flujo de aire a las principales vías subterráneas, circulando por toda la sección.

Con el avance de las labores mineras, se vuelve necesaria la planificación del tipo de ventilación a utilizar. Posteriormente, se realiza el cálculo de la ventilación, el cual se adaptará a las necesidades específicas de cada labor subterránea, cumpliendo con la normativa vigente. Este proceso debe ser realizado por un profesional idóneo y competente en el ámbito de la ventilación de minas.



PLAN DE VENTILACIÓN

La ventilación en minas es una operación fundamental para garantizar el suministro de aire fresco y limpio en todas las actividades mineras. Su función principal es diluir los gases contaminantes y el material particulado, asegurando así una atmósfera segura y adecuada para el trabajo.

Es crucial analizar los diferentes parámetros que conforman el circuito de ventilación de la mina con el propósito de identificar los puntos críticos donde no se garantiza un flujo y caudal de aire óptimos, así como las áreas con altas concentraciones de gases contaminantes y partículas en suspensión. Este análisis permitirá desarrollar alternativas de mejora desde una perspectiva técnica y operacional, priorizando la implementación de buenas prácticas en el sistema de ventilación y un monitoreo efectivo que garantice su operación continua y eficiente.

A continuación, se detallan los componentes clave de un plan de ventilación efectivo.

9.1 Análisis de la ventilación actual

La evaluación del circuito de ventilación natural de la mina es un paso esencial para determinar la cantidad de aire fresco que llega a cada frente de trabajo y verificar si los caudales de aire son suficientes para garantizar el bienestar del personal que labora bajo tierra. Para llevar a cabo esta evaluación, es indispensable disponer de un plano topográfico de la mina que detalle las direcciones de los flujos de aire y marque los puntos críticos donde se requiera implementar mejoras en el sistema de ventilación.

Este análisis se desarrolla en tres fases principales:

- Fase 1. En esta etapa, se recopila información clave para caracterizar el sistema de ventilación de la mina. Esto incluye determinar si la ventilación es natural o forzada, identificar los equipos empleados, evaluar su ubicación dentro de la mina, su estado de mantenimiento y su eficiencia operativa. Asimismo, se verifica si se realizan aforos regulares y si se cuenta con los cálculos correspondientes de caudales. Es igualmente fundamental confirmar la existencia de indicadores que midan las condiciones termo ambientales y evalúen la presencia de gases nocivos.
- Fase 2. Con la información obtenida durante la inspección, se procede a analizar si los requerimientos de caudal son suficientes para las necesidades operativas de la mina. Esto incluye:
 - Realizar el cálculo de la resistencia total del circuito de ventilación actual.
 - Verificar la magnitud de las caídas o pérdidas de presión en cada sector de la mina.

Una vez identificadas las características del circuito de ventilación mediante el registro y la medición de aforos y gases presentes en la mina, se evalúa el estado actual del sistema considerando parámetros clave como las condiciones termo ambientales.

De acuerdo con el (Decreto 1886, 2015), modificado por el (Decreto 944, 2022), que regula las actividades de minería subterránea, se analizan los datos de ventilación utilizando los indicadores medibles establecidos en dicha normativa.

Tabla 51

Indicadores de evaluación de condiciones termo ambientales

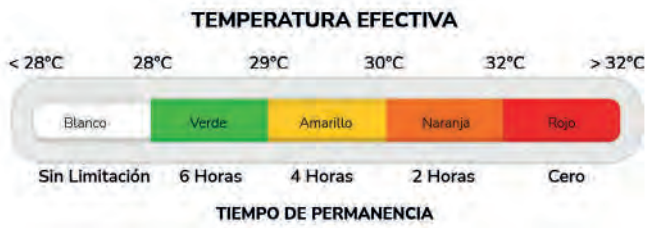
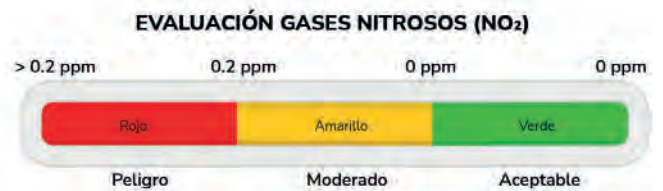
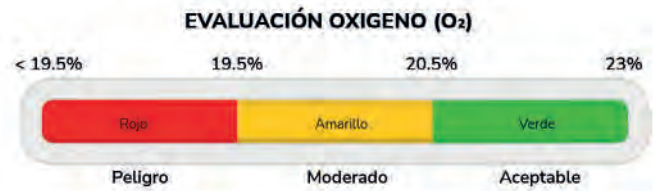
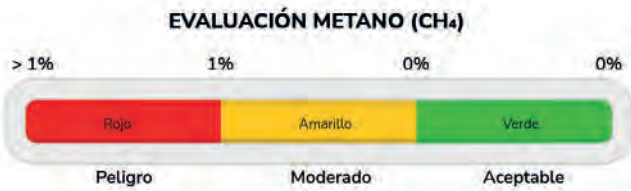


Tabla 52

Indicadores de evaluación de gases



Para el caso de las minas de carbón las minas se clasifican según las concentraciones de gases presentes, esta clasificación se puede evidenciar en la tabla 3 (Capítulo 5).

- **Fase 3. Diagnóstico:** una vez cumplidas las dos fases anteriores se procederá a dar el diagnóstico de las condiciones de la mina determinando y ubicando los puntos críticos donde el flujo de aire sea bajo o nulo como también las zonas con altas concentraciones de gases.

De esta manera clasificará según su explosividad para así tomar las medidas necesarias, realizar diseños de los circuitos de ventilación y garantizar una atmósfera respirable para el personal bajo tierra, mejorando la seguridad de los frentes de trabajo dentro de la excavación.

9.2 Plan de mejoramiento de la ventilación

Tras el análisis del sistema de ventilación actual, se procederá a desarrollar un plan de mejoramiento del circuito de ventilación. Este plan incluirá la evaluación de la necesidad de implementar ventilación mecánica (ventilación forzada) en función de los resultados obtenidos durante el diagnóstico y las tres fases previas. Para ello, se utilizarán cálculos detallados y herramientas de software especializado, que permitirán simular el flujo de aire dentro de la mina y optimizar los caudales en todos los sectores, mejorando la eficiencia general del sistema.

El diseño del plan debe adoptar un enfoque integral que priorice la seguridad, la salud y el bienestar de los trabajadores, además de garantizar la eficiencia operativa de la mina. Además, debe incluir una evaluación exhaustiva de las condiciones actuales de ventilación y proponer estrategias específicas para su optimización, considerando factores clave como:

- La distribución uniforme del caudal de aire.
- La eliminación de concentraciones de gases nocivos y material particulado.
- La reducción de pérdidas de presión en el circuito de ventilación.

9.2.1 Responsable de la ventilación

Para garantizar la mejora continua del sistema de ventilación en la mina, es crucial establecer roles y responsabilidades claras en la implementación y supervisión del plan, asignando estas tareas al ingeniero de minas, al administrador de la mina y al jefe de turno, mientras que la verificación del cumplimiento de las actividades de monitoreo y control será responsabilidad del ingeniero y del titular minero y del personal de la mina.

9.2.2 Identificación de necesidades

1. El objetivo de este cálculo es determinar los caudales necesarios para garantizar una ventilación adecuada en los diversos puntos de la mina, incluidos los frentes de explotación, niveles de transporte, nichos de seguridad, entre otros. Este flujo de aire es esencial para diluir gases explosivos y tóxicos, así como para asegurar un suministro suficiente de oxígeno a los trabajadores. Para lograrlo, se deben considerar los siguientes aspectos:
2. el cálculo del caudal debe comenzar por cuantificar las necesidades en los frentes de explotación y, posteriormente, en otras labores.
3. Se debe determinar el caudal necesario con base al número de personas, a las emisiones de metano (CH₄), los gases producidos por los equipos diésel, la dilución de gases de otros procesos de oxidación y el consumo de explosivos.
4. El caudal final no es solo una suma algebraica, deben tenerse en cuenta los coeficientes de reparto y un factor de seguridad recomendado del 30% debido a las fugas.

9.2.2.1 Caudal por número de personas

Para este cálculo, es fundamental considerar no solo a los colaboradores habituales que trabajan durante el turno con la mayor cantidad de personal, sino también a todas las personas que podrían ingresar a las áreas subterráneas. Esto incluye al personal de los frentes de preparación y desarrollo, tajos, cocheros, supervisores, y equipos de topografía y geología, así como a los visitantes. Es imprescindible tomar en cuenta el turno con la mayor afluencia de personal para garantizar la seguridad y el cumplimiento de los requerimientos de ventilación.

El (Decreto 1886, 2015 art. 54), establece los siguientes valores para el caudal mínimo por trabajador:

- Para minas a menos de 1500 msnm: 3 m³/min (0,05 m³/s) por trabajador.
- Para minas a más de 1500 msnm: 6 m³/min (0,1 m³/s) por trabajador.

9.2.2.2 Caudal para dilución del metano (CH₄)

Para realizar el cálculo del caudal es importante tener claro los conceptos de liberación y de estratificación del gas y el flujo metano (CH₄).

En el caso de la dilución de este gas, puede involucrar una mezcla de metano (CH₄) con aire u otros gases en un proceso controlado, con el fin de reducir su concentración para prevenir riesgos de explosión y cumplir con normativas de seguridad vigentes.

Factores para la dilución del gas metano (CH₄)

- **Prevención de explosiones:** la mezcla de metano (CH₄) con aire puede formar una mezcla inflamable. Para evitar que se alcance una concentración peligrosa (el límite inferior de explosividad, LIE), se introduce un caudal de aire u otros gases que diluyan el metano (CH₄) a una concentración segura.
- **Ventilación en minas:** en lugares donde se requiere que el sistema de ventilación mantenga las concentraciones de metano (CH₄) dentro de los límites seguros.
- **Determinación del caudal necesario para dilución:** el caudal dependerá de varios factores, como la concentración inicial de metano (CH₄), el caudal de aire disponible para la dilución y la concentración objetivo-deseada. La fórmula básica para determinar el caudal necesario es:

$$C_{\text{final}} = (C_{\text{inicial}} * Q_{\text{inicial}}) / (Q_{\text{inicial}} * Q_{\text{aire}})$$

C_{final}: concentración de metano (CH₄) deseada tras la dilución.

C_{inicial}: concentración de metano (CH₄) original.

Q_{inicial}: caudal de metano (CH₄)

Q_{aire}: caudal de aire u otros gases necesarios para diluir.

9.2.2.3 Determinación de la velocidad mínima de ventilación por cada frente de explotación (v) para prevenir la estratificación del gas

- Para calcular la velocidad mínima de ventilación en un frente de explotación y prevenir la estratificación de gases, es imprescindible considerar diversos factores técnicos. Estos incluyen las características del sistema de ventilación, las propiedades físicas y químicas de los gases presentes, las dimensiones del frente de trabajo y el cumplimiento de las normativas de seguridad aplicables.
- En minería subterránea, la estratificación de gases se refiere al fenómeno en el que los gases más ligeros, como el metano (CH₄) tienden a acumularse en la parte superior del túnel, mientras que los más pesados como el dióxido de carbono (CO₂) se acumulan cerca del suelo. Este fenómeno puede ser peligroso, ya que la presencia de gases combustibles en concentraciones cercanas al LIE puede dar lugar a una explosión si se mezcla con aire.

Parámetros que considerar para determinar la velocidad mínima de ventilación

- **Dimensiones del frente de explotación:** tamaño del túnel o galería, ya que influye en el volumen de aire necesario para diluir y evacuar los gases.
- **Caudal de gas (Q):** la cantidad de gas que se genera en la mina debe ser estimada. Este caudal depende de la actividad minera y las características geológicas del yacimiento.
- **Densidad del gas:** la densidad de los gases presentes es un factor crucial, ya que los gases más ligeros tienden a subir y los más pesados se mantienen cerca del suelo. Es necesario conocer las densidades relativas de los gases involucrados, por ejemplo, metano (CH₄), oxígeno (O₂) y dióxido de carbono (CO₂).
- **Distancia de estratificación:** es necesario determinar la distancia a la que los gases pueden estratificarse dentro del frente de explotación.
- **Propiedades de la ventilación:** la ventilación puede ser impulsada o forzada, y el sistema de ventilación se debe diseñar para asegurar que el aire fluya de manera efectiva a lo largo de las labores mineas, evitando puntos de estratificación.
- **Normativa vigente:** seguir las regulaciones específicas sobre la ventilación establecidas en el Reglamento de Seguridad en las Operaciones Mineras Subterráneas (Decreto, 1886).

9.2.2.4 Caudal para dilución de gases tóxicos

Las dos principales fuentes de gases tóxicos en una mina son los gases que pueden generarse en la combustión de equipos diésel en operación y los que se generan producto de una voladura.

Para garantizar la seguridad de los trabajadores y minimizar los riesgos asociados con la exposición a gases tóxicos, así como para determinar la cantidad de aire necesaria para diluir y eliminar gases nocivos como el monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), y el metano (CH₄), entre otros, es fundamental considerar los factores descritos a continuación.

Factores clave a considerar para determinar el caudal de ventilación en minería subterránea

- **Tipo de gas tóxico:** la naturaleza del gas afectará la cantidad de ventilación necesaria. Algunos gases son más densos que el aire como el dióxido de carbono (CO₂) y tienden a acumularse en áreas bajas, mientras que otros como el metano (CH₄) son más livianos y tienden a ascender.
- **Concentración de gases:** la cantidad de gas presente en el aire determinará cuánto aire fresco es necesario para diluirlo a niveles seguros. Es fundamental cumplir con las concentraciones máximas permitidas por las normativas de seguridad.
- **Tamaño y disposición de la mina:** la configuración de las labores mineras subterráneas influye en la distribución del aire y en la necesidad de un caudal adecuado. La ventilación debe ser capaz de alcanzar todas las áreas, incluidas las más alejadas de las entradas principales.
- **Número de trabajadores:** el caudal de aire también debe tener en cuenta el número de trabajadores presentes en la mina, así como sus actividades: trabajos con explosivos, perforación, etc., que pueden generar más contaminantes.
- **Equipos y maquinaria:** los vehículos y equipos utilizados en la mina pueden generar gases como monóxido de carbono (CO) y dióxido de nitrógeno (NO₂). Estos factores deben incluirse en el cálculo del caudal necesario.

De acuerdo con el parágrafo 2 del (Decreto 1886, 2015, art. 54) se considera:

- 6 m³/min por cada H.P de la máquina, cuando el contenido de monóxido de carbono (CO) en los gases del exosto no sea superior a 0,12%.
- 4 m³/min por cada H. P. de la máquina cuando el contenido de monóxido de carbono (CO) en los gases del exosto no sea superior de 0,08%.

9.2.2.5 Caudal por explosivos

El cálculo del caudal necesario para la dilución de gases generados por el uso de explosivos en minería subterránea es crucial para garantizar la seguridad de los trabajadores y el ambiente de trabajo. Los gases como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), y los óxidos de nitrógeno (NO_x), entre otros, pueden acumularse tras las voladuras. Razón por lo que se requiere un sistema de ventilación adecuado para diluir estos gases a niveles seguros.

Pasos para calcular el caudal necesario para la dilución de gases

▪ Determinar la cantidad de gases generados

Cada tipo de explosivo produce una cantidad específica de gases al detonar. En el ámbito minero, esta cantidad suele calcularse utilizando la fórmula del rendimiento de los explosivos (detonación). Este cálculo puede basarse en los datos proporcionados por el fabricante o mediante el uso de fórmulas generales aplicables.

- Para simplificar, los explosivos más comunes como, ANFO o emulsiones, producen los siguientes gases en valores aproximados:

Monóxido de carbono (CO): 1,2 m³ por kg de explosivo.
Dióxido de carbono (CO₂): 1,0 m³ por kg de explosivo.
Óxidos de nitrógeno (NO_x): 0,05 m³ por kg de explosivo.

La cantidad total de gases generados se puede calcular como:

$$\text{Gases generados} = (\text{kg de explosivo}) \times (\text{m}^3 \text{ de gas por kg de explosivo})$$

▪ Establecer los límites de concentración segura

Cada gas tiene una concentración máxima permisible para la salud humana. Los límites más comunes son:

Monóxido de carbono (CO): 50 ppm (partes por millón).

Dióxido de carbono (CO₂): 5000 ppm.

Óxidos de nitrógeno (NO_x): 25 ppm.

▪ Calcular el volumen de aire necesario

El volumen de aire necesario depende de la cantidad de gas generada y el límite de concentración permitida. Para cada gas, el caudal de ventilación necesario puede calcularse con la siguiente fórmula general:

$$Q = V_{\text{gas}}/C_{\text{limite}}$$

Donde:

Q: es el caudal de ventilación necesario (m³/s),

V_{gas}: es el volumen de gas generado (m³),

C_{limite}: es la concentración máxima permisible del gas (m³ de gas / m³ de aire).

▪ Considerar el tiempo de ventilación

Además de los caudales de ventilación necesarios para diluir los gases en función de su concentración máxima, es importante considerar el tiempo en que se produce la emisión de gases. Los sistemas de ventilación deben ser capaces de manejar este caudal durante el período en que los gases estén presentes en el ambiente.

9.2.2.6 Curva característica de la mina

Para obtener el punto de operación que necesita la mina, se construye la curva característica, este es un análisis experimental o teórico de la relación entre el caudal de aire (en el eje X) y la presión (en el eje Y) en las distintas partes de la mina.

Esta curva se obtiene a partir de la ecuación de ventilación de la mina, que generalmente tiene la forma de una ecuación de potencia:

$$P=C*Q^n$$

Donde:

P: es la presión (Pa)

Q: es el caudal de aire (m³/s)

C: constante que depende de las características de la mina

N: exponente que depende de la geometría del sistema de ventilación y la fricción del aire.

Cálculo de la potencia de un ventilador

Para calcular las características del ventilador requerido en una operación minera subterránea, es fundamental considerar dos factores clave: la potencia necesaria para mover la corriente de aire y el caudal requerido ya sea para que el ventilador inyecte o succione, según las necesidades específicas de la mina. El cálculo de la potencia del ventilador depende de varios factores, entre ellos:

- Flujo de aire necesario: el volumen de aire que debe mover el ventilador, generalmente medido en metros cúbicos por segundo (m³/s).
- Resistencia al flujo: depende de las características del sistema de ventilación, como la longitud de las galerías, la sección transversal, las curvas, las obstrucciones y la rugosidad de las superficies.
- Eficiencia del ventilador: determina cuánta de la energía consumida se convierte en trabajo útil para mover el aire.
- La potencia del ventilador se puede calcular usando la siguiente fórmula básica:

$$P = \frac{(\Delta P \cdot Q)}{(\eta \cdot 1000)}$$

P: Potencia en kilovatios (kW).

ΔP: Diferencia de presión (presión estática) en el sistema de ventilación (Pa).

Q: Flujo de aire (m³/s).

η: Eficiencia del ventilador.

9.2.3 Implementación del sistema de ventilación

La implementación del sistema de ventilación, así como su monitoreo, deberá ser debidamente documentada. Para ello, se empleará el uso de planillas que contengan la información relevante y crucial, en las cuales se registren las mediciones de los aforos y las lecturas de gases, con fecha y hora incluidas. De esta manera, los registros estarán disponibles para que el responsable realice la verificación constante, seguimiento y control diario de las labores. Además, se debe contar con un plano de la mina en el que se indiquen las ubicaciones de las estaciones de medición. Las responsabilidades asociadas se definen en la figura 34.

Figura 34

Responsables de la implementación del plan de ventilación.



Tabla 53

Perfiles mínimos requeridos para la implementación del plan de ventilación.

PERFILES MÍNIMOS REQUERIDOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN DE VENTILACIÓN	
RESPONSABLE	PERFIL
Jefe de Turno	Ingeniero de minas o ingeniero en minas o ingeniero de minas y metalurgia.
Ingeniero	Ingeniero de minas o ingeniero en minas o ingeniero de minas y metalurgia.
Administrador	Técnico, Tecnólogo, Profesional.

Nota. La figura y tabla muestra los responsables de la implementación del plan de ventilación.

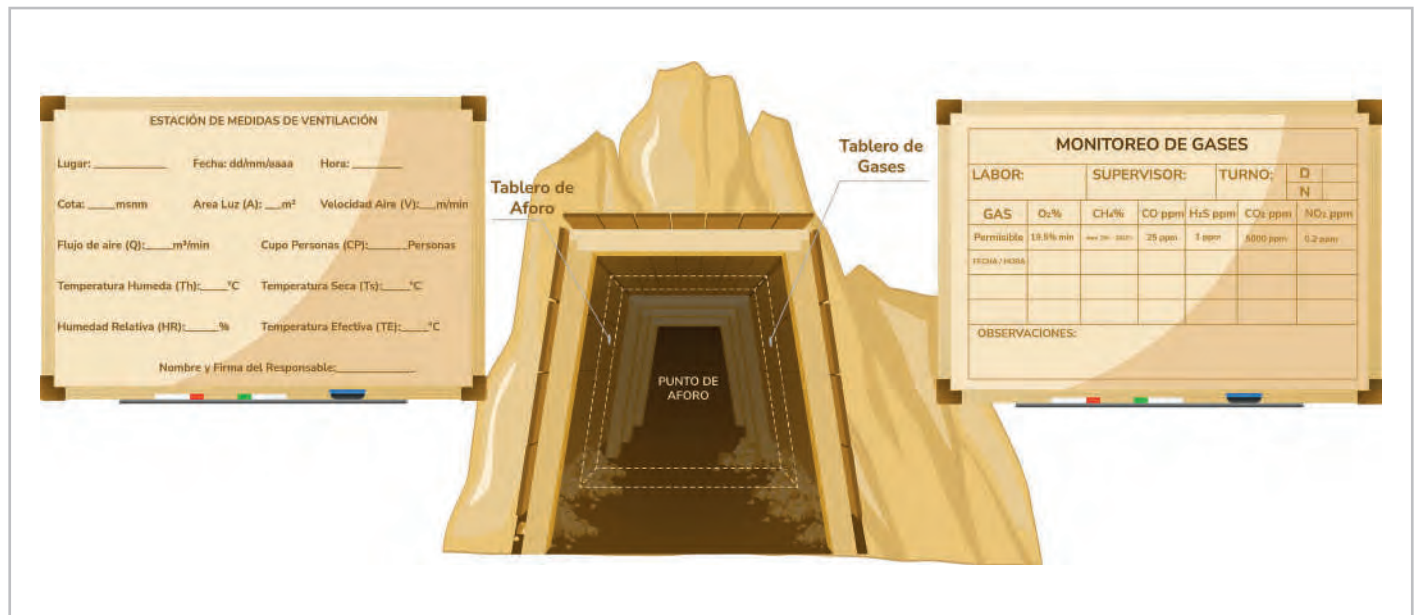
Estaciones de control y aforos de ventilación

Las mediciones de aforos se deben realizar periódicamente sobre todo el circuito principal de ventilación, estas lecturas tendrán como variables calidad del aire, caudal, gases, temperatura efectiva, humedad relativa, entre otras. Estas estaciones deberán estar selladas y contarán con tableros donde se consignen las lecturas realizadas al momento del aforo.

Como ejemplo, la figura 35 muestra la distribución y diseño de un punto de aforo en minería subterránea.

Figura 35

Tableros de registro datos de aforos de ventilación y mediciones diarias de gases.



PLANOS

140 Se recomienda presentar un isométrico de ventilación en el cual debe ir consignada la siguiente información en cada estación de ventilación:

- Área o sección
- Temperatura seca y húmeda
- Velocidad del aire
- Caudal
- Puertas de ventilación, ventiladores, áreas selladas o abandonadas
- Ductos y tuberías
- Dirección de la corriente de aire fresco
- Dirección corriente aire viciado
- Ubicación tableros de control y estaciones de ventilación
- Convenciones recomendadas

Figura 36

Convenciones recomendadas para la presentación del isométrico de ventilación.



Nota. Se recomienda realizar simulación del circuito de ventilación en software especializado. El isométrico debe estar publicado, socializado y firmado por un profesional en ingeniería de minas y metalurgia.

9.3 Sistema de ventilación proyectada

La proyección del sistema de ventilación se basará en las labores actualizadas a la fecha de recolección de la información y se diseñará de acuerdo con la proyección de labores a corto plazo (un año). De este modo, se garantizará que el circuito calculado cumpla con los pará-

metros y requisitos de aire necesarios para mantener las labores libres de aire viciado. Estos cálculos deberán ser actualizados en caso de cambios en el desarrollo de la mina o si el diseño requiere modificaciones conforme a la proyección.

Los cálculos de los caudales necesarios para la operación y para asegurar una atmósfera segura deberán considerar los aspectos descritos en la tabla 54.

Tabla 54

Aspectos para tener en cuenta en el diseño del plan de ventilación.

DATOS INGRESADOS			
DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD
N° De trabajadores/turno	n		
Caudal de aire por persona	q		
Producción mensual	Prod		
Producción diaria	Po		
Volumen de metano (CH ₄) en 24 horas	qCH ₄		
Norma de contenido de metano (CH ₄) en el aire	P		
Factor de seguridad	Fs		
Coefficiente de irregularidad de producción de polvo	C		
Sección libre Inclinado Principal	Ad		
Sección libre Niveles	Ap		
Sección libre promedio Bocaviento	Ae		
DATOS GENERADOS			
DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD
Caudal Requerido por Personal	Q1		m ³ / min
Caudal Requerido por dilución de metano (CH ₄)	Q2		m ³ / min
Caudal necesario para diluir material particulado	Q3		m ³ / min
Caudal necesario para diluir gases de maquinaria	Q5		m ³ / min
CAUDAL TOTAL	QT		m ³ / min
			m ³ / seg

142

9.4 Programa de seguimiento y control

En este capítulo se pueden observar los procedimientos y/o protocolos sobre cómo actuar cuando se presentan incidentes de emergencias relacionadas con el funcionamiento de la ventilación en las minas subterráneas, los cuales pueden poner en peligro la integridad de los trabajadores y personal involucrados en el proyecto minero.

9.4.1 Protocolo medición de aforos de ventilación

A continuación, se detallan los pasos a seguir para realizar los aforos de ventilación:

1. El encargado de supervisar el plan de ventilación delegará a un colaborador idóneo, capacitado y responsable para realizar las mediciones de aforos de ventilación. Esta persona debe contar con experiencia en el manejo de equipos de detección de gases,

formación certificada en ventilación y título como técnico o tecnólogo en supervisión de labores mineras subterráneas.

2. Se deben verificar las condiciones de los equipos a utilizar antes de entrar a la mina y tomar datos en superficie (encerrarlos).
3. Efectuar las mediciones en los sitios que se indicaron para tal fin (estaciones de aforo si las hay), y/o en los inclinados y niveles principales, donde se tenga el circuito de ventilación.
4. Identificar en el plano los sitios donde se presente indicios de aumento constante de los valores permisibles, en estas zonas de la mina se deberá realizar monitoreo continuo y deberán ser objeto de seguimiento y control.
5. Medir aproximadamente la sección útil de la labor donde se realiza la medición
6. Realizar las mediciones de concentración de gases.
7. Realizar las mediciones de velocidad, temperaturas y caudales identificando el sentido del flujo de aire.
8. Anotar, en el apartado de observaciones, los equipos, instalaciones y obstáculos que hay montados entre este punto y el anterior.
9. Registrar los resultados en los tableros de medida dispuestos en las estaciones de control de aforos.
10. Registrar en la libreta los resultados de las mediciones, y en la oficina en el respectivo libro de registro.
11. Difundir y hacer público el resultado de la medición al personal de la mina
12. Realizar aforos cada mes o antes, si el encargado de la supervisión del plan de ventilación así lo determina (seguir recomendaciones del plan de ventilación).
13. El encargado de la medición deberá monitorear continuamente la mina y los frentes evaluados como críticos o de especial cuidado.

9.4.2 Protocolo de medición de gases

Para la medición de gases, el supervisor de ventilación, quien es el responsable de la explotación minera, debe designar a una persona encargada de realizar la medición de gases en cada turno. Esta persona deberá estar debidamente capacitada para llevar a cabo esta tarea.

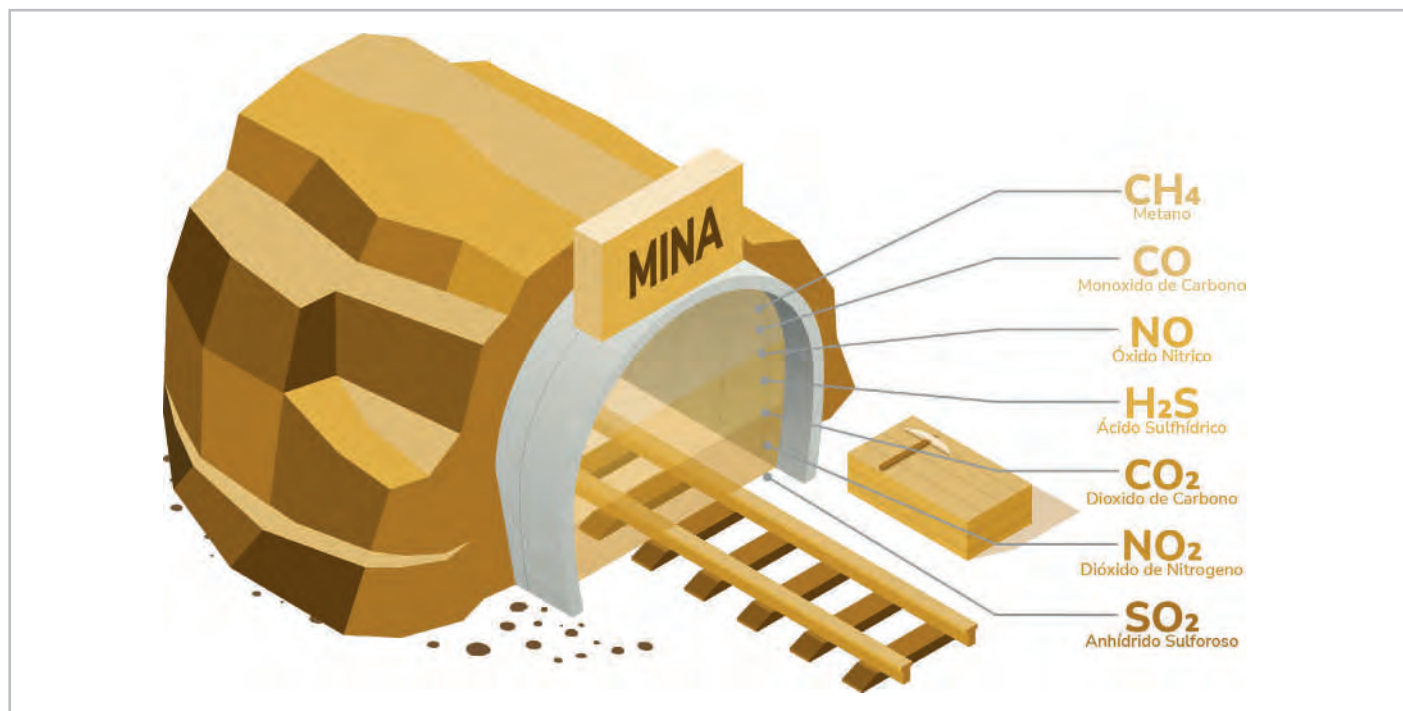
1. Tomar el equipo de medición de 6 gases y encenderlo lejos de equipos de combustión que puedan alterar los sensores (en superficie).
2. Se debe verificar que el equipo se encuentre debidamente calibrado, con su respectiva rotulación.
3. Realizar la encerada de sensores en un área libre de contaminación de gases (en superficie).
4. Encerar picos obtenido de mediciones anteriores.
5. Crear nueva sesión
6. Verificar que la ventilación esté funcionando adecuadamente.
7. Las personas designadas en el plan de ventilación (generalmente dos) ingresan al área de excavación a pie, realizando un barrido completo del lugar. Durante esta actividad, deben seguir los pasos detallados a continuación:
 - Realizar las mediciones de gases en los puntos indicados en la figura 37, siguiendo estrictamente las ubicaciones señaladas.
 - Respetar el tiempo de medición recomendado por el fabricante de cada equipo para garantizar resultados precisos.
 - Permanecer atentos a las alertas del equipo, ya que este indicará cuando las mediciones se encuentren por debajo de los VLP. Registrar estas lecturas de manera oportuna y precisa.
 - Si el equipo presenta errores o sale de rango, se deberá informar de inmediato. En este caso, trasladarse a la superficie para realizar la calibración o el mantenimiento necesario. Es fundamental no reiniciar el equipo dentro de la mina en ninguna circunstancia.

- Leer primero en la pantalla el % de oxígeno (O₂) en la mitad de la vía.
- Leer en la pantalla el % de metano (CH₄) en el techo de la vía.
- Leer en la pantalla, en partes por millón (ppm), los niveles de monóxido de carbono (CO) y ácido sulfhídrico (H₂S) en la mitad de la vía.
- Leer en la pantalla el % de dióxido de carbono (CO₂) en el piso de la vía.

Nota. El tiempo de respuesta de los sensores, generalmente entre 15 y 60 segundos, está respaldado por la información técnica sobre el monitoreo de gases en minería. En particular, los sensores fijos suelen presentar tiempos de respuesta dentro de este rango, dependiendo del modelo y de la tecnología empleada.

Figura 37

Sitios en donde se miden los gases en el frente de trabajo debido a su diversidad



144

- Registrar los resultados obtenidos en los tableros de control de medición de gases, incluyendo la fecha, la hora y el nombre del responsable de la medición. Además, se debe determinar la aptitud del ambiente y firmar el registro.
- Durante el ingreso, avanzar hacia los frentes de explotación y puntos críticos de las labores, especialmente en zonas de concentración de agua y áreas de trabajos antiguos, para realizar las mediciones correspondientes.
- Si las mediciones indican concentraciones de gases por encima de los VLP, se deben implementar las medidas correctivas necesarias antes de permitir el ingreso del personal.
- Registrar los resultados de las mediciones en las libretas de control de gases y firmar cada registro.
- Salir a la bocamina y comunicar los resultados de las mediciones de gases a los colaboradores de la mina, con el fin de autorizar su ingreso de manera segura.
- Realizar la calibración (encerado) de los sensores en un área libre de contaminación por gases, preferiblemente en la superficie, para garantizar el correcto funcionamiento del detector múltiple.
- Continuar con la medición de gases durante toda la jornada laboral. Si durante el turno se detectan concentraciones de gases superiores a los VLP, se deberá evacuar inmediatamente al personal.

En la oficina, los datos registrados en la libreta deben ser transferidos a la bitácora de operación de la mina y al libro de registro correspondiente.

9.4.3 Protocolo y procedimientos para el chequeo y mantenimiento de los ventiladores

Este protocolo establece un procedimiento general para la puesta en marcha de los ventiladores, así como para el chequeo y mantenimiento necesarios para garantizar su correcto funcionamiento.



9.4.3.1 Protocolo de operación o puesta en marcha del ventilador

1. Confirmar que se han implementado todas las medidas de seguridad correspondientes y que el personal técnico dispone del equipo de protección personal (EPP) adecuado.
2. Verificar que el motor del ventilador y sus accesorios se encuentran desenergizados, y que los interruptores están correctamente asegurados para evitar activaciones accidentales.

1. Confirmar que los componentes mecánicos del ventilador estén listos

- a. Verificar que las tuercas, los tornillos y los opresores están apretados.
- b. Asegurarse de que las conexiones del sistema estén hechas y apretadas correctamente.
- c. Comprobar que los rodamientos estén lubricados correctamente.
- d. Confirmar que la hélice gira libremente y la transmisión y el interior del ventilador estén limpios y libres de objetos extraños.
- e. Verificar que las poleas estén colocadas en los ejes correctos.
- f. Asegurarse de que el conjunto flecha-hélice, motor y transmisión estén correctamente alineados.
- g. Verificar que las bandas tengan la tensión adecuada.
- h. Confirmar que las protecciones especificadas estén colocadas y bien soportadas.
- i. Comprobar que las juntas flexibles estén correctamente instaladas.

2. Confirmar que los componentes eléctricos del ventilador estén listos

- a. Verificar que el motor esté conectado a un voltaje de alimentación adecuado.
- b. Asegurarse de que el motor esté correctamente puesto a tierra.
- c. Comprobar que todos los cables conductores estén debidamente aislados y que su calibre sea el apropiado para la instalación.
- d. Verificar que los interruptores termomagnéticos sean compatibles con la capacidad del motor.

2. Realizar el arranque de prueba

- a. Encender el ventilador únicamente el tiempo necesario para que el ensamble comience a girar.
- b. Confirmar que la hélice gire en la dirección correcta, de acuerdo con la flecha indicadora en la embocadura.
- c. Revisar que no existan vibraciones o ruidos anormales durante el funcionamiento.
- d. Corregir cualquier problema identificado siguiendo estrictamente las instrucciones de seguridad.
- e. Poner en operación el ventilador de manera definitiva.

9.4.3.2 Protocolo para el mantenimiento de los ventiladores

Para realizar el mantenimiento de un ventilador se recomienda tener en cuenta los siguientes pasos para su respectivo chequeo:

- a. Mantener los motores y las bobinas limpios es fundamental, ya que la acumulación de suciedad y polvo actúa como aislante térmico, dificultando la disipación de calor.
- b. Los motores deben permanecer secos para evitar cortocircuitos eléctricos. En motores almacenados por períodos prolongados, puede producirse condensación de humedad en las bobinas. Antes de su uso, asegúrese de que el motor esté completamente seco.
- c. Verificar que el motor no esté sobrecargado comparando las lecturas reales de amperaje con los valores especificados en la placa de características del motor.

Mantenimiento de la hélice y la flecha

Examine periódicamente (cada 8 días) la flecha y la hélice para comprobar la acumulación de suciedad, corrosión, y muestras de exceso de tensión o de fatiga.

Mantenimiento de la embocadura y estructura en general

Todos los componentes o dispositivos estructurales utilizados para soportar o unir el ventilador a una estructura deben inspeccionarse cada 15 días o en intervalos regulares de tiempo. Elementos como aisladores de vibración, tornillos y cimentaciones están expuestos a fallas debido a la corrosión, la erosión u otros factores.

En instalaciones sobre pared, es necesario revisar periódicamente el estado del muro para garantizar su integridad estructural. Además, todas estas instalaciones deben ser inspeccionadas diariamente por el personal que trabaja o se encuentre en las proximidades.

Mantenimiento de las chumaceras

Las chumaceras con rodamientos de bolas pueden operar a temperaturas de hasta 93° C (200 °F). Sin embargo, no se debe reemplazar una chumacera únicamente porque se perciba "caliente". Es esencial realizar inspecciones periódicas teniendo en cuenta la exposición al polvo y otros factores que puedan afectar su rendimiento.

Se recomienda implementar un programa de mantenimiento preventivo para asegurar que los equipos se mantengan en condiciones óptimas de funcionamiento.

Mantenimiento de la transmisión

Las bandas tipo A y B requieren inspecciones periódicas y reemplazo ocasional. Durante la inspección de la transmisión, verifique la presencia de acumulación de suciedad, rebabas u obstrucciones que puedan provocar un desgaste prematuro de la banda o de la transmisión. Si se encuentran rebabas, utilice lija fina o una piedra de esmeril de grano fino para eliminarlas, teniendo cuidado de evitar que el polvo entre en los rodamientos.

Revise las poleas para detectar signos de desgaste. Un deslizamiento excesivo de las bandas sobre las poleas puede causar desgaste adicional y generar vibraciones. Sustituya las poleas desgastadas por nuevas.

Es importante tener en cuenta los tipos de mantenimiento específicos que deben realizarse para cada ventilador al establecer este protocolo.

Mantenimiento preventivo

Es el tipo de mantenimiento que se aplica de acuerdo con las recomendaciones de los fabricantes o a la experiencia del personal de mantenimiento. Se realiza mantenimiento preventivo cada 2.000 horas de trabajo, teniendo en cuenta el siguiente procedimiento:

1. Verificar el estado de limpieza general.
2. Verificar si hay fugas de lubricantes, si es así, revisar temperatura e histórico.
3. Verificar correcta ubicación de protectores de transmisión de acoplamientos y correas.
4. Escuchar la existencia de ruidos extraños.
5. Escuchar el correcto asentamiento del ventilador sobre la bancada, observando la posible falta de rigidez

cimentación, soldadura de pernos, exceso de lámina de suplemento etc.

6. Registrar mantenimiento en hoja de vida de los equipos y firma del responsable.

Mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo se enfoca en la vigilancia continua del estado de los equipos, con el objetivo de anticipar fallas antes de que ocurran, basándose en datos y mediciones en tiempo real. Esta metodología permite una gestión proactiva, optimizando la vida útil de los equipos y reduciendo costos asociados a reparaciones inesperadas.

A continuación, se presenta una descripción más detallada y estructurada de cómo aplicar el mantenimiento predictivo al ventilador axial, utilizando la información proporcionada.

Mantenimiento predictivo del ventilador Axial

Objetivo

Detectar las fallas mientras esté en operación, monitoreando su desarrollo para prevenir paradas no planificadas y optimizar el rendimiento del ventilador.

Método

1. Monitoreo del caudal de aire

- Utilizar un anemómetro para medir el caudal de aire del ventilador.
- Establecer un nivel de referencia del caudal basado en las especificaciones y datos históricos del ventilador.

2. Análisis comparativo

- Comparar el caudal de aire medido con los valores históricos y las especificaciones del fabricante.
- Detectar cambios en el caudal de aire que puedan indicar una desviación del rendimiento esperado.

3. Evaluación de la curva de trabajo

- Evaluar la curva de trabajo del ventilador que relaciona el caudal de aire con la potencia consumida.

- Verificar que la curva de trabajo sea estable y conforme a las características preestablecidas del ventilador.
- Cualquier desviación significativa en esta curva puede señalar problemas potenciales en el ventilador.

4. Acciones correctivas

- Si se detecta una variación significativa en el caudal de aire o en la curva de trabajo, se deben realizar inspecciones adicionales para identificar posibles causas de las anomalías, tales como obstrucciones, desgastes o fallos en componentes internos.
- Aplicar el mantenimiento correctivo necesario para resolver los problemas detectados y restaurar el funcionamiento óptimo del ventilador.

5. Documentación y registro

- Registrar todos los datos de monitoreo, comparaciones, y resultados de las evaluaciones en un sistema de gestión de mantenimiento.
- Mantener un historial de los eventos de mantenimiento predictivo para análisis futuros y mejora continua.

Beneficios

Reducción del tiempo de inactividad: al detectar fallas antes de que se conviertan en problemas graves, se minimiza el riesgo de paradas no planificadas, lo que mejora la disponibilidad del equipo.

Optimización del rendimiento: asegura que el ventilador opere dentro de sus especificaciones óptimas, lo que contribuye a mantener una alta eficiencia energética y un funcionamiento constante.

Prolongación de la vida útil: la identificación y corrección temprana de problemas puede extender la vida útil del ventilador, reduciendo costos a largo plazo y mejorando la rentabilidad operativa.

Conclusión

Al implementar el programa de mantenimiento predictivo para el ventilador axial, se garantiza su funcionamiento eficiente y fiable, minimizando el riesgo de fallos inesperados y optimizando su rendimiento a largo plazo.



▪ **Mantenimiento correctivo**

El mantenimiento correctivo se aplica para corregir fallas imprevistas, previstas o defectos en el equipo que afectan su funcionamiento. Para llevarlo a cabo es necesario que existan dos escenarios, en los cuales se establecerán procedimientos según el tipo y la causa de la falla.

- **Falla imprevista:** es la que ocurre sin previo aviso y afecta el funcionamiento del equipo de manera inesperada.

Procedimiento

- Diagnóstico rápido: evaluar la naturaleza de la falla para entender su causa y el impacto en las operaciones.
- Parada de emergencia: detener el equipo si es necesario para evitar daños adicionales o riesgos de seguridad.
- Evacuación: en caso de ser necesario, el encargado de la supervisión de las labores y del plan de ventilación en mina tiene la responsabilidad de activar el plan de emergencia y coordinar la evacuación del personal.
- Reemplazo: reemplazar el ventilador averiado o con fallas, por otro de igual características o mejores, pero nunca de menor potencia.
- Revisión: el ventilador averiado deberá ser revisado por una persona encargada para esa labor la cual deberá llevar a cabo dos acciones:
- Reparación: realizar las reparaciones necesarias para restaurar el equipo a su estado operativo
- Documentación: documentar la falla y las acciones correctivas tomadas para futuros análisis.

- **Falla prevista:** esta es la que se identifica durante las inspecciones rutinarias o mediante técnicas de monitoreo predictivo, pero que no se pudo corregir antes de que ocurriera una interrupción.

Procedimiento

- Evaluación de riesgos: determinar la gravedad de la falla y su impacto potencial en la operación.
- Plan de acción: implementar un plan de mantenimiento para realizar las reparaciones programadas o ajustes necesarios.
- Ejecución de reparaciones: llevar a cabo las reparaciones conforme al plan establecido.

- Revisión y ajustes: revisar el equipo después de la reparación para asegurar que funcione correctamente y realizar ajustes si es necesario.
- Documentación: registrar la falla prevista, el plan de mantenimiento aplicado, y cualquier aprendizaje para mejorar las prácticas futuras.

▪ **Beneficios del mantenimiento correctivo**

- Restauración del funcionamiento: permite volver a poner el equipo en operación después de una falla.
- Adaptación a fallas imprevistas: ofrece una solución cuando no se puede prever la falla con antelación.
- Documentación y mejora continua: la documentación de fallas y reparaciones proporciona información valiosa para mejorar los procesos de mantenimiento y prevenir problemas similares en el futuro.



9.4.4 Protocolo para aislar trabajos abandonados

Con el fin de dar cumplimiento al (Decreto 1886, 2015, art. 44) es importante aislar del circuito de ventilación los trabajos abandonados, buscando evitar que el aire limpio se mezcle con los posibles gases que se generen en estas labores y evitar que el personal circule por estas zonas sin previa autorización.

Figura 38

Labor señalizada y sellada de forma hermética



1. Ubicar las labores que se van a sellar y/o aislar en el plano de la mina.
2. El supervisor de la mina debe socializar con el personal, la realización de dicha labor para evitar posibles interrupciones y riesgos en esta actividad.
3. Contar con el equipo de medición de gases para evaluar la atmósfera de la labor que se va a sellar y/o aislar.
4. Disponer de los materiales con los cuales se va a realizar el aislamiento de la labor como son cinta de seguridad, plástico, lonas, señalización etc.
5. Si la labor va a hacer rellena con material estéril, disponer de los procedimientos para realizar esta labor como son descargue de material, el paleado de material etc.
6. Si el aislamiento se realiza mediante tabiques o muros que cuenten con una salida para desgasificar la labor de manera controlada, se debe monitorear periódicamente estas instalaciones para evaluar posibles aumentos en las emanaciones de gases.
7. Una vez realizada la actividad de aislamiento, esta debe quedar totalmente señalizada para evitar el tránsito de personal por estas.

8. Se deben hacer mediciones periódicas con el multidetector de gases, con el fin de monitorear las posibles concentraciones y/o emanaciones de gases de estas labores.
9. Registrar las mediciones correspondientes en el libro de ventilación para llevar un control adecuado de estas labores.

Esta actividad se debe llevar a cabo con todas las labores que considere el supervisor de ventilación que puedan influir en el circuito principal de ventilación de la mina.

9.4.5 Protocolo de suspensión de la ventilación

De acuerdo con lo establecido en el (Decreto 1886, 2015, art. 45) se debe seguir un procedimiento específico para la suspensión controlada de la ventilación principal, auxiliar o ambas, con el objetivo de suspender las actividades en la mina sin generar riesgos o accidentes. Para llevar a cabo la suspensión de la ventilación en una mina, se deben considerar el siguiente procedimiento.

Procedimiento para ejecutar la orden de suspensión de la ventilación

1. Se debe comunicar con anticipación al personal de la mina la suspensión de la ventilación.
2. El encargado de la ejecución de la suspensión de la ventilación debe evaluar, condiciones de seguridad, para inhabilitar equipos de ventilación.
3. Evacuar el personal en su totalidad o el que ocupa la zona donde se suspenderá la ventilación.
4. Prohibir ingreso del personal hasta que el responsable de la ventilación evalúe las condiciones de seguridad para restablecer el trabajo en frentes evacuados.
5. Apagar o desenergizar los ventiladores.
6. Bloquear el encendido de los equipos de ventilación, con el fin de que estos sean activados accidentalmente.
7. Realizar la actividad por la cual se suspendió la ventilación.
8. Verificar las conexiones eléctricas y de los ventiladores para poner en marcha la ventilación.

9. Aplicar el protocolo para la puesta en marcha de los ventiladores.
10. Realizar la respectiva medición de gases cuando se restituya la ventilación.
11. Realizar el registro de la actividad y las observaciones pertinentes.

9.4.6 Protocolo para la activación de la ventilación

Al igual que se tiene un protocolo para la suspensión de la ventilación, de igual manera es importante cumplir un protocolo para la activación de la ventilación, ya que con esto se busca disminuir al máximo los riesgos y accidentes al realizar cada actividad en la mina.

De esta manera se plantea el siguiente protocolo para la activación de la ventilación, independientemente de cuál haya sido el motivo de la suspensión:

1. Desbloquear y energizar elementos de encendido de ventiladores.
2. Verificar condiciones de seguridad para el encendido de los ventiladores.
3. Aplicar el protocolo para la puesta en marcha de los ventiladores.
4. Encender ventiladores.
5. Según el circuito de ventilación para cada mina se debe tener en cuenta un tiempo de seguridad para el ingreso.
6. Realizar medición de las condiciones atmosféricas de gases tóxicos, una vez se cumpla el tiempo para el ingreso.
7. Si las condiciones atmosféricas de la mina son las adecuadas según la normatividad legal vigente, se recomienda autorizar el ingreso de personal.
8. Realizar el respectivo registro en los libros con las observaciones pertinentes.
9. Verificar de forma periódica las condiciones de la ventilación en todas las labores mineras.

9.5 Formulación del plan de contingencias en ventilación

El plan de contingencia del sistema de ventilación hace referencia a un conjunto de normas, procedimientos y acciones básicas de respuesta que se debería tomar para afrontar de manera oportuna, adecuada y efectiva, ante la eventualidad de incidentes, accidentes y/o estados de emergencias que pudieran ocurrir en la mina relacionados con fallas en el sistema de ventilación.

Objetivo

Contemplar la normatividad vigente para ayudar a reducir la severidad y consecuencias de pérdidas por accidentes y emergencias relacionadas con el sistema de ventilación siendo de conocimiento de todo el personal de la mina.

Alcance

Proporcionar la respuesta ante emergencias y desastres cómo: accidentes o incidentes mineros por explosión, por incendio y/o por ventilación o atmósferas viciadas, aplicable a todo el personal y las actividades asociadas con la ejecución del proyecto

Organización del sistema de respuesta a la emergencia

La organización diseñada para dar respuesta a la emergencia tiene la finalidad de prevenir y atender estos eventos, que pueden causar daño a las personas, propiedad, y alteración del medio ambiente por causa de una Emergencia.

Estructura organizacional

Director general de emergencias (ingeniero residente)
 Jefe de emergencias (supervisor o administrador de la mina)

- Brigadistas
- Grupo de apoyo
- Personal externo que interviene

9.6 Plan estratégico

Tiene como objetivo ofrecer a todo el personal de la mina, una guía y base común de respuesta ante una emergencia que ocurra durante la ejecución de las actividades por fallas en el sistema de ventilación este debe ser socializado y capacitar al personal involucrado en todo el proceso minero.

Emergencia: se define como una situación o condición imprevista que requiere una acción inmediata para prevenir o minimizar daños, asegurar la seguridad de las personas, proteger el medio ambiente, o preservar la integridad de los activos y operaciones de una instalación. Las emergencias pueden surgir de una variedad de eventos inesperados y pueden involucrar una amplia gama de riesgos y peligros.

Características clave de una emergencia

1. Imprevisibilidad

- Las emergencias son eventos inesperados que no se pueden prever con certeza, aunque puede haber señales de advertencia.

2. Urgencia

- Requieren una respuesta rápida y coordinada para evitar consecuencias graves o para mitigar el impacto de la situación.

3. Impacto potencial

- Tienen el potencial de causar daños significativos a la salud humana, la seguridad, el medio ambiente, o las operaciones y activos de una organización.

4. Necesidad de coordinación

Exigen una respuesta organizada y coordinada que involucre a diferentes niveles de la organización y, a menudo,

a servicios externos de emergencia como bomberos, rescatistas, paramédicos, y policía.

Clasificación de emergencias

1. Emergencias de nivel I (emergencias críticas o de alta gravedad)

Descripción: situaciones que representan una amenaza inminente y severa para la vida, la salud, el medio ambiente, o la infraestructura crítica. Requieren una respuesta inmediata y a gran escala, movilizando todos los recursos disponibles.

Ejemplos: terremotos de gran magnitud, erupciones volcánicas importantes, desastres naturales severos (huracanes, inundaciones extensas), accidentes con sustancias químicas peligrosas.

2. Emergencias de nivel II (emergencias moderadas)

Descripción: situaciones significativas que afectan a un área considerable pero no presentan una amenaza inmediata para la vida en todos los casos. Requieren una respuesta rápida, pero con menos intensidad que las de nivel I.

Ejemplos: incendios de grandes proporciones en zonas urbanas o rurales, accidentes de tráfico con múltiples víctimas, inundaciones localizadas.

3. Emergencias de nivel III (emergencias menores)

Descripción: situaciones que pueden ser manejadas con recursos locales y no requieren una movilización masiva. A menudo se trata de incidentes que, aunque serios, no ponen en peligro inminente la vida o la infraestructura crítica.

Ejemplos: incendios pequeños en viviendas, emergencias médicas que no requieren hospitalización urgente y/o incidentes de derrames menores de sustancias no peligrosas.

4. Emergencias de nivel IV (emergencias de baja gravedad)

Descripción: situaciones con un impacto menor, que generalmente se manejan con recursos locales sin necesidad de una respuesta urgente. No representan una amenaza significativa para la vida o el bienestar general.

Ejemplos: problemas menores en servicios públicos, daños menores en propiedades, accidentes domésticos con lesiones leves.



Responsabilidades en las emergencias

El titular minero, gerente o encargado del proyecto es responsable de los fondos, el diseño y la implementación del plan de emergencias, el cual deberá ser socializado con todos los colaboradores, sin importar el nivel jerárquico.

El ingeniero residente, supervisor o administrador de la mina es responsable de la organización para la atención de emergencias en la mina. Además, será responsable de la implementación del plan de emergencias, la actualización constante de los elementos para la atención de contingencias y la coordinación y control del entrenamiento del personal para manejar las emergencias cuando se presenten.

Cuando la emergencia pueda ser controlada con el personal que labora en el área o sector, se procederá a su atención. Una vez controlada, se reportará a la gerencia de la empresa, dejando constancia documentada y socializando la emergencia, así como las actividades de contingencia aplicadas para su atención.

Si existen dudas sobre las capacidades del personal o los recursos disponibles en el área para atender la emergencia, se deberá solicitar de inmediato el apoyo pertinente.

Una vez detectada cualquier emergencia, se debe activar la organización de emergencia, dando el reporte correspondiente.

Definición de funciones

Director general del plan de emergencias

El director general del plan de emergencias está integrado por el personal administrativo de alto nivel jerárquico, incluidos los máximos representantes de la empresa minera, siendo el ingeniero residente el responsable en este caso. Su función principal es garantizar el cumplimiento del programa de preparación para emergencias, asegurando la disponibilidad de los medios administrativos y técnicos necesarios para su implementación, mantenimiento y ejecución, tanto en las fases de entrenamiento como en situaciones de emergencia.

Funciones específicas

- Dar soporte y solidez a la estructura orgánica del plan de emergencias asumiendo el liderazgo y responsabilidad desde el más alto nivel jerárquico.
- Avalar directrices, procedimientos, programas y actividades propias del plan de emergencias en fases de planeamiento y entrenamiento de situaciones de emergencia.
- Ejercer control y seguimiento sobre el desarrollo y continuidad del programa de preparación para emergencias, velando porque se realice por lo menos un simulacro semestral del plan de emergencias con la participación de todos los niveles de la organización.
- Revisar y transmitir la información que debe suministrarse a las autoridades correspondientes.

Jefe de emergencias (J.E.)

Corresponde al administrador de la mina (supervisor), quien asumirá el control y manejo de las comunicaciones de la emergencia en el sitio.

Funciones específicas

- Recibe la comunicación y activa el plan de emergencias, si el evento es comunicado por un trabajador, se indaga sobre el tipo y característica de la emergencia.
- Coordina con la dirección del plan las decisiones y acciones extraordinarias no contempladas en el plan para el efectivo control de la emergencia.

- Coordina la emisión periódica de mensajes para:
 - Alerta sobre la emergencia.
 - Tranquilizar a los trabajadores y residentes en riesgo.
 - Vuelta a la normalidad
- En orden de prioridad evalúa y comunica las necesidades de:
 - Evacuación.
 - Intervención del grupo de emergencias.
 - Intervención de equipos de socorro y rescate exteriores (Grupo de salvamento minero, Bomberos, Cruz Roja, Defensa Civil).
 - Vuelta a la normalidad.
- Incita a las personas a mantener la calma y a seguir las instrucciones de los brigadistas.
- Investiga las causas de la emergencia sucedida en el área bajo su responsabilidad.

9.7 Plan operativo

Tiene como objeto organizar la intervención de los grupos operativos de emergencia y la utilización de los medios de protección contra cualquier eventualidad. El procedimiento general para el caso de evacuación o emergencia es el siguiente:

- Una vez que se recibe notificación sobre la presencia de un evento en algún frente de trabajo, el jefe de emergencias deberá confirmar la eventualidad y tomar decisiones al respecto, clasificándola como conato, emergencia parcial o emergencia general.
- El jefe de emergencias, después de recibir la información complementaria para evaluar la situación y si considera que existe riesgo inminente para la integridad de los ocupantes, comunicará la decisión de evacuar a todos los ocupantes del sitio por medio de una señal establecida.
- Al recibir la alarma los trabajadores suspenderán sus labores, ejecutarán las acciones previamente establecidas y abandonarán el lugar por la ruta de evacuación más cercana llevando con ellos a los visitantes. El coordinador de área verificará que todos hayan salido.

- Al llegar al punto de encuentro, el jefe de emergencia tomará la lista del personal bajo su responsabilidad, entregará el informe de la evacuación de la mina con las respectivas observaciones y se pondrá a disposición de los responsables de la atención de la emergencia.

9.8 Plan de evacuación

Para que la evacuación general pueda ejecutarse en el menor tiempo posible, el proyecto debe tener la siguiente organización:

- Un coordinador de emergencias por área y su respectivo suplente.
- Un mecanismo permanente para recibir la alarma de evacuación.
- Un grupo operativo de emergencia
- Un instructivo con procedimientos generales y específicos de actuación en caso de emergencia.
- Sitio de reunión final o punto de encuentro.

9.8.1 Procedimientos básicos de la atención o plan de respuesta a una emergencia

Relacionados con la calidad del aire

Respecto a la composición del aire en la mina, aunque se haya calculado el caudal de manera precisa teniendo en cuenta todas las variables pertinentes, puede experimentar variaciones a lo largo de su recorrido debido a las siguientes situaciones:

- Emanación espontánea en labores abandonadas generada por:**
 - Proporción de oxígeno (O_2) reducida, oxidación silenciosa y por gasificación de metano (CH_4).
 - Elevada proporción de dióxido de carbono (CO_2) por oxidación silenciosa.

- Aumento en cantidades de monóxido de carbono (CO) por procesos de oxidación debido a la falta ventilación en la mina.

b. Por gases de incendios

- Proporción de oxígeno (O_2) reducida debido a la oxidación de objetos del incendio
- Aumento de la proporción de monóxido de carbono (CO) por oxidación incompleta de objetos de incendio.
- Aumento de metano (CH_4) y de hidrógeno por descomposición térmica de objetos de incendio.

c. Aparición de concentraciones de H_2S por aguas estancadas sin evacuar lámina.

¿Cómo actuar?

Las consideraciones anteriores indican que existen factores que pueden alterar la composición del aire en la mina, los cuales pueden ser o no causales de una emergencia. En este sentido, es importante tener en cuenta que incrementos leves en los niveles de monóxido de carbono (CO) o metano (CH_4) pueden ser generados por una inadecuada labor de sellado de las labores.

Por otro lado, un incremento considerable en la concentración de estos gases puede ser indicativo de una combustión espontánea en el interior de una labor subterránea, la cual no necesariamente es visible, y requerirá la emisión inmediata de una orden de evacuación.

En términos generales, las mediciones puntuales realizadas diariamente en la mina proporcionarán indicios de si el sistema de ventilación está correctamente diseñado o si, por el contrario, existen problemas derivados de un mal diseño o de factores que no fueron considerados inicialmente, o que surgieron posteriormente como resultado de alguna de las situaciones previamente descritas. Por lo tanto, el monitoreo continuo del aire en la mina se considera una tarea prioritaria.

Relacionados con la cantidad de aire

El flujo de aire en la mina debe ser siempre suficiente para garantizar el suministro adecuado a los frentes de trabajo y la dilución de los gases generados por las labores mineras. Para ello, se debe prestar especial atención a la medición de los caudales, cuya disminución puede ser atribuida a las siguientes causas:

a) Pérdidas por reducción parcial o total de área

La reducción de área en el sistema de ventilación puede ser ocasionada por diversos factores entre los que se encuentran:

- Disminución de la sección de la vía por presiones laterales de techo o de piso.
- Fallas en el sostenimiento por falta de mantenimiento.
- Equipos, herramientas o elementos dispuestos de forma permanente en las secciones de la vía.
- Obstrucción total de la vía como causa de un derrumbe.

b) Por mala operación del sistema de ventilación

Los sistemas de ventilación cuentan con puertas o ventanas de ventilación para facilitar la dirección y flujo de la corriente de aire, las cuales, si son abiertas o cerradas de forma permanente sin la orientación del responsable del sistema, afectan el flujo de corriente de aire hacia los sitios que se requiere.

c) Por variaciones de temperatura y humedad relativa

Las condiciones climatológicas pueden alterar de manera significativa el flujo de aire al interior de la mina. Factores como la humedad relativa y la temperatura del aire influyen directamente en el sistema de ventilación, provocando variaciones en la velocidad, densidad y composición del aire, tanto a lo largo del día como a lo largo del año. En ocasiones, esto puede generar cambios en la dirección del flujo o turbulencias, especialmente en los sistemas de ventilación natural.

¿Cómo actuar?

El funcionamiento adecuado del sistema de ventilación requiere un monitoreo continuo, basado en mediciones de la calidad y cantidad de aire, para asegurar un control estricto de las características físicas de las vías subterráneas (sección, sostenimiento, estado de las ventanas de ventilación). Además, es esencial controlar los posibles obstáculos que puedan afectar el sistema, así como las condiciones climáticas severas que podrían influir en su eficacia.

En este sentido, una variación en la velocidad del flujo de aire puede indicar una reducción del área por la cual circula, lo que puede ser causado por los factores previamente mencionados. Esto requiere una revisión general

del estado de las vías, que podría incluir acciones puntuales para eliminar los obstáculos, programar el mantenimiento de las vías o, en casos extremos de obstrucción total, ordenar la evacuación de manera inmediata.

Procedimiento de cómo actuar

- Identificar la emergencia
- Evaluar la emergencia
- Activar alarma y procedimiento de emergencia
- Identificar rutas de evacuación, mantener la calma y evacuar
- Verificar que los trabajadores estén al tanto de la emergencia y hayan salido
- Informe a la brigada correspondiente
- Búsqueda y rescate

Identificar las contingencias

El funcionamiento adecuado del sistema de ventilación requiere un monitoreo continuo, basado en mediciones de la calidad y cantidad de aire, para asegurar un control estricto de las características físicas de las vías subterráneas (sección, sostenimiento, estado de las ventanas de ventilación). Además, es esencial controlar los posibles obstáculos que puedan afectar el sistema, así como las condiciones climáticas severas que podrían influir en su eficacia.

En este sentido, una variación en la velocidad del flujo de aire puede indicar una reducción del área por la cual circula, lo que puede ser causado por los factores previamente mencionados. Esto requiere una revisión general del estado de las vías, que podría incluir acciones puntuales para eliminar los obstáculos, programar el mantenimiento de las vías o, en casos extremos de obstrucción total, ordenar la evacuación de manera inmediata.

- Identificar las amenazas internas, externas directas y externas indirectas que pueden afectar el sistema de ventilación:

Las amenazas internas están relacionadas con las características propias de la explotación minera, es decir la mina deberá ser caracterizada de acuerdo con la concentración de gases que se producen. Tal como se indica en el (Decreto 1886, 2015, art. 58). Para todos los aspectos relacionados con el presente Reglamento, las labores mineras subterráneas de carbón se clasifican en tres (3) categorías (tabla 3, capítulo 5).



Es crucial que las características de la explotación minera sean adecuadamente identificadas y comunicadas tanto al personal que labora en la mina como a los funcionarios de entidades oficiales y asesores del proyecto que requieran acceso a la zona. Además, es necesario tener plenamente identificadas las amenazas externas vinculadas a las condiciones ambientales cercanas a las bocaminas, tales como:

- Motores de combustión interna.
- Áreas con emisiones de humo provenientes de calderas para aguzar picos manuales.
- Zonas con potencial de provocar incendios forestales.

La presencia de una atmósfera contaminada por estos factores debe ser controlada para evitar la entrada de aire viciado a la mina. Esto requiere la implementación de acciones correctivas o, de ser necesario, la suspensión del suministro de aire y la evacuación del personal.



▪ **Analizar la vulnerabilidad para afrontar una emergencia**

Se debe identificar y mejorar las condiciones de riesgo para disminuir su impacto y reducir el nivel de vulnerabilidad frente a fallas en el sistema de ventilación. Es fundamental contar con un sistema de comunicación eficiente que permita afrontar emergencias de manera rápida y efectiva. Además, se debe contar con un sistema de alarmas para alertar al personal sobre posibles estados de alerta o la necesidad de evacuar.

- **Identificar recursos para respuesta a emergencias**

Es necesario tener un registro claro de los recursos existentes, como el número y estado de los autorrescadores, y su ubicación en caso de ser requeridos. Esta información debe ser actualizada constantemente.

- **Establecer y mantener un esquema organizacional para emergencia**

El proyecto debe contar con una estructura organizativa que permita atender emergencias derivadas de posibles fallas en el sistema de ventilación. Se debe identificar al personal capacitado para la atención de emergencias y especificar su grado de responsabilidad dentro del protocolo.

▪ **Procedimientos de evacuación y respuesta ante amenazas**

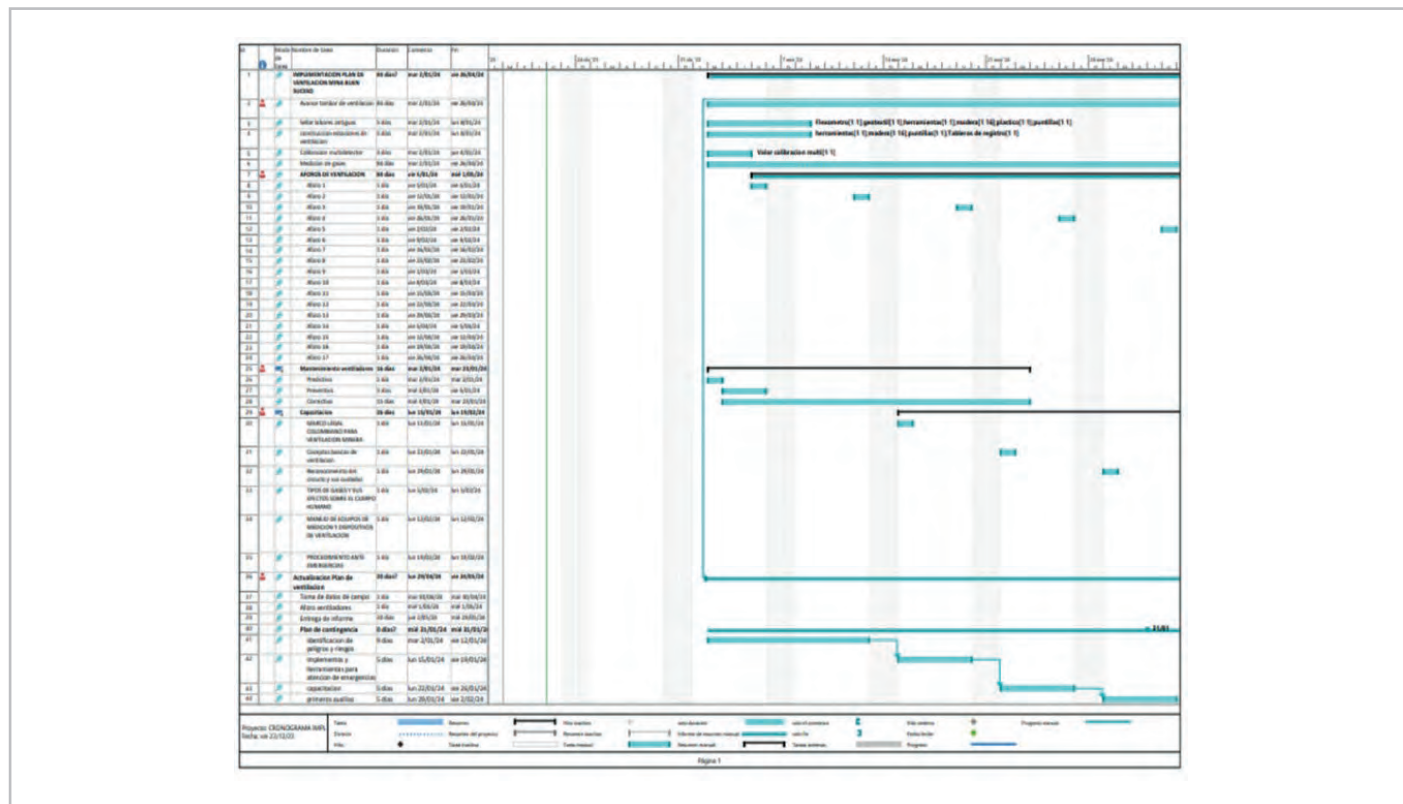
Deben definirse procedimientos claros y prácticos para la evacuación de las diferentes áreas y para la respuesta frente a las principales amenazas identificadas. Asimismo, se deben realizar simulacros de evacuación al menos dos veces al año en cada semestre, para asegurar que el personal esté preparado para actuar en situaciones de emergencia.

▪ **Cronograma anual de actividades y planes de acción mensuales**

Se debe elaborar un cronograma de actividades para la gestión del plan de emergencia, orientado a la identificación de posibles contingencias relacionadas con el sistema de ventilación. Este cronograma debe ser diseñado, aprobado y socializado con todo el personal involucrado en el proyecto minero.

Figura 39

Cronograma implementación



- Establecer indicadores de eficacia y eficiencia

La única manera de evidenciar que el proyecto está implementando acciones para minimizar los riesgos de emergencia y actuar ante cualquier eventualidad es mediante la formulación de indicadores medibles que permitan evaluar el avance logrado en este aspecto.

- Establecer un plan integral de capacitación en emergencia para la organización

Se deberá establecer un programa de capacitaciones a todo el personal, que permita el conocimiento de los aspectos más importantes del diseño y funcionamiento del sistema de ventilación, así como de las acciones a ser desarrolladas en el caso de presentarse una emergencia.

9.8.2 Acciones generales a tener en cuenta para el correcto funcionamiento del sistema de ventilación.

- Todas las labores mineras subterráneas accesibles al personal, así como los lugares donde se encuentre maquinaria, deben ser recorridos de manera constante por un volumen adecuado de aire.
- El aire introducido en la mina subterránea debe estar libre de gases, humos, vapores o polvos nocivos o inflamables.
- Verifique que los lugares donde se realicen labores mineras subterráneas estén ventilados de forma constante y suficiente, para mantener una atmósfera limpia y respirable. El volumen de O₂ en la atmósfera de la mina no debe ser inferior al 19,5% ni superar el 23,5% en volumen de O₂.

- La suspensión de labores en presencia de concentraciones de CH₄ en labores subterráneas, y los lugares donde se deben establecer las concentraciones máximas permitidas de CH₄, deben basarse en lo estipulado en los apartados anteriores y en el (Decreto 1886, 2015), lo cual implica la evacuación inmediata del personal.

El responsable técnico de la labor minera subterránea debe designar, en cada turno, a una persona encargada de supervisar la ventilación en todas las labores. Esta persona deberá estar debidamente capacitada para cumplir con dicha función.

- Las vías de evacuación deberán encontrarse en todo momento libres de obstáculos.
- Utilizar personal idóneo para la realización de cada una de las actividades (capacitación de personal)
- Portar siempre y de forma adecuada los implementos de seguridad industrial.
- Almacenar correctamente los equipos, materiales e insumos, reduciendo así la ocurrencia de eventualidades.
- Mantener en buen estado las instalaciones eléctricas (Certificación RETIE).
- Capacitar a los trabajadores en lo relacionado a las normas relativas a seguridad industrial.
- Identificar personas con necesidades especiales, quienes sean prioritarias en protección y atención.
- Implementar sistemas de monitoreo y alarma (cuando la mina se encuentre catalogada como mediana y altamente explosiva).
- Organizar contactos que actúen ante las emergencias, debe estar consignado en el plan de emergencias el cual debe ser previamente socializado a todas las personas que tengan ingreso a la mina y publicado en un lugar visible.
- Establecer sitios de refugio y de encuentro.
- Llevar a cabo programas de comunicación, educación y divulgación de las medidas que se proponen al atender una emergencia, para que los conozcan todas las personas de la comunidad del área de influencia y las que laboran en la empresa.
- Hacer extensiva la información de quiénes son los encargados de cada puesto de trabajo, con quién deben comunicarse en el caso de una emergencia y cuáles son los sitios de reunión.
- Realizar periódicamente el mantenimiento de instalaciones, equipos, maquinaria e infraestructura.
- Evaluar y controlar la ocurrencia de enfermedades relacionadas con los factores de riesgo laboral como: ergonómicos, químicos y físicos.

- Capacitaciones sobre procedimientos adecuados al desarrollar las actividades laborales, para disminuir la posibilidad de que ocurran accidentes de trabajo.

Estudiar los casos de trabajadores que ameriten la readaptación de sus funciones, reubicación temporal o definitiva de sus puestos de trabajo.

Disponer de información estadística sobre la salud de los trabajadores, que permitan tomar decisiones oportunas frente a factores de riesgo.

9.8.3 Proceso de evacuación

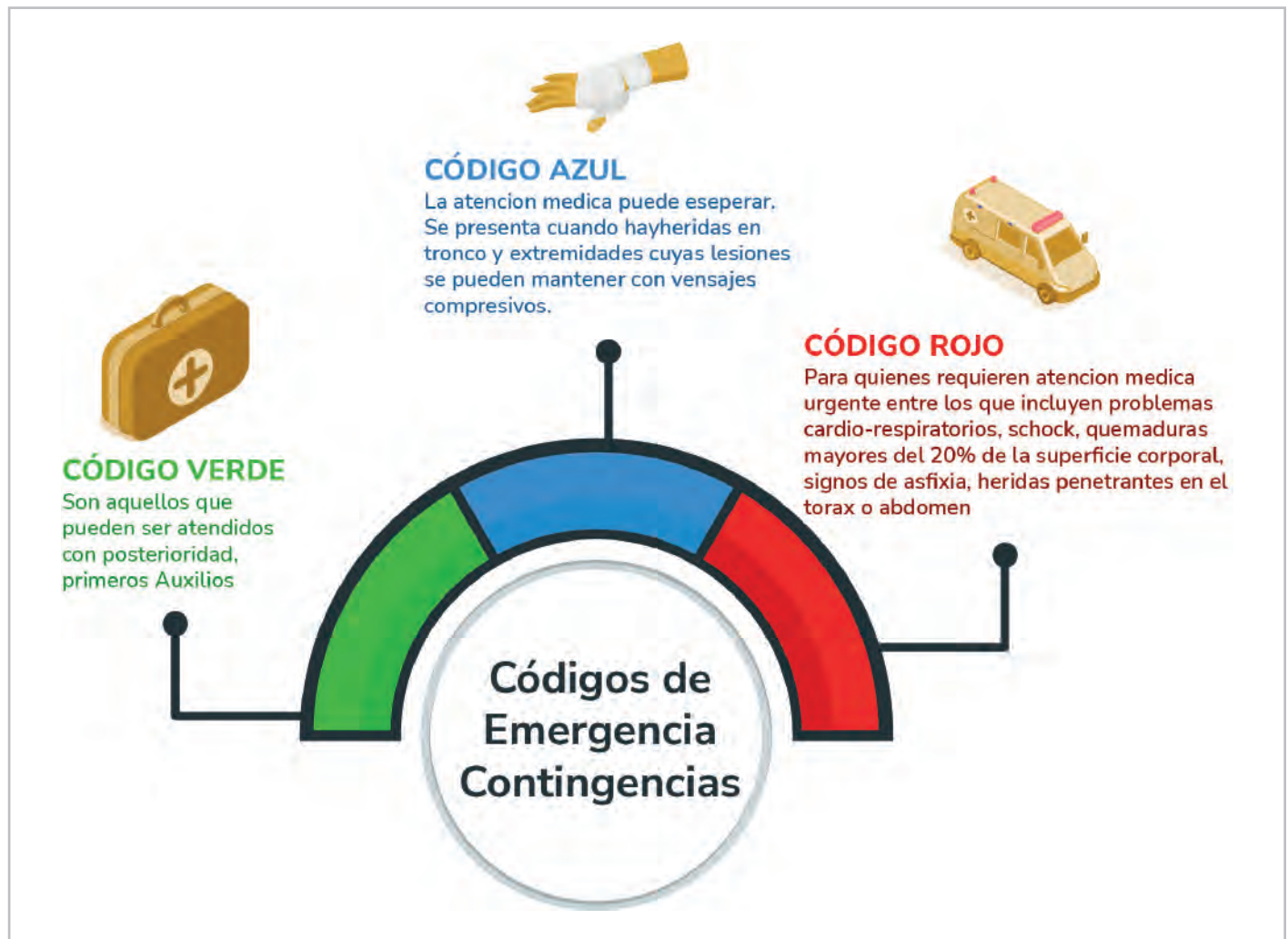
El proceso de evacuación tiene tres etapas:

- **Detección del peligro:** es el tiempo transcurrido desde que se origina el peligro hasta que alguien lo reconozca.
- **Alarma:** la señal audiovisual que alerte la existencia de peligro.
- **Preparación para la salida:** tiempo transcurrido desde que se comunica la decisión de evacuar hasta que la primera persona comienza a salir, y hasta que todo el personal ha salido de manera completa.

Los códigos de emergencia frente a las personas que se ven afectadas por la presencia de la contingencia se relejan en la figura 40.

Figura 40

Códigos de emergencia para contingencias



Durante un evento contingente, se debe dar especial importancia a la protección de las vidas humanas y la integridad de los trabajadores, así como de la población asentada en el área de influencia directa de la empresa, ya que son los primeros elementos en riesgo a proteger.

9.8.4 Reporte y evaluación de la contingencia

Con el fin de garantizar una documentación adecuada sobre el evento, se deben completar formularios para describirlo, así como para evaluar los daños y la funcionalidad

del Plan de Contingencia. En este sentido, los responsables de los puestos de trabajo deberán encargarse de registrar detalladamente la documentación del accidente, incluyendo un informe evaluativo de la emergencia, que contenga todas las observaciones sobre los problemas encontrados y la efectividad en los tiempos de respuesta.

Este informe también debe considerar las fallas en el sistema de comunicación y los vacíos identificados en el Plan de Contingencia, para que, con base en evaluaciones trimestrales, se ajusten oportunamente. Además, debe registrarse la fecha y hora del suceso, los datos de quien lo reportó, las condiciones climáticas, la distancia al sitio de atención más cercano y la causa probable. Es relevante también anotar si hubo personas o propiedades privadas afectadas.

Una vez que se haya controlado la contingencia, será necesario realizar una evaluación ambiental de la misma, con el fin de conocer sus efectos reales sobre el medio ambiente en sus tres dimensiones (física, biótica y social). Mediante esta evaluación, se podrá llevar una estadística que a la vez permita mejorar el conocimiento de las contingencias y sus impactos con el fin de generar mecanismos de prevención apropiados.

9.8.5 Vías de evacuación

Es el camino o ruta diseñada específicamente para que los trabajadores puedan evacuar las instalaciones de la mina en el menor tiempo posible, garantizando al mismo tiempo la máxima seguridad.

Estas son las vías utilizadas durante un siniestro para la evacuación del personal. En algunos casos, son los caminos que se utilizan a diario para el desarrollo de las labores normales de la empresa. En otros, se trata de rutas poco transitadas o menos conocidas, pero que ofrecen mayores garantías de seguridad para las personas en proceso de evacuación. Esta vía de evacuación debe estar representada en un plano, socializada y publicada en un lugar visible.

9.8.6 Puntos de reunión

160 Los puntos de reunión de emergencia son ubicaciones predeterminadas donde el personal se agrupa después de una evacuación para asegurar que todos estén presentes y para coordinar la respuesta a la emergencia. Estos puntos son fundamentales para garantizar una evacuación ordenada y segura, así como para facilitar la coordinación entre los equipos de emergencia y el personal.

Elementos clave para determinar y gestionar puntos de reunión de emergencia

1. Selección de puntos de reunión

Ubicación segura

- Los puntos de reunión deben estar situados en áreas seguras, alejadas de los peligros inmediatos, tales como edificios en llamas, fugas de químicos, etc.
- Deben estar fuera del alcance de posibles explosiones o colapsos estructurales.

Accesibilidad

- Los puntos deben ser fácilmente accesibles desde cualquier área del edificio o instalación.
- Deben tener caminos despejados y accesibles para el personal evacuado, incluidos aquellos con movilidad reducida.

Suficiencia de espacio

- Los puntos de reunión deben tener suficiente espacio para acomodar a todo el personal y permitir la realización de actividades de evaluación y coordinación.
- Deben contar con suficiente espacio para mantener el distanciamiento social si es necesario.

2. Comunicación de puntos de reunión

Información clara

- Comunicar claramente la ubicación de los puntos de reunión a todo el personal a través de señales, mapas y reuniones de formación.
- Incluir instrucciones sobre cómo llegar a los puntos de reunión desde diferentes áreas del edificio.

Actualización de información

- Actualizar la información sobre los puntos de reunión cuando se produzcan cambios en el diseño del edificio o en la configuración del área.
- Asegurarse de que la información esté disponible en varios formatos y accesible a todos los empleados.

3. Procedimientos durante la emergencia

▪ Rutas de evacuación

- Establecer y señalizar rutas de evacuación claras y directas hacia los puntos de reunión.
- Asegurarse de que las rutas estén libres de obstrucciones y sean seguras para el tránsito del personal.

▪ Asignación de responsabilidades

- Designar a líderes de evacuación o coordinadores de emergencia responsables de guiar al personal hacia los puntos de reunión y contar el número de personas.
- Asignar personal de seguridad para verificar que las rutas de evacuación y los puntos de reunión estén despejados y seguros.

▪ Revisión y registro

- Realizar un conteo de las personas en los puntos de reunión para asegurarse de que todos estén presentes y seguros.
- Registrar cualquier persona que falte o que pueda estar atrapada en el edificio.

4. Procedimientos posteriores a la evacuación

▪ Coordinación con servicios de emergencia

- Proporcionar a los servicios de emergencia información sobre el número de personas evacuadas y cualquier problema conocido.
- Facilitar el acceso a los servicios de emergencia y proporcionar asistencia en la evaluación de la situación.

▪ Reunión de evaluación

- Llevar a cabo una reunión de evaluación en los puntos de reunión para revisar la eficacia de la evacuación y los procedimientos de emergencia.
- Discutir y registrar cualquier incidente o problema que haya surgido durante la evacuación.

5. Mantenimiento y mejora continua

▪ Simulacros regulares

- Realizar simulacros de evacuación periódicos para practicar la evacuación hacia los puntos de reunión y ajustar los procedimientos según sea necesario.
- Incluir en los simulacros escenarios variados para asegurar que los puntos de reunión sean efectivos en diferentes tipos de emergencias.

▪ Revisión de procedimientos

Revisar y actualizar los procedimientos de evacuación y los puntos de reunión con regularidad.

Asegurarse de que las modificaciones en la infraestructura del edificio o cambios en el personal se reflejen en el plan de emergencia.

9.8.7 Ubicación de equipos de autorrescate

Los equipos autorrescatadores son de uso personal y, por lo tanto, deben ser portados por cada trabajador en todas las labores mineras subterráneas. Estos equipos deben estar certificados conforme a la normativa técnica colombiana y cumplir con las siguientes características técnicas:

1. El equipo debe proteger individualmente las vías respiratorias del usuario.
2. La temperatura de inhalación del equipo autorrescatador en funcionamiento no debe superar los 60°C, lo cual protege las vías respiratorias de temperaturas altas.
3. El equipo debe permitir escapar de atmósferas contaminadas o con deficiencia de oxígeno.
4. Tener una autonomía mínima de treinta (30) minutos en actividad.
5. El autorrescatador debe suministrar como mínimo un flujo de respiración de 35 l/min.
6. Debe ser un autorrescatador de oxígeno de circuito cerrado, es decir debe operar al 100% sin necesidad del ambiente externo.
7. De activación e iniciación automática.
8. De fácil disponibilidad de uso.
9. Portátil.

10. El equipo en conjunto debe ser antiestático y de resistencia al choque.
11. Debe poseer dispositivo y/o indicador que le permita al usuario de manera inmediata determinar el buen estado del equipo.
12. Debe ser un equipo debidamente certificado, en normas para operar en atmósferas contaminadas o con deficiencia de oxígeno y en atmósferas con gases explosivos y polvo de carbón. La certificación debe ser aportada por el fabricante.
13. Debe tener una vida útil mínima de 5 años, libre de mantenimiento y/o pruebas.

9.9 Plan informativo

En el programa de preparación para emergencias, los medios de comunicación y las alarmas juegan un papel fundamental. De ellos depende, en gran medida, la ejecución pronta y coordinada de las acciones necesarias para facilitar el control de la situación.

Notificación de la emergencia

Todo trabajador o contratista que detecte una emergencia en el área del proyecto está obligado a reportarla de inmediato al encargado o jefe de turno. Una vez conocida la emergencia, se deberá contactar inmediatamente al jefe de emergencias, proporcionando todos los datos posibles y los requerimientos de apoyo.

Tras recibir el reporte de emergencia, el jefe competente procederá a realizar las comunicaciones pertinentes (ANM, gerencia, bomberos, brigadistas, grupo de apoyo, etc.). Es responsabilidad de todo el personal que labora en la mina estar informado sobre la organización y las instrucciones generales de reacción. Además, deben conocer los procedimientos para recibir, retransmitir el mensaje de emergencia y brindar el apoyo necesario.

Los teléfonos móviles, el sistema de radio de banda ciudadana, la central telefónica en la alcaldía y las oficinas de la empresa deben tener disponible el directorio de las entidades para la atención de emergencias. Se recomienda mantener un archivo con los números de emergencia, como se ilustra a continuación en la tabla 55.

Tabla 55

Números de emergencia para contingencias

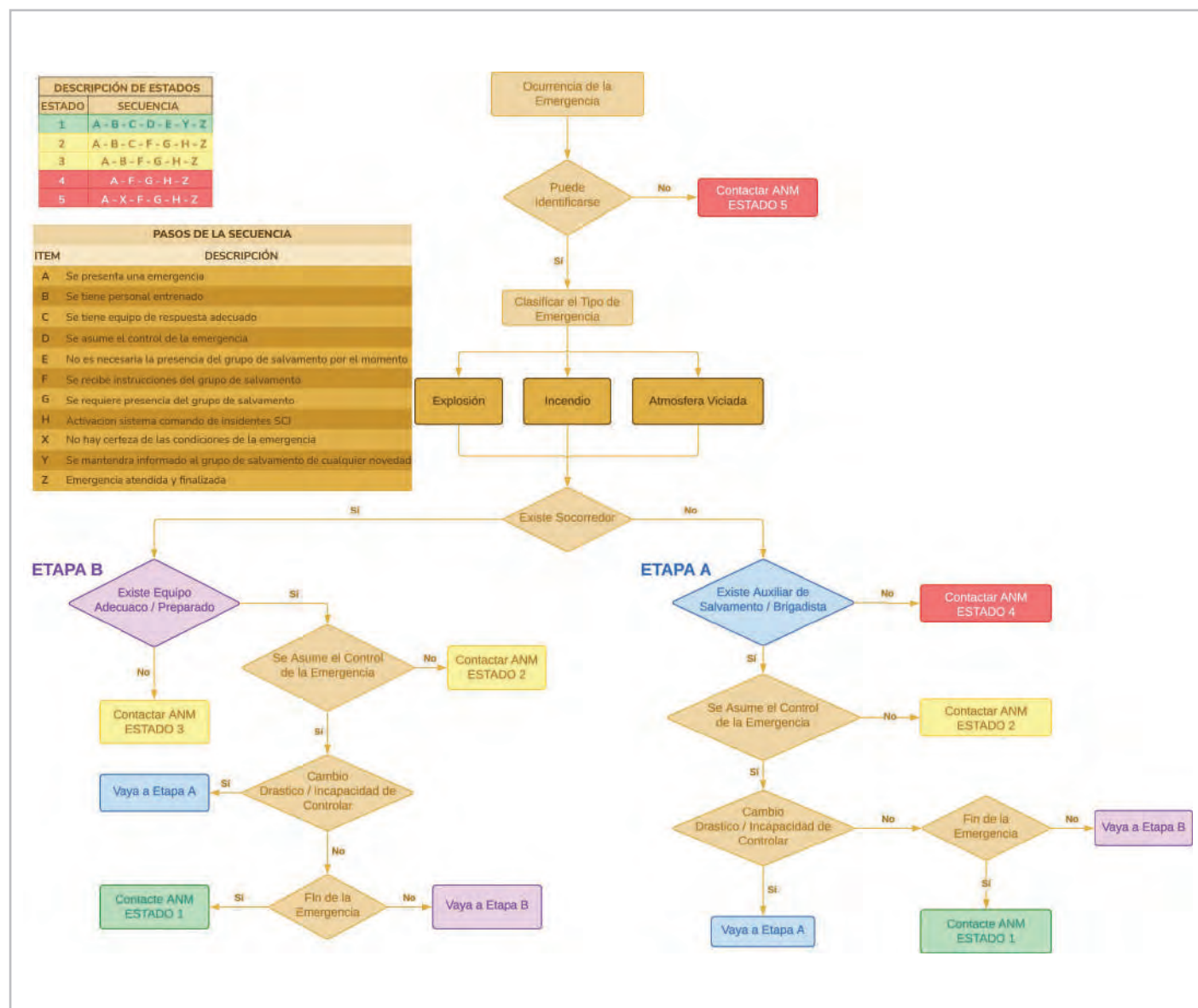
ENTIDAD	MUNICIPIO	TELÉFONO
Alcaldía		
Salvamento Minero		
Defensa civil		
Cruz roja		
Policía Nacional		
Centro de Salud		
Hospital		
Bomberos		

9.10 Plan de acción

En atención a la ocurrencia de una emergencia, a continuación se describe el flujograma del plan de acción propuesto por el Servicio Nacional de Salvamento Minero, que establece los lineamientos para ejecutar operaciones de salvamento en minas subterráneas. Este plan será adoptado por la empresa en caso de una emergencia.

Figura 41

Flujograma del plan de acción de rescate minero



Nota. El flujograma indica que, al momento de la ocurrencia de una emergencia, se debe determinar si es necesario contactar a la ANM. Esta decisión se toma considerando los pasos de la secuencia evaluada en el momento del incidente. Al agrupar estos pasos, se podrá identificar el estado que debe ser reportado a la autoridad minera, permitiéndole preparar su atención e intervención. La importancia de identificar la secuencia radica en el tipo de respuesta que se dará por parte del equipo de salvamento. Tomado del Servicio Nacional de Salvamento Minero.

9.11 Programa de capacitación

Teniendo en cuenta las necesidades del sistema de ventilación, se desarrollará un programa de capacitación anual con el objetivo de cubrir las principales necesidades formativas del personal minero. A continuación, se presenta el programa de capacitación recomendado. Cabe aclarar que cada responsable de la implementación del plan de ventilación será quien defina este programa de acuerdo con las necesidades específicas de su empresa. Programa de capacitación para ventilación

OBJETIVOS

- Capacitar al personal en temas de ventilación con el fin de tener una atmósfera minera segura
- Dar a conocer al personal las situaciones de emergencia y su respectiva respuesta
- Tener personal capacitado con el fin de disminuir riesgos técnicos y de seguridad
- Revisar el cumplimiento de los indicadores definidos para el programa.

DESCRIPCIÓN

Revisar la documentación de soporte de las reuniones y talleres realizados, incluyendo los listados de asistencia debidamente firmados por los participantes, actas e informes a que haya lugar.

164 Entrevistar aleatoriamente algunas de las personas que hayan asistido a las capacitaciones con el fin de conocer su percepción sobre el programa de capacitación y conocimientos adquiridos en las mismas.

Verificar que la capacitación teórica se realice en recintos cerrados, cómodos y con los materiales necesarios para la exposición.

Realizar las recomendaciones a que haya lugar con el fin de mejorar la calidad del programa.

Revisar los registro fotográficos y fílmicos de las reuniones realizadas.

Temas de capacitación

MÓDULO 1: CONCEPTOS BÁSICOS DE VENTILACIÓN

- Conceptos y términos básicos de ventilación
- Conceptos de aire fresco
- Conceptos básicos de aforos de ventilación

MÓDULO 2: RECONOCIMIENTO DEL CIRCUITO Y SUS CUIDADOS

- Cuidado y mantenimiento de la ventilación en la mina
- Conocimiento del circuito de ventilación característico de la mina
- Naturaleza de los peligros por efectos de la ventilación

MÓDULO 3: TIPOS DE GASES Y SUS EFECTOS SOBRE EL CUERPO HUMANO

- Enfermedades comunes por ventilación deficiente
- Tipos de gases en la atmósfera minera y sus características
- Síntomas y presencia de gases nocivos- VLP

MÓDULO 4: MANEJO DE EQUIPOS DE MEDICIÓN Y DISPOSITIVOS DE VENTILACIÓN

- Reconocimiento y manejo de equipos multi detectores de gases
- Procedimiento de medición y registro de gases
- Medición de gases en frentes especiales
- Reconocimiento y manejo de equipos de ventilación (psicrómetro, Anemómetro y/ Termo Higo Anemómetro)
- Accesorios de ventilación

MÓDULO 5: PROCEDIMIENTO ANTE EMERGENCIAS

- Procedimiento ante situaciones de emergencia
- Principios básicos de primeros auxilios

MÓDULO 6: MARCO LEGAL COLOMBIANO PARA VENTILACIÓN MINERA

- Requisitos del Decreto 1886 de 2015 para ventilación

INDICADOR DE ASISTENCIA A CAPACITACIÓN

$$ASISTENCIA = \frac{\text{Número de empleados}}{\text{Número de empleados programados por capacitación}} * 100$$



MANTENIMIENTO DE EQUIPOS, ELEMENTOS Y VÍAS DE VENTILACIÓN EN MINAS SUBTERRÁNEAS



La ventilación es uno de los factores más importantes para garantizar la seguridad y salud de las personas dentro de una mina. Su función principal es distribuir de manera constante un flujo de aire fresco hacia los frentes de explotación minera y evacuar el aire viciado del interior.

Para asegurar su eficiencia, es esencial realizar inspecciones regulares y mantenimiento preventivo de equipos como ventiladores, ductos, tuberías y vías de ventilación. Estas acciones permiten identificar problemas como bloqueos, fugas o desgastes, lo que optimiza el rendimiento del sistema y reduce los riesgos en las operaciones mineras.

10.1 Ventiladores

Los ventiladores tienen como función generar y mantener un flujo continuo de aire fresco a través de las galerías, al mismo tiempo que extraen el aire viciado de la mina. Además, contribuyen a regular la temperatura y la humedad dentro de las instalaciones.

Mantenimiento

El mantenimiento de los ventiladores es crucial para garantizar la seguridad en las operaciones, mantener su eficiencia y prolongar su vida útil. Por esta razón, es fundamental incluir las siguientes actividades esenciales en cualquier programa de mantenimiento.



▪ **Inspecciones regulares**

Permiten detectar desgastes y mal funcionamiento de los componentes (ver figura 57).

Tabla 57

Inspecciones regulares de ventiladores

INSPECCION DE VENTILADORES	
Componentes a Inspeccionar	Acciones Específicas Durante la Inspección
Álabes	Identificar desgastes, deformaciones y acumulación de polvo o residuos que puedan afectar el flujo de aire.
Rodamientos	Evaluar el estado de lubricación, la presencia de ruidos anormales y señales de desgaste.
Conexiones Eléctricas	Revisar el cableado y los contactos para detectar conexiones irregulares o defectuosas, daños o señales de sobrecalentamiento.
Soportes y condición estructural	Identificar fisuras, corrosión, oxido o componentes sueltos que puedan comprometer la estabilidad del ventilador.
Vibraciones	Identificar vibraciones inusuales que puedan indicar un desbalance o falla en componentes del ventilador.
Acciones Generales Durante la Inspección	
Limpiar las superficies expuestas y los álabes con herramientas diseñadas para eliminar polvo y residuos sin dañar el equipo.	
Registrar observaciones en un formato de inspección, incluyendo fotos de áreas críticas para un análisis posterior.	
Realizar pruebas de funcionamiento para detectar ruidos inusuales, fluctuaciones en el flujo de aire o inconsistencias en el desempeño eléctrico.	
Periodicidad de las Inspecciones	
Diario	Inspección visual rápida al inicio de cada turno para verificar las condiciones generales y asegurar que no haya problemas evidentes.
Semanal	Inspecciones detalladas incluyendo pruebas de funcionamiento y limpieza superficial.
Mensual	Revisión exhaustiva, incluye lubricación de rodamientos, pruebas de vibraciones y monitoreo eléctrico.
Nota. En esta tabla se relacionan los componentes a inspeccionar en un ventilador, las acciones a tomar durante la inspección y la periodicidad de las inspecciones.	

- **Limpieza:** evita la acumulación de polvo y otras sustancias que pueden obstruir el flujo continuo de aire y reducir la capacidad mecánica del ventilador.

Tabla 58

Limpieza de ventiladores

LIMPIEZA DE VENTILADORES	
Componentes a Limpiar	Acciones Específicas Durante la Limpieza
Álabes y carcasa	Eliminar las acumulaciones de polvo, suciedad y elementos capaces de obstruir el flujo de aire o causar desbalance en el ventilador.
Rejillas y protecciones	Eliminar residuos que puedan obstruir la circulación o flujo correcto del aire.
Rodamientos y componentes móviles	Limpiar con cuidado las áreas externas para evitar acumulaciones de polvo o partículas, sin comprometer la lubricación del equipo.
Motor y Conexión Eléctrica	Limpiar polvo superficial que pueda causar sobrecalentamiento o interferir con el desempeño eléctrico.
Acciones Generales y Procedimiento de Limpieza	
Apagar el ventilador y asegurarse de que no haya riesgo eléctrico antes de comenzar.	
Limpiar rejillas y protecciones con un paño seco, asegurándose de que estén libres de obstrucciones.	
Limpiar a fondo las superficies de los álabes y la carcasa. Evitar el uso de productos químicos agresivos que puedan corroer materiales.	
Inspeccionar las áreas limpiadas para verificar que no queden restos de residuos.	
Periodicidad de la Limpieza	
Después de eventos críticos	Como actividades de perforación intensiva, derrumbes o condiciones ambientales que generen exceso de polvo.
Durante inspecciones programadas	Aprovechar revisiones para realizar una limpieza a fondo como parte del mantenimiento preventivo.
Mensual	Realizar una limpieza general para mantener la eficiencia operativa.
<p>Nota. En esta tabla se relacionan los componentes a limpiar en un ventilador, las acciones a tomar durante la limpieza y la periodicidad.</p>	

- **Lubricación:** previene el sobrecalentamiento y el desgaste prematuro de los rodamientos y piezas móviles. Es preciso consultar el manual del fabricante para identificar los puntos de lubricación y el tipo de lubricante recomendado.

Tabla 59

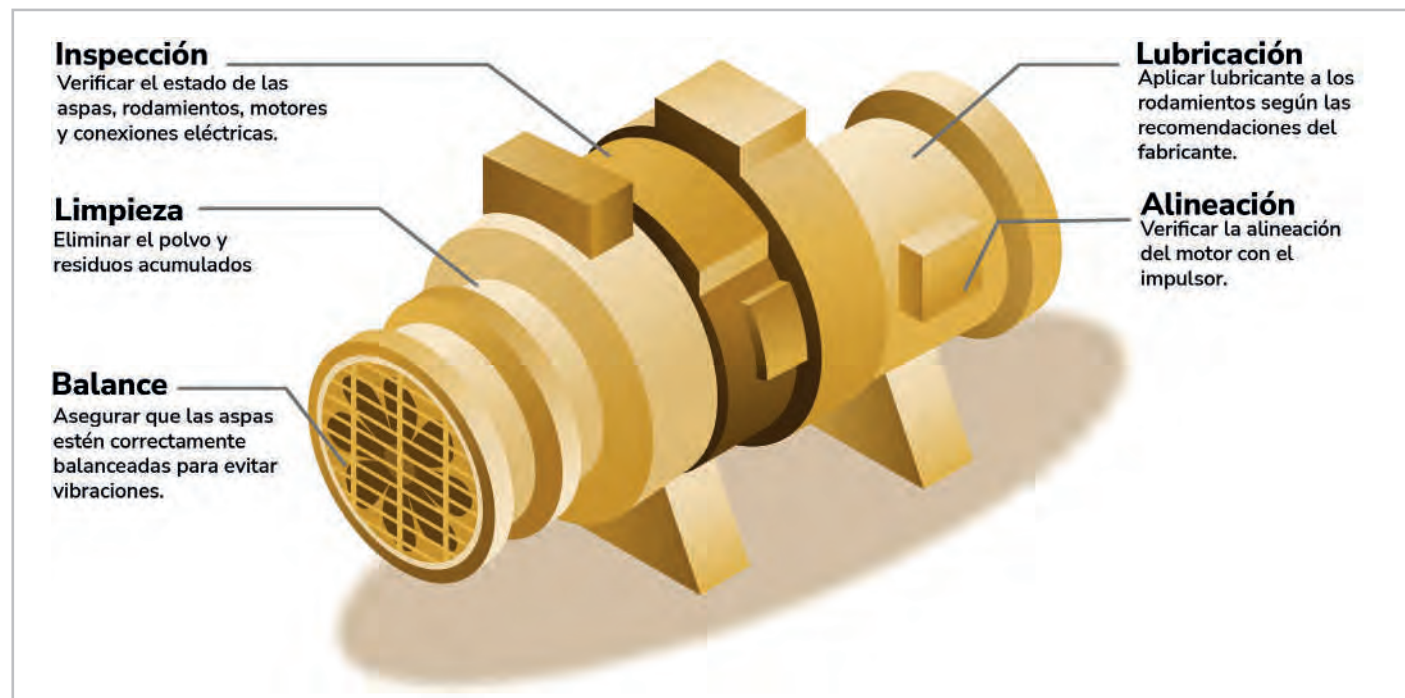
Lubricación de ventiladores

LUBRICACIÓN DE VENTILADORES	
Componentes a Lubricar	Acciones Específicas Durante la Lubricación
Rodamientos	Consultar el manual del fabricante para identificar los puntos de lubricación y el tipo de lubricante recomendado.
Ejes y partes móviles	Consultar el manual del fabricante para identificar los puntos de lubricación y el tipo de lubricante recomendado.
Acciones Generales y Procedimiento de Lubricación	
Asegurarse de que el ventilador esté apagado y bloqueado para evitar accidentes.	
Limpiar los puntos de lubricación con un trapo limpio para evitar que entre suciedad al sistema.	
Aplicar el lubricante en la cantidad recomendada por el fabricante	
Girar manualmente el ventilador después de lubricar para asegurar una distribución uniforme del lubricante.	
Retirar el exceso de lubricante para evitar acumulaciones que puedan atraer el polvo.	
Periodicidad de la Lubricación	
Consultar el manual del fabricante, algunos ventiladores requieren lubricación tras un número específico de horas de trabajo	
Nota. En esta tabla se relacionan los componentes a lubricar en un ventilador, las acciones a tomar durante la lubricación y la periodicidad.	

- **Balance y alineación:** asegurarse de que las aspas estén correctamente balanceadas y que el motor e impulsor estén alineados adecuadamente es fundamental para evitar vibraciones que podrían causar daños. Si el ventilador requiere alineación, se recomienda consultar el manual del fabricante y seguir el procedimiento establecido. En algunos casos, el grado de desbalance o de la anomalía en la alineación podría requerir asistencia técnica especializada.

Figura 42

Acciones para el mantenimiento de ventiladores



Nota. La figura muestra las acciones a realizar dentro del programa de mantenimiento de los ventiladores.

Además del mantenimiento, la verificación es muy importante para salvaguardar aspectos tales como la seguridad. Un ventilador defectuoso puede provocar la acumulación de gases tóxicos y/o la disminución del oxígeno. Así como la reducción de productividad y el aumento de costos operativos. Respecto a las regulaciones mineras, estas establecen requisitos específicos para los sistemas de ventilación, su incumplimiento puede acarrear sanciones.

10.2 Ductos y tubería

Estos elementos son fundamentales dentro de un sistema de ventilación, ya que son responsables de dirigir y distribuir el flujo de aire fresco hacia las labores mineras, además de evacuar el aire viciado, el polvo y otros gases. Los ductos y tuberías generalmente se diseñan para resistir condiciones exigentes de abrasión y humedad, lo que contribuye a preservar la integridad del sistema.

Mantenimiento

El mantenimiento de los ductos y tuberías garantiza la seguridad en las operaciones permitiendo una correcta distribución de aire fresco en los frentes de trabajo. Por tal razón, es recomendable realizar las siguientes actividades esenciales en un programa de mantenimiento.

- **Inspecciones regulares:** revisar la integridad estructural, buscar fugas y obstrucciones.

Tabla 60

Inspección de ductos y tuberías de ventilación

INSPECCIÓN DE DUCTOS Y TUBERÍAS	
Situaciones que identificar	Acciones específicas durante la inspección
Fugas y fisuras	Buscar señales de aire escapando, fisuras visibles o uniones mal selladas.
Acumulaciones de polvo	Identificar obstrucciones internas o externas que puedan afectar el flujo de aire.
Desgaste y corrosión	Revisar superficies internas y externas en busca de corrosión, abrasión o deformaciones.
Acciones generales durante la inspección	
Realizar una inspección visual del exterior de los ductos y tuberías, buscando fisuras, corrosión o acumulación de residuos.	
Evaluar el estado de los soportes y fijaciones, asegurándose de que no haya desplazamientos ni vibraciones que puedan dañar el sistema.	
Registrar las observaciones en un informe detallado, priorizando reparaciones inmediatas o preventivas.	
Periodicidad de las inspecciones	
Semanal	Inspecciones visuales regulares para identificar problemas superficiales o evidentes.
Después de eventos críticos	Como derrumbes, explosiones o cambios significativos en las condiciones ambientales que puedan afectar los ductos y tuberías.
<p>Nota. En esta tabla se relacionan las situaciones a identificar en los ductos y tuberías durante las inspecciones. Las acciones para tomar durante la lubricación y la periodicidad de la misma.</p>	

- **Limpieza:** evita la acumulación de polvo, rocas y otros materiales que pueden obstruir el flujo continuo de aire.

Tabla 61

Limpieza de ductos y tuberías de ventilación

LIMPIEZA DE DUCTOS Y TUBERÍAS	
Componentes a limpiar	Acciones Específicas Durante la Limpieza
Interior de los ductos y tuberías	Retirar el polvo y residuos acumulados que puedan obstruir el flujo de aire.
Superficies externas	Eliminar suciedad que pueda provocar corrosión o desgaste prematuro.
Acciones Generales y Procedimiento de Limpieza	
Apagar el sistema de ventilación antes de comenzar para evitar accidentes.	
Inspeccionar visualmente el resultado de la limpieza y verificar que no queden obstrucciones.	
Periodicidad de la Limpieza	
Mensual	Como parte del mantenimiento preventivo, asegurando un flujo óptimo de aire.
Después de eventos críticos	Como explosiones, derrumbes o actividades que generen grandes cantidades de polvo o residuos.
<p>Nota. En esta tabla se relacionan los componentes a limpiar en ductos y tuberías, las acciones a tomar durante la limpieza y la periodicidad de la misma.</p>	

- **Sellado:** Asegurar que las uniones estén bien selladas para evitar fugas de aire que comprometan la eficiencia del sistema.

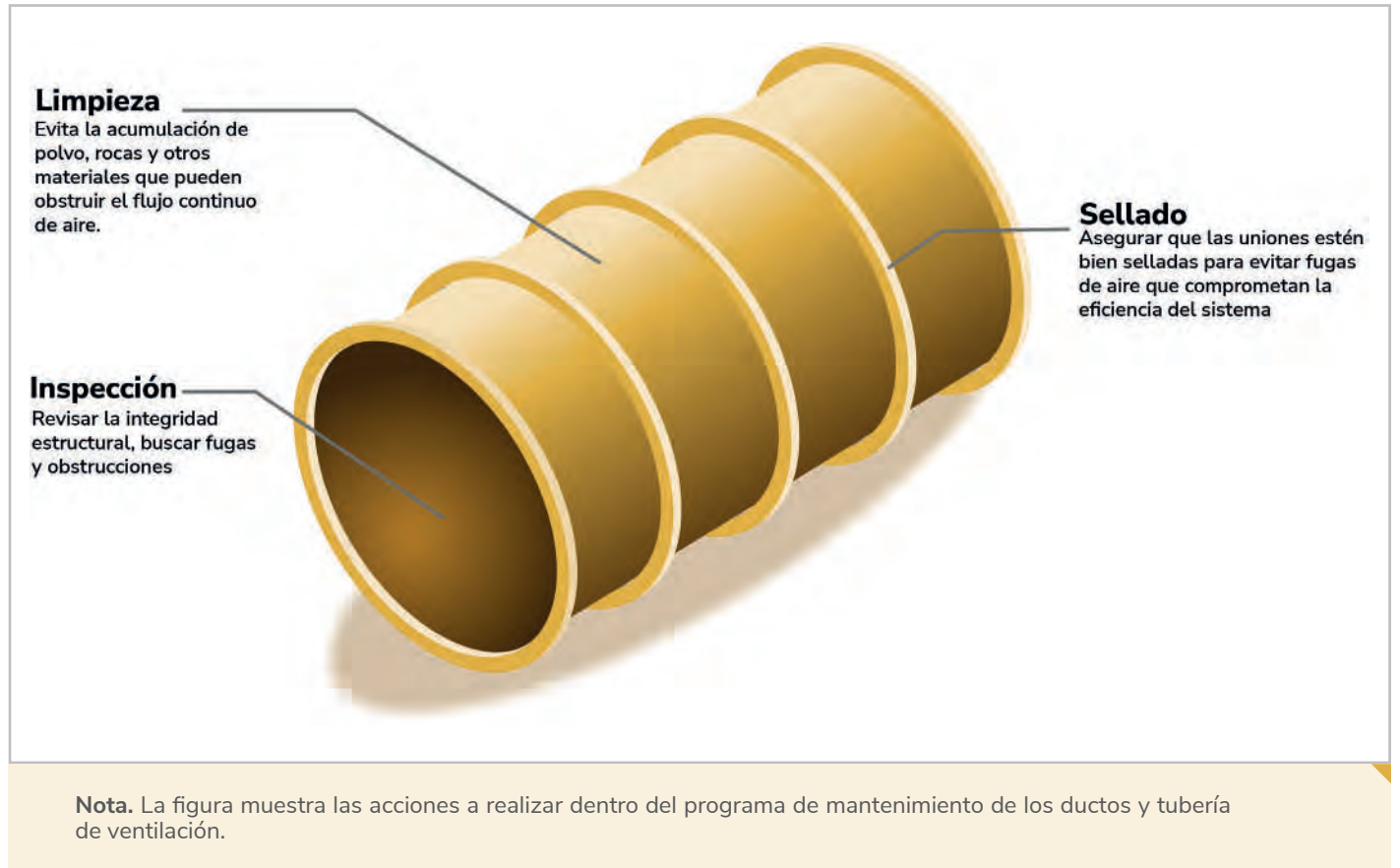
Tabla 62

Sellado de Ductos y Tuberías de Perforación

SELLADO DE DUCTOS Y TUBERÍAS	
Elementos susceptibles de sellar	Acciones específicas y objetivos del sellado
Juntas y uniones	Hay que asegurar que las conexiones entre segmentos de ductos y tuberías estén bien selladas para evitar fugas.
Fugas identificadas	Reparar puntos donde se detecte escape de aire durante inspecciones. Sellar fisuras o perforaciones que puedan comprometer la eficiencia del sistema.
Acoples y empalmes	Revisar las uniones con otros componentes del sistema, como ventiladores o válvulas, para garantizar hermeticidad.
Acciones generales y procedimiento del sellado	
Limpiar la superficie a sellar, eliminando polvo, grasa o residuos que puedan afectar la adherencia del material.	
Aplicar el sellador de forma uniforme sobre el área a reparar utilizando una espátula para alisar y garantizar un sellado hermético.	
Dejar que el sellador actúe según las indicaciones del fabricante antes de reiniciar el flujo de aire.	
Realizar una prueba de funcionamiento para confirmar que no haya fugas y que el sistema opere correctamente.	
Periodicidad del sellado	
Durante inspecciones	Reparar cualquier fuga identificada para evitando así que pueda empeorar.
Inmediatamente detectado el daño	Las fugas pequeñas deben ser atendidas de inmediato para evitar una reducción en la eficiencia del sistema.
Al instalar o reemplazar componentes	Sellar correctamente las uniones y conexiones durante cualquier intervención en el sistema.
Nota. En esta tabla se relacionan los componentes susceptibles de sellado y las acciones a tomar durante el sellado y la periodicidad.	

Figura 43

Acciones para el mantenimiento de ductos y tuberías



Los ductos y tuberías de ventilación suelen sufrir deformaciones, perforaciones o roturas que afectan la eficiencia del sistema. Estas deben ser reparadas de manera inmediata para evitar fugas de aire. Además, las acumulaciones de escombros, polvo y otros materiales reducen el flujo de aire. Es fundamental verificar las uniones entre los tramos de los ductos, ya que esto facilita la identificación de fugas. En caso de detectarlas, se deben aplicar selladores o cintas adhesivas especializadas para garantizar la integridad del sistema.

10.2 Puertas y compuertas

Las puertas y compuertas juegan un papel clave en el control y direccionamiento de los flujos de aire dentro de la mina. Estas estructuras permiten aislar o habilitar secciones del sistema según las necesidades de la operación, facilitando así la ventilación dirigida a labores específicas.

Mantenimiento

El mantenimiento de estas estructuras es fundamental para garantizar la seguridad en las operaciones mineras, asegurando una correcta distribución del aire en los diferentes frentes de trabajo. Por esta razón, se recomienda llevar a cabo las siguientes actividades esenciales dentro de un programa de mantenimiento.

- **Inspecciones:** verificar la integridad estructural, inspeccionar los sellos para evitar fugas.

Tabla 63

Inspección de puertas y compuertas de ventilación

INSPECCION DE PUERTAS Y COMPUERTAS	
Componentes que inspeccionar	Acciones específicas durante la inspección
Estructura	Verificar si hay daños, deformaciones, corrosión o desgaste sobre la superficie o en los marcos.
Mecanismos de cierre y apertura	Comprobar que bisagras, pestillos, y sistemas de cierre automático o manual estén funcionales y libres de obstrucciones.
Sistemas de ajuste	Revisar que las compuertas se deslicen o articulen suavemente y que las puertas cierren completamente sin dejar espacios.
Acciones generales durante la inspección	
Realizar una inspección visual completa de la estructura, identificando daños visibles como fisuras, corrosión o acumulaciones de suciedad.	
Probar el funcionamiento de los mecanismos de apertura y cierre, asegurándose de que no haya resistencia anormal ni piezas atascadas.	
Registrar todas las observaciones en un informe detallado, priorizando reparaciones o ajustes necesarios.	
Periodicidad de las inspecciones	
Mensual	Realizar inspecciones regulares para asegurar que no haya fallas visibles ni funcionales.
Después de intervenciones	Cuando se hayan realizado modificaciones en el sistema de ventilación o después de eventos, como movimientos de suelo.
Nota. En esta tabla se relacionan los componentes a inspeccionar en puertas y compuertas, las acciones a tomar durante la inspección y la periodicidad de las inspecciones.	

- **Limpieza:** evitar la acumulación de rocas y escombros que puedan obstruir la apertura y cierre de las puertas y compuertas

Tabla 64

Limpieza de puertas y compuertas de ventilación

LIMPIEZA DE PUERTAS Y COMPUERTAS	
Componentes por limpiar	Acciones específicas durante la limpieza
Superficies externas e internas	Eliminar polvo, suciedad y residuos acumulados que puedan afectar la operación o provocar corrosión.
Bisagras y mecanismos de articulación	Retirar residuos que puedan interferir con el movimiento suave de las puertas y compuertas.
Acciones generales y procedimiento de limpieza	
Retirar el polvo y suciedad superficial con un paño seco u otro elemento de limpieza.	
Usar cepillos de cerdas finas para limpiar bisagras, pestillos y áreas con acumulación de residuos pequeños.	
Periodicidad de las inspecciones	
Mensual	Para mantener las puertas y compuertas en condiciones óptimas, especialmente en ambientes de alto polvo.
Durante inspecciones programadas	Aprovechar el proceso de inspección para realizar una limpieza ligera que facilite la detección de problemas.
Nota. En esta tabla se relacionan los componentes a limpiar en puertas y compuertas y las acciones a tomar durante la limpieza y la periodicidad	

- **Lubricación:** mantener lubricadas las bisagras y los mecanismos de accionamiento.

Tabla 65

Lubricación de puertas y compuertas de ventilación

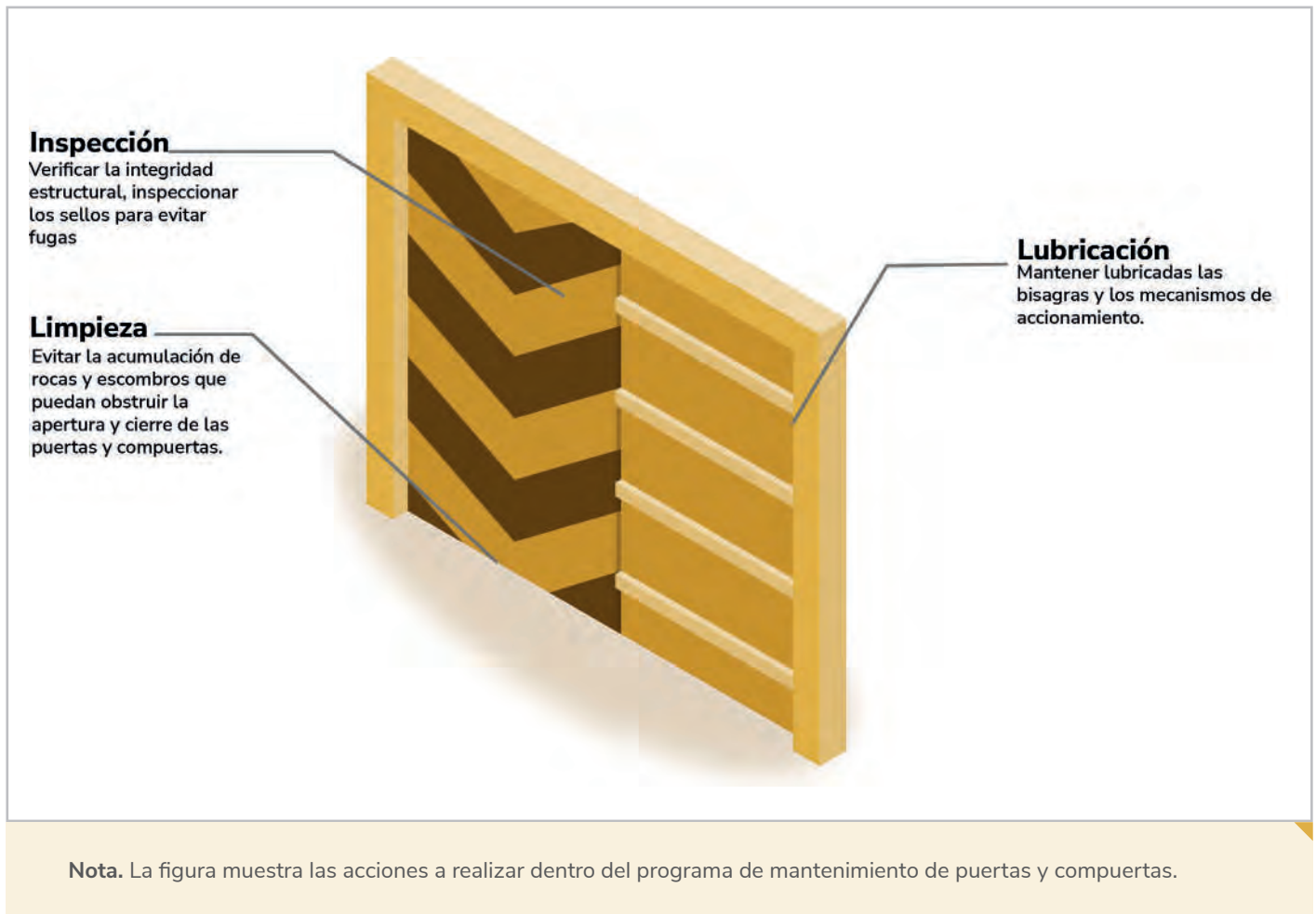
LUBRICACIÓN DE PUERTAS Y COMPUERTAS	
Componentes para lubricar	Acciones específicas durante la lubricación
Bisagras y mecanismos de articulación	Puntos clave para garantizar una apertura y cierre suave sin generar ruidos ni desgaste excesivo y evitar atascos.
Sistemas de cierre	Pestillos, pernos y mecanismos que puedan verse afectados por fricción o acumulación de polvo.
acciones generales y procedimiento de limpieza	
Limpiar cuidadosamente las superficies que serán lubricados, eliminando polvo, grasa vieja o residuos.	
Aplicar el lubricante directamente sobre bisagras y ejes, asegurándose de cubrir uniformemente los puntos de fricción.	
Mover las puertas o compuertas varias veces para distribuir el lubricante de manera uniforme.	
Retirar el exceso de lubricante para evitar acumulaciones que puedan atraer el polvo.	
Realizar una prueba de funcionamiento para confirmar que las puertas y compuertas operen normalmente.	

Periodicidad de Lubricación	
Trimestral	Como parte del mantenimiento preventivo programado.
Después de limpiezas profundas	Restaurar la lubricación en puntos que puedan haber perdido lubricación durante la limpieza.
Al detectar ruidos o fricción	Atender de inmediato cualquier señal de resistencia o ruido inusual en el funcionamiento.

Nota. En esta tabla se relacionan los componentes a lubricar en puertas y compuertas, las acciones a tomar durante la lubricación y la periodicidad.

Figura 44

Acciones para el mantenimiento de puertas y compuertas



Las puertas que controlan el flujo de aire en la mina deben estar libres de cualquier obstrucción y funcionar correctamente. Es importante revisar los sistemas de cierre y apertura, las bisagras y sellos, asegurando que las puertas ajusten adecuadamente para mantener el control de la ventilación.

10.4 Sensores y sistemas de control

Son elementos estratégicos del sistema con la capacidad de monitorear y ajustar de manera automática la ventilación de la mina, estos dispositivos miden parámetros como nivel de oxígeno, la calidad del aire, concentración de dióxido de carbono (CO₂) y otros gases, también la velocidad del aire y la temperatura.

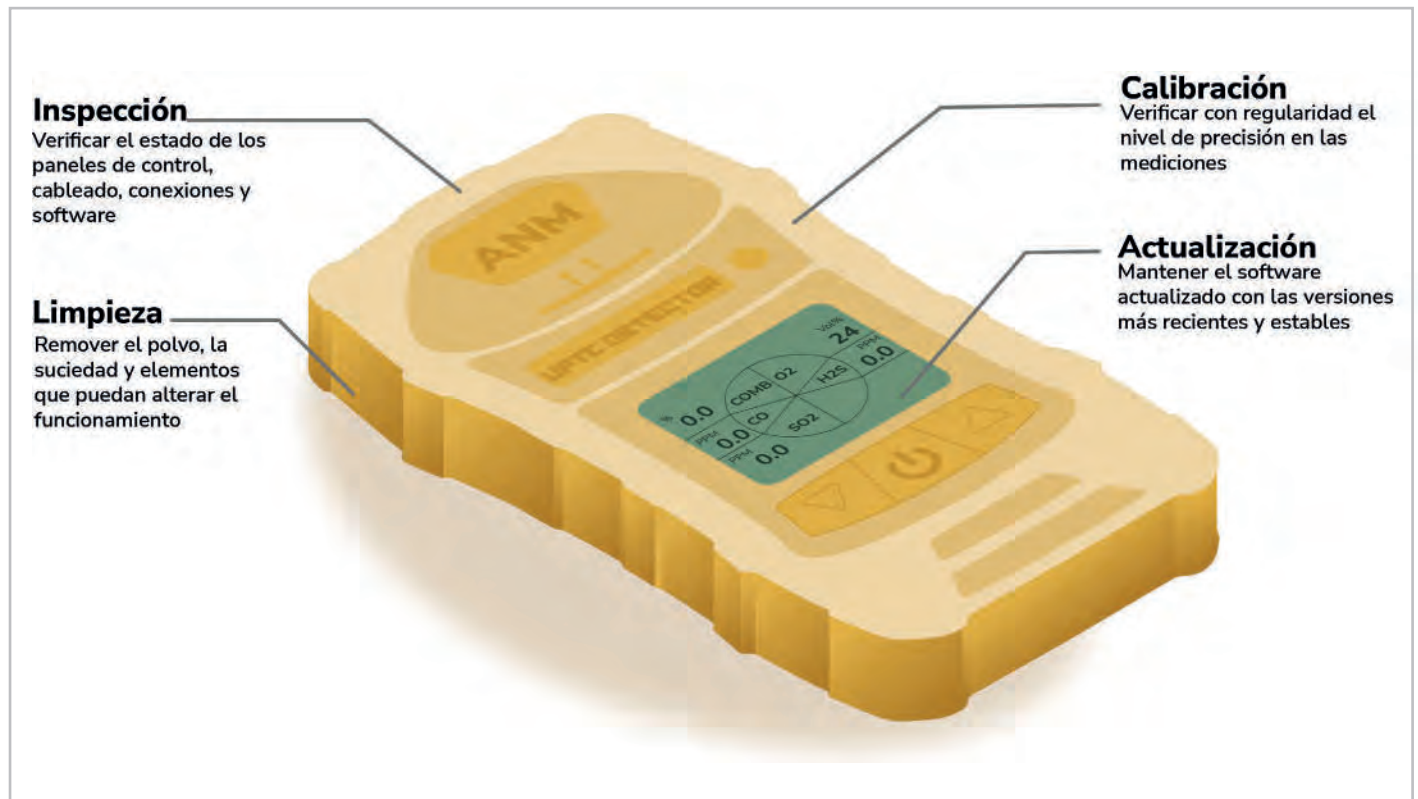
Mantenimiento

El mantenimiento de los sensores y sistemas de control es crucial para garantizar la seguridad en las operaciones mineras, ya que asegura lecturas precisas. Por esta razón, se recomienda realizar las siguientes actividades esenciales dentro de un programa de mantenimiento.

- **Calibración periódica:** verificar con regularidad el nivel de precisión en las mediciones.
- **Limpeza:** remover el polvo, la suciedad y elementos que puedan alterar el funcionamiento.
- **Inspección:** verificar el estado de los paneles de control, cableado, conexiones y software.
- **Actualización:** mantener el software actualizado con las versiones más recientes y estables.

Figura 45

Acciones para el mantenimiento de sensores y sistemas de control



Nota. La figura muestra las acciones que deben realizarse dentro del programa de mantenimiento de sensores y sistemas de control.

Los sensores encargados de monitorear la calidad del aire deben ser calibrados periódicamente para asegurar la confiabilidad de las lecturas. Además, es fundamental probar los sistemas de alarma para verificar su correcto funcionamiento. Los procesos de calibración deben seguir los parámetros estipulados por el fabricante, por lo que se recomienda consultar los manuales del equipo para llevar a cabo las calibraciones. En algunos casos, la calibración debe ser realizada por un centro autorizado por el fabricante.

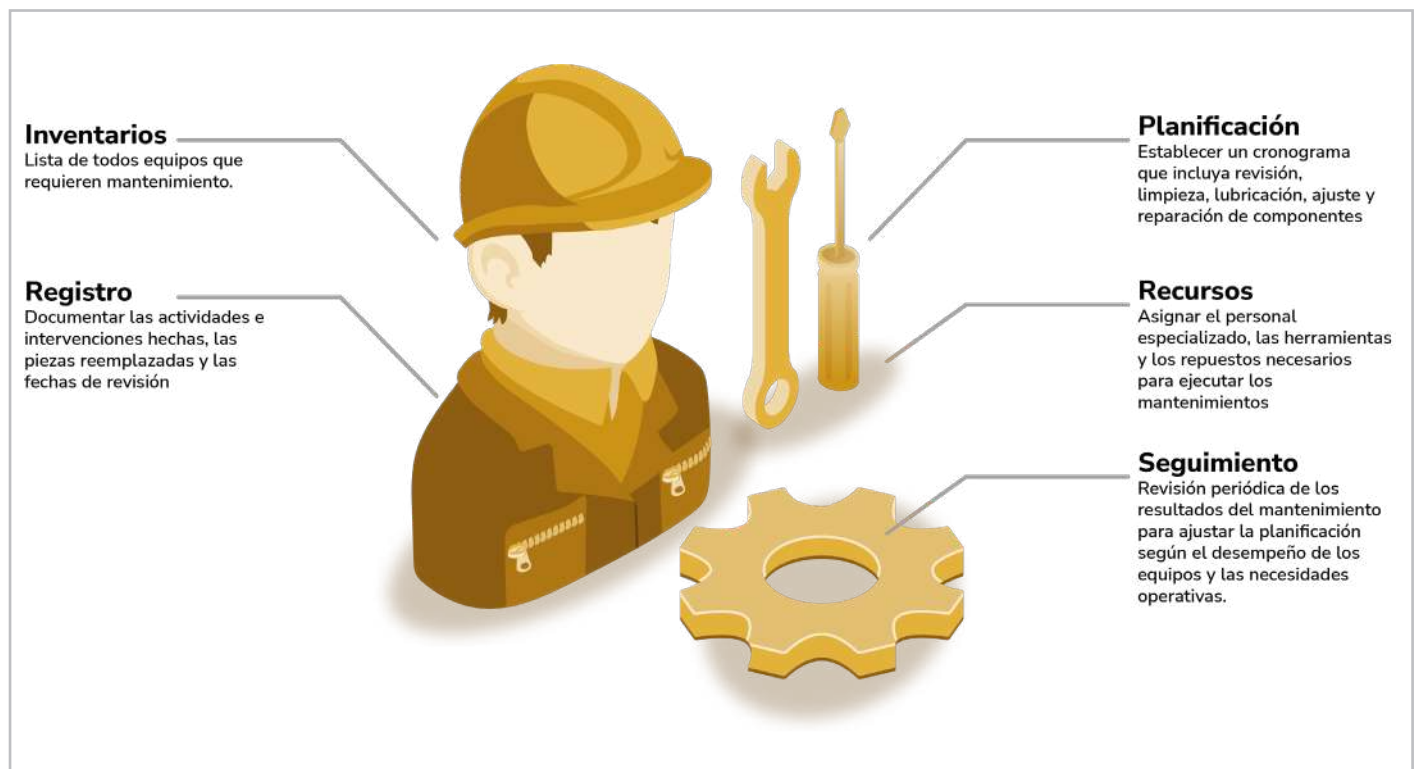
También se sugiere verificar periódicamente la disponibilidad de actualizaciones de software del equipo. Estas verificaciones se pueden realizar en los sitios web oficiales del fabricante. En casos donde el equipo tenga conexión a internet, la actualización puede verificarse navegando en el menú de configuración del sistema y buscando actualizaciones disponibles.

10.5 Consideraciones del programa de mantenimiento

Un programa de mantenimiento es una estrategia organizada que agrupa un conjunto de acciones y procedimientos necesarios para mantener, revisar y reparar los equipos y sistemas, asegurando su buen funcionamiento. Los programas de mantenimiento deben incluir el agendamiento de tareas específicas, tales como inspecciones periódicas, limpieza, lubricación, ajustes, reparaciones o el reemplazo de componentes. Además, es esencial que el programa contemple todos los recursos necesarios, incluyendo el personal, las herramientas, los repuestos y el tiempo requerido para cada tarea de mantenimiento. El objetivo principal de un programa de mantenimiento efectivo es minimizar el tiempo de inactividad de los equipos, prevenir fallos inesperados y garantizar la seguridad y eficiencia operativa.

Figura 46

Elementos de un programa de mantenimiento



Nota. La figura muestra los elementos de un programa de mantenimiento.



CRITERIOS DE ACEPTACIÓN DE LOS PLANES DE VENTILACIÓN EN MINERÍA SUBTERRÁNEA

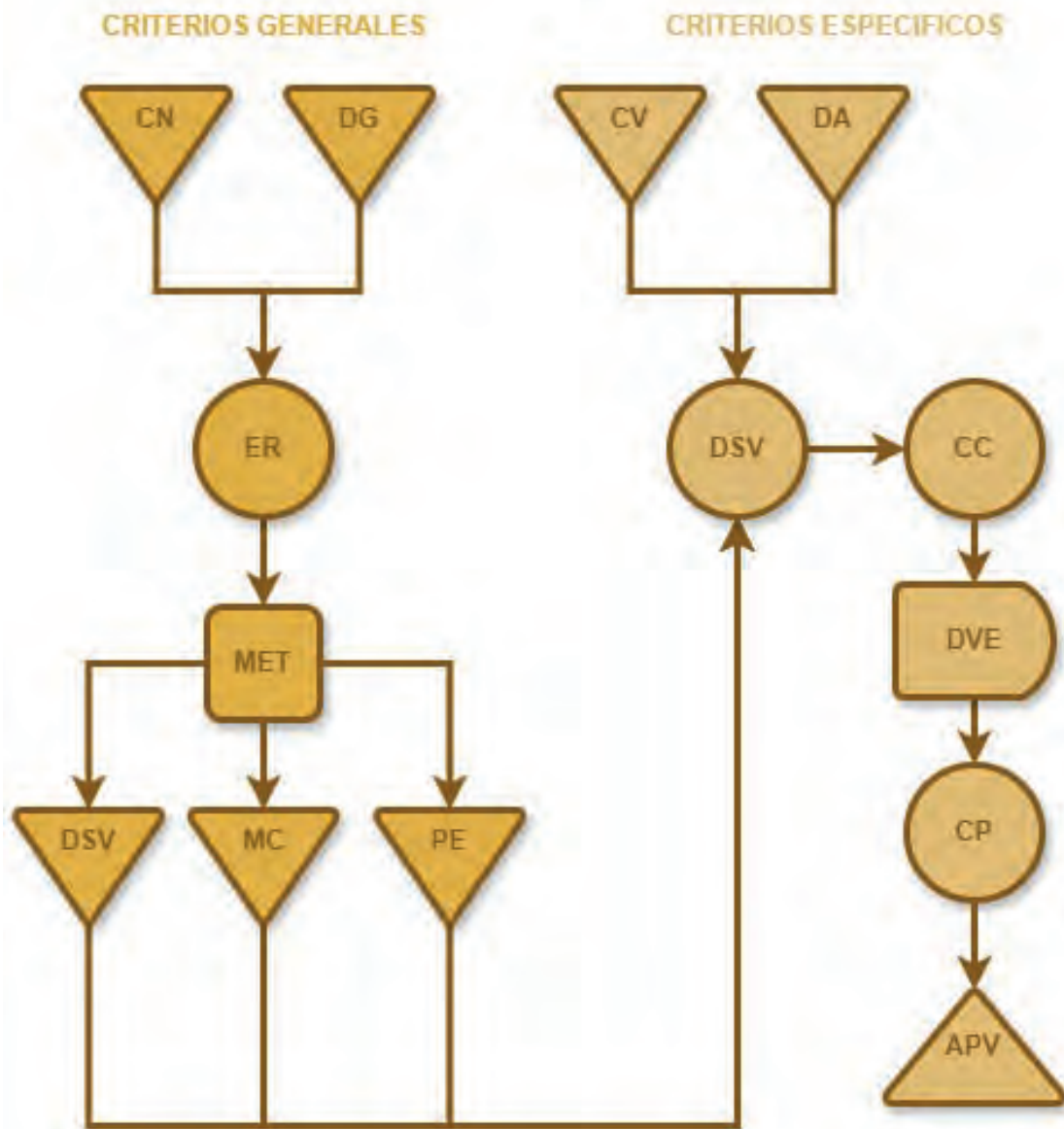


Elaborar un plan de ventilación minero es esencial para garantizar tanto la seguridad y salud de los trabajadores como la eficiencia de las operaciones. Los criterios de aceptación de estos planes deben ser estrictos y diseñados para asegurar el cumplimiento de los más altos estándares de la industria.



Figura 47

Diagrama de criterios de aceptación de los planes de ventilación en minería subterránea



CONVENCIONES

CN: Cumplimiento Normativo
DG: Diagnostico
ER: Evaluación de Riesgos
MET: Metodología
DSV: Diseño de Sistema de Ventilación
MC: Monitoreo y Control
PE: Procedimientos de Emergencia

CV: Calculos de Ventilación
DA: Distribución del Aire
DSV: Diseño de Sistema de Ventilación
CC: Control de Contaminantes
DVE: Diseño Ventilación de Emergencia
CP: Capacitación del Personal
APV: Aceptación Plan de Ventilación

11.1 Factores por considerar en la evaluación

Dentro de la evaluación de un plan de ventilación, es necesario considerar factores fundamentales que permitan determinar las características específicas de cada mina y valorar su índice de riesgo. Por esta razón, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos al realizar la evaluación del plan de ventilación.

- **Geología de la mina:** la geología de la mina influye en la generación de gases y en la permeabilidad de las rocas, lo que afecta el diseño del sistema de ventilación.
- Se requiere tener un estudio geológico detallado de la zona para así determinar las condiciones de la mina.
- **Método de explotación:** el método de explotación utilizado determina tanto la cantidad de aire requerida como su distribución en la mina. Se debe evaluar si los cálculos realizados en relación con el método de explotación implementado cumplen con los requisitos de aire y los caudales necesarios para mantener la atmósfera de la mina limpia.
- **Equipos y maquinaria:** los equipos y la maquinaria utilizados generan calor y contaminantes, por lo que deben ser considerados en el diseño del sistema de ventilación. Además, se deben tener en cuenta las fichas técnicas de estos equipos, así como sus programas de mantenimiento, tanto preventivo como correctivo.
- **Planos isométricos de ventilación:** se debe contar con un plano detallado del circuito de ventilación de la mina el cual debe contener sitios de aforo, ubicación de equipos y direcciones de flujo de aire.
- **Condiciones climáticas subterráneas:** las condiciones climáticas subterráneas, como la temperatura y la humedad, afectan la eficiencia del sistema de ventilación. Por ello, se debe realizar un monitoreo continuo de las condiciones atmosféricas dentro de la mina.
- **Protocolo de seguridad:** el plan de ventilación debe contener un protocolo de seguridad, donde se consignan las tareas o pasos que deben seguirse para la ejecución de acciones seguras.

- **Protocolo de mantenimiento de los equipos de ventilación:** debe contar con un plan y un cronograma de mantenimientos periódicos con el fin de garantizar el perfecto funcionamiento de los equipos de la mina (ventiladores, multi detectores, etc.)
- **Responsabilidades:** el plan de ventilación debe incluir los responsables de la implementación, seguimiento y control de la ventilación del proyecto.

En cumplimiento de esta normativa, se deben evaluar los criterios de aceptación una vez que se haya clasificado la mina según su nivel de riesgo.

Los criterios mencionados anteriormente sirven como guía para evaluar un plan de ventilación. Es fundamental que la persona encargada de la evaluación tenga un conocimiento profundo de la mina, y sea capaz de cualificar y cuantificar el riesgo, a fin de determinar si el plan es consistente y se ajusta a las condiciones específicas de la mina.





REGISTROS DE MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS



El registro de gases mineros es un sistema de documentación en el cual se recopila información y se proporciona evidencia sobre la presencia y concentración de los gases en una labor subterránea.

De acuerdo con lo estipulado en el (Decreto 1886, 2015, art 52), esta información debe estar disponible para la autoridad minera o para la entidad que esta delegue, cuando sea requerida. Además, es pertinente mencionar lo establecido en el (Decreto 1072, 2015), en relación con la conservación de los documentos que respaldan el (SG-SST). Los registros de medición de gases forman parte de estos soportes y deben garantizarse que sean legibles, fácilmente identificables y accesibles, protegidos contra daños, deterioro o pérdida. Estos documentos deben ser conservados por un periodo mínimo de veinte años.

Todo el proceso de registro de los gases mineros está directamente relacionado con el tipo de equipos utilizados para la medición. Para el desarrollo de esta guía, se han clasificado dichos equipos en dos categorías, las cuales se describen en la figura 48.



Figura 48

Formas de medición de gases mineros



12.1 Medición de forma móvil o portátil

La medición de forma móvil o portátil hace referencia al método tradicional, que consiste en utilizar un equipo multi detector de gases mineros en cada uno de los sitios de interés dentro de las labores subterráneas. Con este procedimiento, se obtienen datos puntuales según el lugar donde el personal calificado realice la medición, cumpliendo con lo establecido en el (Decreto 1886, 2015, art 46).

A continuación, se presenta una descripción del proceso que se lleva a cabo en la medición y registro de gases mineros de forma móvil o portátil, como se ilustra en la figura 49.



Figura 49

Proceso de medición y registro de gases mineros de forma móvil o portátil

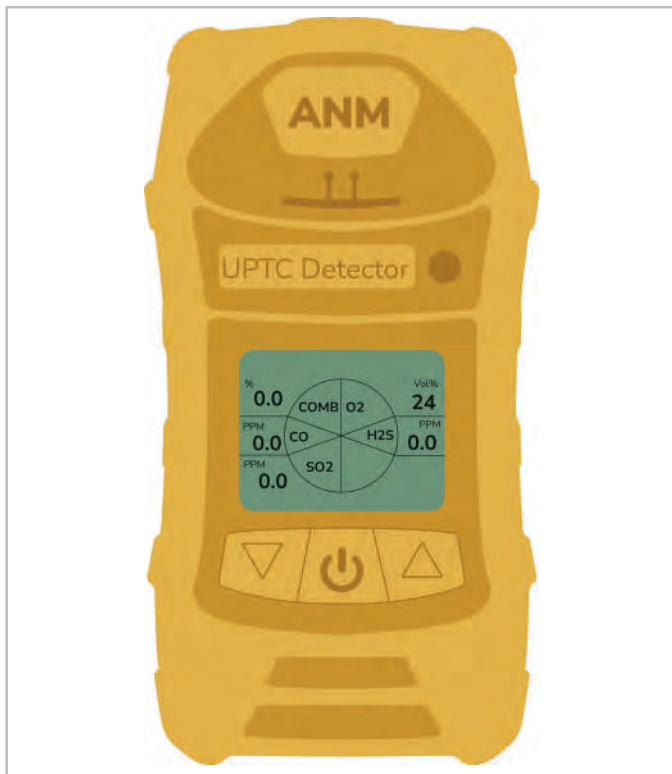
En este proceso crucial de medición de los gases mineros, los equipos utilizados deberán cumplir con lo estipulado en el artículo 46 del Decreto 1886 de 2015. Es responsabilidad tanto del área técnica como administrativa que lleva a cabo las labores subterráneas asegurarse de realizar una verificación previa para garantizar que los equipos adquiridos cumplan con la normatividad. A continuación, se recomienda tener en cuenta los siguientes parámetros de cumplimiento al momento de adquirir estos equipos:

- Que cumpla con los requisitos de protección contra explosiones con seguridad intrínseca, garantizando protección ante cualquier falla. Además, deben contar con un nivel de protección de ingreso (IP) de 65 o superior.
- Que el fabricante certifique que el equipo sea capaz de detectar con precisión los gases para los cuales será utilizado metano (CH₄), oxígeno (O₂), monóxido de carbono (CO), ácido sulfhídrico (H₂S), Gases Nitrosos y dióxido de carbono (CO₂).
- Que el equipo sea preciso y fiable en las mediciones.

En la figura 50 se presenta un ejemplo de un equipo multi detector capaz de monitorear simultáneamente hasta seis tipos de gases mineros.

Figura 50

Ejemplo de equipo multi detector de seis gases mineros



Dentro de la medición de gases mineros de forma móvil o portátil, es posible hacer uso de nuevas herramientas tecnológicas. Estas tecnologías deben ser evaluadas tanto en términos económicos como en cuanto a la capacitación estricta del personal en la organización minera para garantizar la correcta implementación de estas actividades. A continuación, se describen algunas de estas herramientas:

▪ Uso de drones especializados

Los drones diseñados para ambientes hostiles pueden equiparse con sensores de gases, temperatura y humedad. Estos dispositivos permiten acceder a áreas de difícil acceso o condiciones inseguras para los trabajadores. Sus ventajas incluyen acceso remoto, obtención rápida de datos y mayor seguridad para el personal. Sin embargo, se debe considerar que requieren capacitación especializada y drones robustos para operar en ambientes polvorientos y con baja visibilidad.

▪ Tecnología portátil con extensiones

El uso de detectores portátiles con sondas extensibles permite la medición de gases sin exposición directa al área de riesgo. Este método tiene como ventajas la obtención de datos en zonas de difícil acceso, bajo costo y facilidad de transporte.

▪ Vehículos tele operados

Los vehículos equipados con sistemas de medición controlados a distancia son ideales para zonas con derrumbes o atmósferas explosivas, así como para labores profundas y con ventilación limitada. Entre sus desventajas, se destacan el mayor tiempo de implementación y la necesidad de personal altamente capacitado para su operación.

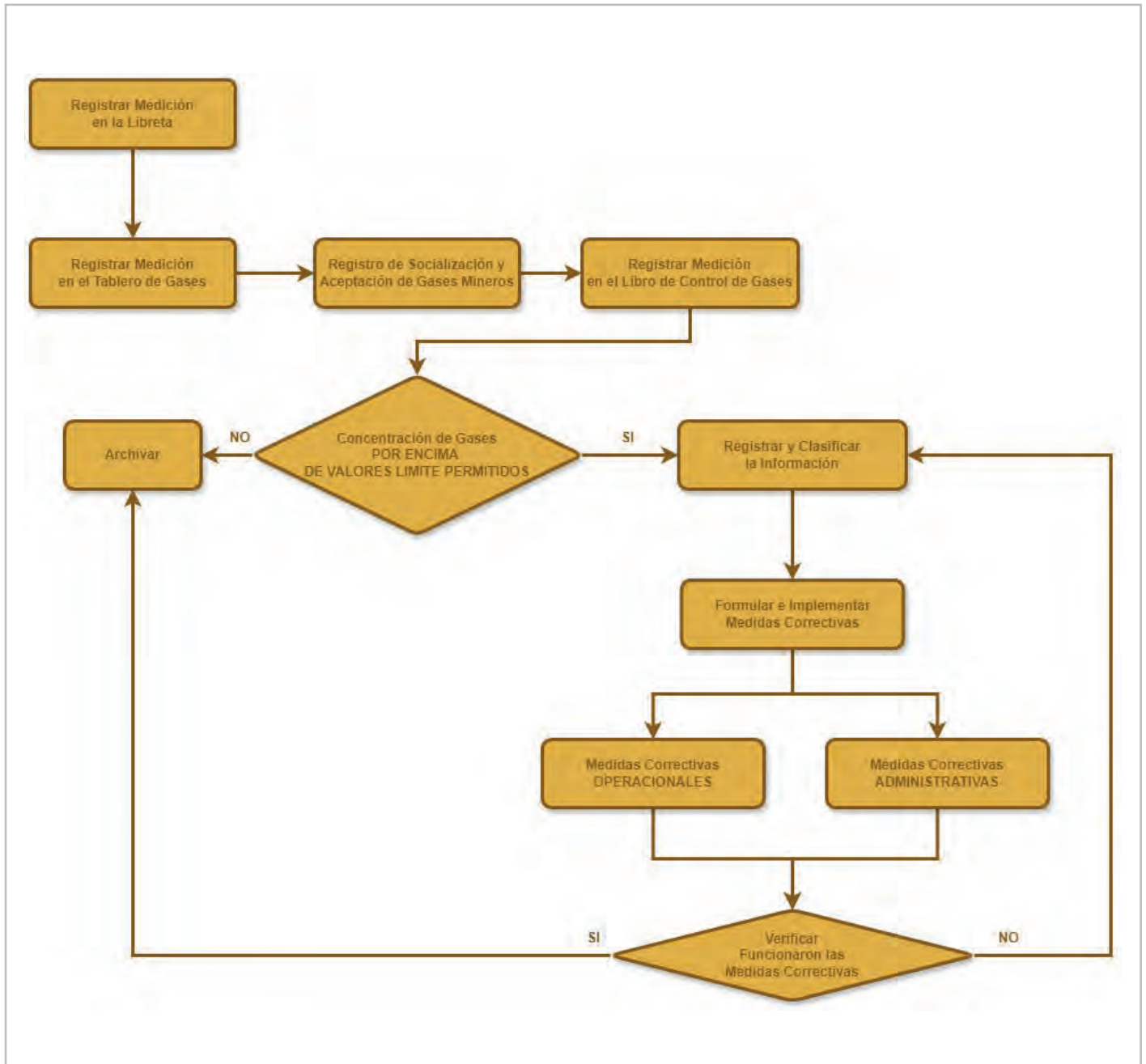
▪ Tubos de muestreo remoto

Los tubos flexibles o rígidos se utilizan para extraer muestras de aire desde zonas peligrosas hacia áreas seguras. Se conectan a analizadores móviles o portátiles para la medición de gases. Las ventajas de este sistema son su accesibilidad y facilidad de operación. No obstante, se limita a distancias cortas y, en algunos casos, puede requerir un sistema de bombeo para garantizar un flujo constante de aire.

Una vez descrito de manera general el proceso de medición de gases mineros, es oportuno explicar cómo se realiza el registro de estas mediciones utilizando la forma móvil o portátil. En la figura 51 se presenta un diagrama de flujo que describe cada una de las etapas involucradas en el proceso.

Figura 51

Diagrama de flujo para registro de la medición de los gases mineros de forma móvil o portátil



12.1.1 Etapa de registro con libreta de campo

Instrumento utilizado en las labores mineras para el registro de los gases mineros, el cual deberá incluir como mínimo los siguientes apartados en este primer registro:

- Fecha
- Hora
- Frente de trabajo, sitio, o labor minera
- Casillas para registro de los gases identificados dependiendo el tipo de yacimiento entre estos, metano (CH₄) como porcentaje en volumen o porcentaje LEL, oxígeno (O₂), monóxido de carbono (CO), ácido sulfhídrico (H₂S), Gases Nitrosos y dióxido de carbono (CO₂). Así como los que la organización minera estime necesario monitorear.
- Equipo utilizado
- Responsable y cargo con firma personal

La libreta de campo constituye un documento de verificación clave, especialmente en situaciones donde sea requerida para fines administrativos y legales. Por esta razón, es fundamental garantizar su manejo adecuado y destinarla exclusivamente al primer registro de gases

mineros durante este proceso. Este registro debe ser realizado por personal debidamente capacitado para llevar a cabo esta actividad, asegurando la precisión y confiabilidad de los datos recopilados.

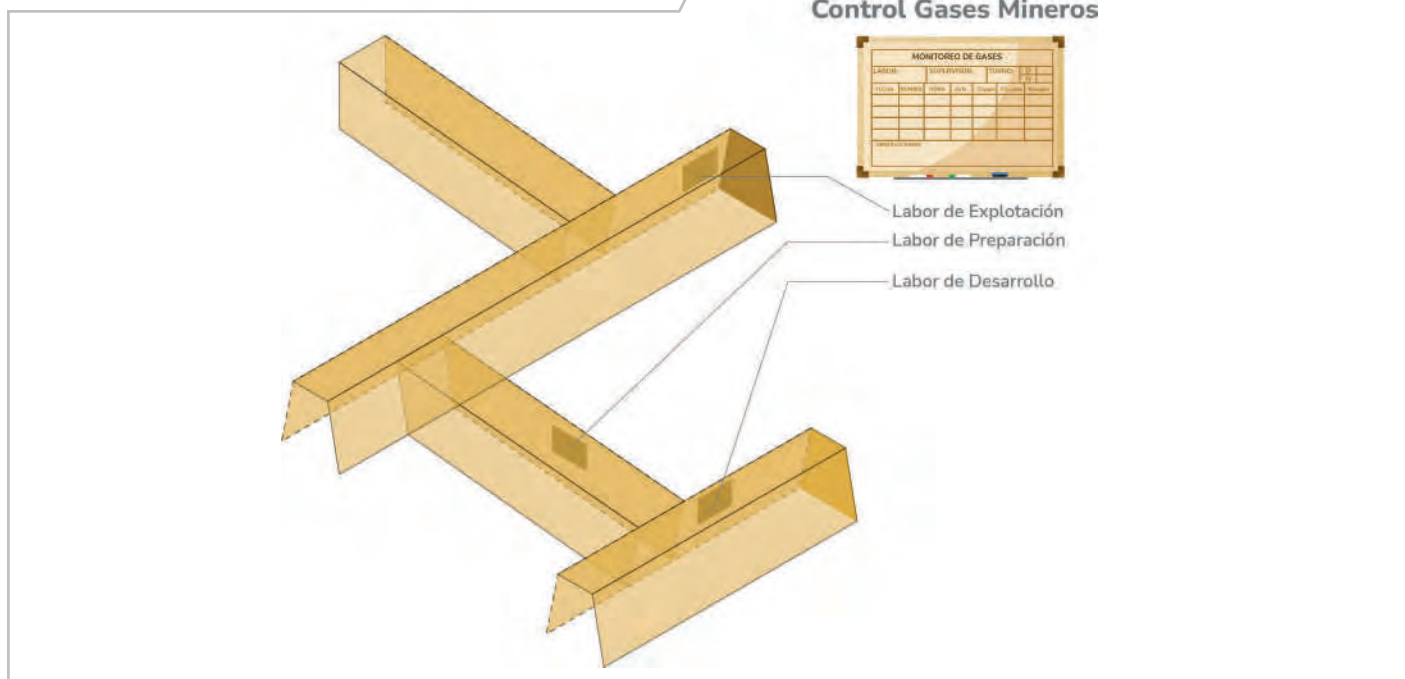
12.1.2 Etapa de registro con tablero de control de gases

Los tableros de control de gases son una herramienta fundamental en la minería subterránea, ya que permiten la visualización clara y precisa de los registros de gases en las operaciones bajo tierra. Estos tableros son esenciales para la toma de decisiones informadas y oportunas sobre las condiciones de seguridad en las labores mineras.

Los resultados de las mediciones realizadas deben ser publicados al interior de la mina y divulgados entre todo el personal minero. Para maximizar su efectividad, es imprescindible que los tableros de control sean ubicados estratégicamente en la entrada de cada una de las labores mineras, como se ilustra en la figura 52.

Figura 52

Ubicación tableros de control de gases mineros



Los tableros de gases deben contener como mínimo los siguientes apartados:

- Fecha
- Hora
- Referencia o nombre de la labor subterránea
- Casillas para registro de los gases identificados dependiendo el tipo de yacimiento entre estos, metano (CH₄) como porcentaje en volumen o porcentaje LEL, oxígeno (O₂), monóxido de carbono (CO), ácido sulfhídrico (H₂S), Gases Nitrosos y dióxido de carbono (CO₂). Es importante la asignación del valor límite permisible para cada uno de estos gases; y así establecer punto de comparación por todo el personal minero.
- Equipo con que se realizó la medida
- Casilla para identificar si cumple o no con VLP.
- Visto bueno por parte del responsable de la ventilación y cargo.
- Generación y asignación de código de colores para indicar la lectura de los gases mineros.

- **Verde** Atmósfera minera con concentraciones de gases cumpliendo los límites permisibles descritos en el (Decreto 1886, 2015).

- **Amarillo** Atmósfera minera con concentraciones detectables, pero manejable por el sistema de ventilación de la mina.

- **Rojo** Atmósfera minera con concentraciones de gases superiores a los límites permisibles descritos en el (Decreto 1886, 2015).

- Aceptación del registro atmosférico por parte del representante de los trabajadores en cada frente de trabajo.
- Observaciones.

12.1.3 Etapa de socialización y aceptación del registro de gases

En esta etapa, se propone que, después de realizar la medición diaria de gases en cada frente de trabajo, se lleve a cabo, de forma obligatoria, una socialización con todo el

personal involucrado en esa área. Durante esta reunión, el encargado de ventilación deberá explicar el valor registrado, los límites permisibles de cada gas, sus efectos en la salud, las acciones a tomar en caso de elevaciones o variaciones instantáneas en la atmósfera minera y cualquier otro aspecto relevante que considere necesario.

Asimismo, se sugiere la implementación de un formato de aceptación del registro diario de gases en cada frente de trabajo. Este formato permitiría que el grupo de trabajadores de cada área certifique que las condiciones atmosféricas fueron socializadas y que la medición de gases realizada en su lugar de trabajo se encuentra, o no, dentro de los valores límites permisibles para la ejecución de las actividades en labores subterráneas.

12.1.4 Etapa de registro en Bitácora o libro de registro de control de gases mineros

El libro de registro de gases mineros constituye un documento esencial para la evaluación de la atmósfera en la minería subterránea. Su principal función es servir como soporte y evidencia en la gestión de los gases presentes en las labores subterráneas. Este registro es fundamental para garantizar el cumplimiento de la normatividad vigente, según lo establecido en el (Decreto 1886, 2015, art. 46) y para facilitar el análisis y la toma de decisiones por parte del equipo operativo y administrativo de la mina.

12.1.5 Etapa de registro con clasificación de la información

En esta etapa, se procede a clasificar los datos obtenidos durante la medición de gases, identificando aquellos gases mineros que superan los VLP. Este análisis también permite evidenciar las posibles causas que

están alterando la normalidad de la atmósfera minera, facilitando la identificación de factores que puedan estar contribuyendo a la presencia anómala de gases. A continuación, se presentan los objetivos de realizar la clasificación de las lecturas de los gases mineros que superan los límites permisibles:

- Realizar análisis periódicos para identificar patrones o áreas críticas que requieran atención prioritaria.
- Atender y documentar cualquier desviación o condición anómala de inmediato.
- Asignar códigos únicos a los registros que superen los valores límites permisibles para vincularlos y relacionarlos con eventos específicos ocurridos en fechas anteriores.
- Realizar análisis a los eventos atmosféricos que están superando los límites permisibles.

En esta etapa, se debe garantizar la accesibilidad y disponibilidad permanente de la información clasificada para el personal administrativo y operativo de la organización minera.

Se genera un formato para el registro de esta información donde quede constancia de las siguientes variables:

- Turno
- Hora
- Equipo con que se realizó la medición
- Frente o área de trabajo
- Responsable
- Valor en porcentaje o ppm de gas medido por fuera del valor límite permisible
- Confrontar valores con registros e historiales anteriores
- Operación minera realizada (arranque, cargue, transporte, mantenimiento etc.)
- Tiempo aproximado de duración del evento
- Demás variables que puedan identificar la causalidad de los eventos en el comportamiento anómalo de la atmosfera minera

12.1.6 Etapa de registro con la formulación de medidas correctivas

Una vez identificadas todas las variables en la etapa anterior, se procede a la formulación de medidas correctivas destinadas a controlar, mitigar y, en lo posible, eliminar las causas que han generado atmósferas contaminadas en el sector, área o labor subterránea en estudio. Estas medidas se clasifican en dos grupos principales:

Medidas correctivas operacionales

Las medidas correctivas operacionales comprenden acciones específicas de carácter técnico y práctico destinadas a controlar y mitigar los riesgos presentes en las labores subterráneas. Estas acciones son formuladas por el personal técnico y operativo encargado de la ventilación de la mina. A continuación, se describen algunas de estas medidas:

- **Evacuación inmediata:** desalojar a todo el personal de la zona afectada de manera segura y ordenada.
- **Incremento de ventilación:** utilizar sistemas de ventilación auxiliar (ventiladores portátiles o ductos) para diluir y evacuar los gases acumulados.
- **Instalación de elementos de ventilación:** construcción, reubicación de tabiques, cortinas y demás para optimizar la ventilación.
- **Cierre temporal de áreas:** restringir el acceso a zonas afectadas hasta restablecer condiciones seguras.
- **Inspección de fuentes:** detectar y mitigar las fuentes emisoras de gases, como fugas en maquinarias, procesos de voladura o fisuras en la roca.

Se diseña un formato estándar que incluirá, como mínimo, los siguientes parámetros fundamentales, además de otros que el personal operativo de la organización minera estime pertinentes para garantizar un registro completo y detallado:

- Fecha
- Nombre de la labor subterránea

- Indicar las medidas correctivas operacionales planteadas en orden de inmediatas, corto y largo plazo
- Tiempo de ejecución
- Descripción de equipos utilizados en la ventilación de minas en referencia a cambios totales, parciales y modificaciones, reparaciones y reubicaciones
- Descripción de nuevas medidas en elementos de la ventilación (tabique, cortinas y demás para optimizar la ventilación)
- Personal necesario para realizar la acción correctiva
- Responsable de la ejecución
- Observaciones y recomendaciones específicas del responsable de la ventilación

Medidas correctivas administrativas

Este grupo incluye las acciones que tienen un enfoque organizacional y de gestión dentro de la mina, orientadas a prevenir riesgos futuros mediante una adecuada supervisión y control. Estas medidas son formuladas desde la alta gerencia y se extienden a todo el personal administrativo, garantizando que la prevención de riesgos y el manejo adecuado de la ventilación sean una responsabilidad compartida y estructurada a nivel organizacional. A continuación, se detallan algunas de las acciones que componen este grupo:

- **Revisión de procedimientos:** actualización y refuerzo de los Protocolos Operativos Estándar (POE), Procedimientos de Trabajo Seguro (PTS) y Análisis de Trabajo Seguro (ATS) relacionados con la gestión de gases mineros. Estos procedimientos deben garantizar que el personal esté capacitado y las prácticas sean apropiadas para mantener condiciones seguras en las labores subterráneas.
- **Capacitación:** asegurar que todos los trabajadores estén formados en la identificación y manejo de atmósferas mineras peligrosas, en la respuesta a emergencias relacionadas con gases, y en el uso adecuado de los equipos de protección personal (EPP). Esta formación debe ser continua y adaptada a las condiciones cambiantes de la operación minera.
- **Auditorías de ventilación:** realización de auditorías periódicas y revisiones del sistema de ventilación tanto principal como auxiliar, con el fin de detectar y corregir deficiencias. Las auditorías deben centrarse en evaluar la efectividad del sistema para mantener los niveles de gas dentro de los límites permisibles.

- **Notificación oficial:** informar de manera oficial a las autoridades competentes, como la ANM y la Administradora de Riesgos Laborales (ARL), sobre cualquier evento relacionado con la presencia de gases peligrosos y las medidas implementadas para mitigar los riesgos. La notificación debe incluir detalles sobre las acciones correctivas y preventivas tomadas.
- **Mantenimiento preventivo:** asegurar que se destinen los recursos necesarios para la realización de mantenimiento preventivo periódico de los equipos de ventilación, los sistemas de detección de gases y la maquinaria minera. Esto contribuirá a prevenir emisiones excesivas y a garantizar el funcionamiento óptimo de los equipos durante las operaciones.

Dentro de las medidas correctivas administrativas se incluyen las medidas educativas y de concientización, que tienen como objetivo, generar y fomentar una cultura de seguridad y prevención organizacional:

- Charlas diarias de seguridad: informar al personal sobre los riesgos de los gases detectados y las medidas de prevención.
- Cartillas y guías: distribuir materiales educativos sobre los gases presentes en la mina, sus efectos y las acciones de control necesarias.
- Promoción de reportes tempranos: incentivar a los trabajadores a reportar cualquier anomalía en el ambiente de trabajo.

Además de las medidas operacionales y organizacionales, las medidas administrativas correctivas incluyen acciones específicas de respuesta ante emergencias, las cuales deben estar claramente definidas y documentadas para garantizar la seguridad de todos los trabajadores en situaciones de riesgo. Estas medidas están orientadas a gestionar el riesgo de manera eficiente y segura en caso de que la situación de atmósferas contaminadas o viciadas persista o se agrave. A continuación, se detallan algunas de estas medidas:

- **Planes de emergencia:** implementar y probar simulacros regulares basados en escenarios de acumulación de gases peligrosos.
- **Equipos de rescate:** asegurar que los grupos de rescate cuenten con el entrenamiento y los equipos necesarios, como sistemas autónomos de respiración y detectores portátiles.

- **Sistemas de comunicación:** garantizar la existencia de equipos de comunicación confiables para coordinar evacuaciones y otras acciones en caso de emergencia.
- Fecha.
- Relación con la medida correctiva operacional.
- Descripción de las medidas correctivas administrativas inmediatas, a corto y largo plazo.
- Autorización para realizar la medida correctiva.
- Presupuesto a destinar.
- Valor y asignación del recurso para ejecución de la medida correctiva.
- Tiempo de ejecución.
- Responsables.
- Observaciones y recomendaciones específicas del responsable.

La organización minera debe generar un formato estructurado para el registro de información sobre las medidas correctivas administrativas. Este formato debe asegurar un seguimiento adecuado de las acciones implementadas y garantizar el cumplimiento de los objetivos de seguridad. A continuación, se describen los parámetros que se deben tener en cuenta al crear dicho formato:

- Fecha.
- Relación con la medida correctiva operacional
- Descripción de las medidas correctivas administrativas inmediatas, a corto y largo plazo.
- Autorización para realizar la medida correctiva.
- Presupuesto a destinar.
- Valor y asignación del recurso para ejecución de la medida correctiva.
- Tiempo de ejecución.
- Responsables.
- Demás que la parte administrativa estime convenientes para el buen desarrollo de estas actividades.

12.1.7 Etapa de registro de verificación

En esta última etapa del registro de gases mineros de forma móvil, se lleva a cabo una confrontación y revisión exhaustiva de la eficacia de las medidas correctivas implementadas en la gestión de las atmósferas viciadas. Este proceso es crucial para verificar que las acciones adoptadas estén logrando el objetivo de mitigar o eli-

minar los riesgos relacionados con los gases mineros, garantizando condiciones de trabajo seguras para el personal subterráneo. Para asegurar que esta revisión sea efectiva, se deben emplear herramientas y técnicas específicas que permitan clasificar y registrar el progreso de cada medida correctiva.

A continuación, se presentan algunas herramientas con las cuales la organización podrá medir y evaluar el avance de estas medidas:

- **Matriz de avance y cumplimiento**

Una tabla estructurada que incluya cada medida correctiva, su estado actual: pendiente, en ejecución, completada, así como su porcentaje de avance.

- **Indicadores de progreso**

Operativos: evaluación de las acciones físicas realizadas, como mejoras en la ventilación, implementación de equipos o sellado de zonas inactivas, verificación de mejoras en los parámetros ambientales como niveles de oxígeno (O₂) y la concentración de gases peligrosos como metano (CH₄), monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂), teniendo en cuenta los VLP. Administrativos: cumplimiento de revisiones, capacitaciones y auditorías.

- **Auditorías internas**

Revisiones periódicas en campo por el equipo evaluador para verificar la implementación y eficacia de las medidas correctivas.

- **Lista de verificación**

Herramientas sencillas para comprobar si cada paso asociado a una medida correctiva se ha cumplido.

- **Reportes fotográficos y documentales**

Evidencias visuales de los cambios implementados en las áreas de la mina donde se ha realizado el evento y documentos con registros escritos que respalden el cumplimiento.

▪ Reuniones de evaluación

Sesiones regulares entre el equipo evaluador para analizar avances, discutir obstáculos y planificar ajustes necesarios.

▪ Software de seguimiento

Herramientas digitales como hojas de cálculo de Excel, Google Sheet o plataformas específicas de cada organización para registrar datos, generar reportes y monitorear indicadores.

Como herramienta adicional en el contenido de esta guía, se ha diseñado y presentado un formato de formulación y verificación de medidas correctivas (anexo 2.) Donde se formulan y registran las medidas correctivas operacionales y/o administrativas y se plantean un tiempo de ejecución de forma inmediata, corto, mediano y largo plazo. Posteriormente, deben ser calificadas con un porcentaje de ejecución con rangos porcentuales que van desde 0 a 100, de acuerdo con el criterio del grupo evaluador conformado por integrantes de la parte operacional y administrativa de la organización.

Se propone que las medidas correctivas ejecutadas completamente reciban una calificación del 100%, lo que indicará que se han cumplido en su totalidad y serán eliminadas de la formulación de nuevas propuestas. Su información se archivará en el registro correspondiente para futuras consultas y seguimientos. En caso de que una propuesta correctiva no haya alcanzado su cumplimiento total, esta será reformulada y quedará sujeta a una nueva calificación. Este proceso garantiza que las medidas implementadas se evalúen de manera rigurosa, promoviendo la mejora continua y la seguridad en las labores mineras.

12.2 Medición de forma estacionaria

Para este tipo de medición, se utiliza un sistema de monitoreo permanente y continuo mediante sensores de gases mineros ubicados en puntos estacionarios, cuya localización se planifica previamente dentro de las labores subterráneas de la mina. Esta metodología de medición

se aplica a las minas clasificadas en la categoría III, conforme a lo establecido en el (Decreto 1886, 2015, art. 48 y 58). Este enfoque permite un control constante de la atmósfera subterránea, asegurando la seguridad de los trabajadores y el cumplimiento de la normativa vigente.

A continuación, se presenta una descripción del proceso que se realiza en la medición y registro de gases mineros de forma estacionaria, figura 53.

Figura 53

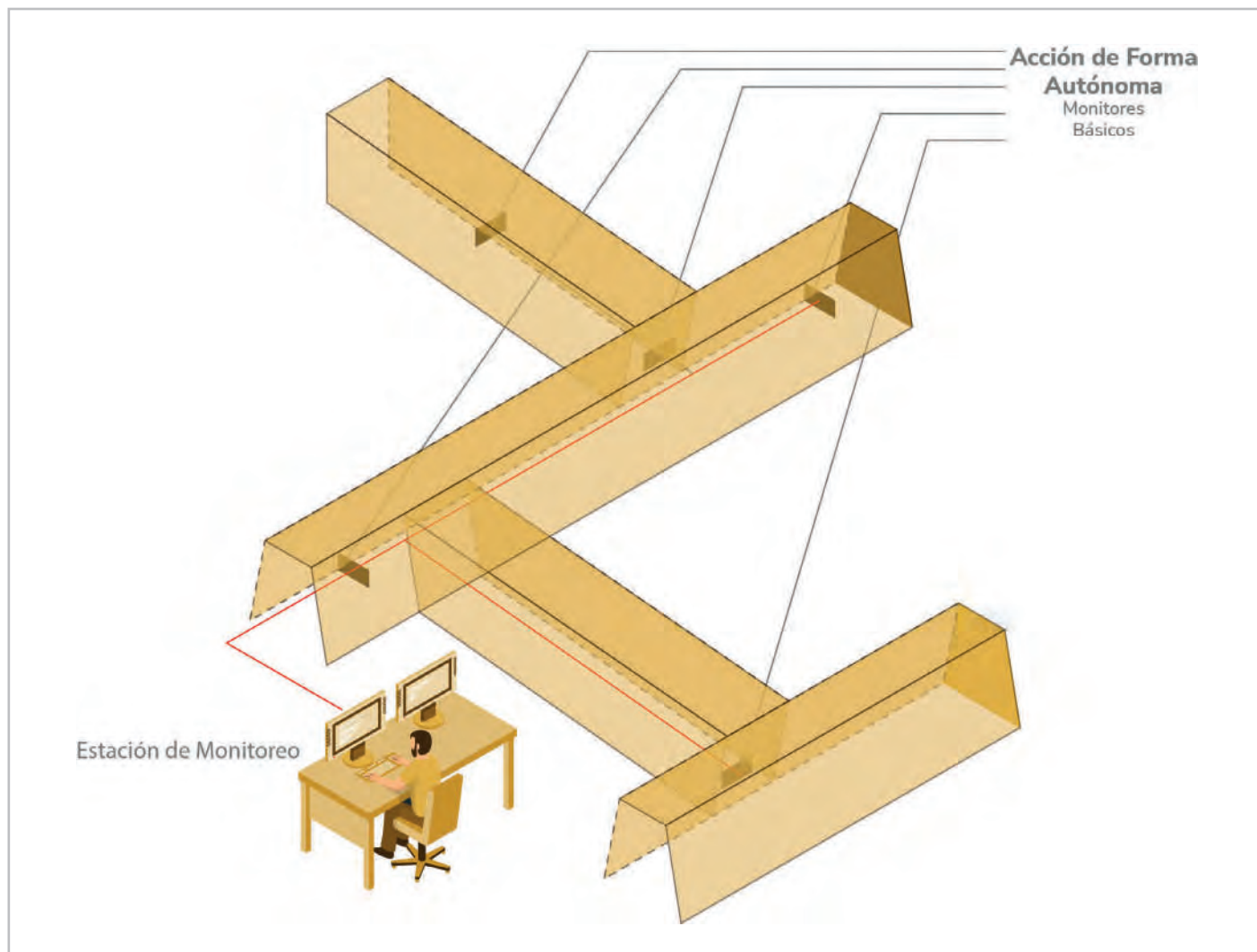
Proceso de medición y registro de gases mineros de forma estacionaria



El proceso de monitoreo continuo comienza en cada una de las estaciones o nodos donde se encuentran ubicados los sensores de gases. Una vez realizada la medición, la información es transmitida a través de una red hacia los tableros de gases y posteriormente a un centro de control, almacenamiento y visualización de datos ubicado en la superficie, como se ilustra en la figura 54.

Figura 54

Esquema de monitoreo continuo de gases mineros

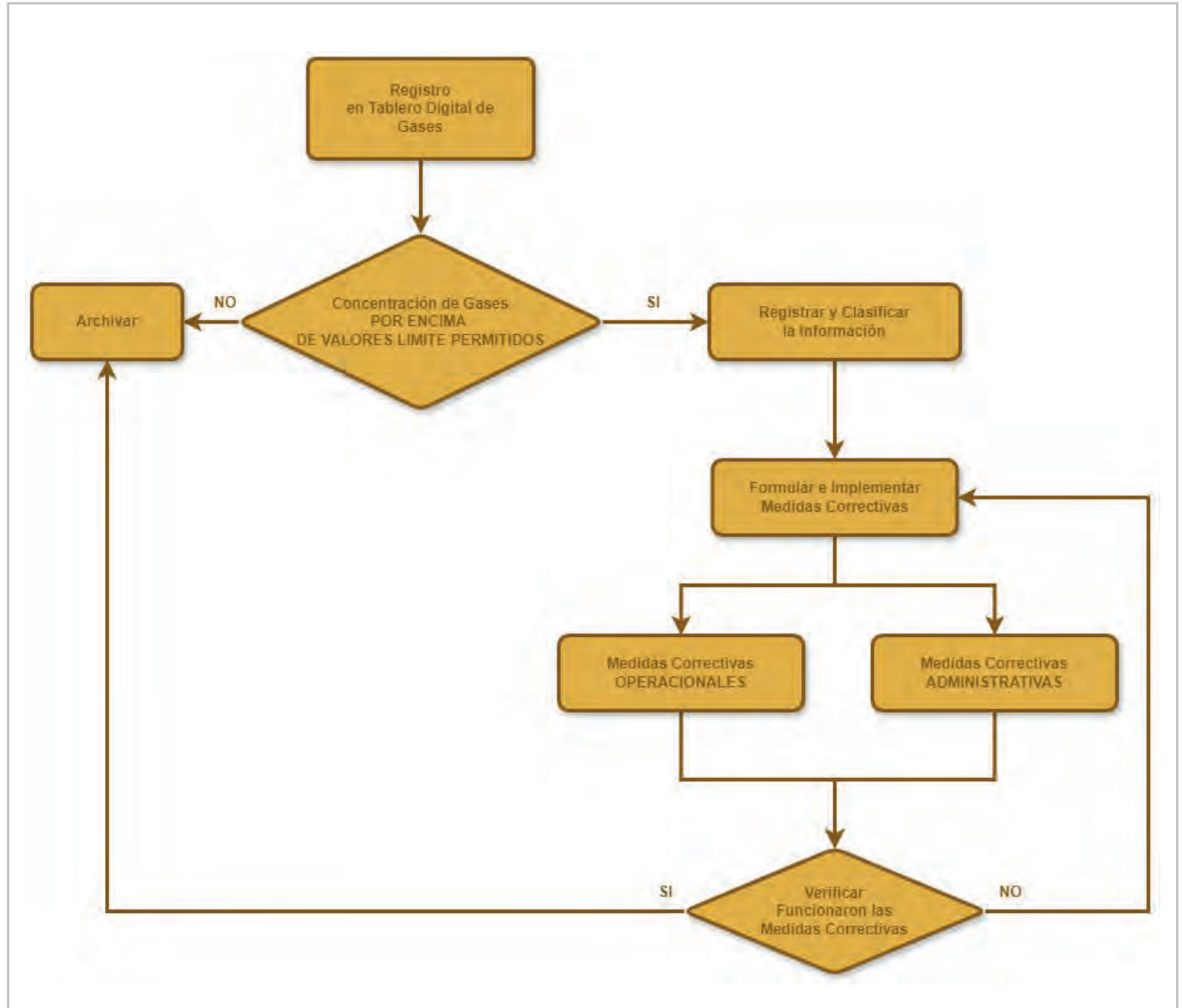


Mediante la implementación de un software especializado, es posible ajustar los rangos permisibles de los gases mineros y generar reportes detallados. Además, este sistema permite integrar el control automatizado de la ventilación, activando de manera remota ventiladores y otros equipos que componen el sistema de ventilación. Gracias a esta tecnología, se obtiene conocimiento en tiempo real de las mediciones de los gases mineros, permitiendo detectar de manera inmediata los factores que generan anomalías en la atmósfera minera.

Después de presentar de manera general el proceso de medición de los gases mineros de forma estacionaria, resulta pertinente detallar cómo se realiza el registro de dichas mediciones. En la figura 55 se muestra un diagrama de flujo que describe cada una de las etapas de este proceso.

Figura 55

Diagrama de flujo para registro de la medición de los gases mineros de forma estacionaria



12.2.1 Etapa de registro con tablero de gases digital

Los tableros de control de gases digitales representan una herramienta tecnológica avanzada y fundamental para la minería subterránea, ya que permiten la visualización en tiempo real de los registros de gases presentes en las operaciones bajo tierra.

Los datos obtenidos a través de estos tableros se publicarán en el interior de la mina y serán divulgados a todo el personal minero. Además, su ubicación estratégica en la entrada de cada labor minera resulta imprescindible, como se detalla en la figura 52 del apartado 12.1.2 de esta guía.

Para garantizar su efectividad, los tableros de gases deben incluir, como mínimo, los siguientes elementos:

- Referencia o nombre de la labor subterránea
- Registro de los gases identificados dependiendo el tipo de yacimiento entre estos, metano (CH₄), oxígeno (O₂) y monóxido de carbono (CO). Así como demás gases que el encargado de la mina estime conveniente monitorear.
- Generación y asignación de código de colores para indicar la lectura de los gases mineros.
 - **Verde** Atmósfera minera con concentraciones de gases cumpliendo los límites permisibles descritos en el (Decreto 1886, 2015).
 - **Amarillo** Atmósfera minera con concentraciones detectables, pero manejable por el sistema de ventilación de la mina.
 - **Rojo** Atmósfera minera con concentraciones de gases superiores a los límites permisibles descritos en el (Decreto 1886, 2015).
- **Aceptación del registro atmosférico:** este registro debe ser firmado por un representante de los trabajadores en cada frente de trabajo, validando la información y garantizando su conocimiento por parte del equipo operativo.
- **Programación de alarmas visuales y sonoras:** se deben establecer sistemas de alerta programados según el código de colores asignado. Estas alarmas deben activarse específicamente cuando se detecten concentraciones de gases superiores a los límites permisibles, garantizando una respuesta inmediata y eficiente.

Asimismo, es posible implementar un uso mixto de tableros, combinando formatos convencionales, que serán diligenciados manualmente por el encargado de la ventilación, con tableros digitales ubicados dentro de las labores mineras. Esta integración debe cumplir con lo estipulado en el (Decreto 1886, 2015, art. 46, 47 y 48) asegurando la conformidad con la normativa vigente y optimizando el control atmosférico en las operaciones subterráneas.

12.2.2 Etapa de almacenamiento y clasificación de la información de registro de control de gases mineros

El registro digital de gases mineros constituye una herramienta fundamental para la evaluación de la atmósfera minera, proporcionando soporte y evidencia clave en la gestión de gases dentro de las labores subterráneas. Este sistema resulta indispensable para garantizar el cumplimiento de la normatividad vigente, conforme lo establece el (Decreto 1886, 2015, art 46) y para facilitar la toma de decisiones rápidas y efectivas tanto por parte del equipo operativo como de la administración de la mina. A continuación, se presentan parámetros indispensables en el manejo de datos para el registro de los gases mineros en forma digital:

Periodicidad del registro: garantizar el registro continuo o con intervalos regulares de los datos de monitoreo de gases, según los riesgos identificados. Documentar de manera inmediata cualquier desviación o condición anómala detectada.

Trazabilidad: asignar códigos únicos a cada registro para asociarlos con eventos específicos, áreas de trabajo o fechas, y asegurar la asignación de un responsable para cada entrada.

Análisis de datos: implementar herramientas visuales como gráficos de tendencias o tableros de control para facilitar la interpretación de los resultados. Realizar análisis periódicos para identificar patrones críticos o áreas prioritarias que requieran intervención.

Accesibilidad: garantizar la disponibilidad de los datos para el personal relevante, incluidos operadores, supervisores y auditores, asegurando un flujo de información eficiente y seguro.

Control de Acceso: generar códigos de acceso privado para la información digital, con el fin de evitar manipulaciones indebidas por parte de personal no autorizado ajeno a la dependencia encargada de la ventilación de la mina.

Conservación de datos: almacenar los registros críticos por el periodo establecido en la normatividad vigente, conforme al (Decreto 1072, 2015). Clasificar los datos históricos como activos estratégicos para promover la mejora continua en la gestión de riesgos atmosféricos.

Se generará un formato de registro para cuando la medición de los gases mineros indique que se encuentren superando los valores límites permisibles, también se considera importante incluir en este formato información donde quede constancia de las siguientes variables:

- Turno
- Hora
- Frente o área de trabajo
- Responsable
- Valor en porcentaje o ppm del gas medido por fuera del valore límites permisible
- Confrontar valores con registros e historiales anteriores
- Operación minera realizada (arranque, cargue, transporte, mantenimiento etc.)
- Tiempo aproximado de duración del evento
- Demás variables que la parte operativa de la mina estime conveniente y con las cuales se puedan identificar la causalidad de los eventos en el comportamiento anómalo de la atmosfera minera.

12.2.3 Etapa de registro con la formulación de medidas correctivas

Una vez identificadas todas las variables en la etapa anterior, se procede a la formulación de medidas correctivas en tiempo real, basadas en los reportes generados de manera inmediata por el sistema de monitoreo continuo de gases. Estas medidas tienen como objetivo controlar, mitigar y, en lo posible, eliminar las variables o causas responsables de la generación de atmósferas contaminadas en el sector o área de trabajo de la labor subterránea. Estas acciones correctivas se clasifican en dos grupos principales:

Medidas correctivas operacionales

Son descritas en el numeral 12.1.5 de la presente guía.

Medidas correctivas administrativas

A este tipo de medidas correctivas se incorporan también las iniciativas educativas y de concientización, así como las medidas de respuesta ante emergencias, las cuales se detallan ampliamente en el numeral 12.1.5 de esta guía.

12.2.4 Etapa de registro de verificación

Para esta última etapa de registro de gases de forma estacionaria se ha elaborado el formato de formulación y verificación de medidas correctivas (anexo 2.). El cual puede ser manejado exclusivamente de forma digital, donde se formulan y registran las medidas correctivas operacionales y/o administrativas, la aplicación de este formato se presenta en el apartado 12.1.7 de esta guía. En el mismo numeral, se presenta la descripción amplia de otras alternativas y herramientas de verificación de las medidas correctivas.



12.3 Análisis de datos

El análisis de datos en la gestión de atmósferas contaminadas y viciadas en minería subterránea permite identificar las características y el comportamiento de dichas atmósferas mediante un proceso sistemático de exploración, transformación y evaluación de los datos recopilados. Este análisis es fundamental para apoyar de manera efectiva la toma de decisiones en este ámbito.

El procedimiento para este tipo de análisis de datos se ilustra y clasifica en la figura 56.

Figura 56

Proceso de análisis de datos para atmosferas contaminadas o viciadas



A continuación, se realiza una descripción de cada uno de los pasos que conforman el proceso de análisis de datos para atmosferas contaminadas o viciadas.

12.3.1 Entrada de datos

El primer paso para cualquier análisis es asegurarse de que los datos recogidos sean completos y de calidad. A continuación, se mencionan los datos más importantes que deben ser registrados durante la medición en una atmósfera viciada:

▪ Concentraciones de gases

- Metano (CH₄).
- Monóxido de carbono (CO).
- Dióxido de carbono (CO₂).
- Oxígeno (O₂).
- Sulfuro de hidrógeno (H₂S).

▪ Datos temporales y espaciales

- Fecha y hora de cada medición
- Ubicación exacta dentro de la mina (frente de trabajo, túneles, áreas con ventilación débil, etc.).

▪ Variables adicionales

- Temperatura
- Humedad
- Velocidad del flujo de aire (ventilación)
- Comportamiento del material utilizado para servicios de ventilación
- Alteración térmica del terreno
- Reacciones químicas no controladas
- Cambios del flujo de aire
- Estructuras geológicas presentes
- Equipos o maquinaria para la operación minera
- Uso de explosivos

12.3.2 Preparación de datos

Proceso de limpieza, organización y consolidación de datos sin procesar para convertirlos en datos estructurados aptos para análisis:

- Eliminar datos duplicados: suprimir registros duplicados de la misma hora y lugar
- Corregir valores atípicos: identificar y corregir valores fuera de lo esperado, como una concentración de metano (CH₄) del 20% que puedan ser errores de equipo
- Asegurar consistencia en el formato de fecha/hora: estandarizar el formato de fechas y horas para simplificar el análisis.

12.3.3 Exploración de datos

El objetivo principal de la exploración de datos es analizar la información recopilada mediante el uso de visualizaciones y métodos estadísticos, con el fin de identificar tendencias y patrones en las variables medidas en las atmósferas de la mina.

Estos análisis facilitan la comprensión de las concentraciones de gases peligrosos, la identificación de riesgos potenciales y la toma de decisiones fundamentadas para el control de la ventilación y la gestión de contaminantes.

A continuación, se describe brevemente cada tipo de análisis empleado:

- **Análisis descriptivo:** constituye el primer paso en el estudio de los datos. Este análisis implica calcular estadísticas básicas, como el promedio, el máximo, el mínimo y la desviación estándar, para obtener una visión general del comportamiento de las concentraciones de gases en la atmósfera de la mina.
- **Comparación de datos:** este enfoque permite contrastar las concentraciones de gases con límites regulatorios o valores históricos, facilitando la evaluación del cumplimiento de las normativas de seguridad y la detección de cambios significativos en las condiciones ambientales.

- **Análisis de tendencias:** consiste en evaluar los datos a lo largo del tiempo para identificar patrones y variaciones en la calidad del aire. Este análisis es fundamental para prever posibles acumulaciones peligrosas de gases o alteraciones en las condiciones atmosféricas.
- **Análisis de correlación:** se utiliza para identificar relaciones entre diferentes variables. Por ejemplo, puede determinar la correlación entre la concentración de gases y factores como la ventilación o la actividad minera, ayudando a comprender las causas de las variaciones en la atmósfera.
- **Análisis de varianza (ANOVA):** este método permite comparar las concentraciones de gases entre diferentes puntos de la mina o períodos de tiempo, evaluando si las variaciones observadas son significativas o se deben a factores aleatorios.
- **Análisis de regresión:** Este análisis permite predecir valores futuros de las concentraciones de gases basándose en tendencias históricas y factores específicos. Es una herramienta valiosa para anticipar condiciones peligrosas y optimizar los controles de ventilación.

Cálculo de análisis descriptivo

Este análisis se centra en la determinación de estadísticas básicas, como los valores máximos, mínimos, promedios y la desviación estándar de las concentraciones de gases. Estos cálculos proporcionan una visión general y cuantitativa del comportamiento de los gases en la atmósfera de la mina, facilitando la identificación de patrones y posibles anomalías. Calcular promedios de cada gas en diferentes ubicaciones o turnos:

- Agrupar los datos según la ubicación o el turno.
- Para cada gas, sumar las mediciones de esa ubicación o turno y luego dividir entre la cantidad de mediciones.

Fórmula del promedio

$$\text{Promedio} = \frac{\sum xi}{n}$$

Dónde: (xi) son las mediciones del gas y n es el número de mediciones.

- Determinar los valores máximos y mínimos de la toma de datos de los gases y aforos de ventilación:

Máximo: $\text{Max}(x_1, x_2, \dots, x_n)$

Mínimo: $\text{Min}(x_1, x_2, \dots, x_n)$

Dónde: x_1, x_2, \dots, x_n son las mediciones del respectivo gas a evaluar.

- Calcular la desviación estándar para medir la dispersión de los datos de los gases:

$$S = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{n-1}$$

Donde:

- (S) es la desviación estándar.
- (xi) son las mediciones.
- (x) es el promedio de las mediciones.
- (n) es el número de mediciones.

Comparación con límites permisibles

Este análisis consiste en comparar los valores medidos con los límites establecidos por la legislación, por ejemplo, el (Decreto 1886, 2015) o normas internacionales.

- Obtener los límites permisibles para cada gas (tabla 2, Capítulo 5).
- Comparar las mediciones con los límites.

Si alguna medición excede los límites, se deben activar alarmas o acciones correctivas.

Si x es la medición de un gas y L es el límite permisible, la comparación puede expresarse como:

Si $x \leq L_x$, la medición del gas es aceptable.

Si $x > L_x$, la medición del gas excede el límite.

Tabla 66

Comparación de registro de gases con los límites permisibles

Gas	Medición (ppm o %)	Límite permisible (ppm)	Unidad	¿Cumple con el límite? (Sí/No)	Acción requerida
Dióxido de Carbono (CO ₂)		5000	%		
Monóxido de Carbono (CO)		25	ppm		
Ácido Sulfhídrico (H ₂ S)		1	ppm		
Anhídrido Sulfuroso (SO ₂)		-	ppm		
Óxido Nítrico (NO)		25	ppm		
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)		0.2	ppm		
Otros gases					

Análisis de tendencias

El análisis de tendencias permite ver cómo cambian las concentraciones de gases a lo largo del tiempo, y la existencia de un patrón que sugiera un problema subyacente. Para esto se deben realizar los siguientes pasos:

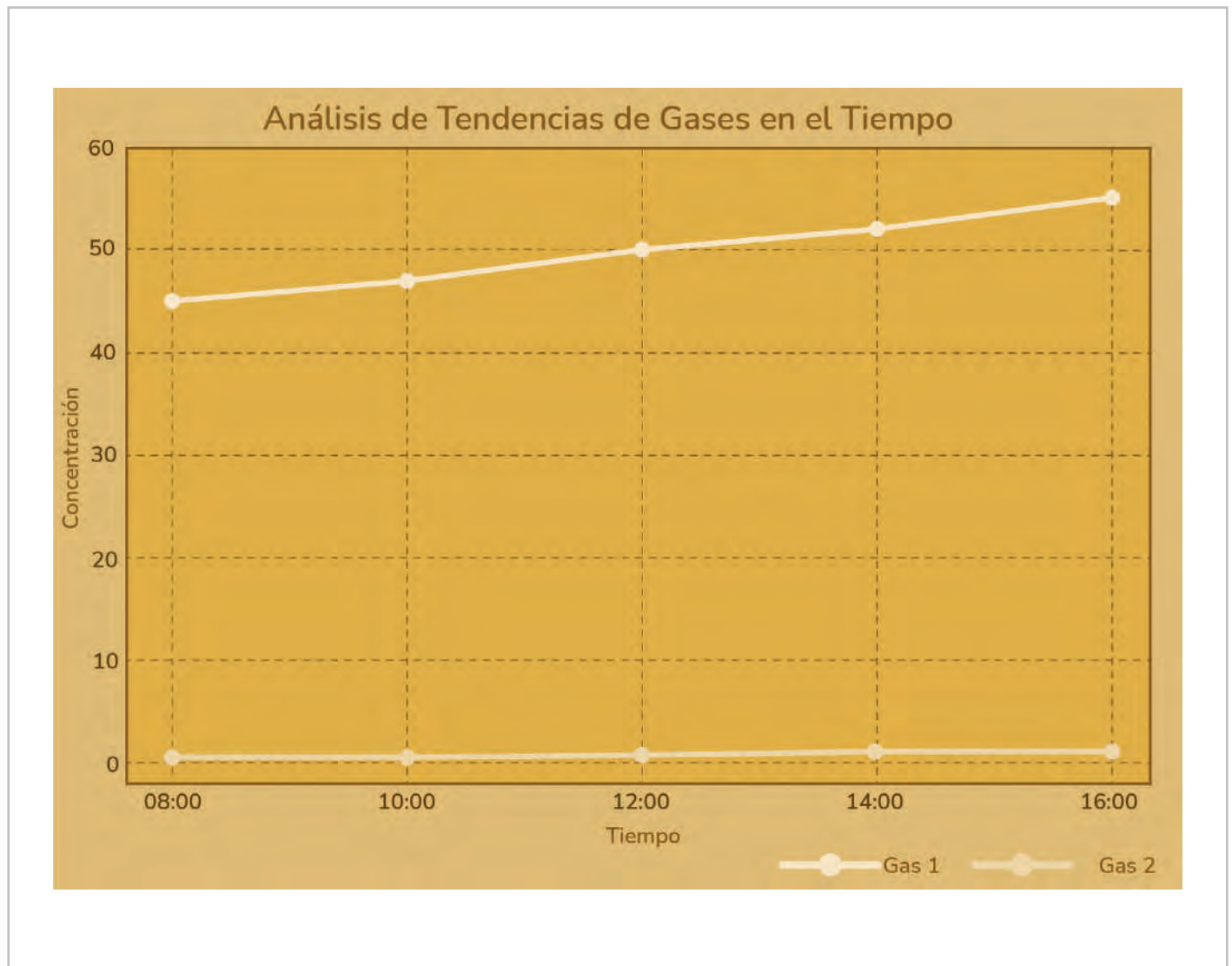
- Registrar las mediciones de cada gas en función del tiempo.

- Graficar las concentraciones para observar patrones de aumento o disminución.
- Identificar si existen picos en horas específicas o si los niveles suben progresivamente.

A continuación, se presenta un ejemplo de interpretación gráfica de tendencias de los gases.

Figura 57

Ejemplo de gráfica de comparación de registro de gases con los límites permisibles



Análisis de correlación

Este análisis te ayuda a identificar si existe una relación entre dos variables, como la concentración de un gas y la cantidad de maquinaria en operación y otros.

- Identificar dos variables a analizar, por ejemplo, concentración de metano (CH₄) y velocidad del flujo de aire.
- Calcular el coeficiente de correlación entre ambas variables. Un coeficiente cercano a 1 indica una fuerte correlación positiva, mientras que un coeficiente cercano a -1 indica una fuerte correlación negativa.

Para esto se debe aplicar la ecuación:

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n\sum x^2 - (\sum x)^2][n\sum y^2 - (\sum y)^2]}}$$

Donde:

- (r) es el coeficiente de correlación
- (x) son los valores de la primera variable
- (y) son los valores de la segunda variable
- (n) es el número de observaciones

El valor de r estará entre -1 y 1:

$r \approx 1$: Fuerte correlación positiva (ambas variables aumentan o disminuyen juntas)

$r \approx -1$: Fuerte correlación negativa (cuando una aumenta, la otra disminuye)

$r \approx 0$: No hay correlación significativa.

Un coeficiente de correlación cercano a (1) indica que las variables están fuertemente relacionadas de manera positiva. Por ejemplo, si el flujo de aire aumenta, también lo hace la concentración de metano (CH₄).

Un coeficiente cercano a (-1) indica que las variables están fuertemente relacionadas de manera negativa (Por ejemplo, a mayor flujo de aire, menor concentración de metano (CH₄). Un coeficiente cercano a (0) indica que no hay una relación clara entre las dos variables.

Análisis de varianza

El análisis de varianza se emplea para evaluar si diferentes condiciones, como los turnos de trabajo o las áreas específicas de la mina, tienen un efecto significativo en las concentraciones de gases. Este enfoque permite identificar variaciones relevantes y distinguirlas de aquellas que podrían atribuirse al azar. Se pueden tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Dividir las mediciones en grupos, por ejemplo, mediciones tomadas en tres turnos diferentes.

Ejemplo:

Turno 1: mediciones de concentración de gases durante el turno de la mañana.

Turno 2: mediciones durante el turno de la tarde.

Turno 3: mediciones durante el turno nocturno.

- Aplicar el análisis de varianza para determinar si las concentraciones de gases son significativamente diferentes entre los grupos.

El análisis de varianza mide si hay diferencias estadísticamente significativas entre los promedios de las concentraciones de gases en los diferentes grupos.

La hipótesis nula (H₀) establece que no hay diferencias significativas entre los grupos. La hipótesis alternativa (H₁) indica que sí hay diferencias entre al menos uno de los grupos.

El análisis de varianza utiliza la siguiente fórmula para calcular el valor F:

Donde:

- La variación entre grupos mide las diferencias entre los promedios de los distintos turnos.
- La variación dentro de los grupos mide las diferencias individuales dentro de cada turno.

Interpretar los resultados:

El análisis de varianza genera un valor F que indica la probabilidad de que las diferencias observadas entre los grupos sean producto del azar.

Si el valor F es menor que 0.05 ($p < 0.05p$), se rechaza la hipótesis nula, lo que significa que existen diferencias significativas en las concentraciones de gases entre los grupos.

Si $p \geq 0.05$, no se pueden concluir diferencias significativas entre los grupos, y las concentraciones de gases pueden ser similares en todos los turnos.

Análisis de regresión

El análisis de regresión permite hacer predicciones sobre futuras concentraciones de gases en función de variables como la actividad minera o las condiciones de ventilación. En este punto se considera:

- Seleccionar una variable dependiente, por ejemplo, concentración del gas y una variable independiente, como el flujo de ventilación.
- Calcular la regresión lineal para crear un modelo predictivo.
- Usar el modelo para prever concentraciones futuras bajo diferentes condiciones de ventilación (figura 58).

La regresión lineal se utiliza para modelar la relación entre las variables independiente y dependiente mediante una ecuación de la forma:

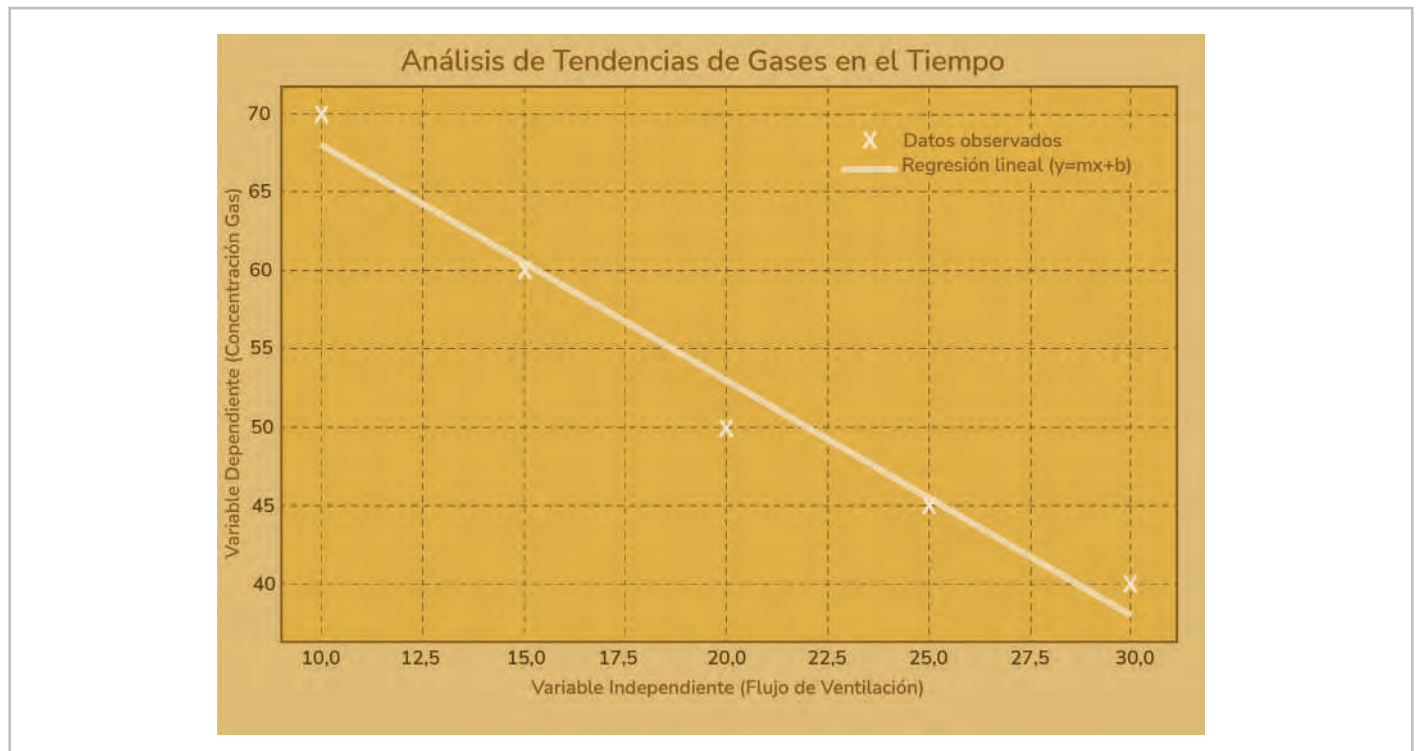
$$y = mx + by$$

Donde:

- (y) es la variable dependiente, por ejemplo, concentración del gas.
- (x) es la variable independiente, por ejemplo, flujo de ventilación.
- (m) es la pendiente de la línea que representa el cambio en la concentración de gases por cada unidad de cambio en el flujo de ventilación.
- (b) es la intersección con el eje Y, que representa la concentración de gas cuando el flujo de ventilación es cero.

Figura 58

Ejemplo de gráfica de regresión lineal en atmosferas contaminadas o viciadas



Este tipo de análisis se puede utilizar, para analizar el comportamiento de los gases o algún parámetro y anticipar el riesgo de un aumento peligroso del gas o parámetro y tomar medidas preventivas.

12.3.4 Enriquecimiento de datos

Esta etapa tiene como objetivo agregar mayor valor a los datos existentes mediante su combinación con otras fuentes de información, lo que permite obtener un contexto más completo y mejorar la calidad de los análisis y las predicciones.

Algunas fuentes o variables adicionales de datos incluyen:

- **Datos de actividad minera:** información relacionada con la maquinaria utilizada, explosivos, turnos de trabajo, entre otros.
- **Datos meteorológicos externos:** variables como temperatura, velocidad del viento, humedad y condiciones climáticas (lluvia, sequía, verano) que pueden influir en la ventilación subterránea.
- **Datos geológicos:** información sobre la composición mineralógica y el tipo de yacimiento.
- **Datos topográficos:** planos detallados de la mina, incluidas las secciones y labores mineras.

El enriquecimiento de datos en el contexto de la minería subterránea no solo mejora la calidad de la información disponible, sino que también facilita la identificación de patrones y relaciones entre diferentes variables.

Al correlacionar factores como la geología, la ventilación, la seguridad estructural, las condiciones ambientales entre otras, se obtiene una visión más clara de cómo estos factores interactúan en conjunto y cómo pueden influir en el riesgo de los trabajos subterráneos.

A continuación, se detallan algunos factores de correlación clave y su valoración en la determinación de riesgos:

▪ Correlación entre concentración de gases y ventilación

La concentración de gases peligrosos como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), ácido sulfhídrico (H₂S) y metano (CH₄) está directamente relacionada con la eficiencia de la ventilación en las áreas subterráneas.

Una ventilación inadecuada puede llevar a la acumulación de gases tóxicos o explosivos, aumentando el riesgo de intoxicación y explosiones. Correlacionar estos datos permite evaluar si el sistema de ventilación es adecuado para mantener concentraciones seguras.

▪ Correlación entre la actividad minera y la generación de gases

Actividades como voladuras, uso de maquinaria diésel y labores de perforación pueden aumentar la concentración de ciertos gases y partículas en el ambiente.

Comprender esta correlación ayuda a identificar períodos o áreas de riesgo elevado durante las actividades mineras, permitiendo establecer controles específicos y adecuados, como mejorar la ventilación o limitar el tiempo de exposición de los trabajadores en estas áreas.

▪ Correlación entre temperatura y concentración de gases

En algunos casos, las concentraciones de gases pueden estar correlacionadas con cambios en la temperatura ambiental de la mina, que afectan la dispersión y acumulación de estos.

En áreas donde la temperatura aumenta considerablemente, el riesgo de acumulación de gases inflamables como el metano (CH₄) también puede incrementarse, aumentando el peligro de explosión. Monitorear esta correlación permite identificar y mitigar dichos riesgos.

▪ Correlación entre humedad y acumulación de gases

La humedad relativa en las minas puede influir en la concentración de ciertos gases, especialmente aquellos que reaccionan químicamente en presencia de agua, como el anhídrido sulfuroso (SO₂).



En condiciones de alta humedad, ciertos gases tóxicos pueden volverse más reactivos, incrementando el riesgo de afectaciones a la salud respiratoria de los trabajadores. La gestión de humedad ayuda a minimizar la exposición a estos compuestos.

- **Correlación entre tiempo de exposición y concentración de gases**

La exposición prolongada a concentraciones incluso bajas de gases puede representar riesgos acumulativos para la salud.

Entender esta relación permite establecer límites de exposición y rotaciones de personal para evitar efectos crónicos en la salud, como enfermedades respiratorias o intoxicaciones.

- **Correlación entre niveles de oxígeno y acumulación de otros gases**

La presencia de gases como dióxido de carbono (CO₂) y monóxido de carbono (CO) puede desplazar el oxígeno en el ambiente.

Una disminución en los niveles de oxígeno representa un alto riesgo para la vida, ya que puede llevar a hipoxia. La correlación entre la concentración de estos gases y el oxígeno permite ajustar los sistemas de monitoreo para alertar sobre atmósferas inmediatamente peligrosas para la vida.

206

12.3.5 Generación de informes

Los resultados del análisis de datos de la ventilación se organizan y presentan de manera clara y comprensible. Los informes deben ser accesibles para ingenieros, supervisores y equipos de seguridad:

- **Resumen ejecutivo:** una visión general de las condiciones de la atmósfera subterránea.
- **Gráficos y visualizaciones:** tendencias, picos y áreas de riesgo.

- **Análisis predictivos y recomendaciones:** modelos de predicción de niveles de gases y acciones recomendadas.
- **Alertas y notificaciones:** en caso de que se superen los niveles de seguridad.

12.4 Análisis de datos con la implementación de softwares mineros

El software de ventilación minera utiliza modelos de simulación para predecir y calcular cómo el aire se mueve y se comporta dentro de la mina. Este proceso implica simulaciones basadas en la dinámica de fluidos y en la interacción de varios factores, como el diseño de la mina, la ubicación de las entradas y salidas de aire, la presencia de maquinaria, y las condiciones atmosféricas. Entre los análisis que pueden realizar estos programas tenemos:

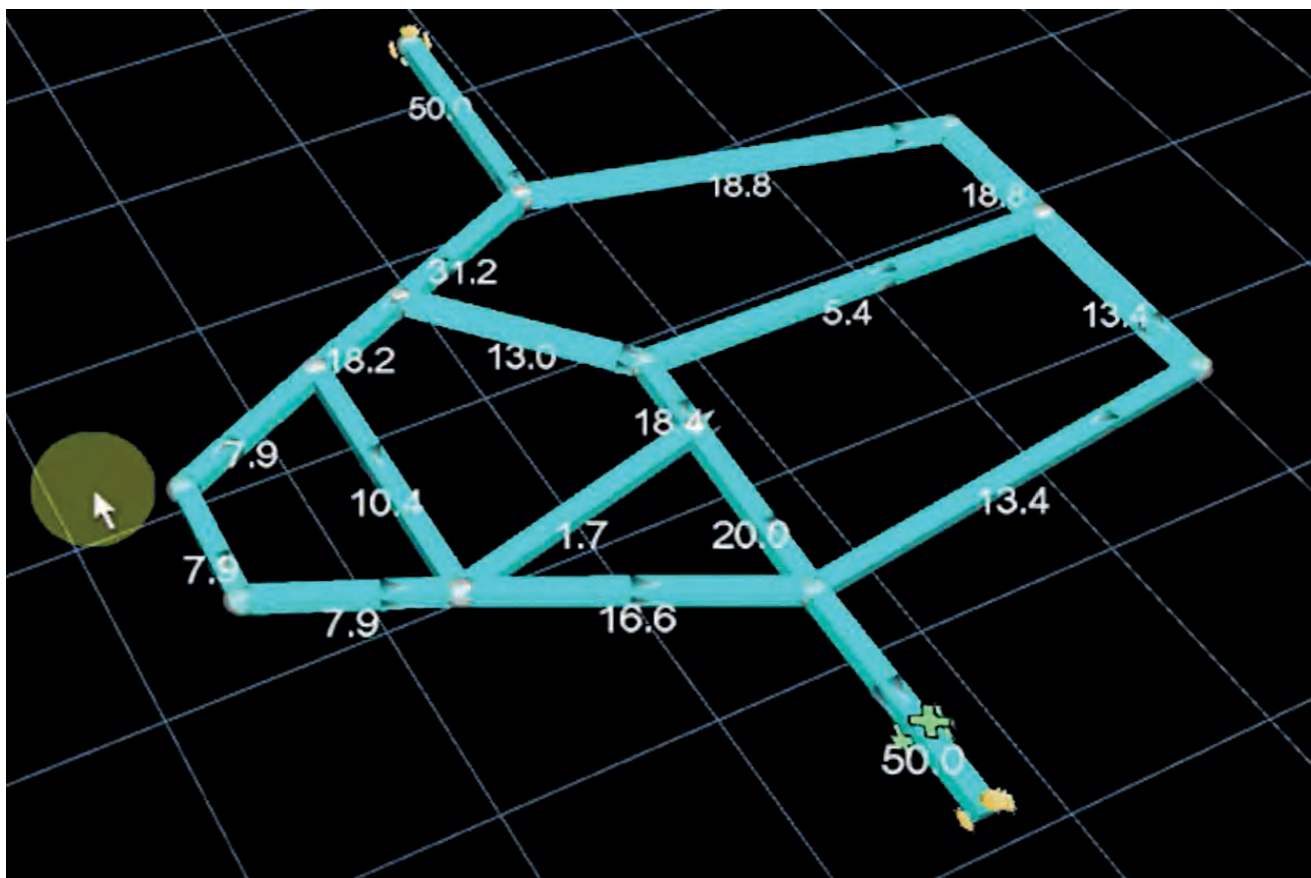
12.4.1 Dinámica de Fluidos Computacionales

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) es una técnica ampliamente utilizada en software de ventilación minera para modelar y simular cómo fluye el aire a través de túneles, galerías y otras áreas subterráneas.

A través de ecuaciones matemáticas complejas que describen el comportamiento de los fluidos (aire) en movimiento, el software puede calcular el caudal, la velocidad y la dirección del aire en diferentes puntos de la mina.

Figura 59

Visualización dinámica de fluidos computacional



Nota. Imagen tomada del software Ventsim.

12.4.2 Cálculo de concentración de gases

El análisis de la concentración de gases tóxicos y explosivos es una de las funciones más críticas del software de ventilación minera. Los datos recolectados por sensores de gases se procesan y se comparan con los valores límite de seguridad para garantizar que las condiciones en la mina sean seguras.

▪ Ecuaciones de dispersión de gases

El software utiliza ecuaciones de dispersión para modelar cómo los gases peligrosos, como el monóxido de carbono (CO), metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) se propagan a través del aire en la mina.

▪ Interacción entre gases y composición del aire

El software realiza un análisis detallado de cómo los gases interactúan con el oxígeno y otros componentes de la atmósfera. Esto es esencial para prever la posibilidad de deficiencia de oxígeno, así como las condiciones que podrían facilitar explosiones, especialmente cuando hay presencia de metano (CH₄) o polvo de carbón.

▪ Límites de Seguridad

Los resultados del análisis de concentraciones de gases se comparan con los límites de exposición ocupacional y las normativas de seguridad, por ejemplo, los límites permitidos para el monóxido de carbono (CO) o el dióxido de nitrógeno (NO₂) en áreas de trabajo. Si los niveles exceden estos límites, el programa emite alertas inmediatas o activa sistemas automáticos de ventilación.

12.4.3 Análisis de tendencias y predicción de riesgos

El software de ventilación no solo analiza los datos en tiempo real, sino que también emplea técnicas de análisis de tendencias y predicción de riesgos para anticipar problemas futuros y evitar situaciones peligrosas.

▪ Análisis de series temporales

- Mediante el análisis de series temporales de los datos, el software puede detectar patrones de comportamiento en las concentraciones de gases y en las condiciones de ventilación.
- Por ejemplo, si el software observa un incremento gradual en la concentración de metano (CH₄) en una sección específica de la mina, puede predecir cuándo se alcanzará un nivel crítico y emitir una alerta anticipada.

▪ Modelos predictivos

- Los modelos predictivos emplean algoritmos de aprendizaje automático (machine learning) o análisis estadístico para pronosticar condiciones peligrosas antes de que se presenten. Estos modelos son entrenados con datos históricos de la mina para detectar las condiciones que normalmente preceden a incidentes, como explosiones o acumulación de gases tóxicos.

Los modelos predictivos pueden utilizar variables como:

- Cambios en la velocidad del aire: si se detectan fluctuaciones en la velocidad del aire, el software puede prever una acumulación de gases en áreas mal ventiladas.
- Patrones en la emisión de gases: los patrones de uso de explosivos o el funcionamiento de equipos diésel pueden ser correlacionados con picos en la concentración de gases peligrosos.

▪ Evaluación de riesgos en tiempo real

- Basado en los resultados del análisis de datos, el software puede generar un índice de riesgo en tiempo real, que cuantifica el nivel de peligro presente en diferentes áreas de la mina. Este índice considera múltiples factores como:
 - La concentración de gases tóxicos o explosivos.
 - La eficiencia del sistema de ventilación en ese momento.
 - Las condiciones ambientales generales (como temperatura y humedad).

12.4.4 Aportes del análisis de datos mediante el uso de software minero

El análisis de tendencias y predicción de riesgos mediante software especializado en minería subterránea es clave para gestionar los riesgos asociados a atmósferas viciadas. Estos softwares analizan datos históricos y en tiempo real sobre la concentración de gases peligrosos, ventilación y condiciones ambientales. Esto permite detectar tempranamente posibles condiciones de riesgo, como un aumento de metano (CH₄) o una reducción de oxígeno (O₂), y generar alertas para tomar acciones preventivas inmediatas.

Además, los softwares permiten simular escenarios de riesgo y optimizar la ventilación en áreas específicas, asegurando un flujo adecuado de aire en las zonas más vulnerables. A través de modelos predictivos, el sistema anticipa eventos peligrosos y proporciona una base de datos objetiva que apoya la toma de decisiones y el ajuste de protocolos de seguridad en función de las condiciones cambiantes en la mina.

En conjunto, el análisis predictivo ayuda a cumplir con normativas de seguridad y facilita la mejora continua en la gestión de riesgos. Así, se minimiza el peligro de atmósferas viciadas, protegiendo la salud de los trabajadores y mejorando la eficiencia y seguridad de las operaciones subterráneas.





PLAN DE PREVENCIÓN DE INCENDIOS Y EXPLOSIONES



Las explosiones en operaciones de minería subterránea representan uno de los mayores riesgos para la seguridad de los trabajadores y la continuidad de las actividades mineras. La presencia de gases inflamables como el metano (CH_4), combinada con el polvo de carbón y otras fuentes de ignición, crea un entorno altamente peligroso si no se gestionan adecuadamente los riesgos. Ante esta realidad, es fundamental establecer un plan de prevención de explosiones que permita identificar, controlar y mitigar estos riesgos.

Teniendo en cuenta lo anterior, se realiza el diseño del plan para que sea una herramienta práctica que los operadores y supervisores puedan utilizar en el día a día de las operaciones mineras, facilitando la implementación de medidas preventivas y correctivas que mantengan un entorno de trabajo seguro y libre de explosiones. El éxito de este plan depende del compromiso y responsabilidad de todos los trabajadores en la mina, desde los niveles operativos hasta la supervisión y dirección. Solo a través de una implementación rigurosa y el cumplimiento constante de estas directrices se puede asegurar la prevención efectiva de explosiones y proteger tanto a las personas como a la infraestructura de la mina.

13.1 Objetivo del plan

El objetivo del plan es proporcionar directrices claras y concretas sobre las medidas preventivas que deben implementarse para minimizar los peligros de explosión. Esto incluye la identificación de los principales riesgos de explosión, como la acumulación de gases combustibles metano (CH_4) y polvo de carbón, el control de fuentes de ignición y la importancia de una ventilación adecuada.

13.2 Alcance

El presente plan abarca todas las áreas subterráneas de una operación minera, incluyendo frentes de explotación, galerías, túneles y zonas de almacenamiento de materiales inflamables, entre otros. Involucra tanto a operadores mineros como a supervisores, personal de mantenimiento y demás personas que estén realizando alguna actividad dentro de las labores subterráneas, asegurando que cada nivel de la operación esté preparado para prevenir y actuar ante posibles situaciones de riesgo.

13.3 Peligros y riesgos de las explosiones

13.3.1 Identificación de peligros y riesgos de explosión

La identificación de peligros y riesgos de explosiones en minería es de vital importancia para prevenir daños a los trabajadores, la infraestructura y el ambiente. Permite implementar controles como ventilación, monitoreo de gases y almacenamiento seguro de explosivos, entre otros, reduciendo los riesgos catastróficos. A continuación se realiza la descripción de estos peligros y los riesgos que generan, con el fin de que puedan ser identificados, evaluados y representados en los planos de ventilación para caracterizar las labores mineras según los riesgos.

13.3.1.1 Presencia de gases combustibles

Las labores mineras subterráneas tienden a acumular gases debido a su diseño y características operativas. Si no se realiza una correcta identificación de estos peligros y no se implementa un circuito de ventilación adecuado, estas condiciones pueden aumentar significativamente el riesgo de explosiones, vulnerando la seguridad de los trabajadores y la integridad de las instalaciones.

Tabla 67

Peligros y riesgos por presencia de gases combustibles

Peligro	Descripción	Riesgo
Metano (CH ₄)	Es uno de los principales gases combustibles presentes generalmente en minas de carbón. Se forma de manera natural y, en concentraciones del 5% al 15% en el aire, puede ser altamente explosivo en presencia de una fuente de ignición.	Explosión por acumulación de estos gases en túneles, galerías o zonas de trabajo.
Ácido Sulfhídrico (H ₂ S)	Aunque es más conocido por su toxicidad, también es inflamable y puede contribuir a explosiones.	
Dióxido de carbono (CO ₂)	Aunque no es combustible, puede desplazar el oxígeno y crear condiciones propicias para la acumulación de otros gases explosivos.	

13.3.1.2 Polvo combustible

El polvo de carbón, y en ocasiones otros como el metálico, es altamente inflamable y explosivo al suspenderse en el aire. En contacto con una fuente de ignición, puede causar explosiones devastadoras que se propagan rápidamente, dañando la infraestructura y poniendo en peligro a los trabajadores. Además, compromete la calidad del aire, aumentando el riesgo de enfermedades pulmonares como la neumoconiosis.

Tabla 68

Peligros y riesgos por polvo combustible

Peligro	Descripción	Riesgo
Polvo de Carbón	En las minas de carbón, el polvo fino suspendido en el aire puede ser extremadamente explosivo. Las partículas de polvo de carbón finamente divididas pueden inflamarse fácilmente y generar explosiones en cadena.	Explosión por polvo combustible acumulado en superficies o flotando en el aire, que puede ser inflamable.
Polvo Metálico	En ciertas minas, los polvos metálicos finamente divididos (polvo de hierro o magnesio) también pueden ser inflamables.	

13.3.1.3 Fuentes de ignición

Equipos eléctricos defectuosos, maquinaria, o actividades como soldadura pueden generar fuentes de ignición que pueden desencadenar explosiones en atmósferas con gases combustibles o polvo suspendido. Al controlarlas, se reduce significativamente el riesgo de explosiones, protegiendo tanto la vida de los trabajadores como la infraestructura minera.

Tabla 69

Peligros y riesgos por fuentes de ignición

Peligro	Descripción	Riesgo
Chispas eléctricas	Equipos eléctricos defectuosos, cables pelados o interruptores mal instalados pueden generar chispas, que podrían encender gases o polvo combustibles.	Explosión por fuente de calor o ignición en atmósferas saturadas de gases o polvos combustibles.
Uso de maquinaria	La fricción, el sobrecalentamiento o los choques entre piezas metálicas de maquinaria pueden generar chispas. Las herramientas manuales de acero también pueden producir chispas en contacto con rocas o superficies metálicas.	
Soldadura o corte de metales	Las operaciones de soldadura, corte o esmerilado dentro de la mina pueden generar llamas o chispas que encienden gases o polvo.	
Cigarrillos y fuego abierto	El uso negligente de cigarrillos o fósforos en áreas de riesgo es un peligro potencial.	
Explosivos mal manejados	La inadecuada manipulación de explosivos puede generar explosiones secundarias involuntarias.	

13.3.1.4 Ventilación inadecuada

Un sistema deficiente permite la acumulación de gases explosivos y polvo, aumentando el riesgo de explosiones. Una ventilación insuficiente también afecta la calidad del aire respirable, exponiendo a los trabajadores a atmósferas peligrosas y reduciendo los niveles de oxígeno.

Tabla 70

Peligros y riesgos por ventilación inadecuada

Peligro	Descripción	Riesgo
Acumulación de gases	Ventilación insuficiente o mal diseñada puede provocar la acumulación de gases explosivos, particularmente en las zonas más profundas o poco ventiladas de la mina.	Explosión por falla en el sistema de ventilación, sea por diseño o por operación.
Fugas en el sistema de ventilación	Si el sistema de ventilación falla, ya sea por fallos eléctricos, mecánicos o bloqueos, la atmósfera subterránea puede volverse rápidamente peligrosa.	

13.3.1.5 Fallas geomecánicas

Conocer las características geomecánicas en minería subterránea es importante, ya que estas fracturas en las rocas pueden liberar súbitamente gases atrapados o causar derrumbes, obstruyendo la ventilación y aumentando el riesgo de explosiones. Las fallas también pueden desestabilizar la infraestructura minera, poniendo en peligro a los trabajadores.

Tabla 71

Peligros y riesgos por fallas geomecánicas

Peligro	Descripción	Riesgo
Liberación Súbita de Gases	La fractura o derrumbe de formaciones geológicas puede liberar súbitamente grandes cantidades de metano (CH ₄) o polvo, lo que aumenta el riesgo de explosión.	Explosión por liberación de gases espontáneas debido a condiciones geomecánicas.
Presiones Subterráneas	La presión del terreno puede liberar gases atrapados en vetas de carbón o en formaciones rocosas, lo que lleva a la creación de atmósferas explosivas.	

13.3.1.6 Actividades de minería de carbón

Tener conocimiento de la operación en minas de carbón es fundamental, ya que tareas como la extracción, perforación, anclajes, entre otros, pueden liberar grandes cantidades de metano (CH₄) y polvo combustible. Estas actividades incrementan significativamente el riesgo de explosiones si no se gestionan adecuadamente.

Tabla 72

Peligros y riesgos por actividades de minería de carbón

Peligro	Descripción	Riesgo
Pernos y perforaciones	Las técnicas de apoyo inadecuadas o sin un control pueden causar liberación de gases explosivos.	Explosión por actividades propias de la operación minera en carbón.
Desagües	El agua subterránea a menudo contiene gases disueltos, como metano (CH ₄). Al extraer el agua, estos gases pueden liberarse y concentrarse en las galerías subterráneas.	

El manejo adecuado de los riesgos anteriormente descritos, a través de sistemas de ventilación, monitoreo constante y la eliminación de fuentes de ignición, es fundamental para la prevención de explosiones en operaciones mineras.

13.3.1.7 Relevancia de los peligros en minería de carbón

En la minería de carbón subterránea, la presencia de peligros que puedan derivar en explosiones es más frecuente debido a la liberación de metano (CH₄), un gas altamente inflamable que se acumula en las minas subterráneas. Además, el polvo de carbón suspendido en el aire puede actuar como combustible debido a su poder calorífico, creando un ambiente explosivo si se combina con una fuente de ignición, como chispas o equipos defectuosos. Estos factores, sumados a las características confinadas de las minas de carbón y la ventilación inadecuada, aumentan significativamente el riesgo de explosiones en comparación con otros tipos de explota-

ción de minerales en labores subterráneas, donde estos materiales inflamables no están presentes en las mismas concentraciones o condiciones.

13.3.2 Evaluación del riesgo

El apartado 8.3 de la Guía Técnica de Gestión de Riesgo de Atmósferas Subterráneas ya incluye una metodología detallada para la valoración y evaluación de riesgos, lo que es fundamental en la gestión de atmósferas explosivas en minería subterránea. Esta metodología permite cuantificar los riesgos asociados, lo que facilita priorizar los peligros que puedan generar explosiones, como gases inflamables y polvo combustible. Por ello, el plan de prevención de explosiones debe enfocarse en estos riesgos priorizados, asegurando una adecuada ventilación, control de gases, y medidas preventivas frente a fuentes de ignición.

La metodología del análisis de riesgos ya desarrollada incluye herramientas de evaluación como la determinación del nivel de probabilidad, exposición y consecuencias, lo que resulta esencial para definir estrategias preventivas en las operaciones mineras. Esto facilita la toma de decisiones informadas para evitar explosiones, protegiendo tanto a los trabajadores como a las instalaciones mineras.

13.3.3 Clasificación de zonas de riesgo

La clasificación de zonas de riesgo en minería subterránea es fundamental para identificar y priorizar los sitios más propensos a explosiones e incendios, según los peligros y riesgos que se presenten en las labores mineras. Este proceso permite establecer controles específicos acorde a los riesgos presentes en cada área. La clasificación se basa en una evaluación detallada de las diferentes áreas de la mina, principalmente considerando la concentración de gases inflamables y la presencia de polvo combustible. A continuación, se describe el esquema de clasificación de las zonas y los pasos necesarios para gestionarlas de manera adecuada.

Tabla 73

Clasificación de las zonas riesgo

ZONA DE RIESGO	EXPLICACIÓN
Zonas de riesgo bajo	En estas áreas, la concentración de gases inflamables es baja, y no se identifican condiciones que favorezcan la acumulación de polvo explosivo o la presencia de fuentes de ignición.
Zonas de riesgo moderado	Estas áreas presentan concentraciones detectables de gases inflamables, aunque no superan los niveles críticos. El polvo combustible podría estar presente, pero en niveles que aún no representan un riesgo inmediato.
Zonas de alto riesgo	Estas son áreas donde la concentración de gases inflamables es alta y podría alcanzar el límite inferior de explosividad (LEL). La acumulación de polvo combustible es significativa, y las fuentes de ignición podrían desencadenar una explosión en cualquier momento.

1. Evaluación y Monitoreo Inicial

El primer paso para clasificar las zonas según su riesgo es llevar a cabo una evaluación exhaustiva de la atmósfera subterránea. Esto incluye:

- **Monitoreo continuo de gases inflamables:** se debe realizar un análisis de las concentraciones de metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), y otros gases inflamables o tóxicos para ubicarlos en las diferentes labores subterráneas en donde se evidencia la presencia de estos.
- **Medición de polvo combustible:** particularmente en minas de carbón, se debe determinar la concentración de polvo en el aire y en las superficies, ya que este puede actuar como un detonante secundario en una explosión. Es importante también las concentraciones del material particulado que circula por las diferentes labores, así como el tamaño de las partículas que se encuentran en el aire para referenciar.
- **Identificación de fuentes de ignición:** es vital evaluar las áreas donde podrían presentarse fuentes de ignición, como equipos eléctricos, maquinaria defectuosa o actividades que generen chispas, para así ubicarla en los mapas de riesgos y tener presente acciones de prevención para evitar la generación de estos eventos.

2. Clasificación de las zonas de riesgo

Basado en los resultados del monitoreo inicial, las zonas se clasifican en función del nivel de riesgo que presentan:

3. Representación gráfica de riesgos de explosión

La clasificación de zonas de riesgo no solo debe realizarse a través de evaluaciones teóricas y técnicas, sino que debe plasmarse gráficamente en un plano de riesgos de la mina. Este plano permitirá identificar visualmente las áreas más propensas a explosiones, facilitando la planificación y la implementación de medidas preventivas. A continuación, se detalla el procedimiento para el diseño y uso de este plano de riesgos.

- **Mapa base de la mina:** partir de un plano detallado de la mina, que incluya todas las galerías, túneles, frentes de trabajo y áreas operativas.
- **Superposición de datos de riesgos:** sobre el plano base, se superponen los resultados de la evaluación de riesgos de explosión. Esto incluirá los niveles de concentración de gases inflamables metano (CH₄), oxígeno (O₂) y monóxido de carbono (CO), etc. La presencia de polvo combustible, y las fuentes potenciales de ignición en cada área.
- **Clasificación por colores:** las zonas deben estar claramente diferenciadas mediante un código de colores que permita identificar rápidamente el nivel de riesgo:
 - **Verde** Zonas de bajo riesgo con concentraciones controladas de gases inflamables y sin fuentes significativas de ignición.
 - **Amarillo** Zonas de riesgo moderado donde la concentración de gases es detectable, pero manejable, con polvo combustible presente en niveles no críticos.
 - **Rojo** Zonas de alto riesgo con concentraciones de gases inflamables que pueden alcanzar el límite inferior de explosividad (LEL) y polvo combustible acumulado con presencia de fuentes de ignición.



4. Reevaluación y actualización de la clasificación

Es crucial que la clasificación de zonas de riesgo no sea estática. Las condiciones subterráneas pueden cambiar debido a factores como la actividad minera, las condiciones geológicas, y el desgaste de los equipos. Por ello, se deben realizar evaluaciones periódicas para actualizar la clasificación y ajustar las medidas de seguridad según sea necesario. Además, cualquier incidente o detección de niveles peligrosos debe activar una reevaluación inmediata.

Por otro parte, si las condiciones de riesgos o eventos en las labores mineras no han cambiado o se ha presentado algún incidente, se hará una actualización de los planos de riesgos para la prevención de incendios cada 6 meses. Medidas preventivas

Un plan de prevención eficaz ante incendios y explosiones minimiza los riesgos asociados a la acumulación de gases inflamables y polvo combustible mediante el control riguroso de fuentes de ignición y la implementación de un sistema de ventilación adecuado. Además, asegura el cumplimiento de la normativa de seguridad vigente, protege el medio ambiente y reduce los costos operativos relacionados con accidentes. Por lo tanto, establecer medidas preventivas contra incendios y explosiones en minería subterránea es fundamental para salvaguardar la vida de los trabajadores y garantizar la continuidad segura y eficiente de las operaciones mineras.

13.4.1 Medidas de ventilación

Un sistema de ventilación es la medida principal para garantizar un ambiente seguro, previniendo la acumulación de gases inflamables y tóxicos. Según la normativa y guías técnicas de buenas prácticas, un plan de ventilación para la prevención de incendios y explosiones debe considerar tabla 74.

Tabla 74

Medidas de ventilación

Medidas	Requerimientos
Diseños planos de circuito de ventilación	<ul style="list-style-type: none">- Describir los caudales de aire que recorre cada una de las labores subterráneas y colocar nomenclatura.- Identificar sitios con % de acumulación de polvo de carbón o material particulado.- Relacionar las condiciones atmosféricas, oxígeno (O₂) y gases en niveles, inclinados, clavadas, cruzadas, etc.- Ubicación de equipos, herramientas y maquinaria eléctrica, así como las redes eléctricas dentro de las labores subterráneas.- Identificación de cualquier otro elemento que pueda generar ignición en la mina.
Circuito de aire constante	<ul style="list-style-type: none">- Se debe contar con los cálculos de caudal de acuerdo con las necesidades generadas en la operación: cantidad de personas, altura de mina, gases a diluir, uso de explosivos, entre otros.- Realizar verificaciones periódicas de los caudales de ingreso y salida, así como los que recorren las labores mineras.
Ventilación natural y/o forzada	<ul style="list-style-type: none">- Implementar un flujo de aire suficiente que recorra las labores principales de la mina, asegurando una atmósfera minera segura.- Asegurar que las labores mineras en ciego cuenten con el suministro de aire suficiente, según el caudal requerido.
Monitoreo continuo	<ul style="list-style-type: none">- Realizar mediciones diarias y/o constantes, según el nivel de riesgo que se identifique en la evaluación.- Registrar todos los datos de mediciones en bitácoras, libros o software que permitan tener la información para realizar análisis posteriores de las condiciones atmosféricas de las minas.



13.4.2 Medidas de inertización

La inertización del polvo de carbón se realiza principalmente utilizando polvo inerte como el polvo de roca caliza, conocido como carbonato de calcio (CaCO₃), ampliamente utilizado debido a su capacidad para diluir el polvo de carbón y evitar que se disperse en el aire, reduciendo así su potencial explosivo. Además, en algunas situaciones, se pueden emplear sistemas de rociado de agua o barreras de agua en zonas estratégicas de la mina para humedecer el polvo y prevenir su ignición.

Figura 60




Medidas de inertización

MEDIDAS DE INERTIZACIÓN

En minas de carbón, se deben instalar barreras o anaqueles de polvo inerte o de agua para frenar la propagación de explosiones de polvo de carbón. Estas barreras deben ser instaladas en puntos donde se haya identificado el riesgo.

Evaluar la opción de implementar un sistema de rociado de agua o barreras de agua para disminuir el riesgo de polvo en el ambiente y superficies.

En lo posible en minas de carbón, es vital el drenaje del metano para reducir su acumulación en las zonas de explotación, sea previo a la explotación o durante esta.

A continuación, las recomendaciones para el uso de polvo de roca en la inertización del polvo de carbón y la prevención de explosiones:

- **Tipo de roca:** se recomienda utilizar materiales inertes pulverizados como caliza, dolomita, yeso, anhídrita, lutita, adobe u otros materiales similares.
- **Tamaño de la partícula:** el 100 % del material debe ser capaz de pasar a través de un tamiz de malla 20 (20 aberturas por pulgada lineal), mientras que al menos el 70 % del material debe pasar a través de un tamiz de malla 200 (200 aberturas por pulgada lineal).
- **Calidad del material:** es fundamental garantizar que el polvo de roca no se aglutine ni se adhiera al mojarse y secarse. Además, se debe controlar que el material no sea fácilmente dispersado por las corrientes de aire, para asegurar su efectividad en la inertización.






13.4.3 Medidas de monitoreo de gases

El monitoreo continuo de gases contaminantes en cada una de las labores mineras es fundamental para la detección temprana de riesgos de explosión e intoxicación. Las medidas están contempladas en la figura 61.

Figura 61

Medidas de monitoreo de gases




MONITOREO DE GASES	Instalación de estaciones fijas de monitoreo en puntos estratégicos para medir concentraciones de los diferentes gases.	
	Uso de detectores portátiles constante por parte del personal para asegurar una atmósfera segura o de lo contrario reportar la condición.	
	Uso de software que permita estar monitoreando constantemente las condiciones de las atmósferas mineras y tomar acciones según las recomendaciones de estos programas.	

13.4.4 Medidas de control de fuentes de ignición

Es esencial controlar y minimizar cualquier fuente que pueda generar chispas o calor excesivo, que puedan detonar una atmósfera explosiva

Figura 62

Medidas de control de fuentes de ignición

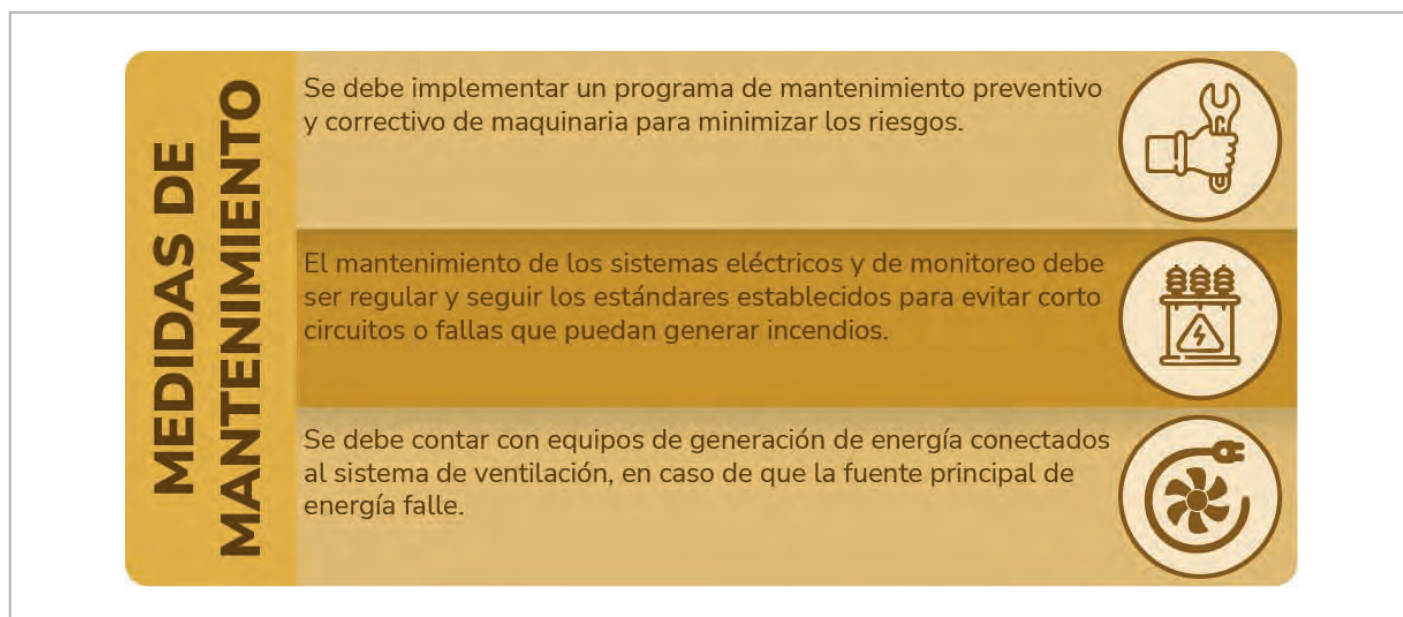
FUENTES DE IGNICIÓN	El control y monitoreo de todos los equipos eléctricos al interior de la mina y su ubicación se debe realizar por lo menos una vez al mes, llevando los registros del estado de estos mantenimientos.	
	El uso de explosivos debe contar con los protocolos establecidos para reducir la generación de gases peligrosos y la posibilidad de ignición.	
	Deben implementarse procedimientos de control de temperatura y prevención de chispas en todas las áreas donde puedan ocurrir eventos con otras condiciones de combustión o explosión.	

13.4.5 Medidas de mantenimiento

El mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos es esencial para evitar la generación de chispas o fugas de combustible (ver figura 63).

Figura 63

Medidas de mantenimiento



13.5 Procedimientos operativos

En minería subterránea, la prevención de incendios y explosiones requiere el desarrollo de Procedimientos de Trabajo Seguro (PTS) específicos, diseñados para controlar los riesgos asociados con la ignición de gases inflamables y polvo combustible. Estas actividades deben incluir: Procedimientos de trabajo seguro en zonas de riesgo

De acuerdo con la normativa actual y demás guías existentes actualmente, se relacionan los procedimientos de trabajo seguro requeridos para evitar y/o prevenir incendios y explosiones en labores mineras subterráneas, así como las temáticas que deben contener:

1. Perforación y voladura

- Uso de explosivos, accesorios de voladura y detonadores.
- Prevención de la acumulación de gases tóxicos y explosivos después de las voladuras, como metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂).
- Verificación de condiciones previas a la voladura.

2. Operación de equipos eléctricos y electrónicos

- Mantenimiento y uso de equipos eléctricos a prueba de explosiones en atmósferas inflamables.

- Control de fuentes de chispas y generación de calor en zonas con metano (CH₄) y polvo de carbón.
- Bloqueo y etiquetado para mantenimiento en atmósferas peligrosas.

3. Manejo y transporte de explosivos

- Almacenamiento y transporte seguro de explosivos, evitando su exposición a fuentes de calor o ignición.
- Procedimientos para la manipulación y disposición adecuada de los explosivos no detonados.

4. Manejo y almacenamiento de combustibles

- Almacenamiento seguro de combustibles líquidos y gases en áreas ventiladas y alejadas de fuentes de calor.
- Procedimientos para el llenado de tanques y mantenimiento de equipos de combustible.

5. Soldadura y corte con soplete

- Control de chispas y fuentes de calor durante operaciones de soldadura en áreas con posibles acumulaciones de gases inflamables.
- Uso de barreras de protección contra incendios en áreas críticas.

6. Ventilación y control de gases

- Monitoreo continuo de gases inflamables, metano (CH₄), monóxido de carbono (CO) y tóxicos. Así como el aseguramiento de que el sistema de ventilación mantiene niveles seguros.
- Procedimientos para el control y ajuste de los caudales de ventilación según las condiciones cambiantes de la mina.

7. Manejo de polvo de carbón

- Implementación de sistemas de inertización, como la dispersión de polvo inerte o rociado de agua, para prevenir explosiones de polvo.
- Limpieza regular de las galerías para evitar la acumulación de polvo combustible.

8. Mantenimiento de maquinaria

- Mantenimiento preventivo de maquinaria para evitar fugas de combustible o aceite que puedan causar incendios.
- Verificación del estado de los sistemas eléctricos y de los sistemas de escape en los equipos.

9. Uso de equipos diésel en minería

- Procedimientos para controlar las emisiones de gases y partículas de equipos a diésel, asegurando que las concentraciones no alcancen niveles peligrosos.
- Revisión periódica de los sistemas de escape y catalizadores de los equipos diésel.

10. Cierre de áreas y frentes de trabajo

- Procedimientos para aislar frentes de trabajo abandonados o inactivos, evitando la acumulación de gases o propagación de incendios.
- Uso de sellos herméticos en galerías abandonadas para prevenir la fuga de gases combustibles.

11. Control de sistemas eléctricos y de energía de emergencia

- Mantenimiento regular de sistemas de energía, asegurando su operatividad en caso de emergencia sin riesgo de explosión.
- Procedimientos para activar/desactivar equipos en áreas con alto riesgo de ignición.

12. Manejo de drenaje de metano (CH₄)

- Procedimientos para la instalación y operación de sistemas de drenaje de metano (CH₄) antes y durante las actividades mineras, evitando la acumulación peligrosa del gas.

Además, para la elaboración de estos procedimientos de trabajo seguro, se propone la plantilla de la tabla 57, que pretende abordar toda la información relevante que permita tener el control en la ejecución de actividades en condiciones de riesgos que puedan generar incendios o explosiones.

Tabla 75

Propuesta Plantilla Procedimiento de Trabajo Seguro (PTS)

PLANTILLA PROCEDIMIENTO DE TRABAJO SEGURO (PTS)			
INFORMACIÓN GENERAL			
Nombre del Procedimiento:	Especifique el nombre de la actividad	Ubicación del Trabajo:	Especificar el sitio específico en la mina
Responsable del PTS:	Nombre del Supervisor o Responsable	Fecha de Elaboración:	DD/MM/AAAA
DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD			
Descripción Detallada de la Actividad: Explicar detalladamente la actividad y los procedimientos de esta, por ejemplo, perforación y voladura en un frente de desarrollo.			
Objetivo de la Actividad:	Definir objetivo específico	Duración Estimada:	Horas o días previstos
Recurso Humano Necesario: Nombre completo del trabajador uno - Rol específico. Nombre completo del trabajador dos - Rol específico. Nombre completo del trabajador tres - Rol específico. Nombre completo del trabajador cuatro - Rol específico. Nombre completo del trabajador cinco - Rol específico.			
IDENTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE RIESGOS			
Riesgos Principales: Listar riesgos específicos de la actividad - Riesgo uno Listar riesgos específicos de la actividad - Riesgo dos Listar riesgos específicos de la actividad - Riesgo tres Listar riesgos específicos de la actividad - Riesgo cuatro Listar riesgos específicos de la actividad - Riesgo cinco			
Controles Necesarios: Especificar los controles y medidas de mitigación del riesgo uno Especificar los controles y medidas de mitigación del riesgo dos Especificar los controles y medidas de mitigación del riesgo tres Especificar los controles y medidas de mitigación del riesgo cuatro Especificar los controles y medidas de mitigación del riesgo cinco			

:
 :
 :
 :
 :
 :
 :
 :
 :
 :

13.5.2 Entrenamiento del personal

Con el fin de garantizar la implementación adecuada del plan de prevención de incendios y explosiones en minería subterránea, es fundamental proporcionar una serie de capacitaciones y formación continua al personal minero, con un enfoque en los riesgos asociados a atmósferas explosivas y las medidas de control. Las temáticas relevantes son las siguientes:

1. Capacitación en seguridad industrial y normativa

- **Objetivo:** instruir al personal con las normativas locales e internacionales de seguridad minera, incluyendo la legislación contemplada en (Decreto 1886, 2015), (Decreto 1072, 2015), (Decreto 944, 2022), así como las normas internacionales, NIOSH, MSHA y la ISO 45001, entre otras.
- **Contenido:** normas de seguridad específicas para el manejo de explosivos, equipos eléctricos en zonas peligrosas, y protocolos de trabajo seguro en atmósferas explosivas o con gases inflamables.
- **Frecuencia:** capacitación inicial y actualización anual o cuando se introduzcan nuevas normativas o equipos.

2. Capacitación en manejo y almacenamiento de explosivos

- **Objetivo:** garantizar el manejo seguro de explosivos para minimizar los riesgos de incendios y explosiones durante las operaciones mineras.
- **Contenido**
 - Técnicas para el almacenamiento seguro de explosivos.
 - Procedimientos para el transporte de explosivos dentro de la mina.
 - Métodos seguros de detonación.
 - Control de gases generados tras las detonaciones.
 - Disposición adecuada de explosivos no detonados.
- **Frecuencia:** capacitación inicial obligatoria para el personal involucrado. Así como actualizaciones periódicas, especialmente cuando se introducen nuevos tipos de explosivos o métodos de detonación.

3. Formación en ventilación y control de gases

- **Objetivo:** asegurar que el personal comprenda la importancia de la ventilación en la prevención de la acumulación de gases inflamables y tóxicos.
- **Contenido**
 - Funcionamiento del sistema de ventilación.
 - Monitoreo de gases como metano (CH₄), monóxido de carbono (CO), entre otros.
 - Uso de detectores de gases portátiles y estaciones fijas.
 - Procedimientos para actuar ante niveles peligrosos de gases y ajustar el flujo de aire en zonas críticas.
 - Frecuencia: capacitación inicial obligatoria. Así como actualización continua conforme cambian las condiciones de la mina o los equipos de monitoreo.

4. Capacitación en Manejo de Polvo de Carbón y Sistemas de Inertización

- **Objetivo:** reducir el riesgo de explosiones de polvo de carbón mediante la gestión adecuada de este material.
- **Contenido:** procedimientos para la eliminación de polvo de carbón, uso de sistemas de inertización como polvo de roca y barreras de agua, y protocolos de limpieza regular de las galerías.
- **Frecuencia:** capacitación inicial y entrenamiento regular en procedimientos de limpieza e inertización.

5. Capacitación en prevención y respuesta ante incendios

- **Objetivo:** preparar al personal para prevenir, detectar y responder ante incendios en áreas subterráneas.
- **Contenido:** uso de sistemas de detección y extinción de incendios, manejo de equipos de extinción portátiles, rutas de evacuación, y uso de barreras contra incendios. También incluye simulacros de evacuación en caso de incendio o explosión.
- **Frecuencia:** capacitación inicial, con simulacros y entrenamientos de respuesta a emergencias al menos cada seis meses.



6. Formación en mantenimiento de equipos y maquinaria

- **Objetivo:** asegurar que todo el personal esté capacitado en el mantenimiento preventivo de equipos para evitar fallos que puedan causar incendios o explosiones.
- **Contenido:** procedimientos de mantenimiento de ventiladores, sistemas eléctricos a prueba de explosiones, y maquinaria diésel. Capacitación sobre la identificación de problemas que podrían generar fuentes de ignición.
- **Frecuencia:** capacitación inicial y actualización regular conforme a los programas de mantenimiento establecidos.

7. Capacitación en drenaje de metano (CH₄) y sistemas de emergencia

- **Objetivo:** enseñar al personal cómo manejar y monitorear los sistemas de drenaje de metano (CH₄) para reducir el riesgo de acumulación y explosión de gases.
- **Contenido:** operación de los sistemas de drenaje de metano (CH₄), monitoreo constante de las concentraciones del gas, protocolos de evacuación y uso de sistemas de emergencia.
- **Frecuencia:** capacitación inicial y entrenamientos periódicos cada seis meses, con simulacros de emergencia para garantizar una rápida reacción ante la detección de altos niveles de metano (CH₄).

Es fundamental garantizar y documentar no solo la participación en las capacitaciones, sino también la adopción efectiva de las medidas orientadas a prevenir la generación de incendios y explosiones. Por ello, es necesario demostrar el cumplimiento de lo dispuesto en el (Decreto 1886, 2015) y su modificación establecida en el (Decreto 944, 2022, art. 4), en lo referente a los programas de capacitación. Estos programas deben especificar los responsables de su diseño y ejecución, así como la cantidad de horas requeridas según los diferentes cargos existentes.

Dichos programas deben incluir, como mínimo, las temáticas previamente mencionadas, además de cualquier otro contenido adicional que se considere pertinente para la sensibilización y formación de todo el personal involucrado en las operaciones de minería subterránea. Esto garantizará un enfoque integral en la gestión del riesgo y la seguridad laboral.

13.6 Monitoreo y mejora continua

Garantizar la eficacia y actualización constante de las medidas de seguridad frente a riesgos cambiantes en ambientes mineros, permitirá disminuir al máximo los riesgos y eventos indeseados que se puedan presentar. Este proceso permite identificar fallos o debilidades en los procedimientos, adaptar el plan a nuevas normativas, tecnologías o incidentes. Así como optimizar la respuesta preventiva ante situaciones críticas, reduciendo la probabilidad de accidentes y protegiendo la vida de los trabajadores y los activos de la operación.

1. Auditorías internas y externas

Las auditorías internas permiten detectar deficiencias de manera preventiva, facilitando la implementación de medidas correctivas antes de que ocurran incidentes. Por otro lado, las auditorías externas, realizadas por entidades independientes, aportan una evaluación imparcial, validan el cumplimiento normativo y refuerzan la credibilidad de la organización ante autoridades y partes interesadas. Ambas son esenciales para mantener y mejorar los estándares de seguridad y salud en la minería.

Planificación de auditorías

- Establecer un cronograma anual para auditorías internas y externas, asegurando una revisión exhaustiva de los procedimientos de seguridad, equipos y sistemas de prevención de explosiones.
- Las auditorías internas pueden realizarse trimestralmente, mientras que las auditorías externas podrían programarse al menos una vez al año, para verificación en el cumplimiento de la normativa y riesgos específicos.
- Las auditorías deben incluir inspecciones visuales, pruebas funcionales de los equipos de seguridad, y entrevistas al personal sobre procedimientos y protocolos.

Asignación de responsabilidades

- Nombrar un equipo de auditoría interna con personal capacitado en seguridad minera, gestión de riesgos y prevención de explosiones, aparte de la persona encargada de la implementación del plan de ventilación, así como tomadores de decisiones.
- Contratar a una empresa externa especializada en auditoría de seguridad minera para las auditorías externas, asegurando objetividad e imparcialidad.

Informe de auditoría

- Generar un informe de resultados tras cada auditoría, destacando puntos de mejora y no conformidades.
- Establecer un plan de acción correctiva con plazos y responsables específicos para cada área que requiera mejoras.

Las auditorías internas, como externas, deben contener por lo menos los siguientes resultados:

- Funcionamiento del sistema de ventilación del periodo evaluados
- Fallas presentadas en el periodo de tiempo evaluado
- Acciones correctivas y preventivas realizadas para evitar incendios y/o explosiones.
- Costos, equipos y mejoras para mejorar las condiciones atmosféricas en operaciones subterráneas.

- Próximos pasos para evitar los eventos presentados y que sean evaluadas en las siguientes auditorías.
- Responsables de la toma de decisiones para realizar las mejoras y personal que ejecuta los procesos.

2. Actualización del plan

Seguimiento normativo

- El encargado del plan de ventilación es responsable de monitorear cambios en las regulaciones de la normativa que regula la materia.
- Asegurarse de que cualquier cambio normativo se refleja en el plan de prevención y en los procedimientos operacionales.

Revisión posincidente

- Establecer un procedimiento formal para la revisión y actualización del plan en respuesta a cualquier incidente o cuasi-accidente relacionado con explosiones o atmósferas peligrosas. Esto incluye:
 - Realizar un análisis de causas raíz del incidente.
 - Incorporar mejoras en los procedimientos y en la capacitación del personal.
 - Ajustar los parámetros de monitoreo de condiciones como sensores de gases y sistemas de ventilación.

Integración de mejoras tecnológicas

- Mantener una evaluación continua de nuevas tecnologías aplicables a la prevención de explosiones, como equipos de monitoreo de gases avanzados, sistemas automáticos de ventilación, dispositivos de bloqueo de seguridad y software que permitan hacer el seguimiento en tiempo real.
- Actualizar los equipos de monitoreo y seguridad en función de las mejores prácticas y tecnologías emergentes en el sector minero.

Proceso de actualización del plan

- Establecer una política de revisión periódica del plan (mínimo anual), en la cual se considere la inclusión de

nuevas tecnologías, cambios regulatorios o mejoras sugeridas por las auditorías.

- Asegurar la capacitación constante del personal ante cualquier actualización del plan, garantizando que todos conozcan y entiendan los cambios implementados.

3. Documentación y Seguimiento

- Mantener un registro detallado de todas las auditorías, actualizaciones y revisiones del plan de prevención de incendios y explosiones.
- Utilizar un sistema de gestión documental que permita rastrear el historial de modificaciones y verificar que todas las acciones correctivas se hayan completado adecuadamente.

4. Mejora Continua

- Revisión de KPIs (Indicadores Clave de Desempeño)
 - Definir KPIs para medir la efectividad de las auditorías y actualizaciones, como la frecuencia de incidentes, tiempo de respuesta ante no conformidades, y reducción de riesgos.
 - Ajustar las estrategias de seguridad y prevención de explosiones con base en los resultados de estos indicadores.

5. Involucrar a las partes interesadas

Asegurar la participación de todos los niveles de la organización en el proceso de monitoreo y mejora continua, fomentando una cultura de seguridad en la que se priorice la retroalimentación y el cumplimiento de las mejores prácticas en seguridad minera.

Este enfoque tiene como objetivo garantizar que el plan sea dinámico, se mantenga actualizado y responda de manera efectiva a los riesgos inherentes a las labores mineras subterráneas. Por ello, la actualización del plan debe ser revisada y avalada por la alta dirección o el responsable de la operación minera, asegurando desde los niveles más altos la eficiencia y eficacia del plan de prevención de incendios y explosiones en atmósferas mineras.

13.7 Registro y documentación

13.7.1 Reportes de incidentes

La correcta documentación de incidentes relacionados con riesgos de explosión e incendio permite aprender de los sucesos ocurridos, identificar fallos en el sistema de prevención y desarrollar acciones correctivas. Los elementos clave incluyen:

1. Protocolos para la documentación de incidentes

- Establecer un procedimiento claro para documentar cualquier incidente o cuasi-incidente (near-miss) relacionado con incendios o explosiones.
- Los reportes deben ser completados inmediatamente después del suceso, y deben incluir:
 - Fecha y hora del incidente.
 - Descripción detallada del incidente (lugar, causas aparentes, circunstancias).
 - Tipo de materiales involucrados (inflamables, combustibles, polvo, etc.).
 - Personas involucradas y nivel de lesiones (si aplica).
 - Equipos afectados.
 - Respuesta inicial y medidas tomadas.
 - Conclusiones preliminares y acciones correctivas a corto y largo plazo.

Tabla 76

Ejemplo de formato de reporte.

Incidente	Fecha y hora	Descripción	Materiales involucrados	Personas involucradas	Equipos afectados	Respuesta inicial	Conclusiones

2. Investigación de incidentes

- En caso de incidentes graves o repetitivos, debe realizarse una investigación exhaustiva. El informe debe incluir un análisis de las causas raíz utilizando herramientas como el método del árbol de causas o el método de los 5 porqués, además de un plan de acción preventivo para evitar recurrencias.
- Las investigaciones deben efectuarse de manera inmediata, garantizando la preservación de los detalles en el sitio del evento, los testimonios de las personas que presenciaron el incidente y los informes de supervisores relacionados con las actividades en el área afectada.
- Es necesario establecer una comisión para llevar a cabo las investigaciones, la cual debe incluir, como mínimo, supervisores, expertos en SST y conocedores del proceso o del área donde ocurrió el evento.
- Los resultados de las investigaciones deben identificar las causas raíz del incidente y proponer acciones concretas para evitar la repetición de eventos similares. Estas recomendaciones deben ser socializadas y adoptadas por todo el personal minero.
- Es crucial que estos informes sean revisados periódicamente por la alta dirección y el equipo de seguridad, asegurando su implementación y seguimiento.

3. Registro de acciones correctivas

Los resultados de las investigaciones deben generar acciones correctivas que deben ser implementadas, documentadas y monitoreadas hasta su cierre. Esto incluye actualizaciones de procedimientos, mejoras en equipos, refuerzos de formación, entre otros.

Ejemplo: si el incidente fue causado por la acumulación de polvo combustible, las acciones a implementar podrían incluir:

- La instalación de sistemas de inertización en las labores mineras mediante la aplicación de polvo inerte.
- La humectación de los procesos de arranque mediante la inyección de agua en los sitios donde se genera mayor cantidad de polvo, especialmente durante el uso de equipos de perforación.

Cabe resaltar que el registro y la documentación en el plan de prevención de incendios y explosiones no solo garantiza y demuestra el cumplimiento normativo, sino que también crea una base de datos útil que sirve para mejorar continuamente los procedimientos de seguridad. Toda la información debe almacenarse de forma segura, en formato físico y/o digital. Así como mantenerse disponible para revisiones internas, auditorías externas o en caso de investigaciones regulatorias.

A continuación, se describe cómo gestionar un plan de prevención de incendios y explosiones en minería subterránea en el software Ventsim.

Paso 1. Crear el modelo de ventilación

- Es fundamental disponer del diseño actualizado de las labores mineras en un formato compatible con el software, como archivos DXF (AutoCAD). Alternativamente, el diseño puede realizarse directamente en la plataforma de Ventsim.
- El diseño de las labores mineras debe estar completo e incluir todos los elementos relevantes, tales como galerías, cámaras, niveles, y sistemas de ventilación principales y auxiliares.
- Es necesario definir las propiedades físicas de las labores mineras, incluyendo longitudes, diámetros, resistencia al flujo de aire y otras características que puedan influir en el comportamiento del sistema de ventilación.
- Identificar las necesidades iniciales de ventilación de la mina, teniendo en cuenta las condiciones específicas de cada zona.
- Configurar la ventilación principal y auxiliar. Esto incluye asignar los caudales de aire requeridos, configurar ventiladores según las condiciones iniciales, y establecer elementos como cortinas de ventilación y otros componentes del sistema.

230 Paso 2. Identificar las fuentes de riesgo

- Configurar las emisiones de gases peligrosos dentro de las labores mineras, incorporando las fuentes de emisión de gases inflamables como metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y sulfuro de hidrógeno (H₂S).
- Definir las tasas de emisión de gases en las áreas donde existe una mayor probabilidad de explosión.
- Establecer los límites máximos permisibles de concentración de gases, de acuerdo con la normativa vigente.
- Identificar los puntos donde se generan concentraciones de polvo de carbón superiores a los niveles permisibles y configurar las propiedades del polvo, como

el tamaño de partícula y la tasa de generación. Esto permitirá simular la acumulación y suspensión de partículas en el aire de manera precisa.

paso 3. Configuración del sistema de ventilación para dilución de contaminantes

- Determinar los caudales de aire requeridos, de acuerdo con las configuraciones anteriores de los contaminantes presentes en las labores mineras.
- Usar Ventsim para simular diferentes escenarios que permitan asegurar que las condiciones atmosféricas están por debajo de los límites permisibles. Esto es posible ajustando el sistema de ventilación, las características de los ventiladores, colocando cortinas de ventilación, entre otras acciones.
- Ejecutar el software simulando varios escenarios para asegurar que las zonas críticas están recibiendo el flujo de aire suficiente para diluir contaminantes.

paso 4. Prevención de explosiones por gases y polvo de carbón

- En Ventsim es posible establecer alertas automáticas cuando las condiciones atmosféricas excedan sus límites permisibles, los cuales también pueden ser personalizables.
- Simular la acumulación de polvo de carbón en las zonas mineras y configurar barreras de polvo inertes o sistemas de humectación en las labores.
- Realizar ajustes en la ventilación para prevenir la suspensión del polvo en el aire y así reducir el riesgo de explosiones de polvo.
- Crea escenarios para simular la acumulación peligrosa de gases y polvo, en diferentes condiciones operacionales.
- Simular fallas del sistema de ventilación para evaluar cómo respondería el sistema y el personal ante una acumulación súbita de gases o polvos.

Paso 5. Prevención de incendios

- El software registra los sitios donde están ubicados los equipos o maquinaria que puede generar calor excesivo, como motores eléctricos, compresores o sistemas de transporte.
- Simular la propagación de calor desde las fuentes de ignición identificadas y verificar si la ventilación disipa el calor de manera eficiente.
- Utilizar la capacidad de simular la propagación del incendio en una mina, lo que da información de cómo se comporta el fuego dentro de las labores mineras, según las características de la zona.
- Ajusta el sistema de ventilación para crear barreras contra la propagación del fuego mediante la reconfiguración del flujo de aire.
- Configura sensores virtuales de temperatura, donde los equipos pueden generar calor peligroso para una combustión espontánea.
- Establecer alertas automáticas para aumentar el flujo de aire o activar medidas de emergencias en caso de detección de sobrecalentamiento.

Paso 6. Configuración de barreras y medidas de control

- En las labores identificadas, se establecen cortinas de ventilación o barreras contra incendios que puedan cerrarse de manera automática en caso de incendios.
- Simula la efectividad de las barreras contra incendios para evaluar su efectividad.
- Utilizar Ventsim para simular la dispersión del humo o de los gases tóxicos en caso de incendios o explosiones. Ajusta las rutas de ventilación para garantizar que las rutas de escape permanezcan libres de humos y gases tóxicos.
- Verifica si las rutas de evacuación son seguras y si los sistemas de ventilación de emergencia funcionan de manera óptima.

Paso 7. Implementación de planes de emergencia y contingencia

- Crear un plan de respuesta ante incendios y explosiones, configurados por los escenarios simulados en Ventsim, que incluyen: acciones inmediatas para corte de suministro de gases inflamables, redirigir aire dependiendo del escenario y conocer las rutas de evacuación por zonas seguras.
- Realizar simulacros basados en los escenarios modelados en Ventsim y capacitar al personal en manejo de incendios y explosiones, asegurando que todos estén familiarizados con las rutas de escape y los procedimientos de emergencias.

Paso 8. Monitoreo continuo y revisión del plan

- Es posible realizar un seguimiento en tiempo real del sistema de ventilación de una mina conectando Ventsim a un sistema de monitoreo continuo. Este permite realizar mediciones constantes de las atmósferas mineras y emitir alertas en caso de que se detecten límites o condiciones de riesgo.
- Ventsim facilita la generación de informes automáticos sobre la efectividad del sistema de ventilación y las concentraciones de contaminantes. También permite realizar auditorías periódicas para identificar posibles fallos antes de que se conviertan en incidentes.
- Revisar regularmente los resultados de las simulaciones y las condiciones operativas permite implementar medidas correctivas y mejorar continuamente el sistema de ventilación en función de las condiciones específicas de la mina.

En resumen, el uso de un software como Ventsim para la planificación de prevención de incendios y explosiones en minería subterránea permite diseñar y mantener un sistema de ventilación robusto y eficiente. Esto contribuye a prevenir la acumulación de gases inflamables y polvo, mitigar el riesgo de explosiones y controlar la propagación de incendios. Al integrar simulaciones avanzadas, sensores y barreras de control, se optimiza tanto la prevención como la respuesta ante emergencias en operaciones mineras.





PROCEDIMIENTOS DE INTERVENCIÓN FRENTE A CONDICIONES INSEGURAS

Los procedimientos de intervención frente a condiciones inseguras son un conjunto de acciones sistemáticas diseñadas para identificar, evaluar y corregir situaciones que puedan comprometer la seguridad y salud de los trabajadores en el entorno laboral. Estas intervenciones se activan al detectar condiciones que infringen las normativas de seguridad establecidas o que representan un peligro inminente, como la presencia de atmósferas viciadas o contaminadas en la minería subterránea.

El objetivo es establecer un procedimiento documentado para la identificación de actos y condiciones subestándar, así como para llevar a cabo el control y/o mitigación de los riesgos asociados a atmósferas viciadas y explosivas. Esto protege tanto al personal propio como al externo que realiza actividades mineras rutinarias y no rutinarias en los diferentes frentes de trabajo de minas subterráneas.

14.1 Alcance

La intervención para el control de los riesgos por atmósferas viciadas y explosivas abarcan todos los procesos y actividades que se adelantan en las minas subterráneas, en sus diferentes fases de desarrollo, preparación, explotación, y servicios mineros, y tiene en cuenta las actividades **rutinarias y no rutinarias**.

El procedimiento inicia con la identificación del riesgo, el análisis, control y finaliza con el reporte y actualización de la matriz de riesgo (ver anexos 3 y 5).

14.2 Ámbito de aplicación

Este procedimiento es aplicable a todo el personal que realice alguna actividad bajo tierra, incluyendo tanto al personal propio de las minas como a los contratistas y partes interesadas. Todos estos actores deben adherirse a las normativas de seguridad establecidas y seguir los procedimientos de intervención en caso de identificar condiciones inseguras, con el objetivo de garantizar un entorno de trabajo seguro y saludable.

14.3 Documentos asociados al procedimiento

Los documentos necesarios para la aplicación efectiva de este procedimiento pueden incluir:

- Planes de seguridad y salud ocupacional.
- Regulaciones sobre atmósferas explosivas y viciadas.
- Protocolos de respuesta ante emergencias.
- Formularios para la identificación y reporte de riesgos.
- Manuales de capacitación para el personal.
- Documentación sobre el mantenimiento y calibración de equipos de monitoreo ambiental.

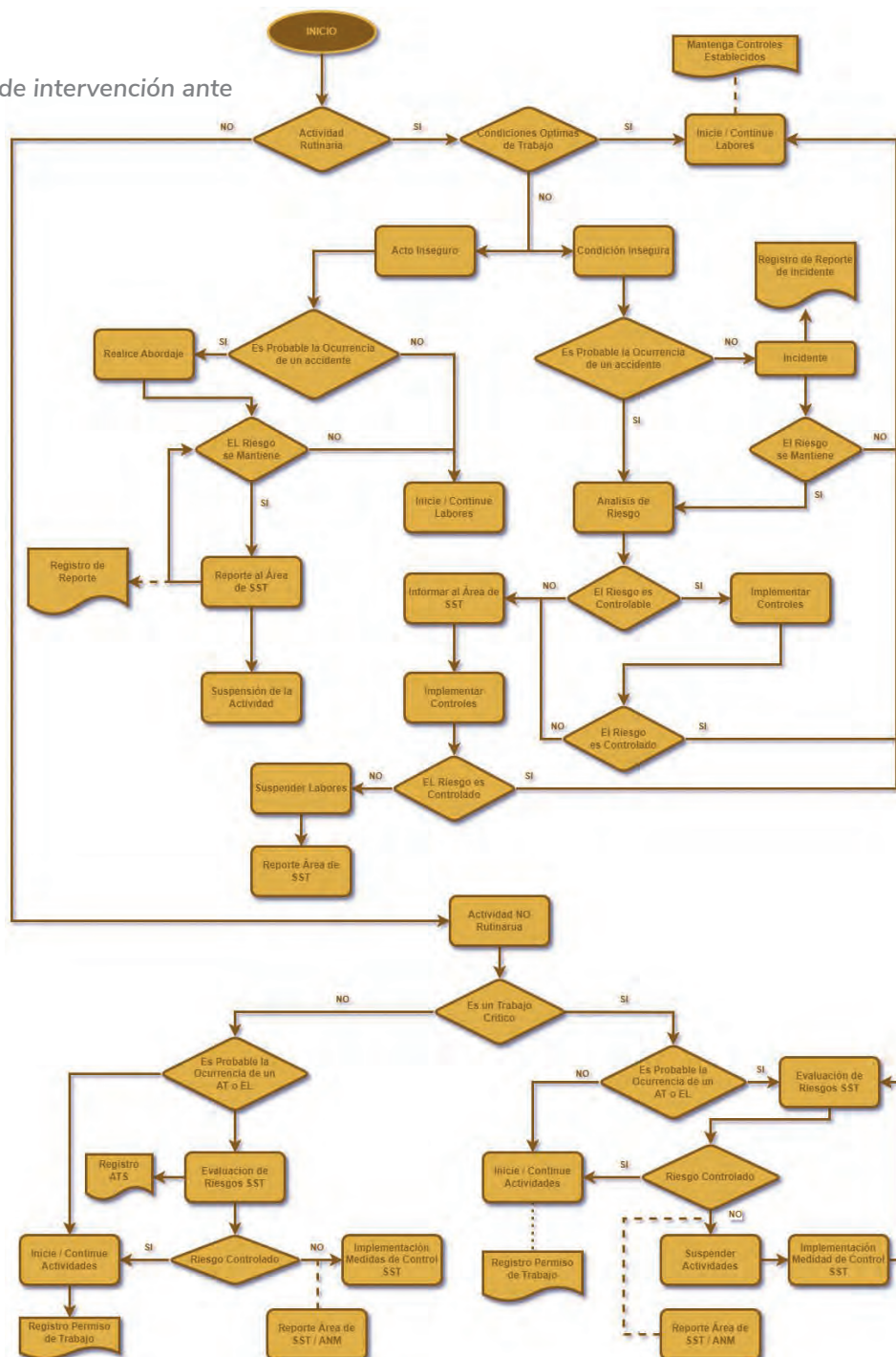
14.4 Diagrama de flujo

El diagrama de flujo describe los procedimientos de intervención ante condiciones inseguras, diferenciando entre actividades rutinarias y no rutinarias (ver figura 65). Las actividades rutinarias incluyen inspecciones diarias de equipos, auditorías semanales de seguridad y capacitaciones periódicas, lo que garantiza un monitoreo constante de las condiciones laborales. Por otro lado, las

actividades no rutinarias comprenden la respuesta ante emergencias, la investigación de incidentes y la evaluación de riesgos en proyectos específicos. Esta diferenciación facilita una gestión más efectiva de la seguridad, asegurando un enfoque proactivo en la identificación y mitigación de riesgos, tanto en acciones regulares como en situaciones excepcionales.

Figura 65

Diagrama procedimientos de intervención ante condiciones inseguras



14.5 Descripción de actividades

Tabla 77

Descripción de actividades procedimientos de intervención ante condiciones inseguras

Actividad	Descripción	Responsable	Registro
Clasificación de la actividad	<p>Establecer el tipo de actividad que va a desarrollar el trabajador. Esta puede ser rutinaria, es decir que se lleva a cabo de manera continua y permanente durante la jornada laboral, al igual que el riesgo de exposición.</p> <p>No rutinaria: trabajos especiales, los cuales pueden ser críticos; El nivel de riesgo es alto al igual que la probabilidad de la ocurrencia de un Accidente de trabajo (AT), o enfermedad laboral (EL)</p>	<ul style="list-style-type: none"> Responsable de la explotación minera Trabajador Área SST Terceros o contratistas 	<ul style="list-style-type: none"> Registro de plan de trabajo diario
Rutinaria	<p>Establecer las condiciones de trabajo: el trabajador debe realizar los procedimientos de seguridad establecidos antes de iniciar la labor como, por ejemplo:</p> <ul style="list-style-type: none"> Medición y registro de gases en los frentes de trabajo Asegurar un caudal de aire adecuado. Disponer y usar correctamente los EPI adecuados 	<ul style="list-style-type: none"> Área de SST Trabajador Terceros o contratistas 	<ul style="list-style-type: none"> Libreta de control de gases. Registro en tableros de control de gases.
	<p>a) Si las condiciones de trabajo son óptimas: es decir las concentraciones de gases están dentro de los límites permisibles, se puede iniciar con la actividad laboral.</p> <p>Es importante mantener un control permanente en las concentraciones de gases, durante el turno de trabajo</p>	<ul style="list-style-type: none"> Área de SST Trabajador Terceros o contratistas 	
	<p>b) Si las condiciones de trabajo no son óptimas: es decir, si las concentraciones de gases están por fuera de los límites permisibles, y el trabajador omite esta condición se puede establecer, la ocurrencia de un acto o una condición insegura</p>	<ul style="list-style-type: none"> Área de SST Trabajador Terceros o contratistas 	
	<p>Condición insegura: existe una alta probabilidad, de acuerdo con las mediciones de gases realizadas previo al inicio de la actividad de la ocurrencia de un AT o EL. para ello realice:</p> <ul style="list-style-type: none"> El análisis de riesgo: que Consiste en identificar, evaluar, y valorar el riesgo el riesgo identificado <p>Luego de la valoración se establece si la condición riesgo es controlable o no.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Área de SST Trabajador Terceros o contratistas 	<ul style="list-style-type: none"> Procedimiento Modelo de gestión del Riesgo atmósferas explosivas y viciadas.

Actividad	Descripción	Responsable	Registro
	<p>Si el riesgo es controlable: Implementar los controles que permitan mitigar la condición de riesgo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ampliación de ducto de ventilación. • Repotenciación de ventiladores para incremento en el caudal • Medición de gases permanente y continua. • Las demás que sean necesarias. <p>Una vez controlada la condición de riesgo, se puede autorizar el inicio o continuidad de la actividad laboral, manteniendo el monitoreo permanente.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Responsable de SST • Trabajador 	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis de trabajo seguro ATS.
	<p>Si el riesgo no es controlable: Si al implementar los controles, estos no son suficientes para mitigar la condición de riesgo, entonces se debe informar al responsable de SST.</p> <p>El área de SST debe replantear nuevos controles, y verificar los resultados, si las concentraciones de gases siguen por fuera de los VLP, entonces se debe suspender inmediatamente la actividad. El coordinador del área de SST determinará si es necesario reportar a la ANM. (Grupo de Atención de emergencias).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Responsable de SST • Coordinador de SST • Agencia Nacional de Minería 	<p>Registro de reporte condición insegura.</p>
	<p>Incidente de seguridad (condición insegura): cuando la probabilidad de ocurrencia de un accidente es baja o nula, pero existió una exposición de riesgo que lo pudo generar, esta situación se clasifica como un incidente de seguridad.</p> <p>Si la condición de riesgo se presenta de manera prolongada, se debe:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Realizar un análisis de riesgo: identificar, evaluar, y valorar el riesgo, • Hacer la valoración y establecer si la condición riesgo es controlable o no. • Seguir el procedimiento anterior para definir si el riesgo es controlable o no. 	<ul style="list-style-type: none"> • Responsable de SST • Trabajador 	<ul style="list-style-type: none"> • Registro reporte de incidente de seguridad • Procedimiento Modelo de gestión del Riesgo atmósferas explosivas y viciadas

Actividad	Descripción	Responsable	Registro												
	<p>Actos inseguros: que pueden cometer tanto los trabajadores propios como contratistas y partes interesadas. El acto inseguro puede presentarse por omisión del trabajador, por falta de formación y capacitación en temas relacionados a riesgos por atmósferas viciadas o explosivas o por falta de procedimientos documentados entre otros.</p> <p>A continuación, se presenta una clasificación de acuerdo con el potencial de daño que se puede originar, si se materializa la condición o acto inseguro. Esta clasificación no tiene relación con el procedimiento de valoración de riesgos propuestos en la guía.</p> <table border="1" data-bbox="293 688 984 1293"> <thead> <tr> <th data-bbox="293 688 404 772">Clase</th> <th colspan="2" data-bbox="404 688 984 772">Potencial de daño de la condición o acto inseguro</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="293 772 404 936">Alto</td> <td data-bbox="404 772 464 936">A</td> <td data-bbox="464 772 984 936">Podría ocasionar la muerte. Incapacidad, incapacidad permanente o daños considerables. Concentraciones de gases fuera de VLP, explosiones</td> </tr> <tr> <td data-bbox="293 936 404 1131">Medio</td> <td data-bbox="404 936 464 1131">M</td> <td data-bbox="464 936 984 1131">Podría ocasionar una lesión o enfermedad grave con incapacidad temporal. daños menores. Concentraciones de gases fuera de VLP, explosiones, con exposición esporádica</td> </tr> <tr> <td data-bbox="293 1131 404 1293">Bajo</td> <td data-bbox="404 1131 464 1293">B</td> <td data-bbox="464 1131 984 1293">Podría ocasionar lesiones menores sin incapacidad, enfermedad leve o daños menores. Concentración de gases dentro de VLP.</td> </tr> </tbody> </table>	Clase	Potencial de daño de la condición o acto inseguro		Alto	A	Podría ocasionar la muerte. Incapacidad, incapacidad permanente o daños considerables. Concentraciones de gases fuera de VLP, explosiones	Medio	M	Podría ocasionar una lesión o enfermedad grave con incapacidad temporal. daños menores. Concentraciones de gases fuera de VLP, explosiones, con exposición esporádica	Bajo	B	Podría ocasionar lesiones menores sin incapacidad, enfermedad leve o daños menores. Concentración de gases dentro de VLP.	<ul style="list-style-type: none"> • Responsable SST • Trabajador 	<ul style="list-style-type: none"> • Procedimiento Modelo de gestión del Riesgo atmósferas explosivas y viciadas
Clase	Potencial de daño de la condición o acto inseguro														
Alto	A	Podría ocasionar la muerte. Incapacidad, incapacidad permanente o daños considerables. Concentraciones de gases fuera de VLP, explosiones													
Medio	M	Podría ocasionar una lesión o enfermedad grave con incapacidad temporal. daños menores. Concentraciones de gases fuera de VLP, explosiones, con exposición esporádica													
Bajo	B	Podría ocasionar lesiones menores sin incapacidad, enfermedad leve o daños menores. Concentración de gases dentro de VLP.													
	<p>Establecer la probabilidad de ocurrencia de un accidente:</p> <p>Si existe la probabilidad de ocurrencia de un accidente:</p> <p>Realizar abordaje a la persona que está cometiendo el acto inseguro.</p> <p>Evaluar si el riesgo se mantiene; si es así, entonces hacer el respectivo reporte al responsable de SST y suspender la actividad.</p> <p>Implementar controles establecidos, y evaluar la condición de riesgo, si es superada iniciar o continuar con la actividad programada</p> <p>Si la probabilidad de ocurrencia de un accidente es baja, o los controles son suficientes para mantener los gases dentro de los VLP, se autorizará el inicio o continuidad de las labores programadas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Responsable SST • Trabajador y partes interesadas 	<ul style="list-style-type: none"> • Registro reporte de acto inseguro. 												

No Rutinaria	<p>Determinar las características del trabajo:</p> <p>a). Si el trabajo es crítico: se debe hacer la planificación de este y establecer si los riesgos presentes pueden dar origen a un accidente de trabajo o enfermedad laboral.</p> <p>Si hay probabilidad de ocurrencia de un accidente de trabajo o enfermedad laboral:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Evaluación y valoración de los riesgos de emanación de gases. • Implementar controles de acuerdo con el nivel de riesgo. • Verificar si los controles fueron efectivos. si los riesgos por concentración de gases son controlados <p>Si las concentraciones están dentro de los VLP, se autorizará el inicio de la actividad previo diligenciamiento del Permiso de trabajo y ATS.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Responsable de SST • Supervisor o responsable de la actividad • trabajador y/ o partes interesadas 	<ul style="list-style-type: none"> • Permiso de trabajo • Formato Análisis de trabajo seguro • Procedimiento Modelo de gestión del Riesgo atmósferas explosivas y viciadas
	<p>Si las concentraciones de gases están fuera de los VLP y la probabilidad de ocurrencia de un accidente es alta, se debe suspender la actividad;</p> <ul style="list-style-type: none"> • Implementar medidas de control • Reevaluar los riesgos • Verificar si el riesgo se controló <p>Si las medidas de control no son efectivas, se debe mantener la suspensión de actividades, y reportar al área de SST o en su defecto de acuerdo con las condiciones informar al grupo de salvamento minero de la ANM.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Responsable de SST • Responsable de la actividad • Trabajador y/o partes interesadas 	<ul style="list-style-type: none"> • Procedimiento Modelo de gestión del Riesgo atmósferas explosivas y viciadas
	<p>Determinar las características del trabajo:</p> <p>b). Si el trabajo no es crítico: pero las condiciones de riesgo están presentes durante el desarrollo de la actividad se debe evaluar la probabilidad de ocurrencia de AT o EL.</p> <p>Si las concentraciones de gases son susceptibles a variaciones considerables que pueden originar un AT o EL:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Evaluación y valoración de los riesgos • Establecer controles • Verificar la efectividad de los controles • Análisis de trabajo seguro <p>Si los riesgos son controlados y no ponen en peligro al o los trabajadores, se autoriza el inicio de la actividad, previo diligenciamiento del permiso de trabajo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Responsable SST • Trabajador y/o partes interesadas • Responsable de la actividad 	<ul style="list-style-type: none"> • Procedimiento Modelo de gestión del Riesgo atmósferas explosivas y viciadas • Formato Análisis de Trabajo Seguro • Permiso de trabajo



DISPONIBILIDAD DE RECURSOS

La gestión del riesgo en atmósferas contaminadas o viciadas en la minería subterránea es un aspecto crítico para la seguridad y salud de los trabajadores. Esta labor está regulada por un conjunto de normativas nacionales e internacionales que establecen lineamientos claros para prevenir y mitigar los peligros asociados con la presencia de gases tóxicos o explosivos. Normas como (Decretos 1886, 2015), (Decreto 1072, 2015), y (Decreto 944, 2022). Así como la Norma Técnica Colombiana NTC 6620 de 2022, proporcionan un marco normativo integral para garantizar la seguridad en las operaciones subterráneas.

En este contexto, es esencial asegurar la disponibilidad de los recursos necesarios para cumplir con estas normativas y gestionar el riesgo de manera efectiva. Estos recursos incluyen no solo tecnología avanzada para la detección, monitoreo y control de gases, sino también personal capacitado, materiales adecuados, financiamiento suficiente, apoyo institucional, sistemas de información robustos y programas de formación continua. En la figura 66 se describen los diferentes recursos que pueden implementarse.

Figura 66

Disponibilidad de recursos en manejo de riesgo por atmosferas contaminadas o viciadas



15.1 Recursos humanos

Los recursos humanos son esenciales para la correcta implementación de las estrategias de gestión de riesgos. Los profesionales capacitados en seguridad minera, salud ocupacional, y ventilación de minas desempeñan un rol clave en la identificación, evaluación y control de los riesgos en atmósferas contaminadas o viciadas.

Elementos clave

- Personal técnico especializado en ventilación de minas.
- Ingenieros especialistas en SGSST y control de atmósferas.
- Brigadas de rescate y personal de emergencia.
- Supervisores de seguridad con formación y experticia en manejo de gases y atmósferas peligrosas.
- Trabajadores con entrenamiento en el uso de equipos de protección personal (EPP) adecuados para atmósferas viciadas.

15.2 Recursos tecnológicos

La tecnología juega un papel crucial en la detección y control de atmósferas viciadas o contaminadas. Es necesario contar con equipos avanzados para la identificación de gases mineros, ventilación adecuada y dispositivos de monitoreo en tiempo real.

242 Elementos clave

- Detectores portátiles y fijos de gases tóxicos y explosivos como monóxido de carbono (CO), metano (CH₄), anhídrido sulfuroso (SO₂), entre otros.
- Sistemas de ventilación automatizados para asegurar el intercambio de aire fresco.
- Equipos de comunicación para alertas y coordinación en situaciones de emergencia.
- Sistemas de monitoreo en tiempo real y alarmas para controlar la calidad del aire.
- Equipos de protección respiratoria autónomos como máscaras de oxígeno y Equipos de Respiración Autónoma (ERA).

15.3 Recursos materiales

Los recursos materiales se refieren a los insumos necesarios para las operaciones diarias en minas subterráneas. Estos incluyen herramientas y equipos de protección personal para garantizar la seguridad de los trabajadores.

Elementos clave

- Máscaras de oxígeno y filtros de aire.
- Equipos de primeros auxilios y rescate.
- Herramientas especializadas para el mantenimiento de sistemas de ventilación.
- Extintores y sistemas de supresión de incendios adaptados para ambientes confinados.

15.4 Recursos financieros

La disponibilidad de recursos financieros es esencial para asegurar la implementación y mantenimiento de los sistemas de seguridad necesarios y en este caso específico el control de los riesgos mineros causados por atmósfera contaminada o viciada. Sin el financiamiento adecuado, la adquisición de tecnología avanzada y la capacitación continua serán inalcanzables.

Elementos clave

- Dependiendo del tipo de yacimiento y la clasificación de la mina, se hace necesario la destinación de mayores recursos financieros para equipos de medición, control y monitoreo en la atmósfera minera (Decreto 1886, 2015, art. 47,48 y 58).
- Inversión en tecnología actualizada para detección de gases y ventilación.
- Manejo de actividades y recursos en mantenimiento de labores de ventilación.
- Presupuesto para capacitación continua de personal.
- Respaldo y confianza en el proceso por parte de la alta gerencia.
- Fondos para la adquisición de equipos de protección personal y su renovación periódica.
- Recursos para la contratación de expertos en gestión del riesgo causado por atmósfera contaminada o viciada.

15.5 Recursos institucionales

Las instituciones tanto públicas como privadas desempeñan un rol vital en la creación de regulaciones, el seguimiento de su cumplimiento y el apoyo en situaciones de emergencia.

Elementos clave

- Instituciones gubernamentales de control y supervisión, como el Ministerio de Minas y Energía y la ANM.
- Colaboración con organismos de emergencia y rescate.
- Alianzas con empresas privadas para proveer tecnología y servicios especializados.
- Organismos internacionales de seguridad minera que brinden y actualicen directrices y estándares.



15.6 Recursos de información

Para una gestión efectiva del riesgo es esencial disponer de información actualizada y accesible sobre las condiciones ambientales dentro de la mina.

Elementos clave

- Monitoreo constante de la calidad del aire y registro de datos en tiempo real.
- Informes y estudios de riesgos por atmosfera contaminada y termo ambientales.
- Bases de datos sobre incidentes previos y lecciones aprendidas.
- Planes de emergencia y protocolos de actuación basados en análisis de riesgos.

15.7 Recursos para capacitación

La formación continua de los trabajadores es vital para asegurar que estén preparados para responder ante los riesgos que se generan en una atmósfera viciada. Las capacitaciones deben ser periódicas y actualizadas según los avances tecnológicos y normativos.

Elementos clave

- Programas de entrenamiento en la identificación de gases mineros.
- Simulacros de emergencia para el manejo de incidentes en minas subterráneas.
- Capacitación en el uso adecuado de equipos de protección personal y sistemas de ventilación.
- Cursos sobre nuevas tecnologías de monitoreo y control de atmósferas viciadas.

15.8 Relación de actividades y recursos disponibles

A continuación, se presenta la tabla 78 que relaciona las principales actividades necesarias para la gestión del riesgo en atmósferas contaminadas o viciadas y los recursos requeridos para cada una.

Tabla 78

Principales actividades en Gestión del riesgo en atmosferas contaminadas o viciadas y los recursos requeridos

ACTIVIDAD	RECURSOS HUMANOS	RECURSOS TECNOLÓGICOS	RECURSOS MATERIALES	RECURSOS FINANCIEROS	RECURSOS INSTITUCIONALES	RECURSOS DE INFORMACIÓN	RECURSOS PARA CAPACITACIÓN
IDENTIFICACIÓN DE GASES TÓXICOS Y EXPLOSIVOS	Ingenieros especialistas en SG SST y técnicos especializados.	Detectores de gases portátiles y fijos.	Máscaras y filtros de aire.	Inversión en equipos de monitoreo.	Supervisión por parte del Ministerio de Minas y energía y autoridad minera ANM.	Base de datos de calidad del aire.	Cursos de manejo de detectores de gases.
INSTALACIÓN Y MANTENIMIENTO DE VENTILACIÓN	Personal técnico en ventilación.	Sistemas de ventilación automatizados.	Herramientas de mantenimiento.	Presupuesto para actualización de sistemas.	Empresas privadas de suministro de ventilación.	Planes de mantenimiento preventivo.	Formación en mantenimiento de sistemas de ventilación.
PREPARACIÓN PARA EMERGENCIAS	Brigadas de rescate y personal de emergencia.	Equipos de comunicación y alarmas.	Equipos de rescate y primeros auxilios.	Fondos para simulacros y adquisición de equipos.	Colaboración con cuerpos de rescate locales.	Protocolos de emergencia y simulacros anteriores.	Simulacros y capacitación en respuesta a emergencias.
MONITOREO CONTINUO DE LA CALIDAD DEL AIRE	Personal de análisis de información, supervisión y control.	Sistemas de monitoreo en tiempo real.	Equipos de comunicación.	Presupuesto para sistemas de monitoreo avanzado.	Alianzas con empresas proveedoras de tecnología.	Informes en tiempo real sobre condiciones atmosféricas.	Capacitación en manejo e interpretación de datos.



INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO

Este capítulo incluye las herramientas necesarias para realizar el monitoreo.

16.1 Tipos de instrumentos de monitoreo

La implementación de un sistema eficaz de monitoreo en minería subterránea requiere la selección adecuada de instrumentos que permitan evaluar en tiempo real las condiciones ambientales y operativas. Antes de detallar los principales tipos de sensores y equipos de monitoreo, es importante realizar una descripción de las ventajas y desventajas de los equipos portátiles en comparación con los equipos estacionarios.

Tabla 79

Análisis de equipos de monitoreo

ASPECTO	PORTÁTILES	ESTACIONARIOS
Movilidad	Alta, fáciles de transportar	Baja, fijos en puntos específicos
Costo	Menor inversión inicial	Mayor inversión inicial
Monitoreo continuo	Limitado a la duración de la batería	Ideal para monitoreo 24/7
Cobertura	Localizada	Integral, en múltiples ubicaciones
Mantenimiento	Más frecuente pero sencillo	Especializado, menos frecuente
Flexibilidad	Alta, adaptable a situaciones cambiantes	Baja, requiere planificación para su instalación

El uso combinado de equipos portátiles y estacionarios es la mejor práctica para complementar el sistema de monitoreo. Los equipos portátiles son ideales para inspecciones diarias y situaciones específicas, mientras que los equipos estacionarios proporcionan monitoreo continuo y datos históricos, lo que permite realizar análisis detallados.

16.1.1 Sensores de calidad del aire

Estos sensores son fundamentales para detectar y medir la concentración de gases, oxígeno (O₂) y partículas en la atmósfera minera, asegurando que los niveles se mantengan dentro de los límites seguros establecidos por la normativa vigente.

- **Sensores de gases tóxicos y explosivos:** utilizados para detectar la presencia de gases como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), anhídrido sulfuroso (SO₂) y otros gases peligrosos. Estos sensores emplean tecnologías como la electroquímica, infrarrojos no dispersivos (NDIR) y catalítica.
- **Sensores de oxígeno:** miden la concentración de oxígeno en el aire, alertando sobre niveles bajos que puedan comprometer la salud de los trabajadores.
- **Sensores de partículas (PM10 y PM2.5):** detectan la presencia de partículas suspendidas en el aire, como polvo y aerosoles, que pueden afectar la salud respiratoria.

16.1.2 Sensores de flujo y presión de aire

El control del flujo y la presión del aire es vital para mantener una ventilación adecuada en las atmósferas mineras subterráneas, además de asegurar la calidad del aire del personal que allí labora.

- **Anemómetros:** miden la velocidad del aire del circuito de ventilación de la mina, permitiendo calcular el flujo sea suficiente para diluir y remover contaminantes, así como la cantidad de aire requerido para unas condiciones ambientales adecuadas de las personas. Los sensores de velocidad instalados en las galerías de operación de ventiladores deben ser capaces de operar en velocidades de aire fluctuantes y en velocidades mínimas (desde 0.5 m/s).
- **Manómetros diferenciales:** miden la diferencia de presión entre dos puntos, permitiendo evaluar la eficiencia del sistema de ventilación y detectar obstrucciones o pérdidas de carga. Se recomienda instalar sensores de

caída de presión en ventiladores para monitorear dicha variable y obtener finalmente el caudal.

- **Sensores de caudal:** calculan el volumen de aire que circula por los conductos, evaluando constantemente que se cumplan los requerimientos de ventilación establecidos por la normativa. Los sensores supervisan las entradas y salidas principales en las proximidades de los ventiladores, así como la distribución del caudal en distintos puntos.

16.1.3 Equipos de monitoreo remoto

La tecnología de monitoreo remoto permite supervisar en tiempo real las atmósferas mineras subterráneas y operativas desde una ubicación centralizada, mejorando la capacidad de respuesta ante situaciones de riesgo.

Sistemas de monitoreo continuo: integran múltiples sensores conectados a una red que transmite datos en tiempo real a una sala de control. Estos sistemas permiten la detección temprana de anomalías y la implementación inmediata de medidas correctivas. Por ejemplo, las estaciones de calidad del aire pueden monitorear con precisión la velocidad y dirección del flujo de aire, los niveles de gas, la presión barométrica y las temperaturas de bulbo húmedo/seco en tiempo real. Esta información se puede utilizar para ajustar la ventilación principal y auxiliar según sea necesario.

Sistemas de alerta temprana: son equipos que emiten alarmas visuales y sonoras cuando se detectan condiciones peligrosas, permitiendo la evacuación oportuna y la implementación de medidas de control. Estos sistemas son fundamentales para prevenir accidentes y garantizar la seguridad de los trabajadores.

La selección e implementación de estos instrumentos deben realizarse considerando las características específicas de cada operación minera, las normativas vigentes y las mejores prácticas de la industria. Es fundamental que los equipos cuenten con certificaciones que avalen su precisión y confiabilidad, y que se establezcan programas de mantenimiento y calibración periódica para asegurar su correcto funcionamiento.



16.2 Métodos de monitoreo y registro

El monitoreo y registro de datos en minería son tareas fundamentales para garantizar la seguridad y salud en el trabajo, así como la eficiencia operativa. A través de esta información, se pueden analizar diversos aspectos del comportamiento de las atmósferas mineras subterráneas, lo que permite tomar decisiones estratégicas en los sistemas de ventilación. Este apartado detalla los métodos empleados para supervisar las condiciones ambientales y operativas, asegurando un control riguroso y un análisis fiable de las variables críticas.

16.2.1 Monitoreo continuo

El monitoreo continuo implica la supervisión constante de las condiciones ambientales y operativas mediante sensores y equipos fijos conectados a sistemas de control centralizado. Este enfoque es fundamental para la detección temprana de cambios en variables críticas, como la concentración de gases, el flujo y la presión del aire, lo que permite una respuesta inmediata ante posibles riesgos.

Tecnologías empleadas:

- Sistemas de sensores fijos: detectores de gases tóxicos monóxido de carbono (CO), metano (CH₄), anhídrido sulfuroso (SO₂) y niveles de oxígeno (O₂).
- Estaciones de monitoreo remoto: equipos integrados que transmiten datos en tiempo real a salas de control.
- Anemómetros y sensores de caudal: miden el flujo de aire para garantizar una ventilación adecuada.

Figura 67

Equipo de monitoreo continuo (Sensor estático)

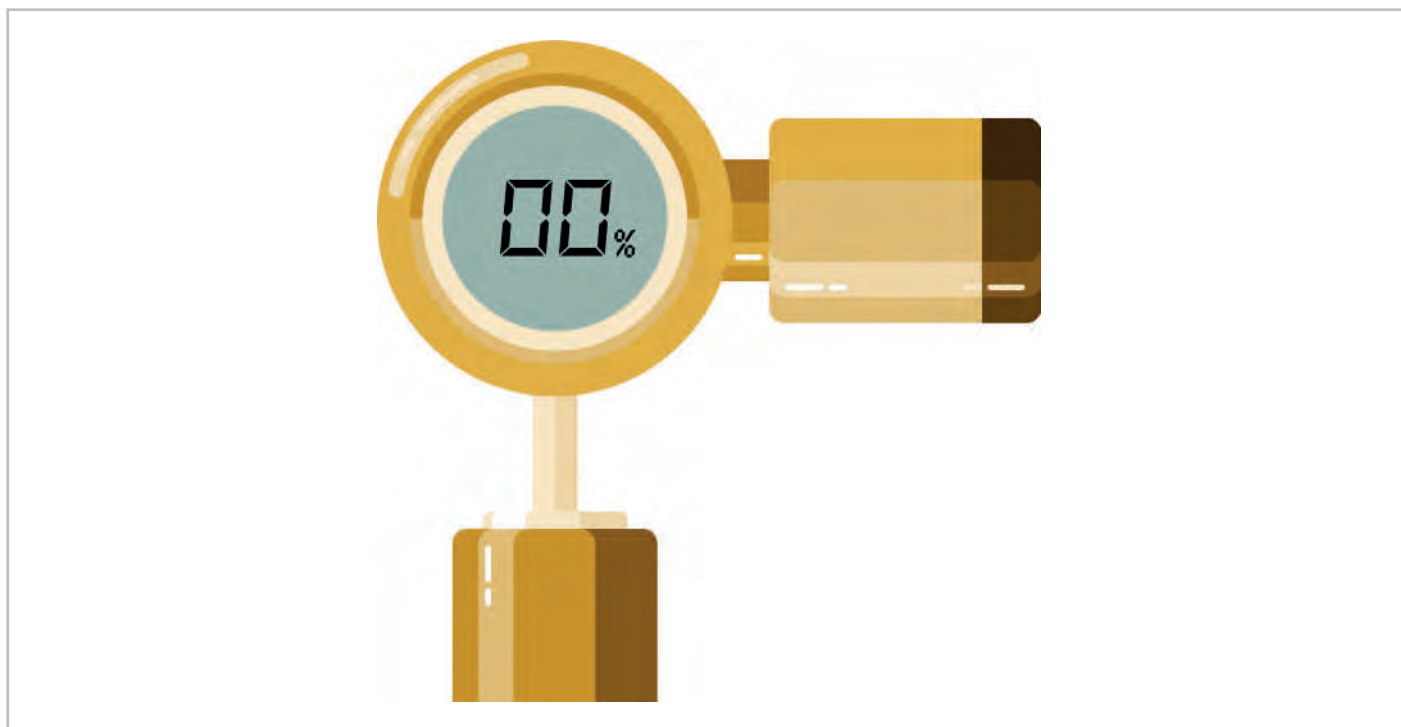


Tabla 80

Ventajas y desventajas del monitoreo continuo

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Permite el seguimiento constante y en tiempo real de las condiciones ambientales. • Se pueden instalar en múltiples sitios para una supervisión integral. • Automatización de alarmas y alertas tempranas en caso de niveles críticos. • Integración con sistemas de gestión del riesgo y software analítico. • Mayor precisión, ya que están diseñados para mediciones constantes en condiciones adversas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere infraestructura de comunicación confiable, como redes inalámbricas o cableadas. • Costos iniciales elevados para instalación y configuración. • Se requiere de mantenimiento especializado, con revisiones periódicas.

16.2.2 Monitoreo portátil

El monitoreo periódico se realiza en intervalos predefinidos mediante instrumentos portátiles o inspecciones manuales. Este método es ideal para complementar el monitoreo continuo, especialmente en áreas de difícil acceso o condiciones de bajo riesgo.

Tecnologías empleadas:

- Dispositivos portátiles de detección de gases: detectores multigas para mediciones puntuales en diferentes áreas de la mina.
- Anemómetros portátiles: miden la velocidad del aire en ubicaciones específicas.
- Monitores de partículas: evaluación de niveles de polvo y partículas suspendidas.

Figura 68

Equipo de monitoreo portátil (Multidetector)

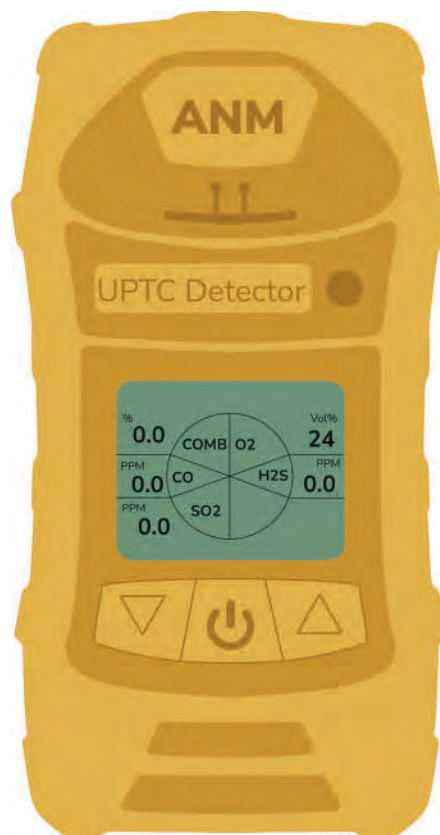


Tabla 81

Ventajas y desventajas del monitoreo portátil

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none">• Flexibilidad para adaptarse a diferentes puntos de medición según la necesidad.• Movilidad que permite realizar las mediciones en diferentes ubicaciones.• Bajo costo en comparación con sistemas continuos.• Permite verificaciones independientes para validar el funcionamiento de los sistemas fijos.• Respuesta inmediata, ya que permite revisar los datos en tiempo real.	<ul style="list-style-type: none">• Depende del personal para su implementación, lo que puede generar variaciones en la precisión.• No detecta cambios repentinos fuera de los intervalos de medición.• Autonomía limitada, ya que funciona con baterías y depende de los turnos, como de las cargas.• Mantenimiento frecuente que requiere de calibraciones periódicas.• Capacidad limitada por monitorear menos parámetros simultáneos.

16.2.3 Registro y almacenamiento de datos

El registro y almacenamiento de datos es el proceso de recopilar, organizar y conservar la información generada por los sistemas de monitoreo. Estos registros son fundamentales para la trazabilidad, análisis histórico, toma de decisiones y cumplimiento normativo.

Elementos clave del sistema de registro:

- Bases de datos centralizadas: plataformas digitales que consolidan la información en tiempo real.
- Protocolos de almacenamiento seguro: uso de tecnologías de respaldo y encriptación para garantizar la integridad de los datos.
- Sistemas de visualización: herramientas gráficas para facilitar el análisis de tendencias y patrones.

Tabla 82

Ventajas y desventajas de los registros de datos atmosféricos

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none">• Facilita la generación de informes técnicos y auditorías.• Proporciona datos históricos para análisis predictivo y mejora continua.• Cumple con las exigencias legales de trazabilidad y reporte.	<ul style="list-style-type: none">• Requiere infraestructura robusta y personal capacitado para la gestión de datos.• Los sistemas deben ser compatibles con los equipos de monitoreo instalados.

16.3 Normas y protocolos de mantenimiento

El mantenimiento adecuado de los equipos de monitoreo en minería subterránea es esencial para garantizar su funcionamiento confiable y preciso en condiciones adversas. Este apartado describe los aspectos técnicos relacionados con la calibración, el mantenimiento preventivo y la revisión periódica de los dispositivos, detallando procedimientos, ventajas y ejemplos para cada actividad.

16.3.1 Normativa sobre mantenimiento de sensores y equipos de medición

A continuación, se describe la normativa nacional e internacional aplicable a los protocolos de mantenimiento de equipos de monitoreo y sensores en minería subterránea, destacando los tipos de protocolos, los tiempos de mantenimiento y las acciones específicas de mantenimiento preventivo y correctivo.

- Decreto 1886 de 2015 - Reglamento de Seguridad en las Labores Mineras Subterráneas (ver tabla 83).
- Decreto 944 de 2022 – Actualización del Decreto 1886 de 2015 (ver tabla 84).
- ISO 9001:2015 - Sistemas de Gestión de la Calidad (ver tabla 85).
- NIOSH (ver tabla 86).
- OSHA - Estándares de Ventilación y Calidad del Aire (ver tabla 87).

Tabla 83

Protocolo de mantenimiento (Decreto 1886, 2015)

TIPO DE PROTOCOLO	TIEMPOS	ACCIONES PREVENTIVAS	ACCIONES CORRECTIVAS
Mantenimiento de equipos de monitoreo y control de calidad del aire en labores subterráneas.	Sensores y equipos de medición continua deben verificarse periódicamente, al menos trimestralmente o según recomendaciones del fabricante.	<ul style="list-style-type: none"> • Limpieza de sensores y conexiones. • Verificación del estado de baterías y componentes electrónicos. • Calibración periódica de dispositivos para asegurar precisión. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sustitución de componentes dañados. • Reprogramación de dispositivos que presenten errores de lectura. • Reparación de circuitos y restauración de configuraciones originales.

Tabla 84

Protocolo de mantenimiento, (Decreto 944, 2022)

TIPO DE PROTOCOLO	TIEMPOS	ACCIONES PREVENTIVAS	ACCIONES CORRECTIVAS
Revisión técnica de equipos asociados al control de atmósferas viciadas.	Inspecciones mensuales y revisiones técnicas semestrales obligatorias.	<ul style="list-style-type: none"> Implementación de cronogramas de mantenimiento planificado. Monitoreo constante del estado de los sistemas fijos. 	<ul style="list-style-type: none"> Reparación inmediata en caso de fallos en sistemas críticos. Reemplazo de sensores fuera de tolerancia.

Tabla 85

Protocolo de mantenimiento, según ISO 9001:2015

TIPO DE PROTOCOLO	TIEMPOS	ACCIONES PREVENTIVAS	ACCIONES CORRECTIVAS
Mantenimiento de equipos utilizados en procesos críticos, como monitoreo ambiental.	Los tiempos son definidos por las recomendaciones del fabricante, pero deben integrarse a un sistema de gestión de calidad.	<ul style="list-style-type: none"> Registro de todas las actividades de calibración y mantenimiento. Inspección de equipos en intervalos regulares para prevenir desviaciones en las mediciones. 	<ul style="list-style-type: none"> Identificación y eliminación de la causa raíz de fallos. Ajustes a procedimientos de mantenimiento para evitar recurrencias.

252

Tabla 86

Protocolo de mantenimiento, según NIOSH

TIPO DE PROTOCOLO	TIEMPOS	ACCIONES PREVENTIVAS	ACCIONES CORRECTIVAS
Mantenimiento de equipos de detección de gases y partículas.	Revisión semanal para equipos portátiles y mensual para sistemas fijos.	<ul style="list-style-type: none"> Verificación de alarmas y señales audibles. Limpieza de sensores ópticos para evitar interferencias en la medición. 	<ul style="list-style-type: none"> Sustitución de sensores dañados o agotados. Reparación de sistemas de comunicación y transmisión de datos.

Tabla 87

Protocolo de mantenimiento, según OSHA

TIPO DE PROTOCOLO	TIEMPOS	ACCIONES PREVENTIVAS	ACCIONES CORRECTIVAS
Supervisión del funcionamiento de los sistemas de ventilación y sensores de calidad del aire.	Inspecciones trimestrales para sistemas fijos.	<ul style="list-style-type: none"> -Mantenimiento de ventiladores y ductos para asegurar flujo constante de aire. -Calibración de sensores de monitoreo continuo. 	<ul style="list-style-type: none"> -Reparación inmediata de cualquier sistema que presente lecturas erráticas. -Reemplazo de partes críticas en los ventiladores o sensores.

La normativa anterior destaca la importancia de definir cronogramas específicos para el mantenimiento preventivo y correctivo de equipos de monitoreo. Esto incluye la limpieza, calibración, inspección y reparación de componentes, asegurando que los dispositivos operen de manera confiable y conforme a los estándares establecidos. Las organizaciones deben incorporar estas prácticas en sus planes operativos para mantener la seguridad en las atmósferas mineras subterráneas y cumplir con los requisitos regulatorios.

16.3.2 Verificación de los equipos, sensores y medidores

La calibración asegura que los sensores y equipos de monitoreo ofrezcan mediciones precisas y estén alineados con valores de referencia estandarizados. Se realiza ajustando los equipos según parámetros establecidos, usando patrones o dispositivos de referencia confiables.

Procedimiento general

- Preparar un entorno limpio y estable, libre de interferencias, para realizar la calibración.
- Conectar los equipos a una fuente de referencia conocida, como gases patrón o sistemas calibradores certificados.

- Ajustar los valores registrados por el sensor hasta que coincidan con los valores del patrón.
- Documentar los resultados y almacenar un informe detallado de la verificación.

Ventajas

- Garantiza la precisión en la detección de gases y parámetros críticos.
- Reduce errores en la medición, minimizando riesgos operativos.
- Mejora la confiabilidad de los datos utilizados para la toma de decisiones.

16.3.3 Planes de mantenimiento preventivo de equipos

El mantenimiento preventivo consiste en realizar inspecciones y actividades planificadas para preservar el estado funcional de los equipos, reduciendo la probabilidad de fallos inesperados.

Procedimientos

1. Definir un cronograma de mantenimiento basado en las recomendaciones del fabricante.

2. Inspeccionar los componentes clave del equipo, como sensores, conectores y baterías.
3. Limpiar las superficies ópticas y mecánicas para eliminar acumulaciones de polvo y residuos.
4. Sustituir piezas desgastadas o propensas a fallar, como filtros, juntas o baterías.
5. Probar el funcionamiento general del equipo tras el mantenimiento.

Ventajas

- Aumenta la vida útil de los dispositivos y mejora su desempeño.
- Reduce interrupciones operativas y costos asociados a reparaciones mayores.
- Permite identificar problemas potenciales antes de que afecten la operación.

16.3.4 Revisión periódica de los equipos

La revisión periódica implica una evaluación exhaustiva de los equipos de monitoreo para detectar fallas, verificar su desempeño y garantizar su cumplimiento con los estándares operativos.

Procedimientos

1. Desmontar los equipos de sus ubicaciones operativas y trasladarlos a un área de revisión técnica.
2. Inspeccionar la integridad estructural del equipo, buscando grietas, corrosión o piezas flojas.
3. Realizar pruebas funcionales, comparando las lecturas del equipo con dispositivos de referencia confiables.
4. Emitir un informe técnico que detalle las observaciones y las acciones correctivas realizadas.
5. Reinstalar los equipos y realizar una prueba operativa final para validar su desempeño.

Ventajas

- Permite identificar y corregir fallas antes de que se conviertan en problemas críticos.
- Garantiza la precisión y confiabilidad del equipo en operaciones continuas.
- Mejora la seguridad al mantener los sistemas en óptimas condiciones.

16.4 Procedimientos de alerta y evacuación

La activación de alarmas es el primer paso para alertar a los trabajadores de una emergencia, mientras que los protocolos de evacuación detallan las acciones necesarias para garantizar la salida segura y eficiente del personal. Estos procedimientos deben integrarse con sistemas de monitoreo continuo para detectar anomalías automáticamente y activar respuestas inmediatas.

16.4.1 Activación de alarmas

Alertar a los trabajadores sobre un riesgo inminente o en curso, como niveles peligrosos de gases, explosiones, incendios o fallos estructurales, es clave para evitar siniestros, por lo que se propone las siguientes acciones:

▪ Configuración de sistemas automáticos

- Conectar los sensores de monitoreo continuo a sistemas de alarma (auditivas, visuales o vibración) que se activan al detectar condiciones peligrosas como:
 - Concentraciones de monóxido de carbono (CO) mayor o igual a 25 ppm.
 - Niveles de oxígeno (O₂) inferiores o iguales a 19.5%.
 - Detección de metano (CH₄) mayor o igual a 1%.

▪ Tipos de alarmas

- Sonoras: sirenas o altavoces con tonos diferenciados para emergencias específicas.
- Visuales: luces estroboscópicas en áreas con alto ruido ambiental.
- Vibratorias: equipos personales como detectores portátiles con alarmas vibrantes para advertir a los trabajadores.

- **Verificación manual:** supervisores deben realizar inspecciones visuales o mediaciones in situ tras la activación para confirmar la naturaleza del peligro.

Ventajas

Detecta y notifica riesgos en tiempo real.

Activas respuestas inmediatas, minimizando el tiempo de exposición.

Mejora la cobertura en áreas remotas o de difícil acceso mediante sistemas interconectados.

16.4.2 Protocolos de evacuación

Garantizar una salida ordenada, segura y eficiente de los trabajadores de las áreas afectadas en una emergencia minera es crucial para minimizar los riesgos y proteger la vida de los trabajadores. Este proceso no solo debe ser rápido, sino también planificado y ejecutado de manera que se minimice la exposición adicional a los peligros ya presentes, como la presencia de atmósferas contaminadas, incendios, o explosiones.

Acciones específicas

1. Identificación de rutas de evacuación

- Mantenimiento constante de rutas señalizadas y libres de obstáculos.
- Uso de iluminación de emergencia para guiar al personal en condiciones de baja visibilidad.

2. Designación de puntos de encuentro

- Establecer áreas seguras dentro o fuera de la mina, dependiendo de la naturaleza de la emergencia.
- Identificar espacios con suministro de aire limpio para refugio temporal.

3. Activación de líderes de evacuación

- Supervisores o brigadistas designados guían al personal hacia los puntos de encuentro.
- Equiparlos con radios para coordinarse con la sala de control.

4. Coordinación con equipos de rescate:

- Notificar a las estaciones de salvamento minero locales.
- Asegurar que los trabajadores sean contabilizados en los puntos de reunión.

5. Simulacros periódicos

- Realizar ejercicios de evacuación semestrales para familiarizar al personal con las rutas y protocolos.

Ventajas

1. Reduce el tiempo necesario para evacuar áreas críticas.
2. Mejora la organización y minimiza el pánico entre los trabajadores.
3. Incrementa la efectividad de la respuesta en situaciones reales gracias a simulacros previos.





PLAN DE PREVENCIÓN, PREPARACIÓN Y RESPUESTA ANTE EMERGENCIAS CAUSADAS POR ATMOSFERAS CONTAMINADAS O VICIADAS

El plan de prevención, preparación y respuesta ante emergencias asociadas a atmósferas contaminadas o viciadas en el ámbito de la minería subterránea en Colombia es crucial para garantizar la seguridad de los trabajadores y minimizar el impacto ambiental. Este capítulo proporciona una descripción detallada y sistemática de la identificación, evaluación y gestión de los riesgos relacionados con la calidad del aire en ambientes subterráneos. Se establecen protocolos específicos para la detección de contaminantes, la implementación de medidas preventivas basadas en principios de ingeniería, así como prácticas operativas seguras, y un marco claro para la respuesta ante incidentes, asegurando una coordinación eficaz entre los distintos actores involucrados.

La estructura técnica del capítulo está alineada con las normativas locales e internacionales vigentes, lo que promueve un enfoque fundamentado en la evidencia y en la mejora continua de las condiciones de trabajo. Los objetivos del plan comprenden la prevención de emergencias mediante la adopción de medidas adecuadas, la preparación a través del desarrollo de capacidades y recursos necesarios, y la respuesta eficiente ante emergencias, con el fin de proteger tanto a los trabajadores como a los activos de la empresa.

17.1 Alcance

Este plan se aplica a todas las operaciones mineras subterráneas en Colombia bajo la verificación de la ANM, abarcando desde la identificación de riesgos hasta la ejecución de respuestas efectivas ante situaciones de emergencia. Involucra a todo el personal de la empresa, contratistas, subcontratistas y cualquier otra entidad involucrada en las actividades mineras subterráneas.

17.2 Importancia del plan

Dado el entorno de alto riesgo inherente a las operaciones mineras subterráneas, la implementación de un plan robusto de prevención y respuesta ante emergencias es fundamental para:

- Proteger la vida y salud de los trabajadores.
- Garantizar la continuidad operacional y minimizar interrupciones.
- Cumplir con las regulaciones nacionales e internacionales en materia de seguridad y salud ocupacional.
- Mantener una reputación corporativa positiva frente a comunidades y autoridades.

17.3 Revisión y actualización

El plan será revisado y actualizado periódicamente para asegurar su pertinencia y eficacia, incorporando lecciones aprendidas de simulacros y eventos reales, así como cambios en normativas y mejores prácticas del sector.

17.4 Administración de emergencias

La gestión de emergencias por atmósferas contaminadas o viciadas se fundamenta en modelos organizacionales que definen la estructura organizativa y los recursos necesarios para garantizar una atención eficiente y eficaz. De esta manera, se protege la vida de los trabajadores y personas externas que tienen una relación directa o indirecta con la operación minera.

Cada operación minera debe establecer la estructura más adecuada para atender posibles emergencias, teniendo en cuenta el nivel de riesgo identificado en el plan de gestión de riesgos y priorizando estos según su nivel de criticidad.

En esta guía se propone la siguiente estructura:

Recurso humano: está definido por las personas que son asignadas a unos roles específicos en niveles jerárquicos previamente establecidos.

17.4.1 Nivel estratégico

Comité operativo de emergencias (COE): se encuentra dentro del nivel estratégico, y está compuesto por un grupo de personas con cargos que deben tener unas características especiales, y dependerá de ellos como organizadores y responsables para la atención de las emergencias que la respuesta sea óptima y adecuada.

El COE, puede estar conformado por:

Participantes	Perfil	Funciones
<ul style="list-style-type: none"> Responsable del SGSST Jefe de Mina Jefe de turno Supervisores Representante del COPSST Coordinador de Brigadas de emergencia 	<ul style="list-style-type: none"> Conocimiento de la operación y del plan de ventilación. Conocimiento y manejo de los riesgos por atmósferas viciadas Autoridad Capacidad de manejo y gestión administrativa Liderazgo, pensamiento estratégico. Motivación y compromiso. 	<ul style="list-style-type: none"> Formular, dirigir, coordinar y asesorar las actividades, referidas al manejo de situaciones de emergencias como consecuencia de la materialización de los riesgos por atmósferas viciadas o explosivas Gestionar y controlar el plan de prevención, preparación y respuesta ante emergencias (Diseño, responsables, funciones y actividades, PON etc.) Diseñar y promover programas de capacitación a todo el personal, para la atención de emergencias. Coordinar con instituciones externas (ANM, Entidades territoriales), los mecanismos de apoyo para establecer la respuesta y rehabilitación teniendo en cuenta los planes de gestión del riesgo local y los definidos por el grupo de salvamento minero.

Participantes	Perfil	Funciones
<ul style="list-style-type: none"> Responsable del SGSST Jefe de Mina Jefe de turno Supervisores Representante del COPSST Coordinador de Brigadas de emergencia 	<ul style="list-style-type: none"> Conocimiento de la operación y del plan de ventilación. Conocimiento y manejo de los riesgos por atmosferas viciadas Autoridad Capacidad de manejo y gestión administrativa Liderazgo, pensamiento estratégico. Motivación y compromiso. 	<ul style="list-style-type: none"> Gestionar y garantizar la señalización tanto interna como externa (Rutas de evacuación) Definir los sistemas de comunicación que se usaran antes, durante y después de la emergencia Organizar y promover la conformación de las brigadas de emergencia, vinculando a trabajadores de diferentes áreas y turnos. Gestionar y disponer de los insumos necesarios para una atención eficiente y eficaz de la emergencia. Programar simulacros al menos una vez al año, para verificar la eficiencia de los planes de atención establecidos. Establecer procedimiento para la vuelta a la calma y operatividad de la mina después de la emergencia.

Sistema de Comando de Incidentes (SCI)

El Sistema de Comando de Incidentes (SCI) como sistema de gestión permite el manejo efectivo y eficiente de incidentes integrando una combinación de instalaciones, equipo, personal, procedimientos y comunicaciones que operan dentro de una estructura organizacional común, diseñada para habilitar este tipo de manejo de los incidentes. Una premisa básica del SCI es su aplicación amplia (USAID & OFDA/LAC, 2013).

Se usa para organizar las operaciones tanto a corto como a largo plazo a nivel de campo para una amplia gama de emergencias, desde incidentes pequeños hasta complejos, tanto naturales como causados por el hombre.

Figura 69

Combinación de elementos de un SCI



Principios del SCI

El SCI está basado en las fases del proceso de administración y en el análisis de los problemas encontrados durante la respuesta a incidentes y manejo de eventos, de acuerdo con ello, se establecen 14 principios. Estos tienen vínculos comunes que los identifican, por lo que se les agrupa en 6 características: estandarización, mando, planificación y estructura organizacional, instalaciones y recursos, manejo de las comunicaciones e información y profesionalismo.

Figura 70

Principios y características SCI

CARACTERÍSTICAS SCI	PRINCIPIOS SCI
Estandarización	<ul style="list-style-type: none">• Terminología común
Mando	<ul style="list-style-type: none">• Establecer y transferir el mando• Cadena de mando y unidad de mando• Comando unificado
Planificación y Estructura Organizacional	<ul style="list-style-type: none">• Manejo por objetivos• Plan de acción del incidente• Alcance de control• Organización modular
Instalaciones y Recursos	<ul style="list-style-type: none">• Instalaciones• Manejo integral de los recursos
Manejo de las Comunicaciones e Información	<ul style="list-style-type: none">• Instalaciones• Manejo integral de los recursos
Profesionalismo	<ul style="list-style-type: none">• Responsabilidad• Oportunidad y pertinencia de los recursos

Responsabilidades del SCI

1. Asumir el mando, asegurar la autoridad de acuerdo con la política y con los procedimientos de la institución.
2. Establecer el Puesto de Comando (PC).
3. Velar permanentemente por la seguridad en el incidente.
4. Evaluar la situación.
5. Determinar los objetivos de incidente, sus prioridades inmediatas, la(s) estrategia(s) y táctica(s) a seguir.
6. Establecer el nivel de organización necesaria, monitorear continuamente la operación y la efectividad de la organización.
7. Administrar los recursos.
8. Elaborar y/o aprobar e implementar el Plan de Acción del Incidente (PAI).
9. Coordinar las actividades del Staff de Comando y Secciones.
10. Aprobar solicitudes de recursos adicionales o su desmovilización.
11. Autorizar la entrega de información a los medios noticiosos.

12. Aprobar la desmovilización de los recursos cuando sea apropiado.
13. Asegurar que los reportes pos-incidentes estén completos.
14. Presentar el informe final.

17.5 Niveles de emergencia

Antes de definir el procedimiento más adecuado para la atención de una emergencia por atmósferas viciadas o contaminadas, se propone una clasificación del nivel de la emergencia, basada en los efectos potenciales que el incidente o accidente pueda causar tanto a la salud de los trabajadores como a la integridad estructural de la mina. Esta clasificación facilitará una planificación adecuada y un control eficiente del evento, permitiendo tomar decisiones oportunas y proporcionales a la magnitud del riesgo.

Tabla 88

Niveles de emergencia

NIVEL	DESCRIPCIÓN	ATENCION/CONTROL
Nivel I (Leve)	El evento tiene como consecuencias efectos a la salud que no generan incapacidad (irritaciones leves en piel y ojos, así como leves mareos). Los efectos a la salud pueden ser tratados con primeros auxilios. Asimismo, los daños a la infraestructura de la mina son leves. En caso de conato de inicio de incendio de equipos eléctricos o mecánicos, estos pueden ser controlados con extintores portátiles.	El evento puede ser controlado de manera inmediata por los trabajadores expuestos, sin requerir la intervención de la brigada de emergencia. En estos casos, un control efectivo implica optimizar la ventilación, ya sea incrementando el caudal de aire o implementando un sistema de ventilación aspirante, especialmente si el gas presente es de alta densidad. Estas acciones permiten mitigar rápidamente los riesgos, restaurando las condiciones seguras en el área afectada.
Nivel II (Moderado)	El evento se clasifica como de naturaleza mediana, ya que pudo ocasionar lesiones que resultan en incapacidades temporales, tales como intoxicaciones, desmayos o deshidrataciones provocadas por un aumento de temperatura y humedad. Sin embargo, no se reportan daños en la infraestructura de la mina.	El evento puede ser controlado con apoyo de la brigada de emergencia. Las concentraciones de gases pudieron presentar incrementos súbitos. La brigada debe hacer una inspección en el área afectada una vez se controle el incidente y dejar registros

Nivel III (Grave)

El evento se clasifica como de gran magnitud debido a su capacidad de ocasionar lesiones con incapacidad permanente o la muerte, derivadas de situaciones como explosiones, conatos de incendio, intoxicaciones o asfixias, entre otros. Adicionalmente, este tipo de incidentes resulta en pérdidas significativas que afectan las vías de la mina, los elementos de sostenimiento, la maquinaria y los equipos.

La atención a este tipo de eventos requiere la remisión inmediata a entidades externas especializadas, debido a la imposibilidad de controlarlo únicamente con el equipo de atención de emergencias de la mina. Entre estas entidades se incluyen los grupos de salvamento minero de la ANM, la Defensa Civil, la Cruz Roja y la Policía.

En zonas afectadas por conatos de incendio, se debe interrumpir el acceso de oxígeno mediante la construcción de tabiques, complementando esta acción con un monitoreo permanente de las condiciones ambientales. En caso de explosiones, es esencial diluir las concentraciones de gases peligrosos y realizar un monitoreo constante para evaluar la estabilidad de las áreas afectadas, garantizando la seguridad antes de reanudar cualquier actividad en la mina.

17.6 Simulacros de emergencia

Los simulacros son actividades que permiten practicar los procedimientos establecidos para la atención de una emergencia ocasionada por presencia de atmósferas viciadas en explotaciones de minas subterráneas. Es interiorizar en el trabajador la forma correcta de actuar ante un evento que puede que no acarree consecuencias, o como puede llegar a ser catastrófico.

El desarrollo, mantenimiento y mejoramiento del Plan de Prevención, Preparación y Respuesta ante Emergencias será responsabilidad del Comité Operativo de Emergencias, con el respaldo del titular, operador o representante legal de la mina, y el apoyo de los trabajadores de la mina, contratistas y partes interesadas. Es fundamental que todos los actores involucrados en la emergencia estén capacitados para actuar de manera rápida, eficaz y oportuna, asegurando así la integridad física de las personas, la protección de las instalaciones de la mina y la preservación del medio ambiente.

17.6.1 Objetivos de la realización de los simulacros

- Evaluar, actualizar y mejorar el plan.
- Identificar puntos débiles o fallas en el desarrollo del plan existente.
- Identificar la capacidad de respuesta y la autonomía del personal de atención de la emergencia, teniendo en cuenta materiales y recursos.
- Evaluar el comportamiento y habilidades del personal en el manejo de la situación de riesgo, y de ser necesario hacer los refuerzos en su entrenamiento.
- Difundir el plan entre los trabajadores de la mina y capacitarlos para afrontar una situación de emergencia.
- Dar a conocer los sistemas de comunicación de emergencia, estas pueden ser lumínicas, sonoras y demás que aseguren una comunicación entendible.
- Identificar las instituciones que pueden acudir en apoyo en situaciones de emergencia. Tener listado de números telefónicos.

Existen 3 tipos de simulacros que el comité puede desarrollar para afianzar los conocimientos del personal en temas de emergencia:

1. **Simulacros programados:** son simulacros de conocimiento general. Todos los trabajadores saben la fecha y hora en que se realizara.
2. **Simulacros sorpresa o no programados:** los trabajadores no son informados de la fecha y hora de realización. Es una evaluación de conocimientos y comportamiento mucho más cercana a la realidad, y sus planes de mejora permiten optimizar con eficiencia los planes.
3. **Simulacros de reconocimiento parciales:** evalúan ciertas actividades o protocolos contenidos en el plan, que necesitan ser mejoradas.

Frecuencia: el personal nuevo como el antiguo deben estar debidamente capacitados y entrenados en los procedimientos de evacuación, asegurando que todos los trabajadores estén preparados para actuar de manera eficiente en caso de emergencia.

La participación de los simulacros es de carácter obligatorio para todo el personal de las minas sin importar el nivel jerárquico que se tenga.

La guía presenta las siguientes fases para el desarrollo de los simulacros:

- Planeación de la actividad
- Ejecución de la actividad
- Evaluación
- Seguimiento y control
- Mejora continua

Tabla 89

Fases para el desarrollo de los simulacros

FASES PARA EL DESARROLLO DE LOS SIMULACROS	
PLANEACION DE LA ACTIVIDAD	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Establecer la situación de riesgo a simular basado en los riesgos previamente evaluados y clasificados en el plan de gestión del riesgo. ▪ Establecer los recursos técnicos, humanos, económicos disponibles para la realización de la actividad. ▪ Definir las personas que participarán en el simulacro (personas lesionadas, personal administrativo, brigadistas, etc.) ▪ Establecer áreas donde se realizará el simulacro (frentes de explotación, zonas de conatos de incendio, vías principales, rutas de evacuación, obstáculos, etc.), sistemas de alarmas y comunicación y áreas de concentración de posibles evacuados). ▪ Institución a donde se remiten los lesionados, sistema de remisión, comunicación y transporte. ▪ Sistemas de información externa: contacto con familiares de posibles víctimas y gestión de medios de comunicación. ▪ Mecanismo de evaluación al finalizar el simulacro y la respectiva socialización de los resultados con todo el personal.

FASES PARA EL DESARROLLO DE LOS SIMULACROS

EJECUCIÓN	<ul style="list-style-type: none"> • Es la fase que requiere de más atención y compromiso por parte de las personas que participan en el simulacro: • Reunión del comité operativo de emergencias para ultimar detalles de la actividad. • Preparación de los trabajadores que representaran los lesionados • Supervisión del frente de trabajo donde se realizará la actividad, asegurar condiciones apropiadas de trabajo y ubicación de los observadores. • Declaración de alarma de emergencia. • Comunicación con entidades externas de apoyo ante emergencias. • Determinar si la evacuación será total o parcial, según la magnitud y el alcance del riesgo simulado. Impartir directrices del lugar de concentración de los lesionados e iniciar la evacuación. • Establecer el orden de evacuación basado en las prioridades de seguridad y • Llevar los lesionados a las zonas de concentración. • Instalación del centro de atención de lesionados. • Clasificación de lesionados y según el caso hacer remisión al centro de salud establecido. • Orden de finalización de la actividad • Evaluación y retroalimentación de la actividad
EVALUACION	<ul style="list-style-type: none"> • Analizar los resultados de la actividad, identificar oportunidades de mejora y establecer planes de acción concretos para optimizar futuras respuestas ante emergencias. • Diligenciar formatos de evaluación para que sean diligenciados por cada participante. • Evaluar el comportamiento y habilidades de los participantes, para establecer programas de reentrenamiento de las falencias identificadas por los observadores. • Verificar si las rutas de evacuación funcionaron como estaba previsto. • Evaluar el tiempo de evacuación. Si fue optimo o no según lo esperado. • Publicar y difundir las conclusiones del simulacro, evidenciando tanto aciertos como falencias identificadas.
SEGUIMIENTO Y CONTROL	<ul style="list-style-type: none"> • Esta fase permitirá evaluar de manera periódica los simulacros. • Capacitación entrenamiento y reentrenamiento y evaluación de estos. • Mantener registros actualizados del comportamiento sistemático de los simulacros • Establecer indicadores de seguimiento.
MEJORA	<ul style="list-style-type: none"> • El seguimiento y control garantizan que los procedimientos sean evaluados, corregidos y optimizados de manera oportuna. De esta manera, cuando ocurra una emergencia, todo el personal contará con el conocimiento y las habilidades necesarias para responder de manera eficaz, minimizando cualquier daño a las personas, al proyecto minero y al medio ambiente.

17.7 Identificación de amenazas, análisis de vulnerabilidad y riesgo

17.7.1 Metodología análisis de vulnerabilidad y riesgos

El procedimiento utilizado en la guía para la determinación del análisis de riesgo es de tipo cualitativo. Este enfoque permite evaluar las amenazas y la vulnerabilidad de las personas, recursos, sistemas y procesos mediante una gama de colores. Este sistema no constituye una forma de medición cuantitativa, sino que facilita la identificación visual y rápida de los niveles de riesgo. Así mismo, permite identificar observaciones que conducen a la formulación de acciones de prevención, mitigación y respuesta.

Tabla 90

Análisis de riesgo

ANÁLISIS DE RIESGO	
ACTIVIDAD	DEFINICIÓN
IDENTIFICACION DE AMENAZAS	Identificación de actividades o amenazas que impliquen riesgos durante las fases de desarrollo, preparación y explotación.
ESTIMACION DE PROBABILIDADES	Una vez identificadas las amenazas o posibles aspectos que podrían iniciar un evento, se debe estimar la probabilidad de ocurrencia del incidente o evento, considerando las características específicas de cada situación
ESTIMACION DE LAS VULNERABILIDADES	Estimación de la severidad de las consecuencias sobre los factores de vulnerabilidad que podrían resultar afectados: personas, sistemas, procesos, labores mineras, recursos mineros, maquinaria, equipos, medio ambiente etc.
CALCULO DEL RIESGO	Se debe calcular o asignar el nivel de riesgo. Este se define en función de la amenaza y la vulnerabilidad, utilizando la matriz del anexo 6.
PRIORIZACION DE ESCENARIOS	Los resultados del análisis de riesgos permiten determinar los escenarios en los que se debe priorizar la intervención.
MEDIDAS DE INTERVENCIÓN	Establecer la necesidad de la adopción de medidas de planificación para el control y reducción de riesgos. Determinar el nivel de planificación requerido para su inclusión en los diferentes planes de acción.

Nota. Esta tabla muestra los principales aspectos que se deben tener en cuenta en el análisis de riesgo y vulnerabilidad por atmosferas viciadas o contaminadas (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

17.7.2 Identificación descripción y calificación de las amenazas

El objetivo de este análisis es identificar y evaluar los riesgos asociados a las atmósferas viciadas o contaminadas que pueden presentarse en las labores mineras subterráneas, las cuales, debido a sus características específicas, podrían dar lugar a una emergencia. El análisis de los riesgos y sus posibles consecuencias permite establecer medidas de prevención y control, tanto internas como externas, que deben ser integradas en el plan de ventilación de la mina.

Para alcanzar el objeto descrito anteriormente, se propone la estructura considerada en la tabla 91.

Tabla 91

Identificación descripción y calificación de las amenazas

AMENAZA	INTERNO	EXTERNO	FUENTE DE RIESGO	CALIFICACION	COLOR

Nota. Esta tabla muestra la estructura propuesta para la identificación y valoración de las amenazas originadas por la presencia de atmosferas viciadas o contaminadas.

Amenazas: se considerarán los riesgos definidos en el plan de gestión del riesgo (capítulo 8 de esta guía), los cuales son resultado de la evaluación de criterios geológicos, técnico-seguridad y el comportamiento de la concentración de gases presentes en las explotaciones mineras subterráneas.

Origen interno o externo: relaciona el lugar o sitio donde se pueden presentar o materializar las amenazas. En este punto se hará mayor relevancia a las originadas internamente.

Fuente de riesgo: situación, actividad, fenómenos geológicos, estructural natural y de seguridad que tiene el potencial de originar una amenaza para el trabajador y la infraestructura de la mina, especialmente en la parte interna donde hay riesgo por atmosferas viciadas o contaminadas.

Calificación: es una medición de la probabilidad de que se materialice el riesgo y se origine una amenaza. Es de tipo cualitativo y se clasifican así:

- **Amenaza posible:** es aquel fenómeno o evento (externo o interno) que nunca ha ocurrido pero que

es factible que ocurra, ya que no hay razones históricas o científicas que determinen que no sucederá.

- **Amenaza probable:** fenómeno o evento esperado (externo o interno) basado en la experiencia previa, con fundamentos técnicos, científicos y operacionales que respaldan la probabilidad de que ocurra
- **Amenaza inminente:** fenómeno o evento (externo o Interno), que ocurrirá inmediatamente, ya que la información y análisis de tipo técnico lo hace evidente y detectable.

17.8 Análisis de vulnerabilidad

El objetivo del análisis de vulnerabilidad es identificar y determinar la localización, área de influencia y características de comportamiento de los diferentes riesgos por atmosferas viciadas o contaminadas, cuya materialización puede dar origen a una emergencia. Estos riesgos pue-

den ser de tipo geológico y estructural, técnico y de seguridad, naturales y propios de la concentración de gases presentes en cada explotación según su mineralización, y se caracteriza porque cualquier momento pueden generar alteraciones repentinas en las actividades normales de las minas.


El análisis de vulnerabilidad contempla tres aspectos, la **vulnerabilidad en las personas, recursos y sistemas o procesos**. Tanto las amenazas identificadas como la vulnerabilidad de los componentes anteriormente relacionados se deberán analizar evaluar y cuantificar para establecer el nivel de riesgo que tienen las operaciones.

En el anexo 6 se propone el desarrollo de una matriz para identificar las amenazas originadas por atmósferas viciadas o contaminadas, a las cuales podría estar expuesto el personal que trabaja en un proyecto minero subterráneo. Sin embargo, es importante aclarar que el alcance de dicha matriz estará determinado por la magnitud del proyecto y el nivel de seguridad implementado.

En la tabla 92 se presenta de forma generalizada la estructura de la matriz y los principales factores que se han de considerar.

Tabla 92

Matriz de amenazas y análisis de vulnerabilidad

Análisis de amenazas			ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD										Nivel de Riesgo						
			PERSONAS			RECURSOS			SISTEMAS Y PROCESO				Resultado del diamante	Interpretación					
Amenazas	Calificación	Color del Rombo	1. Gestión organizacional	2. Capacitación y entrenamiento	3. Gestión de seguridad	Total, Vulnerabilidad personas	Rombo vulnerabilidad personas	1. Gestión de diagnóstico minero	2. Gestión de labores minera	3. Gestión de suministro de equipos	Total, Vulnerabilidad de recursos	Rombo vulnerabilidad recursos	1. Gestión de servicios	2. Gestión de sistemas alternos	3. Gestión de recuperación	Total, Vulnerabilidad Sistemas Procesos	Rombo vulnerabilidad sistemas y procesos		MEDIO

Nota. La tabla muestra la estructura de la matriz para el análisis de amenazas y vulnerabilidad de las operaciones mineras subterráneas en presencia de atmosferas viciados o contaminadas.

Para consolidar esta matriz, se debe estructurar una serie de preguntas para cada componente establecido (personas, recursos, sistemas y procesos), con el fin de determinar su vulnerabilidad en el momento de presentarse una emergencia. Las respuestas a estas preguntas se valorarán de manera cuantitativa, según el esquema de la tabla 93.

Tabla 93

Valoración Cuantitativo

VALORACION CUANTITATIVA	
Clase de respuesta	Valoración
SI	1
NO	0
PARCIAL	0,5

Nota. Esta tabla describe la valoración cuantitativa de las respuestas dadas, al analizar la vulnerabilidad de los componentes personas, recursos, sistemas y procesos desarrollados en las minas.

Una vez realizada la evaluación cuantitativa, se suman los resultados de los promedios de calificación, lo que permitirá determinar el grado de vulnerabilidad en los componentes evaluados: personas, recursos, sistemas y procesos. Este análisis ayudará a identificar las áreas más críticas y a priorizar las acciones correctivas o preventivas necesarias para reducir los riesgos asociados a las atmósferas viciadas o contaminadas.

En las tablas 94, 95, 96 y 97 se presentan en forma resumida todos los aspectos que se consideraron para la identificación de las amenazas y el análisis de vulnerabilidad.

Tabla 94

Identificación de amenazas

1. IDENTIFICACION DE AMENAZAS			
Naturales	Geológicos	Concentración de gases y material particulado	Técnico y de seguridad
Movimientos sísmicos	<ul style="list-style-type: none"> Tipos de yacimientos Estructuras de falla y plegamientos Resistencia de las Rocas Temperatura 	<ul style="list-style-type: none"> Composición química Minas Pulverulentas 	<ul style="list-style-type: none"> Polvo de carbón (nivel de explosividad) Factor de inertización Uso de explosivos Relación metano (CH₄) –oxígeno (O₂) Relación metano (CH₄) - Materia Volátil MV Método de arranque y límite inferior de explosividad (LEL) Equipos de medición de gases Instalaciones eléctricas subterráneas Plan de ventilación

Tabla 95

Elementos y aspectos de vulnerabilidad

2. ELEMENTOS Y ASPECTOS DE VULNERABILIDAD		
Personas	Recursos	Sistemas y procesos
<ul style="list-style-type: none"> Gestión organizacional Capacitación y entrenamiento Gestión de seguridad 	<ul style="list-style-type: none"> Gestión diagnóstico minero Gestión de labores mineras Gestión de suministro de equipos 	<ul style="list-style-type: none"> Gestión de servicios Gestión de sistemas alternos Gestión de recuperación

Tabla 96

Interpretación de la vulnerabilidad por cada aspecto

3. INTERPRETACION DE LA VULNERABILIDAD POR CADA ASPECTO	
Calificación	Condición
BUENO	Si el número de respuestas se encuentra dentro el rango 0,68 a 1
REGULAR	Si el número de respuestas de encuentra dentro el rango 0,34 a 0,67
MALO	Si el número de respuestas se encuentra dentro el rango 0 a 0,33

Tabla 97

Interpretación de la vulnerabilidad por cada elemento

4. INTERPRETACION DE LA VULNERABILIDAD POR CADA ELEMENTO		
Rango	Interpretación	Color
0,0 - 1,00	ALTA	ROJO
1,01 - 2,00	MEDIA	AMARILLO
2,01 - 3,00	BAJA	VERDE

17.8.1 Nivel de riesgo

Identificadas, descritas y analizadas las amenazas y la vulnerabilidad, se procede a determinar el nivel de riesgo, que es el resultado de la combinación entre las amenazas identificadas y los criterios de vulnerabilidad evaluados (personas, recursos, sistemas y procesos). La metodología propuesta en la guía establece que el nivel de riesgo se calcule mediante la combinación de los resultados cualitativos obtenidos del análisis de las amenazas con los resultados arrojados en la tabla 97, la cual interpreta la vulnerabilidad de los componentes evaluados. Este enfoque permite obtener una medición precisa del riesgo, esencial para la toma de decisiones informadas y la implementación de estrategias de mitigación adecuadas.

La metodología permite transformar los resultados en valores cualitativos, y para ello usa el diamante de emergencia por colores, el cual consta de cuatro rombos interrelacionados, cuyas combinaciones de colores definen finalmente el NR (ver anexos 6.1 y 6.2).

En la figura 71 se muestra la interrelación de los criterios de vulnerabilidad con las amenazas. En la tabla 98 presenta la combinación de los colores para los resultados del NR.

Figura 71

Diamante de riesgo








Nota. Esta figura muestra el diamante de riesgo y la combinación de las amenazas con la vulnerabilidad.

Cada uno de los rombos tiene un color que fue asignado de acuerdo con los análisis desarrollados (anexo 6). Para determinar el nivel de riesgo global, se pinta cada rombo del diamante según la calificación obtenida para la amenaza y los tres elementos vulnerables. Por último, de acuerdo con la combinación de los cuatro colores dentro del diamante, se determina el nivel de riesgo global según los criterios de combinación de colores planteados (ver tabla 98).

17.8.2 Interpretación de los prismas

Tabla 98

Interpretación de los prismas

NIVEL DE RIESGO	NUMERO DE ROMBOS	INTERPRETACIÓN
RIESGO ALTO	3 o 4 Rombos en color rojo	Los valores que representan la vulnerabilidad y amenaza están en su punto máximo. Porcentaje de incidencia del 75% al 100%
		
RIESGO MEDIO	1 a 2 rombos rojos 3 a 4 amarillos	La vulnerabilidad es alta o la amenaza es alta. Se espera que los efectos sean de gran magnitud, pero inferiores al riesgo anterior. Porcentaje de incidencia del 50% al 74%.
		
		
	1 a 2 Rombos amarillos y el resto verde	La vulnerabilidad y la amenaza están controladas. Porcentaje de incidencia entre el 25% al 49%.
		
		

17.9 Procedimiento operativo normalizado para explosiones en atmósferas mineras subterráneas

Tabla 99

Diagrama de Flujo PON y procedimiento Operativo Normalizado para explosiones

PROCEDIMIENTO OPERATIVO NORMALIZADO PARA EXPLOSIÓN		
FLUJOGRAMA	DESCRIPCIÓN	RESPONSABLE
<pre> graph TD A[Notificación de la Emergencia] --> B[Evacuar] B --- C[PON de Evacuación] B --> D[Atender Lesionados] D --- E[PON de Lesionados] D --> F{Causa de la Explosión} F -- Accidente --> G[Activar PON de Emergencia por Incendio] F -- Externas --> H[Solicitar Apoyo] G --> I[Verificar y Eliminar Riesgos Asociados] H --> J[Coordinar con Autoridades] J --> I I --> K[Inspeccione la Zona] K --> L[Restablezca Equipos y Labores] L --- M[Generar Reporte] L --> N[Fin de la Emergencia] </pre>	<ol style="list-style-type: none"> 1. La persona que descubra la emergencia, la debe notificar a comunicaciones: identificarse, lugar de la emergencia, tipo de emergencia, si hay heridos o no. 2. Active el PON de Evacuación. Acordone el área para evitar el ingreso de personas al área y evacue. 3. Cualquier persona afectada deberá ser atendida prioritariamente, trasladada fuera del área de riesgo y entregada de ser posible al personal encargado de la Atención Médica y remitido al centro de salud más cercano. 4. Determine la causa de la explosión y coordine con los grupos externos los puntos críticos de acuerdo con la magnitud de la explosión y los planos de la empresa. 5. Active el PON Incendios si aplica a la situación. 6. Busque y elimine riesgos asociados incendios, fugas de gases y otros elementos, derrames, artefactos explosivos, etc. 7. Una vez terminadas las labores de extinción, haga una inspección de las áreas aledañas, para asegurarse que no hay presencia de riesgos asociados y que no haya posibilidad de una nueva explosión. 8. Una vez asegurados de la desaparición de riesgos inminentes, restablezca los equipos de protección del lugar, especialmente la restitución de extintores usados y de mangueras por otras secas y en buen estado. 9. Evalúe afectaciones de la onda producida en la explosión, en el recurso natural, en el sitio del suceso como en el área de influencia y elabore plan de control y restauración con el área ambiental. 	<p>Quien descubre la emergencia</p> <p>Coordinadores de evacuación</p> <p>Brigada</p> <p>Brigada, Grupo antiexplosivos</p> <p>Brigada</p> <p>Brigada</p> <p>Brigada</p> <p>Brigada</p> <p>Brigada SSMA</p>

17.10 Procedimiento operativo normalizado para atmosferas viciadas en entornos mineros subterráneos

Tabla 100

Procedimiento operativo normalizado para atmosferas viciadas

Actividad	Descripción	Responsable	Registro
Verificación de gases	Es fundamental llevar a cabo mediciones de la concentración de gases como una etapa preliminar en la gestión de emergencias. Este proceso tiene como objetivo evaluar la presencia y nivel de materialización del riesgo, proporcionando información clave para la toma de decisiones inmediatas y la implementación de medidas correctivas o preventivas necesarias.	Responsable del SGSST Jefe de mina supervisor	Formato para el registro de gases
Materialización del riesgo	Con los resultados de las mediciones de la concentración de gases, se determinarán los procedimientos adecuados para la atención de la emergencia por atmosferas viciadas o contaminadas.	Responsable del SGSST Jefe de mina supervisor	Formato para el registro de gases
Establecer el origen del riesgo por presencia de gases explosivos, tóxicos o viciados	<p>Si las concentraciones de gases están por encima de los VLP</p> <p>Determinar de manera preliminar el origen del riesgo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Si es propio de la génesis del yacimiento, materializándose el riesgo como consecuencia de posibles fallas en el sistema de ventilación (actos-condiciones subestándar). • No fue diseñado y/o implementado el plan de ventilación de acuerdo con la norma establecida. • Por falta de procedimientos estandarizados en temas de ventilación y control de gases • Falta de capacitación al personal directo, contratistas y partes interesadas. • Presencia de estructuras de fallas en el avance de la labor que dieron lugar al desprendimiento súbito de gases. 	Responsable del SGSST Jefe de mina, supervisor Especialista en ventilación	Formato para el registro de gases Plan de ventilación
Análisis de control	<p>Con base en las condiciones identificadas y las posibles causas del incremento o disminución en la concentración de gases, se deberá determinar si es viable mitigar el riesgo con el personal de la mina, el cual deberá estar debidamente capacitado.</p> <p>Si es controlable, entonces se realizan las acciones que puedan llevar la concentración de gases dentro de los límites permisibles como, por ejemplo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Con base a los aforos realizados determinar si es necesario incrementar caudales de aire. • Obstrucciones del circuito de ventilación principal. • Fallas en equipos de ventilación (ventiladores, ductos etc.). • Verificar los procedimientos y evaluar al personal que interviene en temas de ventilación. 	Responsable del SGSST Jefe de mina, supervisor Especialista en ventilación	Informe de la actividad

Actividad	Descripción	Responsable	Registro
<p>Activar protocolo de atención de emergencias</p>	<p>Si los resultados del análisis determinan que la emergencia no es controlable:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Informar a la brigada de emergencias de la mina, esta administrará y atenderá la emergencia (insumos, recursos logística, etc.), sin intervenir directamente en la condición de riesgo identificada. • Informar y activar la brigada contra incendios, primeros auxilios, quienes serán apoyo, y no deberán ingresar a la mina, a no ser que sean autorizados. • Activar alarma que alerte sobre la presencia de atmósferas viciadas: esta alarma, ya sea sonora o lumínica, debe contar con una codificación específica que indique el nivel de la emergencia. Es fundamental que esta codificación sea claramente comprendida por todo el personal involucrado en la operación minera, incluyendo trabajadores directos y contratistas. Además, la alarma debe estar respaldada por una capacitación adecuada, donde se socialice su funcionamiento y significado, garantizando la activación oportuna del protocolo de evacuación de la mina. • Con la información recolectada de las fuentes primarias (personal evacuado), el cronograma de trabajos establecido por turnos y las mediciones de gases realizadas tanto al inicio como durante la emergencia, se debe proceder con lo siguiente: <p>Aseguramiento del área: las brigadas de emergencia deben garantizar que ninguna persona ingrese al área afectada ni a la mina (de requerirse) hasta que se hayan completado los procedimientos de control correspondientes.</p>	<p>Brigada de emergencias</p> <p>Brigadas contra incendios y primeros auxilios</p>	<p>Informe de la actividad</p>
<p>Comunicación externa</p>	<p>El COE debe avisar a la Estación de servicio de Salvamento Minero (ESSM). El grupo de salvamento minero será el encargado de direccionar la atención de la emergencia. También solicitará el apoyo a otras entidades como Cruz Roja, Defensa Civil, Policía, etc.</p>	<p>COE</p> <p>Brigada de emergencias</p> <p>Brigadas contra incendios y primeros auxilios</p>	<p>Informe de la actividad</p>



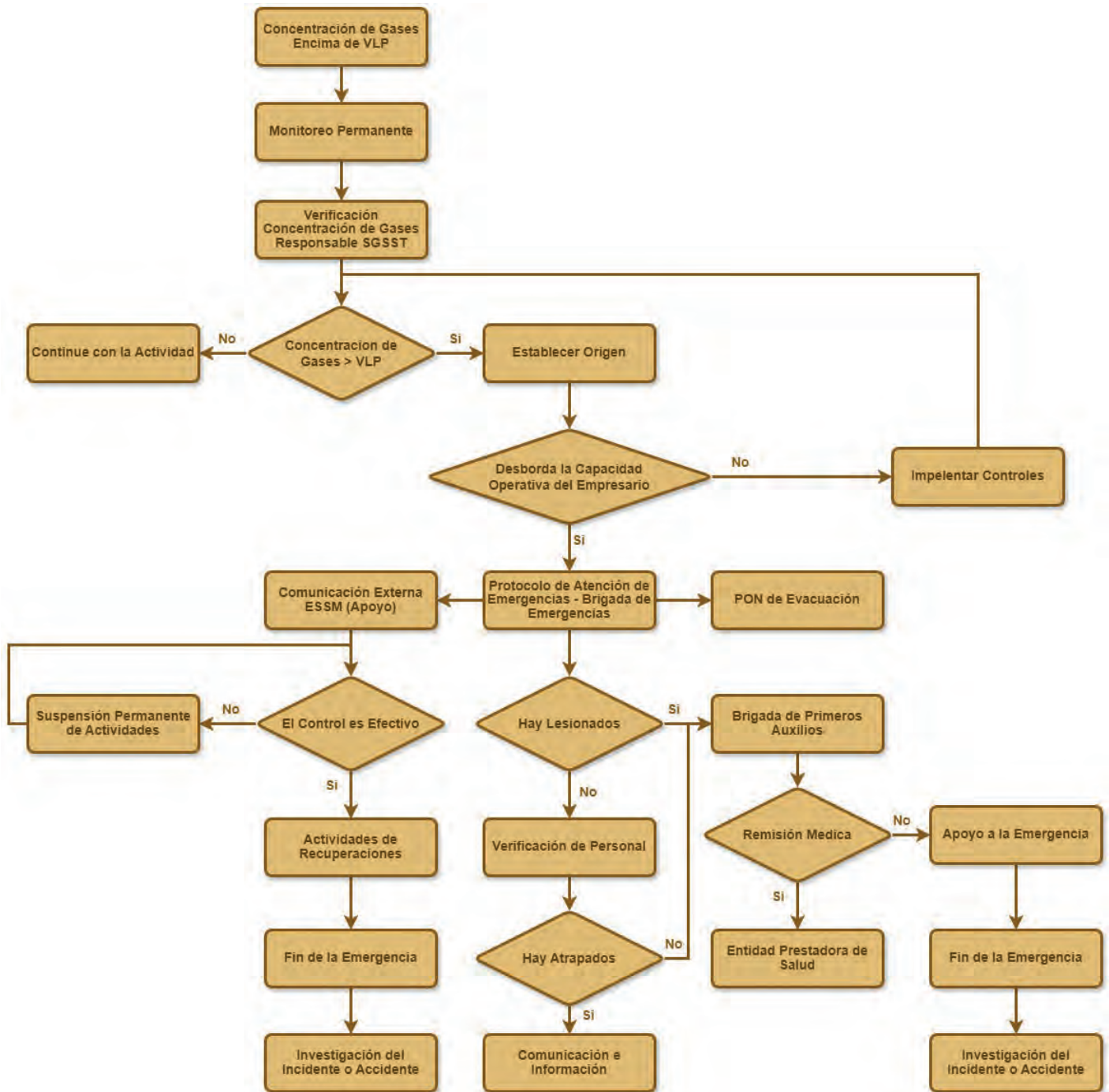
Actividad	Descripción	Responsable	Registro
<p>Activar protocolo de atención de emergencias y establecer el SCI</p>	<p>Este protocolo contiene las siguientes fases:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verificación del estado de la electrificación y nivel de concentración de gases, sostenimiento, desagüe, etc. • Recibir instrucciones del jefe de emergencias. • Definir el tipo de gases que se pueden presentar en la emergencia del yacimiento o explosión. • Verificación de aforos realizados en la mina, caudales, temperaturas (ts, th, HR). Así como el control de gases facilitarán el control de la emergencia. • Asegurar el bienestar de los socorredores y facilitar los recursos que se necesitan (bebidas, ropa y equipos adecuados). • Ingresar a la mina: ingresar con equipo de circuito cerrado, multidetector de gases y equipo de comunicaciones. • Determinar el tiempo de permanencia. • Establecer el plan de acción y ejecutarlo, teniendo en cuenta de ser necesario las acciones de rescate. • El responsable de la mina debe diseñar y aplicar este PON para la atención de este tipo emergencias. • Establecer procedimientos para la atención a la salud por envenenamiento. • Realizar informe 	<p>Estación de servicio de salvamento minero (ESSM)</p> <p>Grupo de socorredores mineros</p>	<p>Informe atención de emergencia ANM</p> <p>Planos de riesgo de la mina</p> <p>Registro de mediciones de gases</p>
<p>Atención de lesionados</p>	<p>Una vez asegurada la zona, es indispensable verificar si hay personas lesionadas. En caso de que las haya, deberán ser atendidas inmediatamente por la brigada de primeros auxilios. Adicionalmente, se debe proceder a realizar un conteo detallado del personal presente, identificando su posible ubicación dentro de la mina, las distancias involucradas, las zonas con aire fresco disponibles y aquellas que posiblemente presenten condiciones de aire irrespirable.</p>	<p>Grupo de socorredores mineros</p> <p>Brigada de emergencias</p> <p>Brigada de primeros auxilios</p>	<p>Informe de la actividad</p>
<p>Atención de personal atrapado en la mina</p>	<p>Si hay personal se propio, terceros o contratistas, el CEO junto con la brigada de emergencia darán aviso al grupo de salvamento minero de la ANM. Realizado esto, se procede según lo establecido el numeral 6 de este PON. Se hace transferencia de mando y se da inicio al protocolo de búsqueda y rescate (PAI) de la ANM.</p>	<p>COE</p> <p>Grupo de socorredores mineros</p> <p>Brigada de emergencias</p> <p>Brigada de primeros auxilios</p>	<p>Informe de la actividad</p>



Actividad	Descripción	Responsable	Registro
Evaluación de atención de la emergencia	<p>Se deberá evaluar si las acciones de control implementadas por el grupo de salvamento minero, junto con las demás entidades de apoyo fueron efectivas.</p> <p>Si el control es efectivo: si las concentraciones de los gases se encuentran dentro de los VLP, se iniciarán las actividades de recuperación, previa autorización de la ANM:</p> <p>Realizar aforos de ventilación con una mayor frecuencia a la que se venían realizando. Mejoras del plan de ventilación de la mina y la respectiva implementación. Repotenciación o adquisición de ventiladores según las necesidades en los caudales de aire. Mejoras en las secciones de labores afectadas según norma (Decreto 1886, 2015).</p> <p>Si el control no es efectivo: entonces las actividades se mantendrán suspendidas hasta que los controles sean eficientes y se autorice por parte de la ANM reactivar la operación, y luego iniciar con las actividades de recuperación enunciadas anteriormente, conforme a lo establecido en el (Decreto 1886, 2015, art. Art. 249 y 250).</p>	<p>COE</p> <p>Responsable del SGSST</p> <p>Jefe de mina supervisor</p> <p>Especialista en ventilación</p> <p>Brigada de emergencias</p>	<p>Informe de la actividad</p>
Fin de la Emergencia	<p>Una vez finalizada la acción de rescate y/o emergencia minera, se debe realizar la investigación del incidente o accidente para identificar las causas fundamentales e inmediatas, conforme a la normativa vigente. Además, se deben establecer medidas de intervención que mitiguen las condiciones de riesgo identificadas. Los resultados de la investigación deben ser documentados de manera exhaustiva y remitidos a las entidades competentes, siguiendo los procedimientos establecidos por la legislación aplicable.</p>	<p>Responsable del SGSST</p> <p>Ingeniero o supervisor</p> <p>Brigada de Emergencias</p> <p>COPASST</p>	<p>Informe de la investigación del incidente/ accidente</p>

Figura 72

Diagrama de Flujo PON para atmosferas viciadas en entornos mineros subterráneos



17.11 Procedimiento operativo normalizado para incendios en atmósferas mineras subterráneas

Tabla 101

Procedimiento Operativo Normalizado para incendios

ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN	RESPONSABLES	REGISTROS
Monitoreo	Realizar mediciones de la concentración de gases en la bocamina, o en el área que sea posible acceder. En explotaciones de carbón, se debe hacer especial énfasis en la medición de la concentración de monóxido de carbono (CO). Además, se debe monitorear el porcentaje de oxígeno (O ₂), ya que su deficiencia puede generar atmósferas peligrosas.	Responsable del SGSST Ingeniero o supervisor	Registro de control de gases
Definir el tipo de incendio.	Si es de origen endógeno o exógeno.	Responsable del SGSST Ingeniero o supervisor	Informe de la actividad.
Análisis del Control de la emergencia	Se debe establecer si la emergencia es controlable o no, para ello se deben evaluar puntos como: <ul style="list-style-type: none"> • Que tan cerca está el incendio • ubicación del incendio • ubicación de los refugios y las distancias del recorrido • Cuánto tiempo gasta el personal en llegar a un lugar seguro • Información del personal • Evaluación si el personal está capacitado para la atención de la emergencia. • Tipo de gases y los resultados de mediciones efectuadas • Plano de riesgos de seguridad y de zonas de presencia de gases viciados o contaminados 	Responsable del SGSST Ingeniero o supervisor	Informe de la actividad. Registro de control de gases Plano de riesgos
Activar protocolo de atención de emergencias	Si los resultados del análisis determinan que la emergencia no es controlable (origen endógeno) : <ul style="list-style-type: none"> • Informar a la brigada de emergencias de la mina para que pueda administrar y atender la emergencia de manera eficaz. Su responsabilidad será coordinar los recursos logísticos necesarios, como insumos, equipos y personal, sin intervenir directamente en la condición de riesgo identificada. • Informar y activar la brigada contraincendios, quienes serán apoyo, y no deberán ingresar a la mina, a no ser que sean autorizados. • Activar alarma que de aviso de la ocurrencia del incendio. Sea esta sonora o lumínica, debe tener una codificación propia que represente el nivel de la emergencia. Esta debe ser socializada con todo el personal que tenga incidencia con la operación (directos y terceros) y así activar el protocolo de evacuación de la mina. • Ubicar la zona del conato de incendio con la información recolectada a través de fuentes primarias (personal evacuado) o con el cronograma de trabajos establecido por turnos. • Aseguramiento del área: la brigada contraincendios velará por que nadie ingrese al área afectada o a la mina si es el caso, hasta que se realicen los procedimientos de control respectivos. <p>Remitirse al numeral 10 de este procedimiento: control de incendio de origen endógeno.</p>	Responsable del proyecto minero (Ingeniero, jefe de mina, supervisor) Responsable del SGSST Brigada de Emergencias Comité Operativo de emergencias (COE) trabajadores	Informe de la actividad.

ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN	RESPONSABLES	REGISTROS
Evaluación de atención de la emergencia	<p>Se deberá evaluar si las acciones de control implementadas por el grupo de salvamento minero junto con las demás entidades de apoyo fueron efectivas. Verificar si fueron realizadas las actividades de mitigación correspondientes como:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Construcción de tabiques en tela de ventilación • Construcción de tabiques temporales; en tabla y arena, ladrillos y lonas, material estéril y sacos de arena • Construcción de tabiques aislantes definitivos. <p>Estos tabiques están diseñados para aislar uno de los componentes esenciales del tetraedro del fuego, específicamente el oxígeno (O₂). Los otros tres componentes que conforman el tetraedro del fuego son el combustible, el calor y la reacción en cadena.</p> <p>Si el control no es efectivo: entonces las actividades se mantendrán suspendidas hasta que los controles sean eficientes.</p> <p>Establecer controles de ingeniería para la respectiva verificación como:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Instalación de puntos fijos de monitoreo de monóxido de carbono (CO), productos de combustión/humos. • Inspección y vigilancia de la mina. • Verificación del funcionamiento de las alarmas audibles o visibles, equipos extintores. • En caso de incendios en mantos de carbón verificar si el sellamiento de la labor fue efectivo mediante el monitoreo de monóxido de carbono (CO). • Identificar nuevas zonas de falla o de fracturas por donde se está presentando emanaciones que puedan impedir el control del incendio. <p>Si el control es efectivo: se comenzarán las actividades de recuperación:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ventilar la zona afectada. • Realizar mantenimiento de elementos de sostenimiento, de ventilación, transporte y demás servicios mineros. • Analizar el flujo de aire y comportamientos térmicos a través de los equipos, software y demás con los que cuenta la empresa. • Implementar el plan de ventilación. • Implementar programas de mantenimiento de equipos de ventilación y llevar su respectivo registro. • Hacer una investigación más profunda del comportamiento estructural y geológico de los mantos determinando el contenido de gas metano (CH₄) m³/Ton. 	<p>Estación de servicio de salvamento minero (ESSM)</p> <p>Grupo de socorredores mineros</p>	Informe atención de emergencia ANM
Activar protocolo de atención de emergencias de la mina	<p>Si los resultados del análisis determinan que la emergencia es controlable:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Informar a la brigada de emergencias de la mina para que pueda administrar y atender la emergencia de manera eficaz. Su responsabilidad será coordinar los recursos logísticos necesarios, como insumos, equipos y personal, sin intervenir directamente en la condición de riesgo identificada. • En el plano de riesgos ubicar los equipos extintores • Informar y activar la brigada contraincendios, quienes serán los encargados de atender la emergencia • Activar alarma que de aviso de la ocurrencia del incendio. Sea esta sonora o lumínica debe tener una codificación propia que represente el nivel de la emergencia. Esta debe ser socializado con todo el personal que tenga incidencia con la operación (propios, terceros), y así activar el protocolo de evacuación de la mina. • Con la información recolectada de las fuentes primarias (personal evacuado), el cronograma de trabajos establecido por turnos y las mediciones de gases realizadas tanto al inicio como durante la emergencia, se debe proceder con lo siguiente: <p>Aseguramiento del área: las brigadas de emergencia deben garantizar que ninguna persona ingrese al área afectada ni a la mina (de requerirse) hasta que se hayan completado los procedimientos de control correspondientes.</p>	<p>Responsable del SGSST</p> <p>Ingeniero o supervisor</p> <p>Brigada de Emergencias</p> <p>Comité Operativo de emergencias (COE)</p> <p>Brigada contraincendios</p> <p>Estación de servicio de salvamento minero (ESSM)</p> <p>Grupo de socorredores mineros</p>	<p>Informe atención de la actividad</p> <p>Plano de la mina</p> <p>Plano de riesgo</p>

ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN	RESPONSABLES	REGISTROS																			
Atención de lesionados	Terminado el aseguramiento de la zona, se debe verificar si hay personas lesionadas, si las hay, estas serán atendidas por la brigada de primeros auxilios, caso contrario se realizarán las actividades de control.	Brigada de primeros auxilios	Informe actividad																			
Control del incendio	<p>Se realizan las acciones de control del incendio:</p> <p>Si es producido por maquinaria, equipo eléctrico, madera se debe:</p> <ul style="list-style-type: none"> Utilizar los agentes extintores adecuados de acuerdo con el elemento combustible que se está incendiando; <table border="1" data-bbox="321 783 1045 1125"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Elemento Combustible</th> <th colspan="3">Elemento extintor</th> </tr> <tr> <th>Agentes Halogenados</th> <th>Químico Seco (Multipropósito)</th> <th>Dióxido de carbono (CO₂)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A (Basura, Madera, Papel)</td> <td>x</td> <td>x</td> <td></td> </tr> <tr> <td>B (Líquidos)</td> <td>x</td> <td>x</td> <td>x</td> </tr> <tr> <td>C (Equipos eléctricos)</td> <td>x</td> <td>x</td> <td>x</td> </tr> </tbody> </table> <p>Si el incendio es de origen endógeno:</p> <ul style="list-style-type: none"> Toda persona que detecte un incendio o conato de incendio debe apagarlo inmediatamente con los medios que disponga como extintores, redes de agua, sofocamiento o aislamiento del conato. Si el incendio se encuentra en niveles inferiores, no baje; si está en niveles superiores, no suba. Busque la ruta de evacuación más segura. Si no es posible el control, informar al supervisor para que este verifique la emergencia y a su vez de alarma general o use el medio de comunicación que tenga disponible Suspender actividades con excepción de aquellas necesarias para abordar la emergencia Implementar PON de evacuación. El responsable de la operación y el de SST, deberán que todo el personal incluyendo contratistas y partes interesadas hayan evacuado. En superficie se hace la verificación del personal y se lleva registro de esta, se avisa a la brigada de emergencias. La brigada contraincendios evaluará el área, para confirmar la neutralización del incendio. establecer el número de personas lesionadas y de acuerdo con la gravedad de estas gestionar la atención medica correspondiente. El COE en cabeza del jefe de la emergencia, dará aviso de la finalización de la emergencia, sin embargo, el lugar donde se presentó la emergencia deberá estar aislado, hasta que se haga la investigación respectiva de las causas básicas e inmediatas que dieron origen al incendio o conato de incendio, y se dé la respectiva autorización de reinició de actividades. Solo podrán ingresar a la mina las personas capacitadas, con equipos de respiración autónoma. En caso de no contar con estos equipos, remitirse al numeral 5 de este procedimiento. 	Elemento Combustible	Elemento extintor			Agentes Halogenados	Químico Seco (Multipropósito)	Dióxido de carbono (CO ₂)	A (Basura, Madera, Papel)	x	x		B (Líquidos)	x	x	x	C (Equipos eléctricos)	x	x	x	<p>Comité Operativo de emergencias (COE)</p> <p>Brigada de Emergencias</p> <p>Brigada contraincendios</p> <p>Ingeniero/supervisor</p> <p>HSE.</p>	Informe actividad
Elemento Combustible	Elemento extintor																					
	Agentes Halogenados	Químico Seco (Multipropósito)	Dióxido de carbono (CO ₂)																			
A (Basura, Madera, Papel)	x	x																				
B (Líquidos)	x	x	x																			
C (Equipos eléctricos)	x	x	x																			

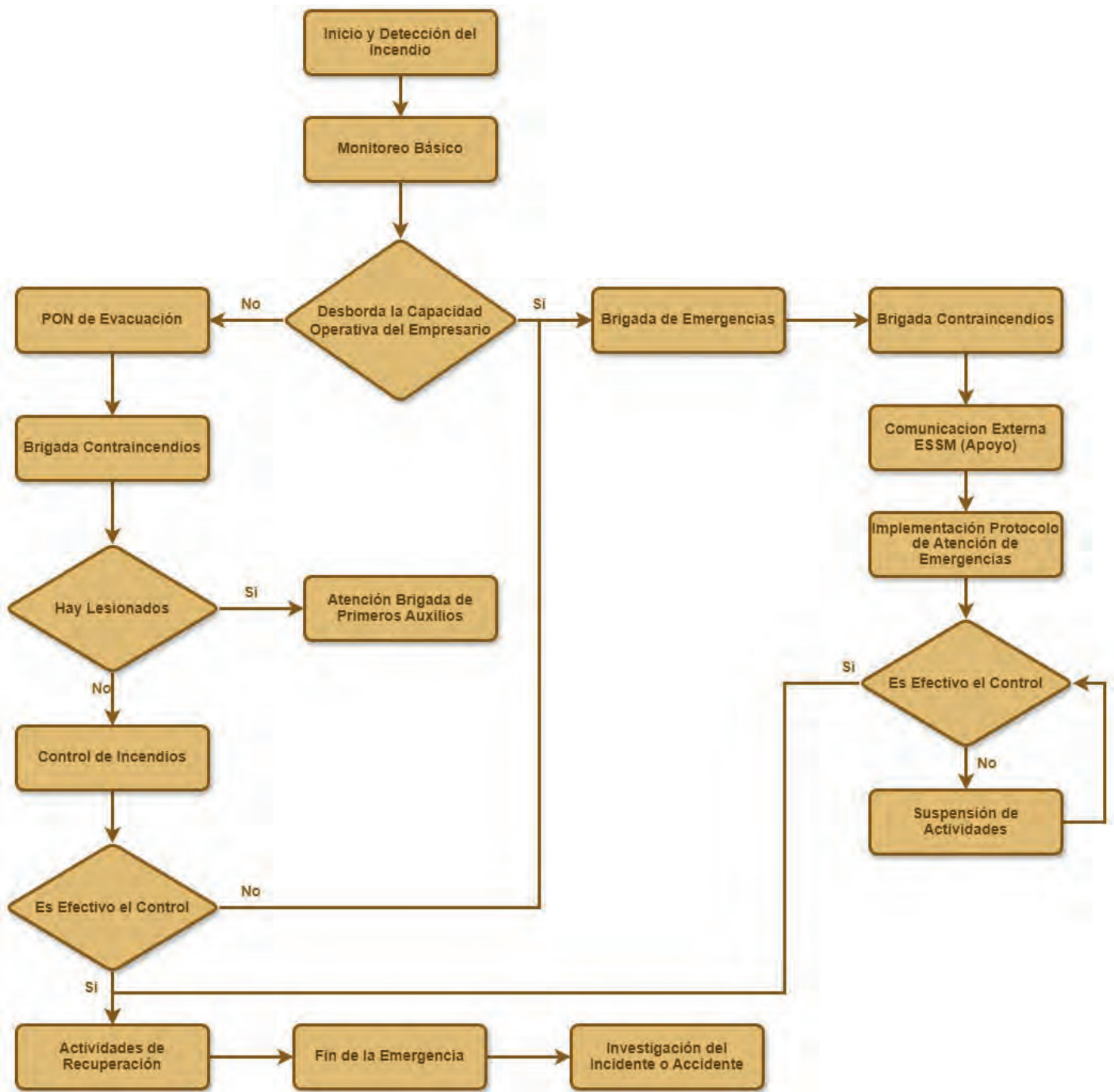


ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN	RESPONSABLES	REGISTROS
Evaluación de atención de la emergencia	<p>Se deberá evaluar si las acciones de control fueron efectivas mediante el uso de los elementos extintores anteriormente relacionados. Evaluar las condiciones de la atmosfera respirable, para de esta manera iniciar las actividades de recuperación:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mantenimiento del equipo que genero el incendio. • Recuperación del área de trabajo • Si fue por otro motivo se deberá hacer una evaluación preliminar de las posibles circunstancias que dieron origen al hecho <p>Una vez controlado el incendio y verificado su origen, se deberá confirmar si este fue causado por una fuente de ignición asociada a un conato de incendio en un manto de carbón. En tal caso, se deberá informar al ESSM para que gestione la emergencia, conforme a lo descrito en la Actividad N.º 4.</p>	<p>Comité Operativo de Emergencias (COE)</p> <p>Brigada contraincendios</p>	<p>Informe actividad</p> <p>Registro de mantenimiento de maquinaria y equipo</p>
Fin de la Emergencia	<p>Una vez finalizada la acción de rescate y/o la emergencia minera, se deberá realizar la investigación correspondiente del incidente o accidente, con el objetivo de identificar las causas básicas e inmediatas, conforme a la normatividad vigente. A partir de los hallazgos, se deberán establecer medidas de intervención para mitigar esta condición de riesgo. Una copia de los resultados de la investigación deberá ser remitida a las entidades competentes y, en la mina, deberán ser socializados como lecciones aprendidas. Los resultados también deberán ser comunicados a todo el personal.</p>	<p>Responsable del SGSST</p> <p>Ingeniero o supervisor</p> <p>Brigada de Emergencias</p> <p>COPASST</p>	<p>Informe de la investigación del incidente/accidente</p>



Figura 73

Diagrama de Flujo PON para incendios en atmósferas mineras subterráneas



17.12 Procedimiento operativo normalizado para evacuación en atmósferas mineras subterráneas contaminadas o viciadas

Tabla 102

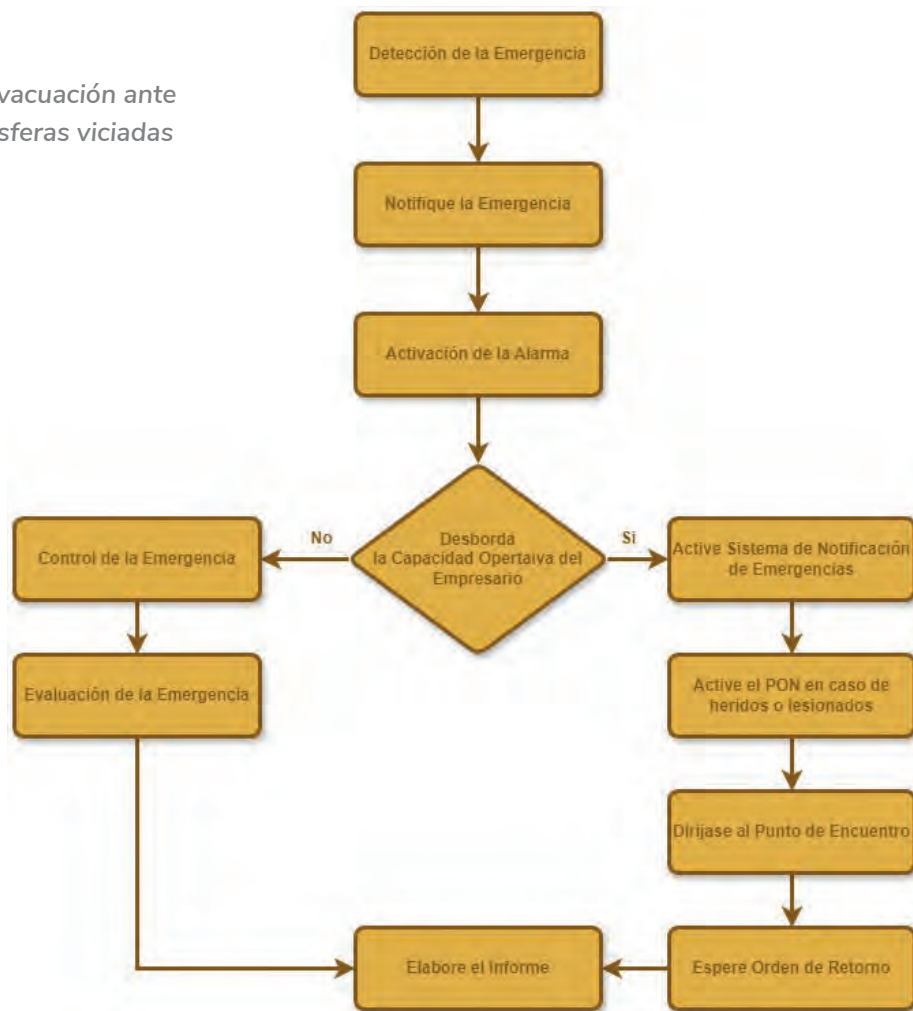
Procedimiento operativo normalizado para evacuación

Descripción	Acciones	Responsable
Detectar la situación de emergencia	Identificación de la situación de peligro o recepción de la información.	Todos los trabajadores y visitantes de la mina
Notificar la emergencia	Informar a cualquier miembro del comité de emergencias, coordinadores de evacuación o brigada de emergencias. En caso de no encontrar a ninguno, activar los pulsadores de alarma si están disponibles en la mina.	Miembros de la brigada
Activación de la alerta y verificación de la posible emergencia	El miembro del comité de emergencias que recibió la información verifica la situación en el sitio reportado mientras paralelamente activa la cadena de llamadas de la mina. Toma decisiones basadas en la verificación del evento.	Miembros de la brigada y líderes de evacuación
Validar la posibilidad de controlar la emergencia con los recursos disponibles	La pregunta principal que debe hacerse el comité de emergencias y el grupo de respuesta interna ante emergencias es: ¿se puede controlar esta situación con los recursos disponibles y sin arriesgar la integridad de las personas?	Comité de emergencias y brigada de emergencias
Controlar la emergencia con los recursos disponibles	Si la respuesta es Sí y la situación se puede controlar sin poner en riesgo la vida de ninguna persona y con los recursos disponibles, se procede al control y posterior evaluación de causas y oportunidades de mejora.	Comité de emergencias, brigada de emergencias
No es posible atender la emergencia con los recursos disponibles	Si la respuesta es NO y la situación no se puede controlar, el comité de emergencias debe dar la orden inmediata de evacuación y realizar las notificaciones externas a los organismos de socorro y a las instancias organizacionales pertinentes. La activación de la alarma puede ser dada por el comité de emergencias o por quien ellos designen.	Comité de emergencias, brigada de emergencias
Activar el PON Lesionados si hay heridos	En caso de tener una persona herida o lesionada, activar el PON de primeros auxilios.	Todos los trabajadores y visitantes de la mina
Llegar al punto de encuentro	Una vez llegue al punto de encuentro, esperar mientras finaliza la atención del incidente o emergencia y se autoriza el reingreso.	Coordinador de emergencias, brigadas de emergencia
Realizar el censo	Verificar la cantidad de personas que salieron y se encuentran en el punto de encuentro. Avisar si falta una o más personas para iniciar su búsqueda a través de la entidad operativa de respuesta que atiende el incidente o emergencia.	Coordinador de emergencias, brigadas de emergencia

Descripción	Acciones	Responsable
Fin Emergencia (Esperar orden de retorno)	<p>Una vez finalizada la acción de rescate y/o emergencia minera, se debe llevar a cabo una investigación detallada del incidente o accidente, con el fin de identificar las causas fundamentales e inmediatas, conforme a la normativa vigente. Esta investigación es crucial para implementar medidas de intervención que mitiguen la condición de riesgo y eviten la repetición de eventos similares. Los resultados obtenidos deben ser enviados a las entidades competentes, cumpliendo con los requisitos legales establecidos.</p> <p>Una vez controlada la emergencia, se inicia la fase de recuperación. Durante esta etapa, se analizan los daños sufridos, tanto a nivel de infraestructuras como de personal, y se evalúa la viabilidad de retomar las actividades en la mina. Este retorno debe realizarse solo después de que el responsable de la atención del incidente haya dado su aprobación, teniendo en cuenta las indicaciones y restricciones necesarias para garantizar la seguridad de todos los involucrados.</p>	<p>Coordinador de emergencias</p> <p>Ingeniero o supervisor</p> <p>Brigada de emergencias</p> <p>COPASST</p>

Figura 74

Diagrama de Flujo PON Evacuación ante una emergencia por atmosferas viciadas o contaminada





CAPACITACIÓN, COMUNICACIÓN Y ENTRENAMIENTO

Todo trabajador que realice labores subterráneas o de superficie relacionadas con minería subterránea debe recibir capacitación para desempeñar estas tareas de manera segura. El programa de capacitación tiene como objetivo proporcionar conocimientos teóricos sobre los riesgos inherentes y las normativas aplicables (Decreto 1886, 2015, art. 14). Este programa debe ser continuo y mantenerse actualizado para responder a cualquier cambio en los procedimientos, equipos o condiciones de alerta relacionadas con atmósferas viciadas.

La capacitación está dirigida no solo a los trabajadores operativos, como operadores de equipos, mineros y demás personas que ejecutan tareas directas en las excavaciones subterráneas, sino también a los siguientes roles:

- Supervisores.
- Ingenieros.
- Personal de seguridad.
- Personal administrativo.
- Personal directivo.
- Contratistas externos.
- Visitantes.

18.1 Programas de capacitación

El programa debe incluir un conjunto estructurado de actividades destinadas a instruir al personal en aspectos relacionados con la seguridad, el mantenimiento y la gestión de riesgos asociados a las atmósferas viciadas en minería subterránea. Cada actividad del programa, como capacitaciones, charlas, cursos, inducciones y reinducciones, debe ser registrada.

El registro debe incluir, entre otros aspectos:

- Fecha de la instrucción.
- Participantes.
- Contenido cubierto.
- Evidencia fotográfica.
- Evaluación de los asistentes.

Todo esto debe realizarse conforme a lo dispuesto en el (Decreto 1886 2015, art.14) modificado por el (Decreto 944,2022, art. 4).

Se recomienda que el programa de capacitación incluya los requisitos descritos en la figura 75.

Figura 75

Elementos del programa de capacitación



288

- Capacitación en reconocimiento de riesgos por atmosferas viciadas: los trabajadores deben aprender a identificar signos de advertencia como falta de oxígeno (O₂), intoxicación por inhalación de gases tóxicos, explosiones e incendios, pérdida de conciencia y agravamiento de enfermedades respiratorias.
 - Capacitación en respuesta a emergencias: es fundamental que todo el personal esté debidamente capacitado y conozca los procedimientos establecidos para identificar atmosferas viciadas y responder de manera adecuada ante situaciones de riesgo. Para ello, se deben contar con registros que certifiquen la asistencia a las capacitaciones y la comprensión de estos procedimientos por parte de todos los trabajadores, garantizando su efectividad y el cumplimiento de las normativas de seguridad.
 - Gestión de riesgos por atmosferas viciadas: capacitación en la identificación y gestión proactiva de riesgos por atmosferas viciadas. Los registros deben mostrar el cumplimiento de esta capacitación y cualquier actualización posterior.
- Comunicación efectiva:** la capacitación debe ser integral, abarcando no solo los procedimientos técnicos para identificar y reportar atmosferas viciadas, sino también la importancia de comunicar información crítica relacionada con los signos de alerta. Además, debe enfocarse en el cumplimiento riguroso de los procedimientos de seguridad en todos los niveles de la organización. Es esencial que los registros de capacitación reflejen tanto la participación de cada trabajador como su comprensión de los procedimientos y protocolos establecidos.

- **Documentación y registro:** el personal debe aprender cómo llevar registros precisos de incidentes, inspecciones y mantenimientos de equipos. Estos registros deben estar disponibles para su revisión y auditoría.
- **Cumplimiento normativo:** todos los empleados, sin excepción, deben estar plenamente informados sobre las regulaciones y normativas locales e internacionales que rigen la contaminación por presencia de gases tóxicos o vapores de solventes en el entorno laboral. Además, se debe asegurar que los registros de capacitación incluyan pruebas documentales de que los empleados han recibido la formación adecuada, demostrando su comprensión y conocimiento de las normativas relevantes.

18.2 Plan de comunicación

El plan de comunicación debe garantizar que todos los trabajadores estén adecuadamente informados, capacitados y entrenados para gestionar eficazmente los riesgos asociados a las atmósferas viciadas, estableciendo estrategias que permitan proteger la salud y seguridad de trabajadores y visitantes. Por tal razón, el plan de comunicación debe contener como mínimo los siguientes elementos.

Figura 76

Componentes de del plan de ventilación



- **Reuniones de seguridad (charlas de cinco minutos):** realizar sesiones informativas breves al inicio de cada turno para repasar los riesgos específicos y las medidas preventivas del área de trabajo.

- **Boletines informativos:** Publicar boletines periódicos en las zonas comunes de la mina, como el comedor y los puntos de control, es una estrategia eficaz para mantener informado al personal sobre los riesgos relacionados con las atmósferas viciadas, estadísticas de incidentes y lecciones aprendidas.
- **Señalización y carteleras:** instalar señalización en áreas críticas que adviertan sobre atmósferas peligrosas y recuerden las prácticas seguras.
- **Comunicación de emergencia:** implementar un sistema de alertas sonoras y visuales para advertir sobre emergencias relacionadas con la calidad del aire.
- **Plataformas digitales:** usar herramientas digitales como aplicaciones móviles para actualizar a los trabajadores sobre condiciones cambiantes y protocolos.

- Gerencia de seguridad o gerencia de mina: evaluar el cumplimiento del programa de capacitación, el entrenamiento y el plan de comunicaciones mediante la medición y monitoreo de indicadores de desempeño. Ejemplos de estos indicadores incluyen: el porcentaje de trabajadores capacitados, la cantidad de simulacros realizados, el tiempo de respuesta durante los simulacros de emergencia y la reducción de incidentes relacionados con atmósferas viciadas.

Es fundamental implementar un cronograma que establezca plazos lógicos y la periodicidad de los elementos mencionados en el programa de capacitación y el plan de comunicaciones. Esto permitirá gestionar de manera eficiente los recursos y el personal necesario para su cumplimiento. Para tal fin, se sugieren los elementos descritos en la tabla 103.

18.3 Roles y cronograma del programa de capacitación y plan de comunicación

Para asegurar el éxito y la eficiencia del programa de capacitación y el plan de comunicaciones se deben establecer roles y responsabilidades. A continuación, se definen las actividades asignadas a los diferentes cargos dentro de la organización:

- **Gerencia de seguridad o gerencia de mina:** supervisar la implementación del plan y asegurar el cumplimiento de las normativas vigentes.
- **Supervisores de turno:** realizar inspecciones y verificar que los trabajadores sigan los procedimientos establecidos.
- **Personal de salud y seguridad:** impartir capacitaciones y actualizar la información sobre riesgos asociados a atmosferas viciadas.
- **Trabajadores y personal en general:** participar activamente en las sesiones de capacitación y entrenamiento, aplicando todas las medidas de seguridad.

Tabla 103

Periodicidad de los elementos del programa de capacitación y plan de comunicación

Periodicidad	Elemento o Actividad
Diario	Charlas de cinco minutos.
Mensual	Información de carteleras – Boletines informativos.
Mensual	Evaluación y monitoreo de los programas: medición de indicadores de desempeño.
Semestral	Capacitación en los elementos del programa de capacitación por atmosferas viciadas.
Semestral	Evaluación y monitoreo de los programas: medición de indicadores de desempeño.
Anual	Actualización del programa de capacitación.
Anual	Actualización del plan de comunicación.
Anual	Evaluación y monitoreo de los programas: medición de indicadores de desempeño.



AUDITORÍAS INTERNAS Y EXTERNAS



En la minería subterránea, donde las atmósferas viciadas representan un riesgo significativo para la salud y seguridad de los trabajadores, las auditorías internas y externas son fundamentales para garantizar el cumplimiento de los sistemas de gestión. Estas auditorías deben llevarse a cabo de manera periódica, conforme a las normativas locales e internacionales aplicables, y realizarse dentro de las instalaciones subterráneas de la operación minera. Su objetivo principal es identificar áreas de mejora, verificar el cumplimiento de los estándares establecidos y mitigar los riesgos asociados con la exposición de los trabajadores a condiciones atmosféricas peligrosas.

19.1 Objetivos de auditorías internas y externas

Las auditorías tienen como objetivo general evaluar el sistema de gestión de atmósferas viciadas en la mina y asegurar:

- El cumplimiento de estándares de seguridad y salud ocupacional.
- La implementación efectiva de prácticas de control y monitoreo de calidad del aire.
- La conformidad con las normativas nacionales e internacionales.

19.1.1 Objetivos de auditorías internas

- Identificar fallos o desviaciones en los procesos antes de una revisión externa.
- Mejorar continuamente el sistema de gestión mediante la identificación de no conformidades internas.
- Garantizar que las prácticas y procedimientos internos cumplan con la política de seguridad de la organización.

19.1.2 Objetivos de auditorías externas

- Evaluar objetivamente el sistema de gestión desde una perspectiva externa, proporcionando una verificación imparcial.
- Certificar el cumplimiento de normas nacionales e internacionales.
- Detectar riesgos adicionales y áreas de mejora no observadas en auditorías internas.

19.2 Diferencias entre auditorías internas y externas

Tabla 104

Diferencias entre auditorías internas y externas

Aspecto	Auditoría interna	Auditoría externa
Realizada por	Equipo interno de la organización	Empresa o auditor externo
Enfoque	Mejora continua y cumplimiento interno	Verificación de cumplimiento normativo
Frecuencia	Periódica: trimestral o semestral	Anual o semestral en ambientes de alto riesgo
Objetivo	Identificación temprana de no conformidades	Certificación y cumplimiento legal

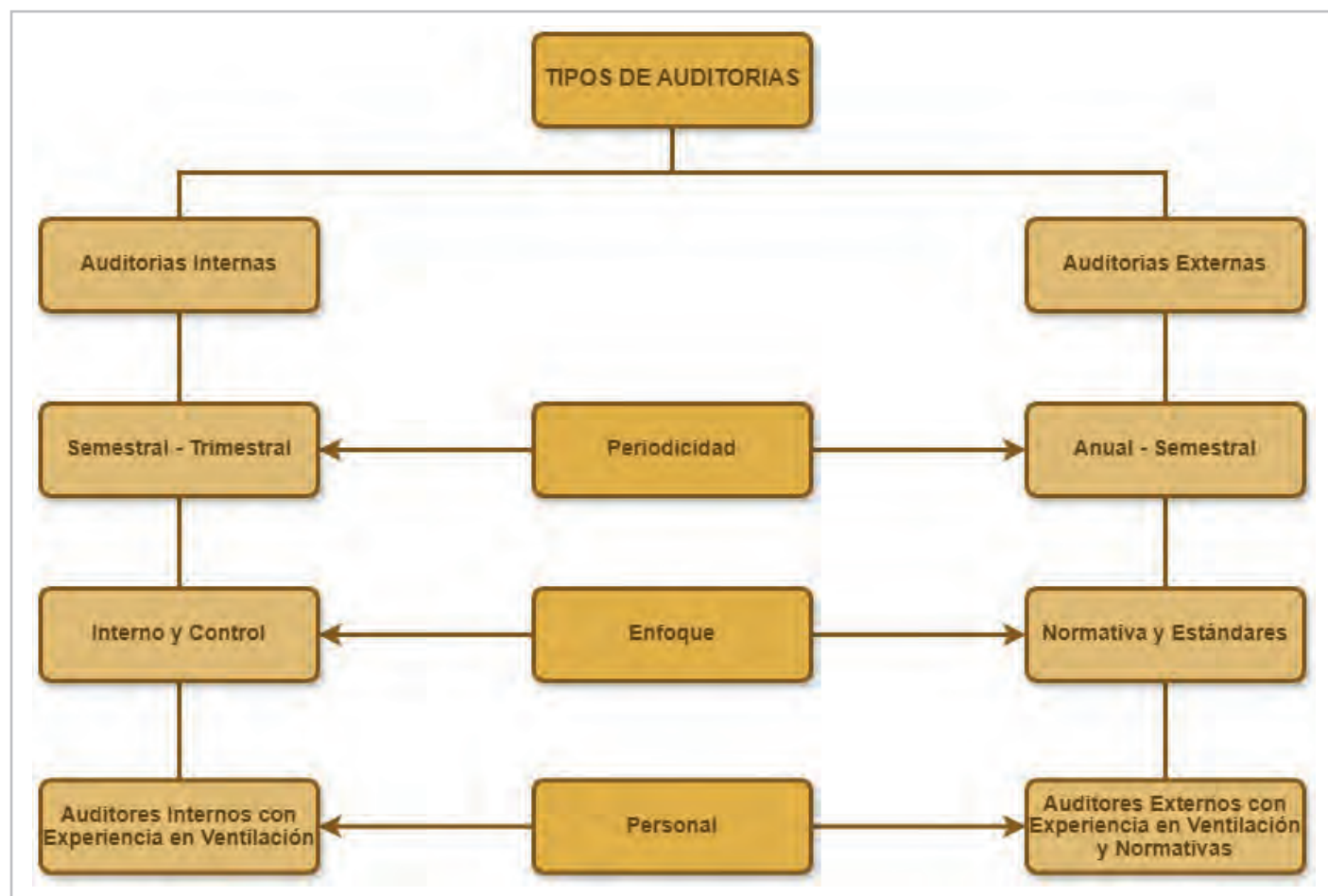
En una organización minera, los dos tipos de auditorías son complementarias y necesarias para garantizar un sistema de gestión eficiente y robusto para lograr la sostenibilidad a largo plazo.

19.3 Tipos de auditorías y periodicidades

Las auditorías se clasifican en internas y externas, cada una con su periodicidad y metodología específica (ver figura 77).

Figura 77

Tipos de auditorías a implementar



19.3.1 Auditorías internas

- **Periodicidad:** es recomendable realizar auditorías internas semestralmente. En proyectos de alto riesgo, estas pueden realizarse trimestralmente para asegurar el cumplimiento constante.
- **Enfoque:** evaluar el cumplimiento de procedimientos internos, identificar no conformidades y asegurar que las prácticas de control de calidad del aire estén operativas.
- **Personal:** en este tipo de auditorías se recomienda que siempre intervenga personal directamente relacionado y conocedor del manejo de la ventilación de la mina.

19.4.1 Planificación de la auditoría

En esta etapa es necesario definir el alcance, áreas a auditar y los auditores responsables.

Ejemplo: programar auditorías internas en los meses de enero y julio para evaluar equipos de ventilación y calidad de aire.

19.4.2 Revisión de documentación

Se deben examinar las mediciones y registros atmosféricos previos de las labores subterráneas, incidentes relacionados con atmósferas viciadas y mantenimiento de equipos.

Ejemplo: revisar los reportes mensuales de monitoreo de gases y los informes de mantenimiento de ventilación.

19.4.3 Inspección en campo

En esta etapa se realizan inspecciones in situ para evaluar las condiciones del aire y verificar el cumplimiento de los protocolos de seguridad.

Ejemplo: inspeccionar la instalación de ventiladores y verificarlos en áreas críticas de la mina donde la ventilación es esencial.

19.4.4 Análisis de cumplimiento

Es crucial, en esta etapa, evaluar los hallazgos de la auditoría comparándolos con los estándares de calidad y las normativas aplicables.

Ejemplo: comparar niveles de oxígeno (O₂) y concentración de gases en la mina con los límites establecidos (Decreto 1886, 2015).

19.4.5 Informe de resultados

En esta etapa final, se deberá elaborar un informe detallado que incluya los hallazgos obtenidos, destacando las no conformidades identificadas y las recomendaciones propuestas. Asimismo, se deberá establecer y programar la periodicidad para su presentación.

Ejemplo: presentar un informe a la gerencia con recomendaciones para mejorar el sistema de ventilación en ciertas áreas de riesgo.

19.4.6 Acciones correctivas

Implementar medidas correctivas para abordar cada hallazgo y mejorar las condiciones de la atmósfera.

Ejemplo: si se detecta un ventilador defectuoso, debe proceder a su reemplazo y a la revisión de los demás equipos involucrados en el correcto manejo de la ventilación en las labores subterráneas.

19.5 Seguimiento y mejora continua

El seguimiento es esencial para asegurar la efectividad de las medidas correctivas. Las auditorías de seguimiento permiten evaluar el impacto de las acciones implementadas.

Ejemplo de mejora continua

Implementación de un plan de monitoreo diario de la calidad del aire, el cual será revisado mensualmente. Las auditorías periódicas permiten evaluar si esta medida contribuye efectivamente a la reducción de las no conformidades.

19.6 Contenido mínimo de los informes de auditoría.

Los informes de auditoría, tanto internos como externos, destinados a garantizar un manejo óptimo de la ventilación en las labores subterráneas, deben incluir, como mínimo, los siguientes parámetros (ver figura 79).

Figura 79

Contenido mínimo de auditorías





INVESTIGACIÓN DE ACCIDENTES MINEROS CAUSADOS POR ATMOSFERAS MINERAS CONTAMINADAS O VICIADAS

La investigación de accidentes laborales es una técnica analítica de seguridad cuyo objetivo es identificar las causas que han originado un accidente, es decir, responder a la pregunta: ¿por qué ocurrió el accidente? A partir de la identificación de estas causas, como fase previa esencial, se deben diseñar y aplicar medidas correctivas para evitar la repetición de accidentes similares. En este sentido, los datos y análisis sobre los accidentes de trabajo se consideran herramientas fundamentales para el desarrollo futuro de la organización minera y sus políticas de prevención.

Actualmente, en la actividad minera desarrollada en nuestro país, los eventos relacionados con atmósferas contaminadas o viciadas representan el 35.4% de las 108 emergencias mineras reportadas a la ANM hasta el 25 de noviembre de 2024 (26 eventos por atmósferas contaminadas, 6 por explosiones y 2 por incendios). Estas cifras evidencian que dichos eventos constituyen una grave amenaza para la seguridad de los trabajadores, la infraestructura, el medio ambiente y toda la organización minera.

Por lo tanto, es de vital importancia llevar a cabo investigaciones exhaustivas de los accidentes mineros relacionados con atmósferas contaminadas o viciadas, con la rigurosidad y atención que requieren. El objetivo es identificar las posibles causas y, a partir de ello, tomar medidas correctivas que luego se utilicen como lecciones aprendidas. Estas lecciones pueden implementarse en el desarrollo de la actividad minera para prevenir futuros eventos lamentables que puedan afectar la integridad de las personas, los equipos, la infraestructura minera y las reservas.

20.1 Criterios para el desarrollo de una investigación causada por atmosfera viciada o contaminada.



299



Una investigación exhaustiva de este tipo de accidentes es esencial para prevenir futuros incidentes y garantizar la seguridad de los trabajadores mineros. A continuación, se detallan los criterios clave a considerar, de acuerdo con el reglamento de seguridad en labores mineras subterráneas (Decreto 1886, 2015) y modificado por el (Decreto 944, 2022).

A continuación, se propone una lista de criterios que deben ser analizados por el equipo designado para llevar a cabo la investigación de accidentes mineros causados por atmósferas contaminadas o viciadas (ver figura 80).

Figura 80

Criterios para tener en cuenta para la investigación de un accidente minero por atmosferas contaminadas o viciadas

S O I R E T I R C	Disposiciones Generales	
	Ventilación de Minas Subterráneas	
	Control de Polvos Inflamables	
	Transporte Interno	
	Explosivos	
	Instalaciones Eléctricas	
	Maquinas, Herramientas y Equipos	
	Prevención y Extinción de Fuegos e Incendios	
	Higiene y Condiciones de Trabajo	
	Aguas Superficiales y Aguas Subterráneas	
Estatuto de Prevención, Capacitación y Atención de Emergencias Mineras y Salvamento Minero		

20.1.1 Disposiciones generales

Tabla 105

Disposiciones generales

D I S P O S I C I O N E S G E N E R A L E S		¿Se restringe el ingreso a frentes abandonados?
	¿Se desarrollan trabajos tendientes a minimizar y controlar cualquier tipo de riesgo en estos frentes?	
	¿La organización mantiene señalizados y sellados herméticamente las labores abandonadas para evitar el tránsito de personal?	
	¿Al reactivar labores mineras abandonadas se realiza previa verificación de condiciones de seguridad?	
	¿Se cuenta con procedimientos e instructivos para la ejecución segura de labores mineras subterráneas que incluyan monitoreo permanente y seguimiento a la implementación?	
	¿La organización cuenta con personal profesional o técnico idóneo y con dedicación exclusiva para la ejecución de actividades de seguridad en el desarrollo de la actividad minera?	
	¿La organización diseña e implementa el SG-SST de conformidad a la normatividad legal vigente?	
	¿La organización destina los recursos financieros, físicos y humanos necesarios para el mantenimiento de máquinas, herramientas, equipos e instalaciones?	
	¿El personal está capacitado en la identificación de peligros, evaluación y valoración de los riesgos, así como la definición de medidas y controles a implementar?	
	¿La organización establece medidas para la gestión del riesgo contra incendio, colabora con su extinción y las acciones de salvamento minero?	
	¿La organización realiza el mantenimiento y calibración periódica de los equipos de medición y monitoreo de gases conforme con las recomendaciones del fabricante?	
	¿La organización Identifica, mide y prioriza la intervención de los riesgos existentes en las labores subterráneas?	
	¿Se dispone de documentación técnica y registros actualizados que den cuenta del seguimiento a la seguridad en las labores mineras subterráneas?	
	¿Antes del inicio y durante el desarrollo de labores se realizan la medición de gases contaminantes, y se mantienen el registro actualizado en los libros y tableros de control?	
	¿Se cuenta con registros de ingreso y salida del personal minero bajo tierra y se cuenta con un responsable de su control y seguimiento?	
	¿El personal cumple con la prevención de riesgos laborales en la empresa minera, y cumple con lo establecido en el decreto 1886 de 2015 modificado por el decreto 944 de 2021?	
	¿El trabajador informa inmediatamente de las condiciones inseguras que identifica y que puedan ocasionar peligro en su sitio de trabajo, herramientas y equipos utilizados en la operación minera?	
	¿La organización elabora permisos de trabajo y mantiene actualizado y socializado el plan de emergencia y contingencia?	
	¿La organización cuenta con un responsable de recorrer antes del inicio y durante cada turno las labores subterráneas y frentes de trabajo, con el fin de identificar los riesgos potenciales para el personal, verificando que las condiciones del aire bajo tierra se encuentren dentro de los Valores Límites Permisibles - VLP?	
	¿La organización brinda capacitación en seguridad en labores subterráneas y equipos de protección personal a directivos, trabajadores y entrenadores en seguridad que realizan dichas labores a través de las instituciones autorizadas para tal fin?	
	¿La organización cuenta con programa de capacitación en seguridad y salud en el trabajo en labores mineras subterráneas en nivel básico y avanzado para trabajadores, técnicos y profesionales?	
	¿La organización suministra EPP de acuerdo con los peligros identificados en el Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo (SG - SST) y las recomendaciones del fabricante? ¿El trabajador los utiliza correctamente?	
	¿La organización cuenta con planos de labores y de seguridad actualizados que cumplan con la resolución 406000 del 27 de mayo de 2015?	
	¿La organización cuenta con un Plan de prevención, preparación y respuesta ante emergencias?	
	¿La mina tiene instalados refugios fijos o móviles teniendo en cuenta las características relacionadas en el Artículo 29 del decreto 1886 de 2015 modificado por el decreto 944 de 2021?	
	¿La organización cuenta con los elementos necesarios para prestar los primeros auxilios y el transporte de lesionados?	
	¿La empresa dispone de una brigada de emergencia entrenada y certificada que prevenga y controle cualquier contingencia derivada de emergencia, siniestro o desastre?	
¿La organización cuenta con evidencias del reentrenamiento anual de socorredores y auxiliares de salvamento minero?		
¿La organización cuenta con un vehículo especializado para el transporte de personal accidentado o lesionado?		

20.1.2 Ventilación en minería subterránea

Tabla 106


Ventilación en minería subterránea

VENTILACIÓN EN MINERÍA SUBTERRÁNEA	¿La organización cuenta con plan de ventilación que cumpla con las características descritas en el Artículo 35 del decreto 1886 de 2015?
	¿La mina esta recorrida permanentemente por un volumen suficiente de aire que mantenga una atmosfera minera dentro de los VLP?
	¿El volumen de oxígeno (O ₂) en la atmósfera minera se encuentra entre el 19,5% y el 23,5% en volumen?
	¿La atmosfera minera se encuentra enmarcada dentro de los VLP indicados en el Artículo 39 del decreto 1886 de 2015?
	¿El circuito de ventilación forzada cumple con lo dispuesto en el Artículo 40 del decreto 1886 de 2015 (Modificado por el artículo 8 del Decreto 944 de 2022)?
	¿La mina cuenta con un encargado de la supervisión de la ventilación en cada turno de trabajo para todas las labores, capacitado para tal efecto?
	¿Las instalaciones de entrada y salida de aire son independientes y separadas al menos por 50 m formando un circuito de ventilación?
	¿Se cuenta con un plan de mantenimiento preventivo de vías de ventilación, ventiladores, puertas reguladoras, medidores y sistemas de control?
	¿Las áreas de trabajo antiguas o abandonadas que no estén ventiladas, se encuentran aisladas herméticamente del circuito de ventilación y señalizadas para evitar el tránsito de personal?
	¿Las labores de las minas categoría II cuentan con un procedimiento para la suspensión de la ventilación en el que se contemple que la orden se debe dar por escrito directamente por el responsable de la ventilación?
	¿En el procedimiento para la suspensión de ventilación se contempla que una vez se restituya la misma el supervisor o jefe inmediato debe verificar las condiciones de la atmosfera minera para aprobar el ingreso de personal a la mina?
	¿Se dispone de equipos calibrados para la medición de gases como metano (CH ₄) (porcentaje en volumen o porcentaje LEL), oxígeno (O ₂), monóxido de carbono (CO), ácido sulfhídrico (H ₂ S), gases nitrosos y dióxido de carbono (CO ₂), según lo estipulado en el Artículo 46 del Decreto 1886 de 2015, modificado por el artículo 19 del Decreto 944 de 2022?
	¿Si la mina está calificada como categoría III, cuenta con monitoreo permanente de metano (CH ₄) y oxígeno (O ₂) como dispone el Artículo 47 del decreto 1886 de 2015 (Modificado por el artículo 10 del Decreto 944 de 2022)?
	¿En las labores mineras donde se utiliza vehículos con motor de combustión interna se implementa un sistema de monitoreo permanente y continuo de Monóxido de carbono (CO) y oxígeno (O ₂), ubicados como mínimos en los sitios indicados en el artículo 48 del Decreto 1886?
	¿Al existir evidencias de focos de incendio activos en la mina o minas vecinas se cuenta con monitoreo permanente de monóxido de carbono (CO) y oxígeno (O ₂), como mínimo en los sitios indicados en el Artículo 48 del decreto 1886 de 2015 (Modificado por el artículo 11 del Decreto 944 de 2022)?
	¿A los equipos de medición de gases disponibles en la mina se les realiza calibración y prueba de verificación y de esto se deja registro para cuando la Autoridad Minera lo requiera, siguiendo lo establecido en los artículos 50, 51 y 52 del Decreto 1886 de 2015 y modificado por el Decreto 944 de 2022?
	¿Se cuenta con procedimiento para la suspensión, reinicio de labores y registro de los mismos para cuando las concentraciones de metano (CH ₄) excedan las permitidas en el Artículo 53 del decreto 1886 de 2015?
	¿En labores subterráneas de categorías II y III, el artículo 58 del Decreto 1886 de 2015 (modificado por el artículo 8 del Decreto 944 de 2022) establece que el volumen de aire que recorre frentes o tajos de explotación es inferior al 0.5% de metano (CH ₄)?
	¿Se cuenta con estudios de la viabilidad de extracción o drenaje de gas metano (CH ₄) con fines de autogeneración, uso o eliminación del mismo?
	¿La medición de concentración de metano (CH ₄) se realiza teniendo en cuenta la categoría de la mina y los parámetros establecidos en el artículo 58 del Decreto 1886 de 2015?
	Basados en lo Establecido en el Artículo 58 del Decreto 1886 de 2015 Minas o Frentes de Trabajo Grisútuosos.
	¿La medición de las concentraciones de gas metano en labores mineras subterráneas se realiza acorde a su clasificación?
	¿Se mantiene activa la ventilación principal y auxiliar según la clasificación de labores mineras?
	¿Una vez se suspende la ventilación principal y auxiliar se evacua al personal inmediatamente de labores mineras según corresponde?
	¿Se cuenta con una planta eléctrica auxiliar que se active de forma automática cuando se presente un corte de la energía eléctrica?
	¿El suministro de aire a frentes ciegos de Categoría III se realiza con ventilación auxiliar en labores mineras de longitud superior a 10 m?
	¿Se cuenta con un estudio geológico que indique las concentraciones de metano (CH ₄) por cada manto de carbón con registro en un plano?
¿Se cuenta con análisis de riesgo y plan de prevención para identificar y gestionar las áreas propensas a desprendimientos instantáneos de gas metano (CH ₄)?	
¿El análisis de riesgos cumple con los requisitos contenidos en el Artículo 64 del decreto 1886 de 2015?	
¿El plan de prevención cumple con los requisitos contenidos en el Artículo 65 del decreto 1886 de 2015 (Modificado por el artículo 13 del Decreto 944 de 2022)?	

20.1.3 Control de polvos inflamables

Tabla 107


Control de polvos inflamables

 CONTROL DE POLVOS INFLAMABLES	¿Se cuenta con estudio de clasificación de la mina por la cantidad de polvo de carbón y se previene una explosión evitando que se presenten de manera simultánea las condiciones indicadas en el Artículo 66 del decreto 1886 de 2015 (Modificado por el artículo 8 del Decreto 944 de 2022)?
	¿La organización implementa las medidas de prevención para minas pulverulentas inflamables indicadas en el Artículo 67 del decreto 1886 de 2015), este procedimiento se contempla en el SG-SST?
	¿Se cuenta con procedimiento e implementación de un método para inertización del polvo de carbón con polvo inerte de caliza y/o agua como se indica en los Artículos 68 y 69 del decreto 1886 de 2015 este procedimiento se contempla en el SG-SST?
	¿Se cuenta con barreras para controlar la propagación de explosiones de polvo de carbón como se indica Artículo 70 del decreto 1886 de 2015 este procedimiento se contempla en el SG-SST?
	¿Se cuenta con evidencias de la implementación y seguimiento del programa de control para la emisión de material particulado y compuestos químicos, este procedimiento se contempla en el SG-SST?

20.1.4 Explosivos

Tabla 108


Explosivos

 S O V I S O S L O P L O X E	¿La organización conoce e implementa los lineamientos para el uso de explosivos en explotaciones mineras subterráneas?
	¿La organización conoce geológicamente las condiciones de acumulación de gases con características explosivas?
	¿La organización minera utiliza explosivos y agentes de voladura de seguridad que sean permisibles para minera subterránea de conformidad con los aspectos técnicos dados por la industria militar?
	¿La organización minera cuenta con personal calificado para realizar la verificación de la atmósfera una vez realizada una voladura, confirmando si los gases están dentro de los límites permisibles previo monitoreo y control?
	¿La organización minera conoce las acciones a seguir antes, durante y después de realizar una voladura?
	¿La mina es categorizada como grisutuosa y pulverulenta? <ul style="list-style-type: none"> ¿Si es el caso antes de iniciar la voladura se verifica la concentración de metano (CH₄) en la atmosfera de cada uno de los frentes de la mina? ¿Si la concentración de metano (CH₄) es mayor o igual al 0,5% en volumen o al 10% del Límite Inferior de Explosividad (LEL), se deben tomar acciones para suspender la voladura?
	¿En minas con polvo de carbón muy fino (polverulentas), antes de iniciar la voladura se humedece con agua las paredes, los pisos y los techos del frente y se neutraliza el polvo de carbón en una longitud de 15m?
	¿Para el avance de los frentes en carbón se utilizan explosivos permisibles certificados?
	¿La organización minera tiene conocimiento que la ventilación de los frentes en los cuales se realice voladura no debe suspenderse antes ni después de una voladura y que se deben realizar mediciones de metano (CH ₄) después de haberse efectuado la voladura para verificar la posibilidad de una liberación súbita?

20.1.5 Transporte interno

Tabla 109


Transporte interno

 TRANSPORTE INTERNO	
	¿Se cuenta con equipos de transporte (locomotoras)? ¿La mina tiene presencia de metano (CH ₄)?
	¿Si es el caso las locomotoras son a prueba de explosiones (intrínsecamente seguras)?
	¿En la mina se cuenta con bandas transportadoras? ¿Si es así las cabezas motrices, los tambores de retorno y sus alrededores se limpian en cada turno de operación para evitar la acumulación de polvo? ¿Cerca de estas se instalan extintores y equipos de extinción de incendios?
	¿Las bandas transportadoras son elaboradas en materiales resistentes al fuego y se evita la acumulación de electricidad estática mediante la instalación de polos a tierra?

20.1.6 Instalaciones eléctricas

Tabla 110


Instalaciones eléctricas

 INSTALACIONES ELÉCTRICAS	
	¿Las instalaciones eléctricas bajo tierra se hacen con todos los requerimientos técnicos que ofrezcan las condiciones de seguridad para el desarrollo de las actividades atendiendo lo dispuesto en el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE y/o Normatividad Vigente?
	¿La maquinaria o equipo eléctrico o electrónico utilizado en la mina cuenta con certificación IECEX, ATEX, o NEC/CEC, para trabajos en áreas clasificadas (a prueba de explosión)?
	¿Los trabajos en actividades eléctricas son ejecutados por técnicos, tecnólogos o ingenieros electricistas o electromecánicos con matrícula profesional vigente?
	¿Los trabajadores de la organización minera, protegen las instalaciones eléctricas?
	¿Cuándo observan alguna irregularidad en máquinas o instalaciones eléctricas, dan aviso al jefe de inmediato?
	¿Las instalaciones eléctricas son sometidas a vigilancia y mantenimiento continuo, esta vigilancia y mantenimiento es efectuada por una persona con matrícula profesional vigente? ¿En las labores mineras subterráneas clasificadas como grisutuosas se utilizan instalaciones a prueba de explosión contra grisú, de acuerdo con la clasificación del área o zona de riesgos? ¿La organización toma las acciones para cortar la corriente eléctrica cuando los índices del metano (CH ₄) alcancen las concentraciones especificadas en el artículo 53 del decreto 1886 y se procede de inmediato a la evacuación del lugar?

20.1.7 Máquinas, herramientas y equipos

Tabla 111

Máquinas, herramientas y equipos

M A Q U I N A S H E R R A M I E N T A S Y E Q U I P O S 	
¿Se dispone de protocolos de operación y ficha técnica de equipos, máquinas y herramientas?	
¿Se cuenta con un Programa de mantenimiento de equipos, máquinas y herramientas que contemple lo establecido en el Artículo 191 del decreto 1886 de 2015?	

20.1.11 Estatuto de prevención, capacitación y atención de emergencias mineras y salvamento minero

Tabla 115

Estatuto de prevención, capacitación y atención de emergencias mineras y salvamento minero

ESTATUTO DE PREVENCIÓN, CAPACITACIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS MINERAS Y SALVAMENTO MINERO
¿La organización minera cuenta con un plan de emergencias y contingencias? ¿Este plan se actualiza por lo menos cada seis meses (6) o antes?
¿La organización minera informa inmediatamente a la ESSM o PASSM de la ANM en caso de incendio, explosión, derrumbe, inundación o cualquier otro evento que ponga en riesgo la vida e integridad física del Personal y del yacimiento? ¿Se tiene establecido un procedimiento para este reporte?

20.2 Fases de la investigación

Para el desarrollo de esta guía se han propuesto ocho fases para la investigación de accidentes mineros causados por atmosferas viciadas o contaminadas, las cuales se presentan en la figura 81 y posteriormente se realiza una descripción pormenorizada de cada una de estas.

Figura 81

Fases de investigación en atmosferas contaminadas o viciadas



20.2.1 Conformación del equipo de investigación

La conformación del equipo investigador debe incluir, como mínimo, al jefe inmediato o supervisor del trabajador accidentado o del área donde ocurrió el incidente, un representante del comité paritario de salud ocupacional o el vigía ocupacional, y el encargado del desarrollo del programa de salud ocupacional. En casos de accidentes graves o fatales, la investigación debe contar con la participación de un profesional con licencia en salud ocupacional, ya sea propio o contratado, así como con el personal de la empresa encargado del diseño de normas, procesos y/o mantenimiento. Este equipo multidisciplinario garantiza un enfoque integral para identificar las causas del evento y establecer medidas correctivas, que luego se plasmarán en un plan de acción para garantizar su implementación y prevenir la ocurrencia de incidentes similares en el futuro. La diversidad de perspectivas y conocimientos dentro del equipo mejora la calidad de la investigación y asegura el cumplimiento de las normas legales y técnicas aplicables.

Funciones del equipo investigador

Líder del equipo investigador

- Dirigir el proceso de investigación.
- Planificar las visitas de inspección.
- Determinar de manera constante durante el recorrido de la inspección, si el área tiene condiciones de seguridad aptas para el desarrollo de la inspección de la investigación.
- Liderar el proceso de recolección de evidencias fotográficas incluyendo las entrevistas a testigos.
- Liderar la realización la inspección(es) de la investigación del accidente minero.
- Asignar funciones a los demás integrantes del equipo investigador.
- Liderar la elaboración y entrega el informe de la investigación.

Investigadores

- Realizar la investigación de los incidentes y accidentes de trabajo, dentro de los quince días siguientes a la ocurrencia del evento.

- Revisar hechos, evidencias relacionadas con el evento minero.
- Realizar la línea de tiempo-
- Diseñar entrevistas y aplicarlas a los testigos del evento.
- Determinar las causas inmediatas y causas básicas del evento minero.
- Establecer medidas correctivas para cada una de las causas que se identifiquen.
- Formular y presentar medidas de control y establecer tiempos de ejecución
- Presentación del informe de la investigación, aplicando la normatividad vigente correspondiente (Ministerio de Salud y Protección Social, Resolución 1401 de 2007).
- Evaluar el seguimiento de las medidas.
- Socializar con el personal operativo y administrativo de la organización minera las conclusiones y lecciones aprendidas del evento minero.
- Las demás funciones que determine el líder de la investigación y que estén relacionados con el objeto de la investigación.

Para la conformación del equipo investigador se pone a consideración el uso de un formato descrito en el anexo 8.

20.2.2 Recopilación de información y datos

La recopilación de datos es un pilar fundamental en la investigación de incidentes y accidentes mineros subterráneos causados por atmósferas contaminadas. Este proceso facilita la comprensión de las circunstancias que llevaron al evento, permite identificar tanto las causas inmediatas como las raíces del problema, y sustenta la implementación de medidas correctivas orientadas a prevenir futuros incidentes similares. La calidad y exhaustividad de los datos obtenidos son factores clave para garantizar la efectividad de la investigación. Esta actividad es una herramienta esencial que guiará el éxito de la investigación del evento minero. En la figura 82 se presentan los componentes propuestos para esta etapa.



Figura 82

Componentes en la etapa de recopilación de información y datos



308

Revisión documental

En esta fase de la investigación de eventos mineros causados por atmósferas contaminadas o viciadas, se llevará a cabo una recopilación y revisión exhaustiva de toda la información relevante relacionada con el comportamiento y los registros de la atmósfera y ventilación de la mina, así como los factores y variables que intervinieron en la ocurrencia del evento.

La revisión documental debe tener en cuenta lo dispuesto en cada uno de los títulos establecidos en el Decreto 1886 de 2015 modificado por el Decreto 944 de 2022, que puedan estar relacionados con las causas del acci-

dente minero. Esta información es esencial para identificar las posibles causas que contribuyeron a la materialización del evento causado por atmósferas viciadas o contaminadas.

Para esta revisión, se ha diseñado un formato modelo (ver anexo 7), en el cual se detalla la información que se considera relevante al iniciar la investigación de eventos mineros provocados por atmósferas contaminadas o viciadas.

Entrevistas

En la investigación de accidentes mineros subterráneos causados por atmósferas viciadas, las entrevistas a las personas vinculadas, ya sea de manera directa o indirecta, son una herramienta fundamental. Estas entrevistas permiten al equipo investigador realizar preguntas clave para obtener información sobre las condiciones previas al accidente y los comportamientos de los involucrados. Este análisis es crucial para identificar las causas raíz del evento, lo que facilita la implementación de medidas preventivas para evitar su repetición. Las entrevistas pueden ser grabadas, siempre con la previa autorización del entrevistado.

Rol de las entrevistas en la investigación

Las entrevistas cumplen varias funciones especiales las cuales se presentan en la figura 83.

Figura 83

Funciones especiales de las entrevistas



- Recopilación de información cualitativa: permiten entender lo sucedido desde múltiples perspectivas, integrando detalles no registrados en reportes formales o sistemas automatizados.
- Identificación de factores humanos y operativos: ayudan a evaluar si hubo errores humanos, fallas en la capacitación o decisiones inadecuadas.
- Detección de inconsistencias: contrastan las versiones de los hechos entre los diferentes actores, ayudando a esclarecer puntos oscuros.
- Recopilación de antecedentes contextuales: aportan información sobre las condiciones laborales, la cultura de seguridad y el cumplimiento de protocolos previos al accidente.

Personas clave para entrevistar

La selección de las personas entrevistadas es crucial para una investigación integral. En la medida de lo posible se deben incluir como mínimo el número de personal que se indican en la figura 84.

Figura 84

Personas clave para entrevistar en caso de un accidente o evento minero causado por atmósferas contaminadas o viciadas



▪ Directamente involucrados

1. Sobrevivientes o testigos del accidente

- Proveen detalles de las condiciones en el lugar y el momento del evento.
- Describen los síntomas experimentados (falta de aire, mareos) y las señales percibidas (olores, alarmas, etc.).
- Operadores de equipos o sistemas

Aportan información sobre el estado y operación de los sistemas de ventilación, sensores de gases y equipos críticos.

▪ Indirectamente involucrados

1. Supervisores y encargados de turno: brindan perspectiva sobre las operaciones planificadas y los protocolos aplicados.

2. Trabajadores en zonas aledañas: pueden describir si notaron anomalías previas al evento como ruidos, olores o cambios en la ventilación.
3. Personal técnico: ingenieros, topógrafos y encargados de ventilación que diseñaron o supervisaron los sistemas.
4. Personal del área de seguridad y salud en el trabajo: aportan datos sobre auditorías, inspecciones y cumplimiento de normas.

▪ Estrategias para realizar entrevistas efectivas

1. Preparación previa

- Tener en cuenta los resultados de la revisión documental, planos, registros y PTS diseñados e implementados en el desarrollo de la actividad minera en el área del evento.
- Formular preguntas abiertas que guíen el relato sin inducir respuestas y si se considera pertinente hacer preguntas cerradas.

2. Ambiente adecuado

- Realizar entrevistas en un espacio seguro y neutral, evitando presiones externas.
- Garantizar confidencialidad para fomentar respuestas honestas.

3. Técnicas de escucha activa

- Tomar notas detalladas o grabar (con previa autorización firmada por el entrevistado).
- Confirmar puntos clave para evitar malentendidos.

4. Enfoque cronológico y temático

- Solicitar una descripción de los eventos previos, durante y posteriores al accidente.
- Indagar sobre aspectos como:
 - Funcionamiento del sistema de ventilación.
 - Cambios en desarrollo de tareas asignadas o procedimientos.
 - Presencia de anomalías percibidas.

Para la realización de entrevistas se propone un formato modelo (anexo 9).

Visita técnica (recolección de evidencias del evento)

La recolección de evidencias debe enfocarse en diferentes aspectos relacionados con las condiciones del accidente:

▪ Evidencia física

- Estado de los equipos: verificar el funcionamiento de ventiladores, equipos multidetectores, sensores de gases, EPP y en general de los equipos que pudieron estar involucrados en la ocurrencia del evento.
- Estructura del lugar: inspeccionar posibles colapsos, obstrucciones o anomalías en los equipos y accesorios de ventilación.
- Condiciones del terreno: registrar acumulaciones de agua, materiales y otros elementos que puedan influir o alterar la ventilación y/o la atmosfera minera.

▪ Evidencia de condiciones atmosféricas de las labores subterráneas

- Concentraciones de gases: realizar medición de gases: metano (CH₄), porcentaje en volumen o porcentaje LEL, Oxígeno (O₂), Monóxido de Carbono (CO), Ácido Sulfhídrico (H₂S), Gases Nitrosos y Dióxido de Carbono (CO₂).
- Condiciones atmosféricas: documentar temperatura, presión y humedad en el lugar del accidente.

▪ Evidencia documental

- Mapas y planos: verificar la correspondencia entre los planos de ventilación y las condiciones reales del lugar.
- Registros operativos: revisar bitácoras de actividades, mantenimiento y monitoreo de gases.

▪ Evidencia visual

- Fotografías y videos: capturar imágenes detalladas del sitio del accidente, las áreas críticas y los equipos involucrados, utilizando cámaras intrínsecamente seguras.
- Diagramas del sitio: elaborar croquis, mapas o planos que representen las áreas afectadas y las condiciones observadas, que faciliten el entendimiento de lo que sucedió en el evento.

Considerando lo expuesto, se propone utilizar el formato modelo del anexo 10, diseñado para estructurar y documentar de forma técnica la información necesaria durante este procedimiento. Este formato incluye los siguientes elementos clave:

- Evidencias físicas
- Otras evidencias
- Registro fotográfico
- Análisis de videos
- Evaluación de todos los equipos y demás elementos que integran el circuito de ventilación.

Verificación topográfica de la mina

La investigación de accidentes mineros en ambientes subterráneos requiere un enfoque integral que considere diversos factores. Entre ellos, la verificación topográfica desempeña un papel crucial, ya que proporciona información detallada sobre las condiciones geométricas de las áreas afectadas. Esta información es fundamental, ya que permitirá los distintos softwares de ventilación, los cuales podrán simular las concentraciones y la distribución de los gases, así como su comportamiento a lo largo de las labores subterráneas, teniendo en cuenta las diversas variables que pudieron haber influido en el evento o accidente.

Procedimientos en la verificación topográfica

En la investigación de un accidente es necesario llevar a cabo los principales pasos:

- **Recolección de planos previos y actualización de datos:** revisar los planos existentes de la mina. Actualizar el modelo topográfico mediante levantamientos recientes.
- **Levantamiento en el sitio del accidente:** usar instrumentos de precisión: estaciones totales, escáneres láser o drones en accesos remotos.
- **Análisis de conexiones y ventilación:** modelar la red de ventilación para determinar posibles áreas de baja circulación de aire o atmósferas confinadas. Con esto se consigue realizar el modelamiento de flujo de gases, identificación de zonas de riesgo y un análisis de ventilación con su respectiva optimización.
- **Documentación de flujos de trabajo:** superponer los datos topográficos con las rutas recorridas por los trabajadores y/o gases contaminantes antes del accidente.

Aplicaciones específicas en la investigación de atmósferas viciadas

- **Detección de zonas críticas:** las áreas mal ventiladas o con obstrucciones suelen coincidir con puntos donde se concentran gases.
- **Evaluación de sistemas de ventilación:** identificar si existen cortocircuitos, pérdidas de presión o malos diseños que favorezcan la acumulación de gases tóxicos, asfixiantes y/o explosivos.
- **Identificación de patrones de movimiento:** los datos topográficos ayudan a determinar las rutas más utilizadas y si coinciden con las zonas afectadas.

Toma de muestras y análisis de laboratorios

En un accidente minero subterráneo causado por atmósferas viciadas, la toma de muestras es una acción clave para comprender las posibles causas que llevaron a la materialización del evento. Este proceso permite identificar y cuantificar los gases presentes, las características del aire y otros factores ambientales que pudieron haber contribuido al accidente. Los datos obtenidos a través de este análisis son esenciales para evaluar la dinámica del incidente, validar hipótesis y proponer medidas correctivas.

Importancia de la toma de muestras

La toma de muestras en el lugar del accidente proporciona una base científica y técnica que permite:

- **Caracterizar las condiciones del ambiente subterráneo:** identificar los tipos de gases presentes: tóxicos, inflamables, asfixiantes, así como sus concentraciones.
- **Determinar la calidad de la ventilación:** evaluar si el flujo de aire fue suficiente para diluir o evacuar los gases peligrosos.
- **Establecer la cronología del evento:** identificar si los niveles críticos de gases aumentaron de manera gradual o repentina.
- **Corroborar versiones:** contrastar datos técnicos con los testimonios de los involucrados y los registros operativos.
- **Proveer evidencia técnica:** respaldar la investigación y los informes ante auditorías, inspecciones o procesos legales.

Análisis de laboratorio

En minería subterránea, las características químicas y físicas de los minerales extraídos tienen un impacto directo en la calidad del aire y en el desarrollo de atmósferas viciadas. En las investigaciones de accidentes relacionados con esta causa, se requiere un enfoque integral que considere las variables y condiciones presentes en la mina. Los accidentes pueden originarse por la acumulación de gases tóxicos, deficiencia de oxígeno (O₂) o exposición a polvos peligrosos, así como por la interacción de estos con fuentes de ignición.

Los análisis de laboratorio son esenciales para la formulación y sustentación de hipótesis, la identificación de las causas raíz y el diseño de estrategias preventivas y correctivas, con el objetivo de evitar la ocurrencia de eventos similares en el futuro. A su vez permiten:

1. Identificar presencia de gases

Características de los minerales explotados y generación de material particulado. Esta información importante para ser usada en el análisis de causalidad.

2. Evaluación de condiciones previas

- Analizar la calidad del aire y la interacción de los materiales presentes antes del accidente.
- Evaluar si los sistemas de monitoreo eran adecuados para las condiciones del entorno.

3. Diseño de medidas preventivas

- Proporcionar datos objetivos para ajustar protocolos de seguridad y mitigación de riesgos.
- Mejorar el diseño de los sistemas de ventilación, detección de gases y manejo de materiales.

4. Cumplimiento de normativas

- Garantizar que las operaciones mineras se ajusten a los requisitos regulatorios existentes (Decreto 1886, 2015) modificado por el (Decreto 944, 2022) que regula la seguridad en minas subterráneas.

Tipos de minerales y análisis requeridos

Para el desarrollo de la investigación de accidentes por atmosferas mineras contaminadas o viciadas, es crucial definir los análisis de laboratorio necesarios para identificar y mitigar los riesgos asociados de acuerdo con la composición mineralógica del yacimiento (carbón, minerales metálicos, no metálicos y otros materiales).

1. Minerales de carbón

- Análisis proximal: determina el contenido de humedad, materia volátil, cenizas y carbono fijo, esenciales para evaluar la capacidad del carbón de liberar gases como metano (CH₄) y dióxido de Carbono (CO₂).
- Análisis ultimate: proporciona información sobre los elementos básicos (C, H, O, N, S) para identificar posibles emisiones de anhídrido sulfuroso (SO₂) o nitrógeno (NO_x). Liberación de gases por adsorción/desorción: evalúa el potencial de emisión de metano (CH₄) desde la matriz del carbón.
- Índice de autoignición: determina la susceptibilidad del carbón a la combustión espontánea, un factor crítico en atmósferas viciadas.

2. Minerales metálicos

- Análisis químico (ICP-MS o AAS): identifica la presencia de elementos metálicos y sus óxidos como hierro, cobre, plomo o zinc, que pueden reaccionar en condiciones subterráneas para liberar gases tóxicos.
- Estudios mineralógicos (DRX o SEM): determinan la composición mineral y estructura cristalina que influyen en las reacciones químicas durante las operaciones.
- Generación de ácido (ABA o NAG Tests): mide el potencial de drenaje ácido que puede liberar gases secundarios como anhídrido sulfuroso (SO₂) o ácido sulfhídrico (H₂S).

3. Minerales no metálicos

- Análisis de polvos respirable (Sílice Libre): evalúa la fracción respirable de sílice cristalina, que es un riesgo crítico para la salud.
- Espectroscopía infrarroja (FTIR): analiza compuestos no metálicos asociados a emisiones de vapores o gases.

4. Estudio de solubilidad: determina la liberación de compuestos tóxicos en condiciones ambientales subterráneas. Otros materiales (rocas de encajamiento, residuos, etc.):

- Análisis de gases de captura: evalúa la liberación de gases atrapados en formaciones geológicas como metano (CH₄) y dióxido de Carbono (CO₂).
- Propiedades físico-mecánicas: estudia la porosidad y permeabilidad de la roca para determinar la difusión de gases peligrosos.

Se recomienda realizar los análisis sugeridos en laboratorios acreditados y certificados para tal fin.

20.2.3 Análisis de datos

El análisis de datos es una etapa fundamental en la investigación de accidentes ocurridos en atmósferas viciadas, ya que permite transformar la información recopilada en conocimiento práctico y accionable. Este proceso consiste en examinar sistemáticamente los datos obtenidos durante la investigación, con el propósito de identificar patrones, relaciones y causas subyacentes que hayan contribuido al evento.

En el contexto de la minería subterránea, donde la exposición a atmósferas viciadas constituye un riesgo significativo, el análisis de datos es clave para el desarrollo de medidas preventivas y correctivas eficaces. Esta etapa no se limita únicamente a la identificación de factores de riesgo, sino que también evalúa la efectividad de los sistemas de ventilación, monitoreo, gestión y la implementación de protocolos de seguridad.

Mediante el uso de herramientas cualitativas y cuantitativas, el análisis de datos proporciona una comprensión profunda del incidente, facilitando la toma de decisiones informadas y el fortalecimiento del sistema de gestión de seguridad de la organización. Esta guía establece las bases necesarias para realizar un análisis de datos riguroso, asegurando que los hallazgos obtenidos contribuyan a prevenir futuros accidentes y a proteger la integridad de los trabajadores en entornos mineros.

20.2.3.1 Línea de tiempo

La línea de tiempo es una representación gráfica que organiza de manera cronológica los hechos relacionados con un accidente, construida a partir de información recopilada durante la investigación, como la revisión documental, entrevistas, registros y otros datos relevantes. Esta herramienta permite comprender la secuencia de eventos que llevaron al incidente, identificando puntos críticos y posibles desencadenantes. Además, proporciona una base estructurada para el análisis de causalidad, facilitando la identificación de causas inmediatas y raíces del evento.

En la figura 85 se presenta un ejemplo de línea de tiempo aplicada a un evento minero causado por atmósferas contaminadas o viciadas, ilustrando su utilidad como recurso clave en el desarrollo de investigaciones mineras.

Elementos clave que se incluyen en una línea de tiempo

- Fecha y hora: se indica la fecha y hora exacta de cada evento relevante.
- Descripción del evento: se describe brevemente lo sucedido en cada momento y hora relevante, utilizando un lenguaje claro y conciso.
- Personas involucradas: se identifican las personas que estuvieron presentes en cada etapa del incidente.
- Acciones realizadas: se detallan las acciones que se tomaron en respuesta a cada momento.
- Consecuencias: se describen las consecuencias de cada evento, tanto inmediatas como a largo plazo.

Si es necesario la línea de tiempo puede incluir momentos y/o acciones previas y posteriores al accidente que ayuden al entendimiento del evento y la identificación de factores que contribuyeron en la ocurrencia del evento.

Figura 85

Línea de tiempo



20.2.3.2 Descripción del accidente

El entendimiento y la descripción detallada del evento es el primer paso fundamental en cualquier investigación, y en el caso de un accidente minero, no es la excepción. Esta descripción sirve como el cimiento sobre el cual se construirá todo el análisis posterior.

¿Por qué es tan importante la descripción de la ocurrencia del accidente?

- **Comprender la secuencia de eventos:** al describir con precisión lo ocurrido, se establece una línea de tiempo clara de los acontecimientos, desde los momentos previos al accidente hasta sus consecuencias. Esto permite visualizar el escenario completo e identificar los elementos que intervinieron en el desarrollo del evento.
- **Identificar las causas directas:** la descripción detallada ayuda a identificar las causas inmediatas del accidente. Es decir, los factores que desencadenaron el evento. Por ejemplo, un derrame de combustible, una explosión o un derrumbe.

- **Detectar factores contribuyentes:** más allá de las causas directas, la descripción del accidente puede revelar factores que contribuyeron al incidente, como condiciones inseguras, errores humanos o fallas en los equipos. Estos factores son cruciales para entender el contexto más amplio del accidente.
- **Establecer hipótesis:** con una descripción clara, los investigadores pueden formular hipótesis sobre las posibles causas del accidente, las cuales serán posteriormente verificadas o descartadas a través del análisis de la evidencia.
- **Comunicar los hechos:** la descripción del accidente sirve como base para comunicar los hechos a otras personas involucradas en la investigación, como ingenieros, abogados y reguladores. Una descripción clara y concisa facilita la comprensión de lo sucedido.

Elementos clave de una descripción detallada:

- **Fecha, hora y lugar del accidente:** información básica pero esencial para ubicar el evento en el tiempo y el espacio.
- **Personas involucradas:** identificar a los trabajadores presentes, testigos y cualquier otra persona relevante.

- **Actividades en curso:** describir las tareas que se estaban realizando en el momento del accidente.
- **Condiciones ambientales:** detallar las condiciones climáticas, la iluminación, la ventilación y otros factores ambientales relevantes.
- **Equipos y maquinaria involucrados:** identificar y describir el estado de los equipos y maquinaria utilizados en el momento del accidente.
- **Lesiones y daños:** detallar las lesiones sufridas por las personas involucradas y/o los daños a la propiedad.
- **Evidencia física:** documentar cualquier evidencia física encontrada en la escena del accidente, como herramientas, materiales o marcas en el terreno.

20.2.4 Análisis causal

El análisis causal es una metodología sistemática diseñada para identificar tanto las causas fundamentales (raíces) como las causas inmediatas de un accidente o evento no deseado. Este enfoque no solo busca determinar "qué ocurrió", sino también comprender "por qué ocurrió" y "cómo puede prevenirse en el futuro". Constituye un recurso esencial en la gestión de la seguridad minera, ya que respalda la toma de decisiones informadas mediante el análisis objetivo de datos y la implementación de medidas preventivas y correctivas.

En el contexto de accidentes relacionados con atmósferas viciadas en minería subterránea, el análisis causal desempeña un papel clave, permitiendo:

1. Identificar las condiciones peligrosas que originaron el evento.
2. Detectar fallas en los sistemas de control de riesgos, como la ventilación, el monitoreo y los programas de capacitación.
3. Diseñar e implementar medidas correctivas para prevenir la repetición de incidentes similares.

4. Clasificar y analizar las causas, distinguiendo entre causas inmediatas y básicas.

20.2.4.1 Descripción de los tipos de análisis de causalidad

El análisis causal es una metodología estructurada que busca determinar las causas inmediatas y básicas de un evento o condición adversa para implementar controles efectivos.

Tipos de metodologías de análisis causal

- **Análisis de causa-raíz (ACR):** identifica las causas fundamentales que originan un problema recurrente.
- **Método de los 5 porqués:** técnica sencilla para profundizar en las causas inmediatas y llegar a la raíz.
- **Diagrama de Ishikawa:** herramienta gráfica que organiza las posibles causas en categorías principales.
- **Análisis de modos y efectos de falla (AMEF):** evalúa las posibles fallas en sistemas y sus impactos.
- **Árbol de fallos:** representa gráficamente las combinaciones de eventos que pueden llevar a una condición peligrosa.

En la tabla 116 se presenta un comparativo de los tipos de análisis de causalidad.

Tabla 116

Comparación de tipos de análisis de causalidad

TIPO DE ANÁLISIS	METODOLOGIA	VENTAJAS	LIMITACIONES
Análisis de causa raíz (ACR)	Utiliza herramientas como el "Diagrama de Ishikawa" o los "5 Por qué" para investigar las causas raíz. Examina aspectos técnicos, operativos y organizacionales relacionados al evento.	<ul style="list-style-type: none"> Identifica causas profundas y no evidentes. 	<ul style="list-style-type: none"> Requiere datos completos y un equipo capacitado.
		<ul style="list-style-type: none"> Facilita soluciones a largo plazo. 	
Método de los 5 porqués	Realiza una serie de preguntas "¿Por qué?" de forma iterativa hasta identificar la causa raíz. Por lo general, se requieren cinco iteraciones.	<ul style="list-style-type: none"> Simplicidad en su aplicación. 	<ul style="list-style-type: none"> Puede ser insuficiente para problemas complejos.
		<ul style="list-style-type: none"> Fomenta un pensamiento lógico y directo. 	<ul style="list-style-type: none"> Riesgo de centrarse en una sola causa y omitir otras relacionadas.
Diagrama de Ishikawa (Espina de pescado)	Representa gráficamente las posibles causas agrupándolas en categorías (personas, equipos, procedimientos, entorno, materiales).	<ul style="list-style-type: none"> Estructura visual que facilita la identificación de múltiples causas. 	<ul style="list-style-type: none"> Puede ser superficial si no se detalla cada categoría.
		<ul style="list-style-type: none"> Útil para análisis colaborativo. 	
Análisis de modos y efectos de falla (AMEF)	Identifica fallas potenciales en componentes críticos (ventilación y sensores de gases) y evalúa sus impactos y probabilidades. Clasifica riesgos para priorizar acciones correctivas.	<ul style="list-style-type: none"> Proactivo en la prevención de futuros accidentes. 	<ul style="list-style-type: none"> Requiere tiempo y experiencia para realizarlo.
		<ul style="list-style-type: none"> Permite una evaluación detallada de sistemas técnicos. 	<ul style="list-style-type: none"> Menos efectivo para causas humanas o organizacionales.
Árbol de causas	Construye un diagrama jerárquico para identificar las relaciones entre causas inmediatas, intermedias y básicas.	<ul style="list-style-type: none"> Claridad visual y lógica en el análisis. 	<ul style="list-style-type: none"> Puede simplificar excesivamente eventos con interacciones complejas.
		<ul style="list-style-type: none"> Útil para representar accidentes complejos. 	

20.2.4.2 Identificación y clasificación de causas básicas e inmediatas

Una vez expuestas las diferentes metodologías para llevar a cabo el análisis de causalidad, la organización minera tendrá la posibilidad de seleccionar aquella que mejor se ajuste a sus necesidades específicas en la investigación de accidentes y eventos mineros originados por atmósferas contaminadas o viciadas.

Con el análisis causal se pretende determinar:

- **Causas inmediatas**

Descripción de las condiciones o eventos que provocaron directamente el accidente.

- **Causas básicas**

Factores subyacentes que contribuyeron al accidente, como deficiencias en la gestión, capacitación o mantenimiento. En la tabla 117, se presentan algunos ejemplos de causas básicas e inmediatas generadas por accidentes o eventos mineros causados por atmósferas mineras contaminadas o viciadas.



Tabla 117

Ejemplos de causa básicas e inmediatas en eventos causados por atmósferas contaminadas

CAUSAS INMEDIATAS	CAUSAS BASICAS
Obstrucción parcial en los ductos de ventilación.	Procedimientos insuficientes en la organización minera para la gestión de emergencias por cortes de energía.
Intoxicación por monóxido de carbono (CO) tras funcionamiento de maquinaria en área deficientemente ventilada	Falta de procedimientos claros para operar maquinaria en labores subterráneas
Sensor de gas minero defectuoso no alertó sobre niveles críticos.	Acumulación de gases mineros por fallo en gestión de la ventilación.
Fallo en el suministro eléctrico que detuvo los ventiladores.	Deficiencia de mantenimiento preventivo en los ventiladores principales.

Figura 86

Jerarquía de controles en un evento minero causado por atmosferas contaminadas o viciadas.



Elaboración del plan de acción

El plan de acción establece las actividades, responsables y plazos para implementar las medidas de control, considerando los siguientes parámetros:

1. Definir los objetivos: el primer paso consiste en tener claros los objetivos que se desean alcanzar.
2. Desglosar el objetivo en tareas: una vez definido el objetivo, es necesario dividirlo en tareas más pequeñas y manejables.
3. Asignar responsabilidades: es fundamental asignar de manera clara y específica las responsabilidades.
4. Establecer plazos realistas: los plazos deben ser viables y alcanzables, teniendo en cuenta los recursos disponibles.
5. Identificar los recursos necesarios: es importante determinar los recursos (humanos, materiales y financieros) necesarios para llevar a cabo el plan de acción.

20.2.6 Informe final

El informe final es el documento que recopila los hallazgos, el análisis y las conclusiones derivadas de la investigación de un accidente minero. Este informe es fundamental para documentar los hechos, determinar responsabilidades, proponer medidas de control y garantizar el cumplimiento de la normativa aplicable (Decreto 1886, 2015) y (Ministerio de Salud y Protección Social, Resolución 1401 de 2007).

Objetivos del informe final:

- Documentar de manera sistemática los hechos relacionados con el accidente.
- Identificar causas inmediatas y básicas.
- Proponer medidas correctivas y preventivas.
- Asegurar la trazabilidad del proceso de investigación.
- Cumplir con los requisitos legales y normativos en Colombia.

Para la elaboración del informe final se propone la utilización del formato anexo 11.

20.2.7 Lección aprendida y socialización

Las lecciones aprendidas son el conjunto de conocimientos adquiridos a partir de la investigación de un evento o accidente. Estas permiten identificar oportunidades de mejora y fortalecer los procesos de seguridad en minería subterránea.

La lección aprendida debe contener, como mínimo, la siguiente información:

- Datos básicos de la mina
- Descripción del evento
- Causas del evento
- Las medidas de control establecidas para evitar la ocurrencia de nuevos accidentes por la misma causa

Esta información se extrae de las evidencias recolectadas y del análisis de la información realizado durante la investigación del evento o accidente minero causado por atmósfera contaminada o viciada.

La lección aprendida debe ser socializada con todo el equipo de trabajo de la organización minera, con el fin de que se implementen las medidas necesarias para prevenir la ocurrencia de eventos similares que puedan afectar a las personas, el medio ambiente, la infraestructura minera y las reservas del mineral de interés.

Para la elaboración de la lección aprendida, se recomienda utilizar el formato del anexo 12.



20.2.8 Seguimiento

•
•
•
•
•
•
•

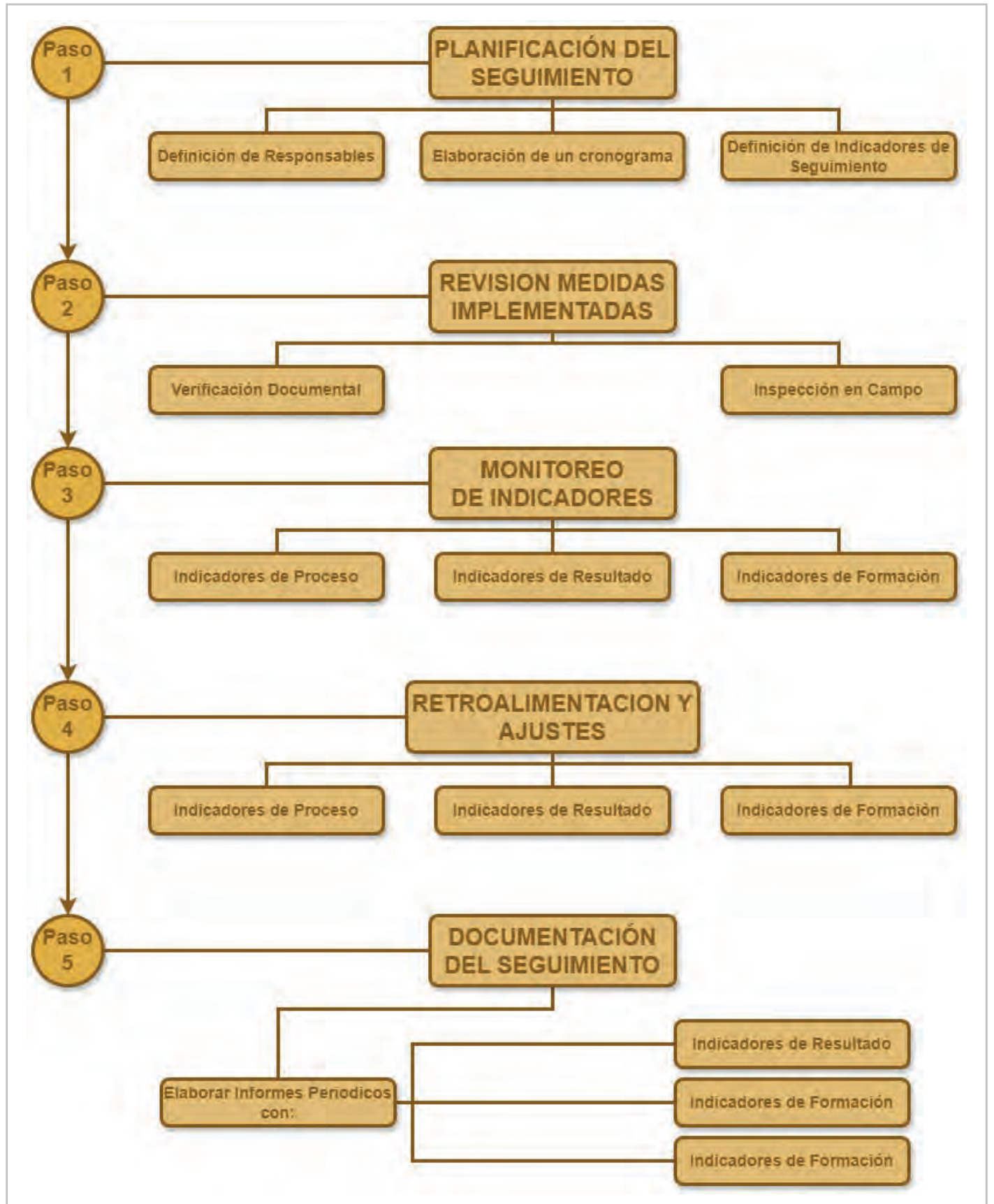
321

El seguimiento es la última fase en la investigación de un accidente, y garantiza que las medidas correctivas y preventivas implementadas sean efectivas y sostenibles. Este proceso incluye la evaluación de las acciones ejecutadas, el cumplimiento de la normatividad y la revisión continua de los riesgos en la minería subterránea, especialmente en relación con las atmósferas viciadas o contaminadas.

A continuación, se presenta la figura 87 donde se describe el proceso metodológico para realizar el respectivo seguimiento.

Figura 87

Proceso metodológico para realizar el seguimiento





GLOSARIO

Acumulación de gas: concentración de gases dentro de una mina debido a la falta de ventilación adecuada.

Aire puro: mezcla de gases atmosféricos, principalmente oxígeno y nitrógeno, esencial para la respiración y libre de contaminantes.

Análisis de gas: proceso de medir la composición de los gases en una muestra de aire de la mina para identificar posibles contaminantes.

Antracita: tipo de carbón de alta calidad y bajo contenido de gases volátiles, menos propenso a la liberación de gas metano (CH₄)

Atmósfera viciada: la presencia de gases tóxicos o insuficiente oxígeno en el ambiente minero.

Bolsas de gas: acumulaciones localizadas de gas dentro de la mina que pueden ser peligrosas si se liberan repentinamente.

Carbón bituminoso: tipo de carbón que puede liberar gas metano (CH₄) durante la minería, representando un riesgo para la atmósfera de la mina.

Columna de agua: acumulación de agua en una mina que puede actuar como una barrera para los gases, afectando su distribución.

Ciclo PHVA (Planificar-Hacer-Verificar-Actuar): es una estrategia interactiva de resolución de problemas para mejorar procesos e implementar cambios. En este proceso se formulan hipótesis, ponen a prueba las ideas y las mejoran.

Circuito de ventilación: es la vía de la mina por donde circula una corriente de aire en cantidad y calidad suficiente para diluir contaminantes a valores límites seguros en todos los lugares donde el personal esté laborando.

Desgasificación: proceso de eliminación de gases acumulados en formaciones rocosas, especialmente en minas de carbón.

Epigenético: cuerpo de minerales formado por fluidos y gases hidrotermales que provienen de otros lugares y fueron introducidos en las rocas huésped o encajadas. Espeleotemas: formaciones minerales en cavidades subterráneas que pueden influir en la circulación del aire y la acumulación de gases.

Estructuras geológicas: formaciones naturales en las rocas, como fallas y pliegues, que pueden afectar el flujo de gases en la mina.

Explosiones: eventos catastróficos que pueden ocurrir debido a la acumulación de gases o sustancias inflamables.

Falla geológica: fractura en la corteza terrestre que puede actuar como canal para el movimiento de gases subterráneos.

Fracturación hidráulica: técnica utilizada para liberar gas natural atrapado en formaciones rocosas mediante la inyección de líquidos a alta presión.

Gas (industria minera): 1. Término usado por los mineros para referirse a un aire impuro, especialmente con combinaciones explosivas. 2. Gases combustibles, como el metano (CH₄), mezcla de aire y gases combustibles, u otras mezclas de gases explosivos que se encuentran en las minas.

Gas adsorbido: gases que se adhieren a la superficie de los minerales en la mina, afectando su liberación y acumulación.

Gas Metano (CH₄): gas inflamable que se encuentra comúnmente en minas de carbón y puede formar atmósferas explosivas.

Gases esenciales: en el contexto minero, el aire atmosférico y el oxígeno, los gases indispensables para la vida del hombre.

Gases explosivos: en el contexto minero, gases que en altas concentraciones forman mezclas explosivas con el aire. Se destacan, metano (CH₄); monóxido de carbono (CO) explosivo en concentraciones entre (13 y 75%); acetileno (C₂H₂) y ácido sulfhídrico (H₂S).

Gases sofocantes: son aquellos que producen asfixia y, en concentraciones elevadas, pueden ser letales:

- Nitrógeno (N₂)

- Dióxido de Carbono (CO₂) en concentraciones superiores al 15% en volumen, es mortal.
- Metano (CH₄)
- Gas de carburo (C₂H₂) producido por la reacción del agua con el carburo de calcio, este gas tiene un olor característico a ajo.

Gases tóxicos: son aquellos que tienen efectos venenosos sobre el organismo, y su exposición puede causar daño grave. Entre los más comunes en la minería se incluyen:

- Monóxido de carbono (CO)

Humo nitroso: Con un olor y sabor ácidos, es altamente irritante.

Sulfuro de hidrógeno (H₂S): También conocido como ácido sulfhídrico, tiene un olor a huevos podridos y su límite permisible es de 8 partes por millón (ppm).

Anhídrido sulfuroso (SO₂): Cuando la concentración supera el 15% en volumen, es mortal. Su límite permisible es de 1,6 ppm.

Gasificación (carbón): es el proceso de combustión en aire u oxígeno, en el que todo el combustible sólido, salvo las cenizas, se convierte en gases combustibles.

Geotermal: relacionado con el calor interno de la tierra, que puede influir en la liberación de gases y vapores en minas subterráneas.

Horizonte de carbón: capas de carbón en la corteza terrestre que pueden liberar metano (CH₄) durante la minería.

Matriz rocosa: composición y estructura de las rocas en una mina, que influyen en la retención y liberación de gases.

Mejora continua: una actividad recurrente para mejorar el desempeño.

Metalogenia: rama de la geología que estudia el origen de los yacimientos minerales, sus relaciones con las rocas que los contienen, las estructuras que los controlan y las leyes que gobiernan la distribución de los depósitos minerales en la corteza terrestre. Esta definición considera todas las variables en el espacio y en el tiempo.

Perfil profesional: documento que resume las habilidades, conocimientos, experiencias y objetivos de una persona en relación con su carrera.

Permeabilidad: capacidad de una roca para permitir el paso de fluidos y gases a través de ella, influenciada por su porosidad y fracturación.

Plan de Gestión del Riesgo: es un enfoque sistemático y estructurado diseñado para identificar, analizar, evaluar, medir y supervisar los riesgos y amenazas que puedan afectar a una organización. Esta herramienta es esencial para gestionar los riesgos que impactan la operatividad y la seguridad de las actividades organizacionales, permitiendo una respuesta proactiva y eficiente ante posibles contingencias.

Plan de contingencia: conjunto de acciones prediseñadas que una organización o proyecto debe seguir en caso de que ocurran situaciones imprevistas o se presenten problemas durante la ejecución del plan original. Un plan de contingencia debe contemplar tres aspectos clave: Protección, para prevenir o mitigar los riesgos; Detección, para identificar a tiempo las amenazas; y Recuperabilidad, para garantizar una pronta recuperación y continuidad de las operaciones tras un incidente.

Porosidad: proporción del volumen de una roca que está ocupado por espacios vacíos, afectando su capacidad de almacenar gases.

Porosidad interconectada: propiedad de una roca o terreno con intersticios conectados por varios lados. Las corrientes de agua pueden desalojar el gas. Se expresa como el porcentaje de volumen bruto ocupado por dichos intersticios.

Suelos carboníferos: formaciones geológicas ricas en carbón que son susceptibles a la liberación de metano (CH₄).

Sulfatos: compuestos químicos que pueden formarse en minas y contribuir a la generación de drenaje ácido y liberación de gases tóxicos.

Tectónica: relativo a las fuerzas internas de la tierra que dan origen a las formas externas de ella. Conjunto de deformaciones que han afectado a los terrenos geológicos posteriormente a su formación (fracturas, pliegues, esquistosidad, etc.). Se excluyen las deformaciones menores de los sedimentos que se producen durante su depósito (deformaciones sedimentarias).

Termogénesis: formación de gas natural a partir de la descomposición térmica de materia orgánica en rocas sedimentarias.



Trampas de gas: estructuras geológicas que atrapan gases, previniendo su migración y acumulación en ciertas áreas de la mina.

Ventilación: operación encargada de llevar aire fresco y puro a los frentes de explotación y evacuar de ellos el aire viciado o enrarecido, por medio de recorridos definidos en las diferentes secciones de la mina.

Ventilación natural: circulación de aire en una mina debido a las diferencias de presión y temperatura entre el interior y el exterior.

Ventilación secundaria: son sistemas auxiliares que, mediante ductos y ventiladores adicionales, permiten ventilar áreas restringidas dentro de las minas subterráneas, facilitando la circulación de aire fresco. Estos sistemas operan en conjunto con el sistema de ventilación primaria, utilizando circuitos específicos para la entrada de aire limpio y la evacuación del aire viciado, contribuyendo así a mantener condiciones atmosféricas seguras y adecuadas para los trabajadores en zonas de difícil acceso.

Yacimiento mineral: es una acumulación natural de minerales en la corteza terrestre que presentan valor económico y pueden ser extraídos para uso comercial.

Zona de saturación: parte de una mina donde los poros y fracturas de las rocas están completamente llenos de agua, lo que puede influir en la distribución de gases.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Comisión Económica para América Latina y el Caribe - CEPAL. (2018). Estado de situación de la minería en América Latina y el Caribe: desafíos y oportunidades para un desarrollo más sostenible. https://www.cepal.org/sites/default/files/presentation/files/181116_extendidadfinalconferencia_a_los_ministros_mineria_lima.pdf

BBB News Mundo. (8 de mayo del 2023). Al menos 27 personas mueren tras incendiarse una mina de oro en Perú. BBC News Mundo. <https://miniurl.cl/u9whsz>

Comisión Nacional de los Derechos Humanos (2020). Antecedentes. <https://www.cndh.org.mx/seccion/42/cndh>
Zippo, E. (2016). La tragedia que se pudo evitar en Santa Cruz. La Izquierda Diario. <https://www.laizquierdadiario.com/Rio-Turbio-La-tragedia-que-se-pudo-evitar-en-Santa-Cruz>.

Agencia nacional de Minería. (2024). Sabanas de accidentalidad a corte de 28 de Julio de 2024.

IMF Smart Education. (2023). IMF blog de Recursos Humanos. <https://blogs.imf-formacion.com/blog/recursos-humanos/busqueda-de-empleo/que-es-un-perfil-profesional-ejemplos-y-forma-de-redactarlo>

La Organización Internacional de Normalización (ISO). (2015). Sistema de Gestión de la Calidad- Fundamentos y Vocabulario. (ISO 9000). <https://www.iso.org/standard/60857.html>

Martins, J. (15 de febrero de 2024). Ciclo PDCA o Deming: En qué consiste y cómo utilizarlo para la mejora continua de tu empresa. Asana. <https://asana.com/es/resources/pdca-cycle>.

Safety Culture. (2024). Plan de Gestión de riesgos. <https://safetyculture.com/es/temas/gestion-de-riesgos/plan-de-gestion-de-riesgos>.

Safety Culture. (2024). Plan de contingencia. <https://safetyculture.com/es/temas/plan-de-contingencia>.

Gómez, L., & Martínez, R. (2019). Desafíos actuales para la hidrogeología en la industria minera, Journal of Mining and Environmental Management.

Pérez, J., & Rodríguez, M. (2020). La contaminación de las aguas subterráneas por residuos mineros. Revista de Hidrogeología

Clavijo, J.A. (s.f) Monitoreo de Gases en Minería. https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/presentacion_multidetectors_ibrid-mx6.pdf

Córdoba, C & Molina, J. (2011). Caracterización de sistemas de ventilación en minería subterránea. Universidad Nacional de Colombia.

Herrera, H. (2019). Introducción a la ventilación minera. Universidad Politécnica de Madrid.

Rebolledo, I & César, N. (2019). Propuesta de ventilación para minera blanco III, comuna de los Vilos. Universidad Técnica Federico Santa María (Chile).



Servicio Nacional de Aprendizaje – SENA. (1987). Bloque modular, Ventilación de minas.

Fernández, C., & López, D. (2021). Hidrogeología y minería: ¿En qué consiste y su importancia?: Geosciences Review.

Ramírez, J., & Castillo, F. (2017). Hydrological Studies, 9(3), 89-104. Impactos físicos de la minería en el medio hidrológico:

Danfoss. (2022). Equipos de ventilación para minas: Salud y seguridad para los trabajadores. Mining México

Soler & Palau. (s.f.). Mantenimiento preventivo de los sistemas de ventilación. Soler & Palau.

Ministerio de Minas y Energía de Colombia. (2019). Protocolos y Guía de Procedimiento para la Ventilación y Prevención de Atmósferas Viciadas de Labores Mineras de Oro.

Paredes Ávila, J. J. (2022). Propuesta de un plan de mantenimiento preventivo en ventiladores para la optimización del sistema de ventilación en minería subterránea [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Trujillo].

Ministerio del Trabajo de Colombia. (26 de mayo de 2015). Decreto Único Reglamentario del Sector Trabajo. [Decreto 1072 de 2015].

Chasm Consulting. (2023). Ventsim Visual (Versión 5.4) [Software de simulación de ventilación].

Ministerio de Minas y Energía. (21 de septiembre de 2015). Reglamento de Seguridad en las Labores Mineras Subterráneas [Decreto 1886 de 2015]. DO: 49.603.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2011). Gestión del Riesgo, Principios y Directrices (NTC-ISO 31000). <https://www.icontec.org>

Ventsim Visual Ventilation Simulation Software. (2024). Ventsim Software: Modelado y simulación de ventilación en minería subterránea.

Bogotá, A. M. (2018). Identificación de peligros, valoración de riesgos y determinación de controles. Bogotá.

Prevención, L. s. (2024). Qué hacer en caso de un accidente de trabajo. https://laborapreencion.com/que-hacer-en-caso-de-accidente-de-trabajo/?expand_article=

Pública, F. (2023). Guía reporte de actos y condiciones inseguras y auto reporte en condiciones de salud.

Social, M. d. (2022). Guía para la identificación de peligro, valoración de riesgos y determinación de controles.

I. N. (1999). NTP 415. Actos inseguros en el trabajo: Guía de intervención. España.

GanttPRO. (2022). Asignación de recursos en un proyecto. GanttPRO Blog. <https://blog.ganttpro.com/es/asignacion-de-recursos-en-un-proyecto/>

Virage Group. (2023). ¿Cuáles son los recursos necesarios para réussir un proyecto? VirageGroup. <https://www.viragegroup.com/es/recursos/quelles-sont-les-ressources-necessaires-pour-ressir-un-projet/>

Scentroid. (2024). Scentroid Mining Air Quality Monitoring.

<https://scentroid.com/wp-content/uploads/2024/09/Scentroid-Mining-Air-Quality-Spanish.pdf>

VDM Consultores. (2019). Monitoreo, control y automatización de sistemas de ventilación.

<https://vdmconsultores.cl/wp-content/uploads/2019/11/LECTURA-3-Monitoreo-Control-y-Automatizaci%C3%B3n-Sistemas-de-Ventilaci%C3%B3n-07-10-2019.pdf>

Sick AG. (s. f.). Control óptimo de la ventilación en la minería subterránea.

<https://www.sick.com/mx/es/sectores/mineria/mineria-subterranea/modo-mina/control-optimo-de-la-ventilacion-en-la-mineria-subterranea/c/p674801>

Issuu Osinergmin. (2021). Boletín técnico de monitoreo en minería subterránea.

<https://issuu.com/osinergmin/docs/boletin-gsm-2021-iiit-osinergmin/s/16102497>

Alonso, E., & Chacón, J. (2017). Gestión de ventilación en minería subterránea. Revista de Ingeniería y Seguridad Minera. <https://www.revistadeseguridadminera.com>

La Organización Internacional de Normalización (ISO). (2015). Sistemas de gestión ambiental – Requisitos con orientación para su uso. (ISO 14001). <https://www.iso.org/standard/60857.html>

La Organización Internacional de Normalización (ISO). (2015). Sistemas de gestión ambiental – Requisitos. (ISO 9001). <https://www.iso.org/iso-9001-quality-management.html>

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). (2018). Mining Safety and Health Standards. <https://www.cdc.gov/niosh/mining/>

Occupational Safety and Health Administration (OSHA). (2020). Ventilation Standards for Underground Mining. <https://www.osha.gov/standards/mining/ventilation>

Alfaro, M. L., Baltodano, S., Soto, P., & Cea, A. (2013). Curso básico de sistema de comando de incidentes: Material de referencia. Oficina de los Estados Unidos de Asistencia para Desastres en el Extranjero para Latinoamérica y el Caribe (OFDA/LAC) & USAID.

ANEXOS

Anexo 1.

Evaluación de riesgos en atmosferas viciadas o contaminadas.

Análisis de riesgo

NIVEL DE DEFICIENCIA						
Factores a evaluar Cualitativos	Bajo	Factores a evaluar Cuantitativos	Medio	Factores a evaluar Cuantitativos	Alto	Factores a evaluar Cuantitativos
Factor por tipo y característica de los yacimientos	2	Yacimientos Residuales Yacimientos Sedimentarios (Rocas Carbonáticas y Otros)	6	Yacimientos metamorficos	10	Yacimientos Sedimentarios (Carbon) Hidrotermales, Magmaticos
Factor Tectónico-Estructural	2	Levemente fracturada, ≤ 3 sistemas de discontinuidad. Muy espaciadas entre si. (RQD 75% -90%). (2-6 fract/m).	6	Moderadamente fracturada, muy bien trabada, no disturbada, bloques cúbicos formados por tres sistemas discontinuidades ortogonales, (RQD 50-75), (6 -12 fract/m).	10	Muy fracturada / Intensamente fracturada. Plegamiento y fallamiento, con muchas discontinuidades intersectadas formando bloques angulosos o irregulares. (RQD 25-50%), (12-20 fract/m).
Factor propiedades físicas de rocas y suelos	2	Yacimientos Sedimentarios (Materiales de Construcción) Porosidad-- 10 - 30% . Permeabilidad-- 10 - 1000 mD	6	Yacimientos metamorficos Porosidad < 1% Permeabilidad < 0,01 mD Yacimientos magmaticos Porosidad-- 0,1 - 5,0% Permeabilidad-- 0,01 - 1,0 mD	10	Yacimientos Hidrotermales Porosidad-- 5,0 - 15% Permeabilidad-- 1 - 1000 mD (Altas zonas de fracturamiento). Yacimientos Sedimentarios (Carbon y Rocas Accesorio) Porosidad-- 10 - 30% . Permeabilidad-- 10 - 1000 mD
Factor propiedades químicas de rocas y suelos	2	Metano (CH ₄) -- 0 - 0,1 % Dioxido de Carbono (CO ₂)-- 0 - 0,03% Oxigeno (O ₂)-- 20,9% Presencia de Sulfuros-- Ninguno pH del Suelo--6,0 - 8,0	6	Metano (CH ₄) -- 0,1 - 0,5% Monoxido (CO)-- 0 - 0,0025% Dioxido de Carbono (CO ₂)-- 0,03 - 0,5% Oxigeno (O ₂)-- 19,5 - 20,9% Presencia de Sulfuros-- presente. Bajo contenido pH del Suelo-- 5,0 - 6,0	10	Metano (CH ₄) -- >0,5% Monoxido (CO)-- 0,0025 - 0,005% ; >0,005% Dioxido de Carbono (CO ₂)-- >0,5% Oxigeno (O ₂)-- <19,5 % Presencia de Sulfuros-- presente. Alto contenido pH del Suelo-- <5,0
Adsorción y cromatografía de gases	2	Concentraciones de gases dentro de los límites permisibles y una capacidad de adsorción adecuada.	6	Concentraciones de gases cercanas a los límites de alarma, con una capacidad de adsorción moderada.	10	Las concentraciones de gases superan los niveles de alarma o críticos y la capacidad de adsorción es baja.
Factor Temperatura	2	Cuanto la temperatura promedio dentro de la mina está alrededor de 23 °C	6	Cuanto la temperatura promedio dentro de la mina está alrededor de 25 °C	10	Cuanto la temperatura promedio dentro de la mina está alrededor de 30 °C
Factor Humedad Absoluta	2	Humedad Absoluta: Menor de 0.36 g/m ³ (poca acumulación de vapor)	6	Humedad Absoluta: Entre 0.36 g/m ³ y 0.67 g/m ³	10	Humedad Absoluta: Desde 0.67 g/m ³ hasta más de 1.21 g/m ³
Factor Confort termico	2	Temperatura efectiva es menor que Temperatura humeda y la temperatura seca	6	Temperatura efectiva es igual que Temperatura humeda y la temperatura seca	10	Temperatura efectiva es mayor que Temperatura humeda y la temperatura seca
Factor Material particulado	2	VPL < a 0.025 mg/m ³	6	Entre 0.025 mg/m ³ a 0.1 mg/m ³	10	VPL > 0.1 mg/m ³

NIVEL DE DEFICIENCIA						
Factores a evaluar Cualitativos	Bajo	Factores a evaluar Cuantitativos	Medio	Factores a evaluar Cuantitativos	Alto	Factores a evaluar Cuantitativos
Factor polvo de carbón	2	Materia Volátil: Menor de 41% de materia volátil	6	Materia Volátil: Entre 41% y 45 % materia volátil	10	Materia Volátil: Igual o mayor a 46%
	2	Tamaño de Partícula: Mayor 200 micras	6	Tamaño de Partícula: Entre 76 y 200 micras	10	Tamaño de Partícula: Menor a 75 micras
	2	Dureza del Carbon: Mayor a 37% de dureza	6	Dureza del Carbon: Entre 36% y 37% de dureza.	10	Dureza del Carbon: Igual o menor a 36% de dureza
	2	Poder Calorífico: Menor a 9600 Kcal/Kg	6	Poder Calorífico: Entre 6900 y 7200 Kcal/Kg	10	Poder Calorífico: Mayor a 7200 Kcal/Kg
	2	<24% cantidad de Liptinita en el carbón	10	Entre 24% y 34% de Liptinita en el carbón	10	>34% de Liptinita en el carbón
Factor Neutralización del polvo de carbón	2	80% de las labores mineras	6	Entre el 50% y 80% de las labores mineras	10	<50% de las labores mineras
Factor Equipos de combustión	2	Si la concentración de CO es menor al 0.08% (800 ppm) entonces se debe asegurar un caudal de aire de 4 m³/min por Hp.	6	Si la concentración de CO esta entre 0.08% (800 ppm) y 0.12% (1200 ppm) entonces se debe asegurar un caudal de aire mínimo de 5 m³/min por Hp.	10	Si la concentración de CO es superior al 0.12% (1200 ppm) entonces se debe asegurar un ingreso de aire de 6 m³/min por Hp.
Factor Uso de Explosivos	2	No uso de explosivos CH₄ = 0%	6	No uso de explosivo y CH₄ = 0.5% o más Utiliza explosivo y CH₄ < 0.5%	10	Uso de explosivos CH₄ = 0.5%
Factor Equipos de medición de gases portátiles o estacionarios	2	Se tiene una calibración certificada de acuerdo a lo recomendado por fabrica	6	No tiene una calibración certificada en los ultimos 6 meses	10	No tiene una calibración certificada en los ultimos 12 meses
Factor Equipos e instalaciones eléctricas	2	Los equipos e instalaciones electricas son certificados anti explosión y/o aseguran condiciones optimas operativas	6	Se cuenta con equipos en buen estado, pero no certificados anti-explosión	10	No cuenta con equipos certificado anti-explosión,
Factor Equipos de generación de energía de emergencia	2	Cuentan con equipos de generación de energía capaz de sostener la ventilación en caso de corte de energía	6	Puede abastecer un tiempo corto la ventilación de la mina	10	No cuenta con equipos de generación de energía que puedan sostener la ventilación en caso de corte de energia
Factor Caudal de aire de requerida	2	No cuenta con una entrada y salida de aire en la mina que asegura la cantidad suficientes de acuerdo con los requerimientos operativos	6	Algunos sitios cuentan con el caudal suficiente y otros no se conoce	10	El caudal de aire que ingresa y sale de la mina corresponde al requerido o no se conoce
Factor de riesgo por tipo de arranque	2	Factor de riesgo por tipo de arranque	6	Arranque realizado por medio de martillos neumaticos y/o electricos.	10	Arranque realizardo con equipos mecanizados y voladuras.
Metano CH₄ - 1%	2	Cuando la medición de metano esta entre 0 % a 0.3%	6	Cuando la medición está entre 0.3 % - 0.9%	10	Mayor a 1%
Monóxido de carbono CO - 25 ppm	2	Cuando la medición esta entre 0 a 10 ppm	6	Cuando la medición está entre 11 y 25 ppm	10	Cuando la medición está por encima de 25 ppm
Acido Sulfhídrico H₂S - 1 ppm	2	Cuando la medición esta entre 0 a 0.3 ppm	6	Cuando la medición está entre 0.4 a 0.9 ppm	10	Cuando la medición está por encima de 1 ppm
Anhidrido Sulfuroso SO₂ - 5 ppm	2	Cuando la medición está entre 0 a 0.007 ppm	6	Cuando la medición está entre 0.007 y 4.9 ppm	10	Cuando la medición está por encima de 5 ppm
Oxido Nítrico NO - 25 ppm	2	Cuando la medición está entre 0.3 a 1 ppm	6	Cuando la medición está entre 1 y 25 ppm	10	Cuando la medición está por encima de 25 ppm
Dióxido de Nitrógeno NO₂ - 0.2 ppm	2	Cuando la medición está entre 0 a 0.052 ppm	6	Cuanto la medición está entre 0.053 y 0.2 ppm	10	Cuando la medición está por encima de 0.2 ppm
Oxigeno O₂ - 21%	2	Cuando el oxigeno esta dentro de 19.5 % a 23.5%	6	Cuando esta entre 19 % a 19.4% o de 23 % a 23.5%	10	Menor a 19.5% y mayor a 23.5%

NIVEL DE DEFICIENCIA						
NIVEL DE DEFICIENCIA (ND)	Valor	BAJO	Valor	MEDIO	Valor	ALTO
		2	48 - 112	6	113 - 177	10

NIVEL DE EXPOSICIÓN								
NIVEL DE EXPOSICIÓN (NE)	Valor	ESPORADICO (EE)	Valor	OCASIONAL (EO)	Valor	FRECUENTE (EF)	Valor	PERMANENTE (EP)
		1	La exposición al riesgo se presenta de manera eventual	2	La situación de exposición se presenta alguna vez dentro de la jornada laboral	3	La situación de exposición se presenta varias veces durante la jornada laboral por tiempos cortos	4

NIVEL DE CONSECUENCIA								
NIVEL DE CONSECUENCIA (NC)	Valor	LEVE (L)	Valor	GRAVE (G)	Valor	MUY GRAVE (MG)	Valor	MORTAL O CATASTROFICO (M)
		10	Lesiones o enfermedades que no requieren incapacidad	25	Lesiones o enfermedades con incapacidad laboral temporal	60	Lesiones o enfermedades graves irreparables (Incapacidad permanente parcial o invalidez)	100

DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE RIESGO					
NIVEL DE RIESGO (NR) = NP * NC		NIVEL DE PROBABILIDAD (NP)			
		40	18	4	2
NIVEL DE CONSECUENCIA (NC)	100	4000	1800	400	200
	60	2400	1080	240	120
	25	1000	450	100	50
	10	400	180	40	20

ACEPTABILIDAD DEL RIESGO			
NIVEL DE RIESGO	VALOR	SIGNIFICADO	
BAJO	200 - 20	No intervenir, salvo que un análisis mas preciso lo justifique.	Aceptable
MEDIO	1079 - 201	Mejorar el control existente	Mejorable
ALTO	2400 - 1080	Corregir o adaptar medidas de control	No aceptable o aceptable con control específico
MUY ALTO	Mayor a 2400	Situación crítica, corrección urgente.	No aceptable

Factores atmosféricos

NIVEL DE DEFICIENCIA						
Factores a evaluar Cualitativos	Bajo	Factores a evaluar Cuantitativos	Medio	Factores a evaluar Cuantitativos	Alto	Factores a evaluar Cuantitativos
Nivel de Deficiencia						
Factor a Evaluar	Bajo	Explicación	Medio	Explicación	Alto	Explicación
Gases existentes						
Dióxido de carbono CO ₂ - 5000 ppm	2	Cuando la medición está entre 0 a 400 ppm (Perú)	6	Cuando la medición está entre 400 a 5000 ppm	10	Cuando la medición está por encima de 5000 ppm
Monóxido de carbono CO - 25 ppm	2	Cuando la medición esta entre 0 a 10 ppm (México)	6	Cuando la medición está entre 11 y 25 ppm	10	Cuando la medición está por encima de 25 ppm
Acido Sulfhídrico H ₂ S - 1 ppm	2	Cuando la medición esta entre 0 a 0.3 ppm (USA)	6	Cuando la medición está entre 0.4 a 0.9 ppm	10	Cuando la medición está por encima de 1 ppm
Anhidrido Sulfuroso SO ₂ - 5 ppm	2	Cuando la medición está entre 0 a. 0.007 ppm (OMS)	6	Cuando la medición está entre 0.007 y 4.9 ppm	10	Cuando la medición está por encima de 5 ppm
Oxido Nítrico NO - 25 ppm	2	Cuando la medición está entre 0.3 a 1 ppm (OSHA)	6	Cuando la medición está entre 1 y 25 ppm	10	Cuando la medición está por encima de 25 ppm
Dióxido de Nitrógeno NO ₂ - 0.2 ppm	2	Cuando la medición está entre 0 a 0.052 ppm (EPA)	6	Cuanto la medición está entre 0.053 y 0.2 ppm	10	Cuando la medición está por encima de 0.2 ppm
Oxigeno O ₂ - 21%	2	Cuando el oxigeno esta dentro de 19.5 % a 23.5%	6	Cuando esta entre 19 % a 19.4% o de 23 % a 23.5%	10	Menor a 19.5% mayor a 23.5%
Gases Explosivos						
Metano CH ₄ - 1%	2	Cuando la medición de metano esta entre 0 % a 0.3%	6	Cuando la medición está entre 0.3 % - 0.9%	10	Mayor a 1%

Factores operativos

NIVEL DE DEFICIENCIA						
Factores a evaluar Cualitativos	Bajo	Factores a evaluar Cuantitativos	Medio	Factores a evaluar Cuantitativos	Alto	Factores a evaluar Cuantitativos
Factor Equipos de medición de gases portátiles o estacionarios	2	Se tiene una calibración certificada de acuerdo a lo recomendado por fabrica	6	No tiene una calibración certificada en los ultimos 6 meses	10	No tiene una calibración certificada en los ultimos 12 meses
Factor Equipos e instalaciones electricas	2	Los equipos e instalaciones electricas son certificados anti explosión y/o aseguran condiciones optimas operativas	6	Se cuenta con equipos en buen estado, pero no certificados anti-explosión	10	No cuenta con equipos certificado anti-explosión,
Factor Equipos de generación de energía de emergencia	2	Cuentan con equipos de generación de energía capaz de sostener la ventilación en caso de corte de energía	6	Puede abastecer un tiempo corto la ventilación de la mina	10	No cuenta con equipos de generación de energía que puedan sostener la ventilación en caso de corte de energia
Factor Caudal de aire de requerida	2	No cuenta con una entrada y salida de aire en la mina que asegura la cantidad suficientes de acuerdo con los requerimientos operativos	6	Algunos sitios cuentan con el caudal suficiente y otros no se conoce	10	El caudal de aire que ingresa y sale de la mina corresponde al requerido o no se conoce
Metano CH ₄ - 1%	2	Cuando la medición de metano esta entre 0 % a 0.3%	6	Cuando la medición está entre 0.3 % - 0.9%	10	Mayor a 1%

Factores externos

NIVEL DE DEFICIENCIA						
Factores a evaluar Cualitativos	Bajo	Factores a evaluar Cuantitativos	Medio	Factores a evaluar Cuantitativos	Alto	Factores a evaluar Cuantitativos
Factor por tipo y característica de los yacimientos	2	Yacimientos Residuales Yacimientos Sedimentarios (Rocas Carbonáticas y Otros)	6	Yacimientos metamorficos	10	Yacimientos Sedimentarios (Carbon) Hidrotermales, Magmáticos
Factor Tectónico-Estructural	2	Levemente fracturada , ≤ 3 sistemas de discontinuidad . Muy espaciadas entre sí. (RQD 75% -90%). (2-6 fract/m).	6	Moderadamente fracturada, muy bien trabada, no disturbada , bloques cúbicos formados por tres sistemas discontinuidades ortogonales , (RQD 50-75) , (6 -12 fract/m).	10	Muy fracturada / Intensamente fracturada . Plegamiento y fallamiento, con muchas discontinuidades intersectadas formando bloques angulosos o irregulares. (RQD 25-50%), (12-20 fract/m).
Factor propiedades físicas de rocas y suelos	2	Yacimientos Sedimentarios (Materiales de Construcción) Porosidad-- 10 - 30% . Permeabilidad-- 10 - 1000 mD	6	Yacimientos metamorficos Porosidad < 1% Permeabilidad <0,01 mD Yacimientos magmaticos Porosidad-- 0,1 - 5,0% Permeabilidad-- 0,01 - 1,0 mD	10	Yacimientos Hidrotermales Porosidad-- 5,0 - 15% Permeabilidad-- 1 - 1000 mD (Altas zonas de fracturamiento). Yacimientos Sedimentarios (Carbon y Rocas Accesorio) Porosidad-- 10 - 30% . Permeabilidad-- 10 - 1000 mD
Factor propiedades químicas de rocas y suelos	2	Metano (CH ₄) -- 0 - 0,1 % Dioxido de Carbono (CO ₂)-- 0 - 0,03% Oxigeno (O ₂)-- 20,9% Presencia de Sulfuros-- Ninguno pH del Suelo--6,0 - 8,0	6	Metano (CH ₄) -- 0,1 - 0,5% Monoxido (CO)-- 0 - 0,0025% Dioxido de Carbono (CO ₂)-- 0,03 - 0,5% Oxigeno (O ₂)-- 19,5 - 20,9% Presencia de Sulfuros-- presente. Bajo contenido pH del Suelo-- 5,0 - 6,0	10	Metano (CH ₄) -- >0,5% Monoxido (CO)-- 0,0025 - 0,005% ; >0,005% Dioxido de Carbono (CO ₂)-- >0,5% Oxigeno (O ₂)-- <19,5 % Presencia de Sulfuros-- presente. Alto contenido pH del Suelo-- <5,0
Adsorción y cromatografía de gases	2	Concentraciones de gases dentro de los límites permisibles y una capacidad de adsorción adecuada.	6	Concentraciones de gases cercanas a los límites de alarma, con una capacidad de adsorción moderada.	10	Las concentraciones de gases superan los niveles de alarma o críticos y la capacidad de adsorción es baja.

Anexo 1.1.

Ejemplo de cuantificación del riesgo de una mina.

Factores cualitativos a evaluar	Nivel de Deficiencia		Nivel de exposición		Nivel de consecuencia		Nivel de riesgo		Interpretación de peligrosidad	
	DESCRIPCIÓN	Valor	DESCRIPCIÓN	Valor	DESCRIPCIÓN	Valor	Nivel	Aceptabilidad del riesgo	Interpretación del riesgo	Peligrosidad de mina
Factor por tipo y característica de los yacimientos.	El yacimiento es sedimentario y corresponde a explotación de carbón.	10	Se presenta siempre por la condición del yacimiento.	4	No se presenta en toda la mina pero sí en la mayoría de las labores mineras.	10	400	Medio	2	25%
Factor tectónico-estructural.	Moderadamente fracturada, muy bien trabada, no disturbada, bloques cúbicos formados por tres sistemas discontinuidades ortogonales (RQD 50-75%) (6 -12 fract/m). RQD 68	6	No se presenta en toda la mina pero sí en la mayoría de las labores mineras.	3	No se presenta en toda la mina pero sí en la mayoría de las labores mineras.	10	180	Bajo	1	10%
Factor propiedades físicas de rocas y suelos.	Yacimientos sedimentarios (carbón y rocas accesorio). Porosidad-- 10 - 30% . 18% Permeabilidad-- 10 - 1000 Md 830	10	No se presenta en toda la mina pero sí en la mayoría de las labores mineras.	3	No se presenta en toda la mina pero sí en la mayoría de las labores mineras.	10	300	Medio	2	25%
Factor propiedades químicas de rocas y suelos.	Metano=0.4% CO=0.0020% CO2= 0.04% Presencia de sulfuros.	6	No se presenta en toda la mina pero sí en la mayoría de las labores mineras.	3	No se presenta en toda la mina pero sí en la mayoría de las labores mineras.	10	180	Bajo	1	10%
Adsorción y cromatografía de gases.	Concentraciones de gases dentro de los límites permisibles y una capacidad de adsorción adecuada.	2	Las concentraciones de gases en la mayoría de las áreas de la mina se mantienen dentro de los límites permisibles, lo que hace poco frecuente la necesidad de ajustes significativos en la cantidad de gases presentes.	2	No se presenta en toda la mina pero sí en la mayoría de las labores mineras.	10	40	Bajo	1	10%
Factor Temperatura.	Temperatura de la mina: 25°C.	6	La condición se presenta de manera permanente en todo el turno de 8 horas.	4	Esta condición no genera incapacidades.	10	240	Medio	2	25%
Factor Humedad Absoluta.	La humedad absoluta de la mina es > 10.6 Kg/kg de aire seco.	10	Se presenta ocasionalmente, generalmente en horas de inicio del turno.	2	Esta condición no genera incapacidades.	10	200	Bajo	1	10%
Factor confort térmico.	La temperatura efectiva es igual temperatura húmeda: 30°C.	6	Esta condición se da esporádicamente, cuando las condiciones de temperatura exterior afecta la temperatura de la mina.	2	Esta condición no genera incapacidades.	10	120	Bajo	1	10%
Factor material particulado.	VLP < a 0.025 mg/m3	2	Se presentar de manera frecuente, ya que el material particulado se encuentra en casi todas las labores mineras.	3	Esta condición puede generar lesiones o enfermedades graves.	60	360	Medio	2	25%
Materia volátil	Materia volátil de 50%	10	No se presenta en toda la mina pero sí en la mayoría de las labores mineras.	3	Esta condición no genera incapacidades.	10	300	Medio	2	25%

Tamaño de partícula	Tamaño de partícula de 100 micras	6	Generalmente solo se presenta en los frentes activos pero no en todas las labores.	2	Esta condición no genera incapacidades.	10	120	Bajo	1	10%
Dureza de carbón	Dureza del carbón de 36%	6	Se presenta esta condición en la mayor parte de la mina.	3	Esta condición no genera incapacidades.	10	180	Bajo	1	10%
Poder calorífico	Poder calorífico de 7000 Kcal/Kg	6	Se presenta esta condición en la mayor parte de la mina.	3	Esta condición no genera incapacidades.	10	180	Bajo	1	10%
Análisis petrográfico	<24% de Liptinita	2	Se presenta esta condición en la mayor parte de la mina.	3	Esta condición no genera incapacidades.	10	60	Bajo	1	10%
Factor neutralización del polvo de carbón.	50% de las labores mineras tienen polvo de caliza para inertizar el polvo de carbón.	6	Los anaqueles con material inerte en el 50% de las minas es permanente.	4	Esta condición puede generar accidentes graves o mortales.	100	2400	Alto	3	60%
Factor equipos de combustión.	Se cuenta con equipos de combustión con mediciones de CO ₂ = 0.1% y CO= 0.07%	2	Los equipos de combustión se utilizan ocasionalmente una o dos veces al día, dependiendo de la cantidad de material a mover.	2	Esta condición puede generar lesiones con incapacidad temporal.	25	100	Bajo	1	10%
Factor uso de explosivos.	Metano en los sitios donde se realiza voladuras = 0.5%.	6	Es esporádica la situación porque generalmente se controla con el sistema de aire proveniente de la ventilación.	1	Esta condición puede generar accidentes graves o mortales.	100	600	Medio	2	25%
Factor equipos de medición de gases portátiles o estacionarios.	Se tienen todos los equipos calibrados con menos de 6 meses de certificación.	2	Es esporádico que se pueda dejar los equipos sin calibrar, ya que esta programadas las calibraciones cada 6 meses.	1	Esta condición puede generar accidentes graves o mortales.	100	200	Bajo	1	10%
Factor equipos e instalaciones eléctricas.	No se cuenta con e quipos certificados anti-explosión.	10	Es permanente la situación debido a que por el momento no se cuenta con equipos anti-explosión.	4	Esta condición puede generar accidentes graves o mortales.	100	4000	Muy Alto	4	100%
Factor equipos de generación de energía de emergencia.	No se cuenta con equipos para generación de energía en caso de que falle las redes de electricidad.	10	No se cuenta con generadores de energía en caso de fallas eléctricas.	4	Esta condición puede generar accidentes graves o mortales.	100	4000	Muy Alto	4	100%
Factor caudal de aire requerida.	La mina cuenta con una entrada de aire independiente a los tambores de ventilación que asegura un caudal natural principal en la mina de aire limpio	2	Frecuentemente el caudal de aire es suficiente en toda la mina, según los cálculos de caudal requeridos	4	Esta condición puede generar accidentes graves o mortales.	100	800	Medio	2	25%
Factor de riesgo por tipo de arranque.	En la mina se realiza el arranque de mineral por medio de martillos neumáticos.	6	Es frecuente el uso de los martillos.	4	Puede generar lesiones o enfermedades con incapacidad laboral.	60	1440	Alto	3	60%

Metano (CH ₄) - 1%	CH ₄ = 0.5%	6	Ocasionalmente se presenta la situación debido a que el aire en ocasiones no llega de manera suficiente a todas las labores.	2	Esta condición puede generar accidentes graves o mortales.	100	1200	Alto	3	60%
Monóxido de carbono CO - 25 ppm	CO = 2 ppm	2	Esporádicamente se presenta solo en algunos sitios puntuales.	1	Esta condición puede generar lesiones menores o con incapacidad temporal.	25	50	Bajo	1	10%
Acido Sulfidrónico (H ₂ S) - 1 ppm	H ₂ S = 0.1 ppm	2	Esporádicamente se presenta solo en algunos sitios puntuales.	1	Esta condición puede generar lesiones menores o con incapacidad temporal.	25	50	Bajo	1	10%
Anhidrido Sulfituroso (SO ₂) - 5 ppm	NA	NA		NA		NA	NA		NA	NA
Óxido Nítrico (NO) - 25 ppm	NO = 1ppm	2	Esporádicamente se presenta en las voladuras realizadas.	1	Esta condición puede generar lesiones menores o con incapacidad temporal.	25	50	Bajo	1	10%
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂) - 0.2 ppm	NA	NA		NA		NA	NA		NA	NA
Oxígeno (O ₂) - 21%	19%	6	Se presenta de manera frecuente en varias de las labores mineras.	3	Esta condición puede generar lesiones menores o con incapacidad temporal.	25	450	Medio	2	25%
TOTAL										
Nivel de Riesgo de Mina										27%

PORCENTAJE RIESGO DE MINA		Atención
Bajo	<10%	Atención moderada
Medio	entre 11% a 25%	Atención prioritaria
Alto	entre 26% a 60%	Atención inmediata
Muy alto	> mayor a 60%	Cierre y corrección

Porcentaje de Riesgo de la Mina: corresponde al promedio de la peligrosidad de la mina calculado y que refleja el nivel de compromiso que debe tener la mina para mejorar o corregir los riesgos presentado en sus labores subterráneas, según el nivel de riesgo.

Anexo 2.

Formato de formulación de medidas correctivas en atmosferas viciadas o contaminadas (capítulo 13).

FORMATO DE FORMULACION Y VERIFICACION DE MEDIDAS CORRECTIVAS EN ATMÓSFERAS VICIADAS O CONTAMINADAS																	
FORMATO N°			CONTRATO 643 UPTC - ANM						VERSIÓN								
I. DATOS DE LA MINA																	
Nombre de la boca mina		Nombre del frente			Fecha		D	D			M	M		A	A	A	A
II. DATOS DE LA MEDIDA A DESARROLLAR																	
MEDIDA CORRECTIVA			OPERACIONAL						ADMIMNISTRATIVA								
IMPORTANCIA DE LA MEDIDA			ALTA		MEDIA			BAJA		DEPENDENCIA QUE REALIZA							
III. ACCIONES PARA DESARROLLAR EN LAS MEDIDAS CORRECTIVAS																	
FORMULACION DE LA MEDIDA CORRECTIVA			PLAZO DE EJECUCIÓN *		% EJECUCION		EVIDENCIA DE LA IMPLEMENTACION DE LA MEDIDA CORRECTIVA										
			I														
			C														
			M														
			L														
			I														
			C														
			M														
			L														
			I														
			C														
			M														
			L														
			I														
			C														
			M														
			L														

* PLAZO DE EJECUCIÓN: Inmediato (I): Periodo menor a tres días. Corto (C): Periodo entre tres y quince días. Mediano (M): Periodo entre quince y treinta días. Largo (L): Periodo superior a treinta días.

ASPECTOS ADICIONALES SOBRE LA MEDIDA CORRECTIVA:

FORMULACIÓN DE LA MEDIDA CORRECTIVA NOMBRE; C.C.: CARGO:	VERIFICACIÓN DE LA MEDIDA CORRECTIVA NOMBRES: C.C.: CARGO:
---	---

Anexo 3.

Permiso de trabajo (capítulo 15).

FORMATO REGISTRO DE PERMISO DE TRABAJO O ACTIVIDADES RUTINARIAS Y NO RUTINARIAS			
Fecha de solicitud		Área	
Actividad		Hora de inicio	
Nombre de la empresa (Propia, contratistas, subcontratista)		Hora de finalización	
Nombre y firma responsable de la actividad		Cargo del responsable de la actividad	
Descripción de la actividad			
Equipos de seguridad (EPI requeridos)		Cinta de seguridad	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Guantes, casco, botas ▪ Autorrescatador ▪ Mascarilla para control de gases y Material particulado ▪ Equipo de medición de gases ▪ Gafas de seguridad (si es necesario) 		Equipos utilizados _____	
Otros:			

VERIFICAR LAS CONDICIONES DE SEGURIDAD		SÍ	NO
¿Es necesario aislar el área?			
¿Se informó al responsable del área?			
¿Fueron evaluados los riesgos propios y adyacentes?			
¿Se necesita un observador?			
¿Se realizó análisis de trabajo seguro?			
¿Hay acompañamiento del área de AAT?			

Anexo 4.

Formato reporte de incidentes, actos y condiciones inseguras (capítulo 15).

				Fecha:		
REPORTE DE INCIDENTES, ACTOS INSEGUROS Y CONDICIONES PELIGROSAS		Versión:		1		
PROPIEDAD INTELLECTUAL	Revisó:	Aprobó:		Código:	SGSST-FRRIN-01	
	Firma _____	Firma _____		pag:	1 de 1	
INFORMACIÓN GENERAL						
ÁREA DEL EVENTO	LUGAR DEL EVENTO	OBJETO DEL REPORTE	FECHA DEL EVENTO			ANTECEDENTES
			Día	Mes	Año	
DETALLE DEL EVENTO						
EVIDENCIA FOTOGRÁFICA	ACTIVIDAD REALIZADA	DESCRIPCION DEL EVENTO:				
	PELIGRO					
	RIESGO					
	PROBABLE CONCECUENCIA					
NOMBRE DE QUIÉN IDENTIFICA EL EVENTO	CARGO DE QUIÉN IDENTIFICA EL EVENTO	ÁREA A LA QUE PERTENECE	FIRMA DE QUIÉN IDENTIFICA EL EVENTO			
NOMBRE DE QUIÉN REPORTA EL EVENTO	CARGO DE QUIÉN RECIBE EL EVENTO	ÁREA A LA QUE PERTENECE	FIRMA DE QUIÉN REPORTA EL EVENTO			
NOMBRE DE QUIÉN RECIBE EL EVENTO	CARGO DE QUIÉN RECIBE EL EVENTO	ÁREA A LA QUE PERTENECE	FIRMA DE QUIÉN RECIBE EL EVENTO			
PLAN DE ACCIÓN						
Actividad(es)	Responsable(s)	Fecha Inicio	Fecha Final	Firma del responsable(s)		
OBSERVACIONES GENERALES:						

Anexo 5.

Formato análisis de trabajo seguro (capítulo 15).

ANALISIS DE TRABAJO SEGURO ATS			
Actividad			
Elaborado por			
Área/Frente			
Fecha			
Descripción de la actividad			
Pasos detallados de la tarea	Peligros y riesgos existentes y potenciales	Consecuencias	Controles requeridos
Trabajo realizado por:	Personal de la empresa <input type="checkbox"/>	contratistas <input type="checkbox"/>	temporales <input type="checkbox"/>
Miembros del equipo de trabajo (personas que realizan la tarea y el ATS)			
Nombre y apellidos	Firma	Nombre y apellidos	Firma
Firma jefe de área/Responsable actividad		Firma Gestor SST	

Fuente: Propia.

Anexo 6.

Identificación de amenazas y análisis de vulnerabilidad.

Vulnerabilidad persona

Puntos vulnerables	Respuestas			CALIFICACIÓN	OBSERVACIONES
	SI	NO	PARCIAL		
1. Gestion Organizacional					
¿La organización cuenta con un SGSST donde se incluya un política donde se exprese el compromiso en prevenir y prepararse para afrontar una emergencia?				Por favor escoja una opción	
¿Se ha conformado un comité de emergencias?				Por favor escoja una opción	
¿Existe personal de la mina que sea socorredor certificado?				Por favor escoja una opción	
¿El Comité de Emergencias tiene funciones asignadas y respaldadas por la alta gerencia?				Por favor escoja una opción	
¿La organización ha realizado previamente Análisis de Amenazas? o estudios sobre riesgos y pérdidas que generaría?				Por favor escoja una opción	
¿La organización cuenta con un Plan de Prevención y Atención de Emergencias y de Evacuación documentado y aprobado por la alta gerencia?				Por favor escoja una opción	
¿Existe presupuesto asignado para la implementación del Plan de Prevención y Atención de Emergencias?				Por favor escoja una opción	
¿Se ha creado la brigada de emergencias?				Por favor escoja una opción	
¿Se ha designado otros grupos de apoyo como Coordinadores de Evacuación?				Por favor escoja una opción	
¿Los empleados han adquirido responsabilidades específicas en caso de emergencias?				Por favor escoja una opción	
¿Se ha implementado procedimientos para realizar inspecciones a las áreas para identificar condiciones inseguras que puedan generar emergencias?				Por favor escoja una opción	
¿Se ha implementado procedimientos para realizar inspecciones a los equipos utilizados en emergencias?				Por favor escoja una opción	
¿Existe programa de calibracion a equipos de medición de gases, programa de mantenimiento de maquinas y equipos?				Por favor escoja una opción	
¿Se tiene convenio con entidades externas para la atención de emergencias?				Por favor escoja una opción	
¿Se tiene identificado el personal por turno, contratistas y demas personas relacionadas con la operación minera subterránea?				Por favor escoja una opción	
Existen puntos de encuentro internos y externos ?				Por favor escoja una opción	

Los puntos de encuentro están libres de posibles riesgos para las personas?				Por favor escoja una opción	
Se ha designado posibles lugares para establecer un P.C? (Puesto de Comando) o una Sala de Crisis?				Por favor escoja una opción	
Se han designado lugares para establecer un A.C.V (Área de Clasificación de Víctimas (pacientes)).				Por favor escoja una opción	
La Alta Gerencia hace revisión periódica del plan de emergencias?				Por favor escoja una opción	
PROMEDIO GESTION ORGANIZACIONAL					
2. Capacitación y Entrenamiento					
¿Los empleados conocen el plan de emergencias y de evacuación, saben auto protegerse?				Por favor escoja una opción	
¿Los contratistas y partes interesadas conocen el plan de emergencias y de evacuación, saben auto protegerse?				Por favor escoja una opción	
¿La Brigada de emergencias ha recibido entrenamiento prevención y control de emergencias?				Por favor escoja una opción	
¿La Brigada de emergencias ha recibido entrenamiento en primeros auxilios básicos?				Por favor escoja una opción	
¿La Brigada de emergencias ha recibido entrenamiento en prevención y control del fuego?				Por favor escoja una opción	
¿La Brigada de emergencias ha recibido entrenamiento en rescate básico?				Por favor escoja una opción	
La brigada de emergencias ha sido capacitada para responder ante emergencia por conatos de incendios?				Por favor escoja una opción	
Se ha capacitado a todo el personal en temas relacionados con atmosfera viciadas o contaminadas, los efectos a la salud y los controles de mitigacion adecuados.				Por favor escoja una opción	
¿Los coordinadores de evacuación han sido capacitados y conocen sus funciones?				Por favor escoja una opción	
¿Existen programas administrativos para el control de tareas de alto riesgo?				Por favor escoja una opción	
¿El personal se encuentra capacitado en trabajos de alto riesgo?				Por favor escoja una opción	
¿Se cuenta con manuales, folletos como material de difusión en temas de prevención y control de emergencias?				Por favor escoja una opción	
¿Se ha hecho divulgación de los puntos de encuentro internos, externos y los puntos de encuentro alternos?				Por favor escoja una opción	
¿Se han hecho simulacros en el último año?				Por favor escoja una opción	
¿La alta gerencia tiene conocimiento de la evaluación de los simulacros de evacuación y promueve acciones?				Por favor escoja una opción	
PROMEDIO CAPACITACION Y ENTRENAMIENTO					

3. Gestion de Seguridad				
Existen distintivos para el Comité de Emergencias, Puesto de comando, Área de Concentración de Víctimas, y demás áreas a establecer de acuerdo con la metodología Sistema Comando de Incidentes?				Por favor escoja una opción
¿Existen distintivos para la brigada?				Por favor escoja una opción
¿Existen distintivos para los coordinadores de evacuación?				Por favor escoja una opción
¿Existe dotación Básica para la atención de emergencias para cada miembro de la brigada?				Por favor escoja una opción
¿El personal cuenta con elementos de protección y dotación personal adecuados, de acuerdo con la actividad de alto riesgo que desarrolle?				Por favor escoja una opción
¿Existe equipos de monitoreo que permitan evaluar el nivel de riesgo antes de realizar la actividad (Multidetector de gases, sistemas de monitoreo continuo)?				Por favor escoja una opción
¿Existen herramientas especializadas para la ejecución de la labor? (Ej. Cuerdas, trípode, auto contenido, Autorescatador etc.)				Por favor escoja una opción
¿Se tienen implementos básicos de primeros auxilios adicionales a los de la brigada en caso de requerirse?				Por favor escoja una opción
PROMEDIO SUMINISTRO DOTACIONES				

Vulnerabilidad recursos

Puntos vulnerables	Respuestas			CALIFICACIÓN	OBSERVACIONES
	SI	NO	PARCIAL		
1. Gestion diagnostico mineros					
¿Se cuenta con circuito ventilación forzada ?				Por favor escoja una opcion	
¿Se almacenan y/o manipulan bajo tierra líquidos inflamables o combustibles?				Por favor escoja una opcion	
¿Se almacena bajo tierra madera?				Por favor escoja una opcion	
¿Se tienen instalaciones electricas de alta tension (440 v)				Por favor escoja una opcion	
¿Se hace bombeo de agua en la mina?				Por favor escoja una opcion	
¿Se tienen equipos electricos certificados Antiexplosión ?				Por favor escoja una opcion	
¿Las instalaciones eléctricas estan certificadas según norma RETIE?				Por favor escoja una opcion	
¿Existen planos electricos de la mina, y de ubicación de equipos?				Por favor escoja una opcion	
¿Se utilizan equipos equipos de combustion dentro de la mina ?				Por favor escoja una opcion	
¿Existen zonas abandonadas en la mina sin aislamiento?				Por favor escoja una opcion	
¿Se han presentado conatos de incendio?				Por favor escoja una opcion	
¿Realizan procesos de neutralización de polvo de carbón en todas las labores de la mina?				Por favor escoja una opcion	
¿La mina tiene señalizada internamente la ruta de evacuación?				Por favor escoja una opcion	
¿Se tiene el plano de riesgo, esta publicado?				Por favor escoja una opcion	
¿Se realizan trabajos en alturas?				Por favor escoja una opcion	
¿Se realizan trabajos no rutinarios que contienen riesgos criticos(soldadura, perforaciones prospectivas, mantenimiento de equipos electricos etc.)?				Por favor escoja una opcion	
PROMEDIO GESTION DE DIAGNOSTICO MINERO				0	
2. Gestion labores mineras					

¿Se realizan inspecciones para evaluar los riesgos por atmosferas en la mina y el estado del sostenimiento en especial de las vías principales de ventilación?				Por favor escoja una opcion	
¿Se tienen identificadas las zonas de mayor criticidad por presencia de gases nocivos o toxicos, hay planos de zonificación.				Por favor escoja una opcion	
¿Se tienen una o mas salidas de emergencia de la mina, el personal las conoce				Por favor escoja una opcion	
¿Se tiene un programa para la inertización del de polvo de carbon en las labores mineras?				Por favor escoja una opcion	
¿Se hace mantenimiento a las vías de ventilacion principal de la mina?				Por favor escoja una opcion	
¿Existen fallas o plegamientos en las zonas de explotación?				Por favor escoja una opcion	
¿Hay presencia de agua subterránea que de origen a debilitamiento de las rocas o la mineralización?				Por favor escoja una opcion	
¿Las rutas de evacuación se encuentran en buen estado, estan señalizadas?				Por favor escoja una opcion	
¿Las salidas de ememergencia se encuentran siempre disponibles sin obstaculos?				Por favor escoja una opcion	
¿Las secciones de las vías cumplen con lo establecido en la norma (3,2 m2 como minimo)?				Por favor escoja una opcion	
PROMEDIO GESTION LABORES MINERAS				0	
3. Gestion suministro de Equipos					
¿Se cuenta con algún sistema de alarma Sonora, luminca u otra, para usar en caso de emergencia?				Por favor escoja una opcion	
¿La Alarma se escucha fuerte y en todas las áreas?, el personal tanto interno como externo conoce el sistema				Por favor escoja una opcion	
¿Se cuenta con un sistema de comunicaciones interno, y es protegido antiexplosión				Por favor escoja una opcion	
¿Se tiene un sistema contraincendios(Extintores).				Por favor escoja una opcion	
¿Se cuentan con extintores y en cantidades suficientes?				Por favor escoja una opcion	
¿Están adecuadamente ubicados, instalados y señalizados?				Por favor escoja una opcion	
¿Se cuentan con sistemas automáticos de detección de incendios?				Por favor escoja una opcion	
¿Se cuentan con sistemas automáticos de control de incendios?				Por favor escoja una opcion	
¿Se cuenta con una planta de emergencia que asegure el suministro permanente del caudal de aire necesario para la operación de la mina?				Por favor escoja una opcion	



¿Se encuentran señalizadas las redes internas de la mina de acuerdo al fluido que transportan?				Por favor escoja una opción	
¿Se cuentan con camillas asignadas o cercanas a equipos electricos?				Por favor escoja una opción	
¿Se cuentan con botiquines?				Por favor escoja una opción	
¿Se cuenta con sistema de monitoreo de gases permanente				Por favor escoja una opción	
¿Sistemas de control de acceso de personal, visitantes, contratistas?				Por favor escoja una opción	
PROMEDIO GESTIÓN SUMINISTRO DE EQUIPOS				0	

Vulnerabilidad sistemas y procesos

Puntos vulnerables	Respuestas			CALIFICACIÓN	OBSERVACIONES
	SI	NO	PARCIAL		
1. Gestion de servicios					
¿Se tiene plan de ventilación y se implanta adecuadamente?				Por favor escoja una opción	
¿Se realizan aforos de ventilacion en la mina?				Por favor escoja una opción	
El caudal suministrado es suficiente de acuerdo a la operación minera qué se realiza?				Por favor escoja una opción	
¿Se tienen estudios geomecánicos en la mina?				Por favor escoja una opción	
¿Se tienen documentados los procedimientos de atención de emergencia? ¿El personal los conoce?				Por favor escoja una opción	
¿Se cuenta con un software especializado para el control de ventilación e incendios (Ventsim)?				Por favor escoja una opción	
¿Se cuenta con servicio de comunicaciones en superficie?				Por favor escoja una opción	
PROMEDIO GESTIÓN DE SERVICIOS				0	
2. Gestión de sistemas alternos					
¿Se cuenta con bombas hidroneumáticas o bombas respaldadas por generador alterno?				Por favor escoja una opción	
¿Se cuenta con tanques de reserva de agua?				Por favor escoja una opción	

¿Se cuenta con un sistema de comunicación diferente al público?				Por favor escoja una opción	
¿Se tienen los números telefónicos actualizados de entidades externas de apoyo para atención de la emergencia (ANM, EPS, IPS, Cruz Roja, Defensa civil, etc.?)				Por favor escoja una opción	
¿Se cuenta con ambulancia propia o tiene convenios de ambulancias?				Por favor escoja una opción	
¿Se cuenta con un sistema de iluminación de emergencia?				Por favor escoja una opción	
PROMEDIO GESTIÓN SISTEMAS ALTERNOS					
3. Gestión de recuperación					
¿Se cuenta con algún sistema de seguro para los funcionarios diferente de la seguridad social?				Por favor escoja una opción	
¿Están asegurados los equipos y todos e infraestructura general de la mina ? ¿Se conocen los montos y coberturas de las pólizas?				Por favor escoja una opción	
El personal esta afiliado a ARL, de acuerdo al nivel de riesgo				Por favor escoja una opción	
¿Está asegurada la edificación contra incendio? ¿Se conocen los montos y coberturas de las pólizas?				Por favor escoja una opción	
¿Se conoce como proceder con las aseguradoras luego de un desastre?				Por favor escoja una opción	
¿Hay políticas de trabajo post emergencia con todo el personal?				Por favor escoja una opción	
PROMEDIO GESTIÓN DE RECUPERACIÓN					



Anexo 6.1.

Ejemplo: Análisis de amenaza y vulnerabilidad método riesgos por colores

La mina Valle de Corrales, localizada en la vereda Reyes Patria del municipio de Corrales en el departamento de Boyacá, se caracteriza por su compleja configuración geológica. Este bloque de explotación está delimitado por fallas y plegamientos de origen local, los cuales afectan tanto la continuidad de los mantos explotables como las concentraciones de gases en el subsuelo. A continuación, se describen las principales características de los mantos explotables y los aspectos técnicos de la operación minera.

Tipo	Carbón térmico										
%Cenizas	5.72										
% MV	44.61										
%Azufre (S)	1										
Poder calorífico BTU/lb	13203										
Resistencia a la compresión simple promedio de las rocas	5.412 MPa										
Rumbo-buzamiento	N25°E / 70°NW										
Humedad	Alta (presencia de agua subterránea)										
Método de arranque	Martillo neumático										
	Forzada (Tambor ventilación)										
Equipos	Malacates y ventiladores eléctricos no protegidos										
Servicios mineros	Desagüe: bomba eléctrica sumergible automática Sostenimiento: entibación (puerta alemana) Ventilación: forzada con circuito de ventilación definido.										
Mediciones de gases promedio presentes en la mina											
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Gas</th> <th>Concentración máx. medidas</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CH₄</td> <td>3%</td> </tr> <tr> <td>CO</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>CO₂</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>H₂S</td> <td>0.5 ppm</td> </tr> </tbody> </table>		Gas	Concentración máx. medidas	CH ₄	3%	CO	0	CO ₂	0	H ₂ S	0.5 ppm
Gas	Concentración máx. medidas										
CH ₄	3%										
CO	0										
CO ₂	0										
H ₂ S	0.5 ppm										
<ul style="list-style-type: none"> ▪ SGSST ▪ Plan de emergencia documentado ▪ Equipos de medición de gases calibrados ▪ Plan de ventilación documentado ▪ No hay aforos de ventilación 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Brigada de emergencia ▪ Brigadas de primeros auxilios 										

Tras la implementación de la metodología de análisis de amenazas, vulnerabilidad y riesgos basada en el esquema de colores propuesto en la guía, se obtuvieron los siguientes resultados:

1. Amenazas: se determinaron las siguientes amenazas con base en criterios naturales, geológicos, técnicos-seguridad y concentración de gases y polvos.

RESULTADOS ANÁLISIS DE AMENAZAS		
AMENAZAS	EVENTOS	CALIFICACION
Naturales	Sismos	Probable
Geológicos	Yacimientos sedimentarios	Inminente
	Estructuras de falla y plegamientos	Probable
	Resistencia a la compresión simple de las rocas	Probable
	Factor hidrogeológico	Posible
	Temperatura	Inminente
Concentración de gases y material particulado	CH ₄ , CO, H ₂ S, O ₂	Inminente
	Mina pulverulenta	Probable
Técnico y seguridad	Polvo de carbón	Inminente
	Factor de inertización	Probable
	Relación metano Oxígeno	Inminente
	Relación metano, materia Volátil	Inminente
	método de arranque-LEL	Probable
	Equipo de medición de gases	Probable
	RETIE	Probable
	Plan de ventilación	Inminente

2. Análisis de vulnerabilidad










RESULTADOS ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD		
CRITERIO	CALIFICACIÓN VULNERABILIDAD	CALIFICACIÓN
Personas	1.39	MEDIO
Recursos	1.74	MEDIO
Sistemas y procesos	0.69	ALTO

3. Determinación del Nivel de Riesgo (Combinación de las amenazas con la vulnerabilidad)





RESULTADOS ANALISIS DE AMENAZAS		
AMENAZAS	EVENTOS	NIVEL DE RIESGO
Naturales	Sismos	MEDIO
Geológicos	Yacimientos sedimentarios	MEDIO
	Estructuras de falla y plegamientos	MEDIO
	Resistencia a la compresión simple de las rocas	MEDIO
	Factor Hidrogeológico	MEDIO
	Temperatura	MEDIO
Concentración de gases y material particulado	CH ₄ , CO, H ₂ S, O ₂	MEDIO
	Mina pulverulenta	MEDIO
Técnico y seguridad	Polvo de carbón	MEDIO
	Factor de inertización	MEDIO
	Relación metano Oxígeno	MEDIO
	Relación metano, materia volátil	MEDIO
	Método de arranque-LEL	MEDIO
	Equipo de medición de gases	Probable
	RETIE	Probable
	Plan de ventilación	Inminente

Anexo 6.2.

Ejemplo identificación de amenazas y análisis de vulnerabilidad mina Valle de Corrales.

ANALISIS DE AMENAZAS POR ATMOSFERAS VICIADAS O CONTAMINADAS					
AMENAZA	INTERNO	EXTERNO	FUENTE DE RIESGO	CALIFICACION	COLOR
Naturales	Sismos		<p>Según el Sistema Geologico colombiano las zonas mineras donde se presentan mayor numero de sismos, según orden de criticidad:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Santander 2. Antioquia 3. Cundinamarca 4. Boyaca 6. Tolima 7. Costa Pacifica 8. Norte de santander 	Probable	
Geologicos	tipos de yacimientos		yacimientos volcanicos: Concentracion de gases producto de procesos magmaticos. Pueden presentarse desprendimientos subitos de gases toxicos e irritantes, atraves de estructuras de falla y fracturas de roca	Probable	
			Yacimientos Hidrotermales: los fluidos mineralizados cuyos gases acompañantes se pueden acumular en los intersticios de las rocas, generando desprendimientos de gases toxicos, explosivos y asfixiantes	Probable	
			<p>Yacimientos sedimentarios: Concentración de gases producto de descomposicion organica. El gas metano es la principal amenaza de este tipo de yacimientos, debido a su alto grado de peligrosidad(explosiones, deflagraciones y disminucion del porcentaje oxigeno).</p> <p>Porosidad:10-30% Areniscas y carbonatos Permeabilidad:1-1000 mD alto fracturamiento</p>	Inminente	
			Yacimientos metamorficos: La descomposicion de minerales, puede dar lugar a liberacion y acumulacion de gases dentro del yacimiento.	Posible	
	Estructuras de fallas y plegamientos		Las estructuras de falla facilitan el transporte y liberación de gases que pueden afectar la atmosfera minera. Ademas los plegamientos como anticlinakles o sinclinales pueden ser trampas de acumulacion de gases, que de acuerdo a su nivel fracturamiento aumenta o disminuye la permeabilidad y por ende la migracion de gases peligrosos	Probable	
	Resistencia de las rocas		Rocas de respaldo de mineralizaciones con resistencias a la compresion entre 0,25- 5,0 Mpa, son catalogadas como de baja competencia, parametro que puede generar desprendimientos de rocas(Derrumbes) y por ende de gases peligrosos	Probable	
	factor Hidro-geologico		<p>Transporte de gases peligrosos, en el agua subterranea generando desprendimiento subito en frentes de trabajo</p> <p>Permeabilidad > 10⁻³ m/s Porosidad > 30% Velocidad > 1 m/dia Tasa de infiltracion 10 mm /hora</p>	Posible	
	Temperatura		<p>Profundidad de la explotacion en relación a su cota vertical.</p> <p>Profundidad > 700 mts Temperatura > 30°C HR>93% H. Absoluta > 1,2a mmHg Confort termico > 70</p>	Inminente	

ANÁLISIS DE AMENAZAS POR ATMOSFERAS VICIADAS O CONTAMINADAS					
AMENAZA	INTERNO	EXTERNO	FUENTE DE RIESGO	CALIFICACION	COLOR
Concentracion de gases y material particulado	Composicion quimica		Gas Metano CH ₄ : Concentración 5%≤15%; Explosivo-Deflagrante >25% asfixiante.	Inminente	
			Monoxido de Carbono CO: concentracion > 0,005% ; toxico 12,5%≤74,2%; explosivo	Inminente	
			Doxido de carbono CO ₂ : Concentración > 0,5%; asfixiante.	Inminente	
			Acido Sifhidrico H ₂ S: Concentración >1 ppm Irritante 1000 a 2000 ppm muerte	Inminente	
			Dioxido de Nitrogeno NO ₂ : Concentración > 1 ppm Irritacion Nariz y garaganta 100-200 ppm Muerte	Inminente	
			Oxigeno O ₂ : Concentraciones < 19%; Asfixia. 3-5% Muerte	Inminente	
Minas pulverulentas			Arranque del mineral con un contenido bajo o nulo de humedad(cualquier sistema de arranque), procesos de perforacion. Tamaño de partícula: > 30 µm afectación toracica > 0,1 mg/m ³ disuelto en el aire	Probable	
Tecnico y seguridad	Polvo de carbon (nivel de explosividad)		La Concentracion de metano, acumulación de polvo de carbón y el nivel de inflamabilidad Metano entre 5-15% Materia Volatil > 46% Tamaños de particulas <75µm Dureza del carbon < 36% PC> 7000Kc/Kg	Inminente	
	Factor de Inertizacion		Proceso de inertización o neutralizacion de polvo de carbón en minas pulvelurentas inflamables. Menos del 50% de la labores mineras han sido inertizadas (Polvo inerte de caliza, con granulometria a malla 400, y contenido de Silice >3%)	Probable	
	Uso de explosivos		El nivel de amenaza se establece en base al uso de explosivos dentro del proceso explotación y el nivel de grisutu- osidad de la mina. Uso de explosivos en frentes con concentraciones de metano CH ₄ > 0,5%	Probable	
	Relacion CH ₄ -O ₂		Nivel de explosividad Presencia de Metano y oxigeno en concentraciones tales que pueden dar origen a una explosión Metano CH ₄ ; 5-15% Oxigeno O ₂ ; 12-21% Temperatura de ignición; > 600°C	Inminente	

Tecnico y seguridad	Relación CH ₄ - MV (Inflamabilidad)			Nivel de inflamabilidad. Concentración de Metano y el contenido de materia volátil presente en el carbón. Metano CH ₄ ; > 0,3% Materia Volatil MV; 14-16%	Inminente	
	Metodo de Arranque y LEL			El metodo de extracción y la perturbación que este ejerce en la mineralización, puede generar desprendimientos de gases peligrosos que pueden estar dentro del limite inferior de explosividad. Mecanizado; Perforación y voladura, Minador, rozadora) LEL; 3,3-10%	Probable	
	Equipos de medición de gases			No contar con equipos de medicion de gases certificados Antiexplosión. Equipos sin calibración adecuada Falta de capacitación en el manejo y lectura correcta de las mediciones. no se hace registro de las mediciones Monitoreo y medicion deficiente de acuerdo al nivel de grisusosidad de la mina	Probable	
	Instalaciones Electricas subterranas			Condiciones de las Instalaciones electricas y equipos electricos subterranos, como fuente de ignición de una explosión. Instalaciones electricas sin implementación de la norma tecnica RETIE. Equipos y maquinaria sin certificación Antiexplosion (Ex)	Probable	
	Plan de ventilación			No contar con un plan de ventilación en la mina, o no implementarlo de manera adecuada, aumenta la probabilidad de ocurrencia de un accidente fatal calculo de caudales de aire sin tener en cuenta el personal/turno, la maquinaria y equipos Caudal de aire sin la velocidad suficiente para diluir atmosferas viciadas o contaminadas. Usencia de aforos de ventilación No hay programas de mantenimiento de maquinaria y equipo	Inminente	

Valoración del riesgo

1. IDENTIFICACIÓN DE AMENAZAS			
Naturales	Geológicos	Concentración de gases y material particulado	Técnico y de seguridad
Movimientos sísmicos.	Tipos de yacimientos Estructuras de falla y plegamientos Resistencia de las rocas Factor hidrogeológico Temperatura.	Composición química Minas pulverulentas.	Polvo de carbon (nivel de explosividad) Factor de inertización Uso de explosivos Relación metano (CH ₄) - oxígeno (O ₂). Relación metano (CH ₄) - Materia Volátil MV. Método de arranque y Límite Inferior de Explosividad (LEL). Equipos de medición de gases. Instalaciones eléctricas subterráneas. Plan de ventilación.

2. ELEMENTOS Y ASPECTOS DE VULNERABILIDAD		
PERSONAS	RECURSOS	SISTEMAS Y PROCESOS
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gestión organizacional ▪ Capacitación y entrenamiento ▪ Gestión de seguridad 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gestión diagnóstico minero ▪ Gestión de labores mineras ▪ Gestión de suministro de equipos. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gestión de servicios ▪ Gestión de sistemas alternos ▪ Gestión de recuperación

3. INTERPRETACION DE LA VULNERABILIDAD POR CADA ASPECTO	
CALIFICACION	CONDICIÓN
BUENO	Si el numero de respuestas se encuentra dentro el rango. 0,68 a 1.
REGULAR	Si el numero de respuestas dse encuentra dentro el rango 0,34 a 0,67.
MALO	Si el numero de respuestas se encuentra dentro el rango 0 a 0,33.

4. INTERPRETACION DE LA VULNERABILIDAD POR CADA ELEMENTO		
RANGO	INTERPRETACIÓN	COLOR
0,0 - 1,00	ALTA	ROJO
1,01 - 2,00	MEDIA	AMARILLO
2,01 - 3,00	BAJA	VERDE

Anexo 7

(anexo accidente minero capítulo 20)

CONFORMACION DE GRUPO INVESTIGADOR EVENTO MINERO POR ATMOSFERA CONTAMINADA O VICIADA

El día _____ se reunieron en las instalaciones de la _____, las personas relacionadas a continuación, con el objeto de realizar la investigación de accidente minero causado por _____, presentado el día _____ en la mina _____.

Formato No:	VERSION
TITULO MINERO	
MUNICIPIO	
VEREDA	
NOMBRE DE LA MINA DEL EVENTO	

INTEGRANTES DEL EQUIPO

NOMBRE	
CARGO	
CEDULA	
FIRMA	
NOMBRE	
CARGO	
CEDULA	
FIRMA	
NOMBRE	
CARGO	
CEDULA	
FIRMA	
NOMBRE	
CARGO	
CEDULA	
FIRMA	

Nota: Si se trata de un accidente mortal dentro del equipo investigador se debe contar con un profesional con licencia en Salud Ocupacional o en SST vigente, según lo establecido en la Resolución 1401 de 2007

REGISTROS



Registros de mediciones diarias de gases.			
Descarga de datos atmosféricos de los equipos móviles y/o fijos.			
Certificados de calibración de equipos móviles y/o fijos utilizados para el control atmosféricos.			
Condiciones termo ambientales (Aforos)			
Mantenimiento de las labores de ventilación			
Inspecciones a la ventilación			
Consumo de explosivos (OP)			
Mantenimiento de equipos, elementos y accesorios de ventilación.			
Mantenimiento de equipos mecánicos y eléctricos.			
Circuito de ventilación forzada.			
Plan de prevención preparación y respuesta ante emergencias.			
Estudio geológico indicando concentraciones de gas de los mantos en explotación.			
Análisis de riesgo			
Plan de prevención y control de atmosferas explosivas.(que incluya evidencia de su implementación)			
Estadísticas de accidentalidad por atmosferas contaminadas.			

CAPACITACIONES

Ventilación			
Seguridad Minera			
Identificación de peligros, valoración de riesgos y determinación de controles			
Procedimientos de Trabajo Seguro PTS			
Plan de emergencias			
Manejo de equipos, máquinas y herramientas			
Capacitaciones brigadas de emergencias			
Simulacros de evacuación			
Lecciones aprendidas de eventos relacionados con atmosferas contaminadas.			

Anexo 9

(anexo accidente minero capítulo 20)

ENTREVISTA INVESTIGACION DE ACCIDENTE	
	
INFORMACION GENERAL DE LA MINA	
Formato No:	VERSION
TITULO MINERO	
MUNICIPIO	
VEREDA	
NOMBRE DE LA MINA DEL EVENTO	
DATOS PERSONA ENTREVISTADA	
<p>En _____, vereda _____ del departamento de _____, el día/mes/año siendo las _____, concurrió por solicitud del Equipo Investigador, el señor _____ identificado con c.c. _____, con el fin de ser entrevistado de manera libre y espontánea para investigar las causas del evento minero ocurrido el día día/mes/año. Acto seguido se le se le informó que está entrevista es libre de apremio y juramento y que es su voluntad atenderla o no.</p> <p>A continuación, se procede a realizar la entrevista</p>	
Nombre:	Firma:
C.C.	Cargo:
REGISTRO DE INFORMACION DE LA ENTREVISTA	
<p>Interrogantes de acuerdo con el tipo de accidente minero</p> <p>Se sugiere preguntar:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ ¿Qué sucedió? ▪ ¿Cómo sucedió? ▪ ¿Cuándo sucedió? ▪ ¿Dónde sucedió? ▪ ¿Por qué sucedió? ▪ ¿Quién más estaba en el lugar del accidente? ▪ ¿Qué eventos similares han ocurrido? ▪ ¿Qué labor desempeñaba el trabajador en el momento del accidente? ▪ ¿Como podría evitarse lo que sucedió? ▪ ¿Qué estaba haciendo el trabajador antes y en el momento del accidente? ▪ Considero aclarar que... 	
DATOS DE QUIEN REALIZA LA ENTREVISTA	
NOMBRE	FIRMA
C.C.	
NOMBRE	FIRMA
C.C.	

Anexo 9.1



(anexo accidente minero capítulo 20)

EVIDENCIA EN REALIZACION DE ENTREVISTAS			
FORMATO N°	VERSION		
CONTRATO 643 ANM			
			
NOMBRE DE LA MINA	FECHA: DIA	MES	AÑO
<p>AUTORIZACION PARA GENERAR GRABACION DE LA ENTREVISTA</p> <p>Yo _____ en calidad de entrevistado, Identificado con C.C. No _____ autorizo libre y ampliamente para que la entrevista de recolección de información del evento minero ocurrido por atmosferas mineras contaminadas o viciadas en la mina _____, sea grabada, con el fin de aportar información que ayude al equipo investigador a determinar las causas del evento.</p> <p style="text-align: center;">CONSENTIMIENTO PARA POSTERIORES ENTREVISTAS</p> <p>Yo _____ en calidad de entrevistado identificado con C.C. No _____ autorizo me comuniquen y/o informen de entrevistas posteriores para aclarar la información del accidente minero ocurrido por atmosfera minera viciada o contaminada en la mina _____ con el fin de aportar información que ayude al equipo investigador a determinar las causas del evento.</p> <p>Nombre: _____</p> <p>Firma _____</p> <p>C.C. No _____</p> <p>Contacto _____</p>			



Anexo 10

(anexo accidente minero capítulo 20)

VISITA TECNICA EN INVESTIGACION DE EVENTOS POR ATMOSFERAS CONTAMINADAS O VICIADAS									
CONTRATO 643 ANM									
									
FORMATO N°			VERSION						
1. GENERALIDADES									
FECHA DE LA VISITA TECNICA			DD___ M___		AÑO_____				
TITULO MINERO									
NOMBRE DE LA MINA									
NOMBRE DEL FRENTE DONDE OCURRE EL EVENTO									
UBICACIÓN			VEREDA		MUNICIPIO		DEPARTAMENTO		
TIPO DE ACCIDENTE O EVENTO			ATM CONTAMINADA		EXPLOSION		INCENDIO		
2. LUGAR DONDE OCURRIO EL EVENTO									
INCLINADO	GALERIA	TAMBOR	TAJO	EXPLOTACION	POZO - TOLVA	OTRO			
DESCRIPCION:									
3. CONDICIONES ATMOSFÉRICAS ACTUALES									
LABOR	CH ₄ (%) 1	O ₂ (%) VLP=19,5	CO (PPM) VLP=25	CO ₂ (%) VLP=0,5	NO ₂ (PPM) VLP=0.2	H ₂ S (PPM) VLP=1	CAUDAL AIRE m3/min	TEMP. EFFECT. °C	

Se hace necesario utilizar el sistema de transporte para acceder al sitio del evento Si___ No___

El estado del sistema de transporte es seguro para acceder al sitio del evento Si___ No___

Descripción del estado del sistema de transporte interno para acceder al sitio del evento.

6. CONDICIONES DEL SISTEMA DE DRENAJE / DESAGÜE

Tipo de Drenaje:

- Natural
- Mecánico
- Sin drenaje

Las condiciones de drenaje son aptas para llegar al sitio de interés y realizar la visita técnica en investigación del evento SI___ NO___

Descripción del estado actual del sistema de drenaje utilizado en la mina.

7. CONDICIONES DE LAS VIAS INVOLUCRADAS EN EL EVENTO

Las condiciones actuales de las vías son aptas para llegar al sitio de interés y realizar la visita técnica en investigación del evento SI___ NO___

Descripción del estado actual de las vías que fueron afectadas en el evento.

8. MAQUINARIA Y EQUIPO

¿La maquinaria y equipo se encuentran en buen estado para realizar la visita técnica en investigación del evento minero? SI___ NO___

Descripción del equipo, maquinaria y/o herramienta involucrado en el evento:

NOMBRE DEL EQUIPO	CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO	CANTIDAD	ESTADO		
			B	R	M

9. RED ELECTRICA

¿La red eléctrica presenta inconveniente y riesgo para la realización de la visita técnica en la investigación del evento minero? SI___ NO___

¿Al interior de las labores mineras existen elementos que generan chispa?

Especifíquelos: _____

¿Los equipos eléctricos, y las instalaciones eléctricas son a prueba de explosión o intrínsecamente seguros? Si No

Descripción de la red eléctrica afectada en el evento:		
---	--	--

10. ESQUEMA DEL LUGAR DEL EVENTO

(Con apoyo de las personas que participaron en la atención de la emergencia ubicar, personal y equipos involucrados en el evento)

11. OBSERVACIONES GENERALES DE LA MINA QUE APORTEN EN DESARROLLO DE LA INVESTIGACION DEL EVENTO

12. FIRMAS DE QUIEN RELIZA LA VISITA TECNICA

NOMBRE	
CARGO	
FIRMA Y No. CEDULA	
NOMBRE	
CARGO	
FIRMA Y No. CEDULA	
NOMBRE	
CARGO	
FIRMA Y No. CEDULA	





NOMBRE	
CARGO	
FIRMA Y No. CEDULA	
NOMBRE	
CARGO	
FIRMA Y No. CEDULA	
NOMBRE	
CARGO	
FIRMA Y No. CEDULA	
NOMBRE	
CARGO	
FIRMA Y No. CEDULA	
NOMBRE	
CARGO	
FIRMA Y No. CEDULA	
NOMBRE	
CARGO	
FIRMA Y No. CEDULA	

Hoja 5 de 5 formato de visita técnica en investigación de accidente minero causado por atmosfera minera o contaminada.

Anexo 11

(anexo accidente minero capítulo 20)

REGISTRO FOTOGRÁFICO EN LA INVESTIGACIÓN DE ACCIDENTES MINEROS POR ATMÓSFERAS CONTAMINADAS O VICIADAS.			
FORMATO N°		VERSIÓN	
			
CONTRATO 643 UPTC			
1. INFORMACIÓN GENERAL			
FECHA DE INVESTIGACION:			
TITULAR:			
NOMBRE DE LA MINA O BOCAMINA			
NOMBRE DEL FRENTE DEL EVENTO			
2. REGISTRO DE EVIDENCIAS RECOLECTADAS			
Fotografía N°	Hora	Ubicación del lugar de toma de fotografía	Observaciones
3. UBICACIÓN DE LAS FOTOGRAFÍAS			

:
 :
 :
 :
 :
 :
 :
 :
 :
 :

4. ARCHIVO FOTOGRÁFICO

5. OBSERVACIONES GENERALES

6. FIRMAS



LÍDER O REPRESENTANTES DEL GRUPO INVESTIGADOR

NOMBRE		
FIRMA		
NOMBRE		
FIRMA		

⋮
⋮
⋮
⋮
⋮
⋮
⋮
⋮
⋮
⋮

Anexo 12

(anexo accidente minero capítulo 20)

LÍNEA DE TIEMPO		
ANEXO N°	VERSIÓN	
CONTRATO 643 ANM		
		
NOMBRE DE LA MINA:	FECHA DE LA INVESTIGACION:	
	DÍA	MES AÑO
<p>LÍDER O REPRESENTANTE DEL EQUIPO INVESTIGADOR</p> <p>Nombre: _____</p> <p>Firma _____</p> <p>C.C. No _____</p>		

:

:

:

:

:

:

:



:

:

:

Anexo 13

(anexo accidente minero capítulo 20)

FORMATO DE LECCIONES APRENDIDAS EN ACCIDENTE O EVENTO CAUSADO POR ATMÓSFERAS CONTAMINADAS O VICIADAS	
Formato N°	Versión
CONTARO 643 ANM	
	

1. DATOS BÁSICOS DEL EVENTO

Fecha de ocurrencia	DÍA____ MES____ AÑO____
Municipio	
Departamento	
Nombre de la mina	
Nombre del frente del evento	
Personas afectadas	Fallecidas____ Heridos____ Sin lesiones____
Tipo de evento o accidente	Atmósfera contaminada____ Explosión____ Incendio____
Mecanismo	
Agente	

2. ¿DESCRIPCION DEL EVENTO?

Describir de manera general y de acuerdo con la investigación del accidente los hechos.

3. CAUSAS DEL EVENTO

Debe escribir la cantidad total de causas encontradas durante la investigación y la cantidad de causas de acuerdo con las categorías establecidas en la metodología adoptada en el desarrollo de la investigación.



4. DEFINICION DE MEDIDAS DE CONTROL

Relacione las medidas de control determinadas en la investigación, para que no vuelva a ocurrir este tipo de accidentes teniendo en cuenta las causas que lo generaron.

LÍDER O REPRESENTANTE DEL GRUPO INVESTIGADOR	
NOMBRE	
CARGO	
CÉDULA	

Anexo 14

(anexo accidente minero capítulo 20)

INFORME FINAL DE INVESTIGACIÓN DE EVENTO MINERO POR ATMÓSFERA CONTAMINADA O VICIADA					
					
Anexo formato N°			VERSIÓN		
FECHA INVESTIGACIÓN					
1. INFORMACIÓN GENERAL DE LA MINA					
MUNICIPIO:			VEREDA :		
TÍTULO MINERO:			TITULAR Y/O EXPLOTADOR:		
NOMBRE DE LA MINA:			NOMBRE DEL FRENTE DEL EVENTO:		
2. DATOS DEL EVENTO MINERO POR ATMÓSFERA CONTAMINADA O VICIADA					
FECHA	04/09/2023	LUGAR	NIVEL UNO NORTE MINA VERITA		
HORA	APROX 3:00 AM	TIPO DE EVENTO	ATM. CONTAMINADA	<input checked="" type="checkbox"/>	
			EXPLOSIÓN	<input type="checkbox"/>	
			INCENDIO	<input type="checkbox"/>	
REALIZABA LABOR HABITUAL	SÍ NO	DESCRIPCIÓN: ¿la ocurrencia del evento fue un día laboral/laboral?			
DAÑO AMBIENTAL	SÍ NO NA	DAÑO MATERIAL	SÍ	NO	
Nº. ILESOS		Nº LESIONADOS LEVES			
Nº. FALLECIDOS		Nº LESIONADOS GRAVES			
TOTAL DE PERSONAS INVOLUCRADAS					
NOMBRE DE LOS COLABORADORES AFECTADOS	CARGO	FECHA DE NACIMIENTO	IDENTIFICACIÓN	GRAVE	MORTAL
TIPO DE VINCULACIÓN O RELACIÓN CON LA ORGANIZACIÓN MINERA	DIRECTA	OCASIONAL	CONTRATISTA	VISITANTE	OTRO
3. LÍNEA DE TIEMPO DEL EVENTO MINERO					
Anexo 12					

4. DESCRIPCIÓN DEL EVENTO MINERO

5. EVIDENCIAS

5.1 CONCLUSIONES DE REVISION DOCUMENTAL

ANEXO 8.

5.2 VISITA TÉCNICA AL SITIO DEL EVENTO

FUE POSIBLE REALIZAR LA INSPECCIÓN SÍ _____ NO _____

DESCRIPCIÓN:

Anexo 10.

5.3 EVIDENCIAS DE CAMPO

5.3.2 EVIDENCIA FOTOGRÁFICA

Anexo 11.

5.3.3 VIDEOS DESCRIPCIÓN Y CONCLUSIONES

5.4 ENTREVISTAS

ENTREVISTA GRAVADA SÍ _____ NO _____

Anexo 9.1

Total de entrevistados _____

FECHA	ANEXO N°	NOMBRE DEL ENTREVISTADO	CARGO	NOMBRE DEL ENTREVISTADOR	CARGO

5.5 Simulación de las condiciones atmosféricas del día del evento mediante software especializado
Ver anexos.

6. ANÁLISIS DE CAUSALIDAD

(REALIZAR UNA DESCRIPCIÓN)

Ver anexos.

6.1. AGENTE Y MECANISMOS DEL ACCIDENTE

MECANISMO DEL ACCIDENTE	Cod..	AGENTE DEL ACCIDENTE	Cod.
	6		

6.2. JERARQUÍA DE DEFENSA /AUSENTE

Nº	DESCRIPCIÓN	CÓDIGO

6.3. ACCIONES INDIVIDUALES O DE GRUPO

Nº	DESCRIPCIÓN	CÓDIGO

6.4 CONDICIONES DE LA TAREA O DEL ENTORNO

6.4.1 FACTORES DEL TRABAJO

Nº	DESCRIPCIÓN	CÓDIGO

6.4.2. FACTORES HUMANOS

Nº	DESCRIPCIÓN	CÓDIGO
1		
2		
3		
4		
5		

6.5 FACTORES ORGANIZACIONALES

N°	DESCRIPCIÓN	CÓDIGO

7. ARGUMENTACION DE CAUSALIDAD

8. INCUMPLIMIENTOS NORMATIVOS

9. HIPÓTESIS

SÍ ____ NO ____
Descripción y evidencias:

10. DETERMINACION DE MEDIDAS

SÍ ____ NO ____
Descripción y evidencias:

11. LIMITANTES DE LA INVESTIGACIÓN



Agencia
Nacional de Minería



Uptc®

Universidad Pedagógica y
Tecnológica de Colombia