



**REPÚBLICA DEL PERÚ
MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS**

**GUÍA PARA LA EVALUACIÓN
DE IMPACTOS EN LA CALIDAD
DEL AIRE POR ACTIVIDADES
MINERO METALÚRGICAS**

SUB - SECTOR MINERÍA

Volumen XXI

**Dirección General de
Asuntos Ambientales Mineros**

REPÚBLICA DEL PERÚ
MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS

**GUÍA PARA LA EVALUACIÓN DE IMPACTOS
EN LA CALIDAD DEL AIRE POR ACTIVIDADES
MINERO METALÚRGICAS**

SUB - SECTOR MINERÍA

**DIRECCIÓN GENERAL DE
ASUNTOS AMBIENTALES MINEROS**

LIMA - PERÚ

Preparado por

Anthony Ccicone, Ph.D., P.Eng.

Dr. Jorge Chávez

Fernando Medina, M.Phil.

por encargo del



PROYECTO DE REFORMA DEL
SECTOR DE RECURSOS
MINERALES DEL PERU



**Canadian International
Development Agency**

**Agence canadienne de
développement international**

Todos los derechos reservados. Esta guía no puede ser total o parcialmente reproducida, memorizada en sistemas de archivo o transmitida en cualquier forma o medio electrónico, mecánico, fotocopia o cualquier otro sin la autorización previa del Ministerio de Energía y Minas del Perú.

Primera Edición: Setiembre de 2007

Índice

Sección	Página
Presentación	xiii
1. Introducción.....	1
2. Marco Legal	3
2.1 Estándares de Calidad Ambiental y Límites Máximos Permisibles Nacionales	3
2.1.1 Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire.....	3
2.1.2 Niveles de Estados de Alerta	5
2.1.3 Límites Máximos Permisibles de Emisiones Gaseosas.....	5
2.2 Estándares Internacionales	6
2.2.1 Grupo del Banco Mundial.....	11
2.2.2 Organización Mundial de la Salud.....	12
2.2.3 Criterios Federales del Canadá.....	13
2.2.4 Criterios Locales de Calidad del Aire en Ontario	14
3. Emisiones Típicas de las Operaciones Mineras.....	15
3.1 Minería Subterránea.....	17
3.2 Minería a Tajo Abierto.....	17
3.3 Operaciones Metalúrgicas	18
3.4 Minería No Metálica.....	20
4. Inventario de Emisiones	23
4.1 Descripción del Inventario de Emisiones	23
4.2 Escenarios de Emisiones Máximas.....	24
4.3 Técnicas de Estimación de Emisiones	24
4.3.1 Evaluación de Fuentes	25
4.3.2 Balance de Masa.....	29
4.3.3 Software/Modelos.....	30
4.3.4 Factores de Emisión.....	31
4.3.5 Cálculos de Ingeniería.....	34
4.4 Emisiones de Procesos	34
4.4.1 Minería Subterránea y a Tajo Abierto	34
4.4.2 Operaciones de Fundición	34
4.4.3 Fuentes de Combustión	37
4.4.4 Chancado y Molienda.....	38
4.5 Emisiones Fugitivas	38
4.5.1 Pilas de Almacenamiento.....	39
5. MODELAMIENTO DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES	45
5.1 Consideraciones Generales	46
5.1.1 Escalas Espacial y Temporal	47
5.1.2 Requerimientos de Cómputo.....	47
5.1.3 Acceso a Datos Confiables	48
5.1.4 Calidad de la Predicción.....	48
5.2 Meteorología.....	48
5.2.1 Capa Límite Atmosférica	50
5.2.2 Estabilidad	52
5.2.3 Velocidad y Dirección del Viento.....	54
5.2.4 Turbulencia.....	56
5.2.5 Longitud Monin-Obukhov	57

Índice

5.3	Modelamiento de la Dispersión	58
5.3.1	Propagación de la Pluma en Base a la Estabilidad	60
5.3.2	Elevación de la Pluma	61
5.3.3	Altura de Mezcla.....	63
5.4	Consideraciones para el Modelamiento	64
5.4.1	Efectos Aerodinámicos.....	64
5.4.2	Terreno Complejo.....	66
5.5	Disponibilidad de los Modelos	68
5.5.1	Selección de Modelos	68
5.5.2	Clases de Modelos	72
5.5.3	Niveles de Sofisticación de los Modelos	74
5.6	Modelos Comúnmente Utilizados	75
5.6.1	ISC – PRIME	75
5.6.2	AERMOD.....	78
5.7	Exactitud del Modelo de Dispersión	84
6.	Interpretación de los resultados	87
6.1	Rendimiento de las Operaciones Ambientales	87
6.2	Métodos de Evaluación del Impacto	88
7.	Ejemplos	93
7.1	Introducción	93
7.2	Inventario de Emisiones	93
7.2.1	Antecedentes.....	94
7.2.2	Descripción del Proyecto.....	94
7.2.3	Estimación de las Emisiones.....	95
7.3	Modelo de Dispersión	102
7.3.1	Fuentes de Emisión.....	102
7.3.2	Receptores	105
7.3.3	Meteorología.....	105
7.3.4	Terreno Complejo.....	105
7.3.5	Deposición por Edificaciones	107
7.4	Resultados del Modelamiento	107
8.	Referencias	111

LISTA DE FIGURAS

Figura 4-1	Sensibilidad del Riesgo según Estimación de Emisiones	25
Figura 4-2	Muestra de Balance de Masa en el Proceso de Fundición y Refinación.....	35
Figura 4-3	Velocidad Promedio Horario vs. Velocidad Observada.....	41
Figura 4-4	Velocidad Umbral de Fricción.....	43
Figura 5-1	Circulación General de la Atmósfera.....	49
Figura 5-2	Flujos Mesoscala.....	50
Figura 5-3	Capa Límite Atmosférica	50
Figura 5-4	Balance de Energía Superficial	51
Figura 5-5	Perfil Vertical de la Temperatura	51
Figura 5-6	Variación Diurna de la ABL	52
Figura 5-7	Perfiles de la Temperatura de la Capa de Mezcla	53
Figura 5-8	Variación de la Velocidad del Viento con la Altura	55

Índice

Figura 5-9	Ejemplo de una Rosa de Viento	56
Figura 5-10	Escalas de Turbulencia	57
Figura 5-11	Dispersión de la Pluma y Estabilidad Atmosférica	59
Figura 5-12	Efectos del Promedio en el Tiempo.....	60
Figura 5-13	Elevación de la Pluma	62
Figura 5-14	Ecuaciones de la Elevación de la Pluma de Briggs	62
Figura 5-15	Deflexión del Aire por la Punta de la Chimenea	64
Figura 5-16	Efectos de Estela de Edificios	65
Figura 5-17	Flujo sobre Terreno Elevado	67
Figura 6-1	Clave para el Uso de Diagramas de Enlace.....	88
Figura 6-2	Diagrama de Enlace para Calidad de Aire	89
Figura 6-3	Diagrama de Enlace para la Depositación de Ácido	89
Figura 6-4	Diagrama de Enlace para el Ozono	90
Figura 6-5	Diagrama de Enlace para el Olor	90
Figura 7-1	Archivo de Control del AERMOD	103
Figura 7-2	Distribución de las Instalaciones del Proyecto	104
Figura 7-3	Ubicación de los Receptores.....	106
Figura 7-4	Diagrama Típico de Elevaciones.....	108
Figura 7-5	Isopletas de Concentraciones Anuales Máximas de Material Particulado.....	109
Figura 7-6	Isopletas de Concentraciones Mensuales Máximas de Material Particulado.....	110

LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1	Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para el Aire	4
Tabla 2-2	Estándares de Calidad de Aire Introducidos por la RM 315-96- EM/VMM.....	4
Tabla 2-3	Niveles de Estados de Alerta Nacionales para Contaminantes del Aire	5
Tabla 2-4	Niveles Máximos Permisibles para Emisiones Gaseosas.....	5
Tabla 2-5	Emisiones Máximas Permisibles para Dióxido de Azufre	5
Tabla 2-7	Límites de Emisión del Grupo del Banco Mundial.....	10
Tabla 3-2	Fuentes de Emisión para el Procesamiento de Oro.....	18
Tabla 4-1	Lista de Métodos de Pruebas de Fuentes Aprobadas	28
Tabla 4-2	Factores de Emisión para las Descargas de Tubos de Escape de los Vehículos en la Mina.....	38
Tabla 5-1	Escalas Utilizadas para los Estudios de Modelamiento Meteorológico y de Calidad de Aire.....	47
Tabla 5-2	Efecto de los Índices de Lapsos Atmosféricos en el Comportamiento de la Pluma	54
Tabla 5-3	Comparación de Modelos de Dispersión Comúnmente Utilizados	75
Tabla 6-1	Guía Internacional de Emisiones.....	87
Tabla 6-2	Muestra de Magnitudes del Impacto	91
Tabla 7-1	Actividades Operacionales de la Mina	94
Tabla 7-2	Emisiones por Voladura	97
Tabla 7-3	Análisis Estadístico de Erosión Eólica.....	99
Tabla 7-4	Factores y Tasas de Emisión y Segmentos	101
Tabla 7-5	Descripción de Fuentes Puntuales.....	102
Tabla 7-6	Fuentes Superficiales	102
Tabla 7-7	Fuentes Asociadas a los Caminos	102
Tabla 7-8	Tasas de Emisión de Material Particulado Modelado	105

Acrónimos

LISTA DE ACRÓNIMOS

AERMAP	Air Dispersion Modelling System Terrain Preprocessor
AERMET	Air Dispersion Modelling System Meteorological Data Preprocessor
AERMOD	Air Dispersion Modelling System Air Dispersion Model
AMS	American Meteorological Society
BPIP	Building Profile Input Program
CAS	Chemical Abstract Service
CCMA	Canadian Council of Ministers of the Environment (Consejo Canadiense de Ministros del Ambiente)
CEM	Continuous Emissions Monitoring (Monitoreo de Emisiones Continuas)
CHIEF	Clearinghouse for Inventories & Emissions Factors (Portal Electronico del Inventario de Emisiones/ Factores de Emision de la USEPA)
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (Australia)
DEM	Digital Elevation Model
DIGESA	Dirección General de Salud Ambiental de Ministerio de Salud (Perú)
DS	Decreto Supremo
ECA	Estándar de Calidad Ambiental
EEA	European Environmental Agency (Agencia Ambiental Europea)
EFR	Emission Factor Rating (Código de Factor de Emisión)
EMC	Emission Measurement Center (Centro de Medicion de Emisiones de la USEPA)
FIRE	Factor Information Retrieval Data System (Sistema de Recuperacion de Datos de Factores)
GEP	Good Engineering Practice (Buena práctica de ingeniería)
IFC	International Finance Corporation (Corporación Financiera Internacional, brazo financiero del Grupo del Banco Mundial)
ISC	Industrial Source Complex
LMP	Límite Máximo Permisible
MOE	Ministry of Environment (Ministerio del Ambiente de Canadá)
NMP	Nivel Máximo Permisible
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (Administración Oceánica y Atmosférica Nacional de los Estados Unidos)
NPI	National Pollutants Inventory (Inventario Nacional de Contaminantes de Australia)
PRIME	Plume Rise Model Enhancements
RD	Resolución Directoral
RM	Resolución Ministerial
SCC	Source Classification Code (Codigo de Clasificacion de Fuentes)
TAPM	The Air Pollution Model (Modelo australiano de calidad de aire)
TTN Web	Technology Transfer Network (Red de Transferencia de Tecnologia de la USEPA)
USEPA	United States Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos)

GLOSARIO

Término	Definición
Advección	<p>Proceso de transporte de una propiedad atmosférica debido únicamente a movimiento de masa de la atmósfera. La advección puede ser representada matemáticamente por la siguiente ecuación:</p> $-\rho \cdot \nabla \varphi = \left(u \frac{\partial \varphi}{\partial x} + v \frac{\partial \varphi}{\partial y} + w \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)$ <p>Donde:</p> <p>φ: La propiedad atmosférica (e.g., la concentración de un contaminante)</p> <p>$\vec{u} = (u, v, w)$: Vector velocidad</p> <p>$\nabla \varphi = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)$: Gradiente de φ</p> <p>El signo negativo es necesario porque el transporte ocurre en la dirección opuesta al gradiente (i.e., en la dirección en la que la propiedad φ desciende).</p>
ABL	Capa Limite Atmosférica (Atmospheric Boundary Layer). La capa más baja de la atmósfera relacionada con el calentamiento/enfriamiento de la superficie y donde se descargan las emisiones.
Albedo	Cociente de la radiación de onda corta reflejada por la superficie de la tierra respecto de la radiación incidente.
Altura GEP	Altura de buena práctica de ingeniería; i.e., la altura del edificio más 1.5 veces la altura o ancho del edificio, según cuál sea el más pequeño.
Anabático (viento)	Viento húmedo y cálido que se eleva por una ladera y que a su paso se condensa provocando la formación de nubes de tipo lenticular en la cima
Bowen, relación de	<p>Relación de flujos de energía de un medio a otro por calor sensible y latente respectivamente.</p> $B = \frac{Q_h}{Q_e}$ <p>Donde: Q_h = Calor sensible Q_e = Calor latente</p>
Brunt-Väisälä, frecuencia de	<p>Frecuencia a la cual una celda de aire desplazada verticalmente oscila en un ambiente estáticamente estable.</p> $N = \sqrt{\frac{g}{\theta} \frac{d\theta}{dz}}$ <p>Donde: θ = temperatura potencial (K) z = altura (m) g = aceleración de la gravedad (9,81 m/s²)</p>
Catabático (viento)	Aire fresco y seco que desciende a sotavento de la montaña, después de haberse condensado toda la humedad de lado de barlovento
Celda de aire	Volumen imaginario de un fluido (e.g., aire atmosférico) al que se le asignan diversas propiedades termodinámicas y cinéticas en un modelo de dispersión.
CIL	Carbón en Lixiviado (Carbon in Leach). Proceso de obtención de metales preciosos por cianuración, en el cual el carbón activado es agregado a la solución cargada.
CIP	Carbón en Pulpa (Carbon in Pulp). Proceso de obtención de metales

Glosario

Término	Definición
	preciosos por cianuración, en el cual el carbón activado es agregado a la pulpa.
Convección	Movimiento de masa dentro de un fluido resultando en el transporte y mezcla de las propiedades del fluido.
Condiciones Estándar	0°C de temperatura y 1 atm de presión.
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
Coriolis	Fuerza aparente que actúa sobre objetos en movimiento en un sistema no inercial de coordenadas. En meteorología, el efecto Coriolis determina la deflexión de las masas de aire o partículas en suspensión hacia la derecha en el hemisferio norte, o hacia la izquierda en el hemisferio sur, debido a la rotación de la tierra (ver también Parámetro de Coriolis).
DALR	Tasa de lapso adiabático seco (Dry Adiabatic Lapse Rate). La tasa de decrecimiento de la temperatura con la altitud de una celda de aire seco que asciende por un proceso adiabático reversible en equilibrio hidrostático a través de la atmósfera.
dscm	Metros cúbicos secos estándar (Dry Standard cubic metres), i.e., en condiciones estándar.
Estándar de Calidad Ambiental	Nivel de concentración o grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo, en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente. Según el parámetro en particular a que se refiera, la concentración o grado podrá ser expresada en máximos, mínimos o rangos. (Art. 31° de la Ley 28611).
Estado de Alerta	Estado en el cual la concentración de un contaminante atmosférico puede causar efectos significativos en la salud de las personas. El DS 009-2003-SA distingue tres tipos de estados de alerta: <ul style="list-style-type: none"> • Estado de Cuidado. Corresponde a la concentración de contaminantes atmosféricos que presenta riesgo de provocar efectos en la salud de cualquier persona y efectos serios en los grupos sensibles de la población. • Estado de Peligro. Corresponde a la concentración de contaminantes atmosféricos que presenta riesgo de provocar efectos serios en la salud de cualquier persona. • Estado de Emergencia. corresponde a la concentración de contaminantes atmosféricos que presenta alto riesgo de provocar efectos serios en la salud de cualquier persona.
EF	Factor de Emisión (Emission factor)
EFR	Factor de Emisión asociado
GIS	Sistema de Información Geográfica (Geographical Information System)
h	Altura (e.g., de una chimenea).
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
H ₂ S	Sulfuro de hidrógeno (en solución: ácido sulfhídrico)
HCN	Cianuro de hidrogeno (en solución: ácido cianhídrico)
Hg	Mercurio
K	Grados Kelvin (K = °C-273)
L	Longitud de Monin- Obukhov. Altura sobre el terreno donde la turbulencia producida mecánicamente (por corte vertical) es balanceada por los efectos negativos del empuje.
Límite Máximo Permisible	Concentración o grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a un efluente o una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente. Su cumplimiento es exigible legalmente por la respectiva autoridad competente. Según el parámetro en particular a que se refiera, la concentración o grado podrá ser expresada en máximos, mínimos o rangos (Art. 32° de la Ley 28611).
n	Número de perturbaciones por año

Glosario

Término	Definición
NH ₃	Amoniaco
NO _x	Óxidos de Nitrógeno
O ₃	Ozono
P	Precipitación
Parámetro de Coriolis	$f = 2\Omega \sin\phi$ <p>Donde: Ω es la velocidad de rotación de la tierra; y ϕ es el ángulo de latitud</p>
PC	Computadora personal
Pluma	Flujo continuo de la salida desde una chimenea.
PTS	Partículas totales en suspensión o material particulado.
PM ₁₀	Material particulado inhalable; i.e., de diámetro aerodinámico menor o igual a 10 μm .
PM _{2,5}	Material particulado respirable; i.e., de diámetro aerodinámico menor o igual a 2,5 μm .
ppmv	Partes por millón en volumen.
Puff	Volumen discreto de emisiones salidas por una chimenea que pudiesen sufrir transformaciones en la atmósfera.
Q	Índice de Emisión
SIZ	Zona de Influencia de la Estructura (Structure Influence Zone)
SO ₂	Dióxido de Azufre (anhídrido sulfuroso)
SVOC	Compuestos Orgánicos Semi-Volátiles (Semi Volatile Organic Carbon); incluyendo clorobenzenos, clorofenoles, bifenilos policlorados (PCB), hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH), dioxinas y furanos.
Temperatura Potencial	<p>La temperatura de una celda de aire seco no saturado que se mueve en condiciones adiabáticas y reversibles a una presión estándar, p_0 (usualmente 100 kPa).</p> $\theta = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^\kappa$ <p>Donde: κ : Constante Poisson; frecuentemente tomado como 2/7.</p>
THC	Hidrocarburos totales
U _t	Velocidad umbral del viento
U*	Velocidad de fricción
Receptor	Un punto en el ambiente donde se evalúa el impacto de una operación. Los receptores sensibles pueden incluir hospitales o escuelas.
VOC	Compuestos Orgánicos Volátiles (Volatile Organic Carbon); definidos como cualquier compuesto de carbono, excluidos CO, CO ₂ , ácido carbónico, carburos o carbonatos metálicos y carbonatos de amonio, que participan en reacciones fotoquímicas de la atmósfera y poseen una presión de vapor de 0,01 kPa o más a 25 °C.
WS	Estación de Trabajo (Work Station)

Presentación

PRESENTACIÓN

La minería cumple un rol fundamental en la economía del Perú y constituye un gran factor de desarrollo. Es el primer proveedor de divisas y aporta hoy más del 60% del total de nuestros ingresos por exportaciones; no obstante, tiene también un potencial de generación de impactos ambientales que, de no recibir un tratamiento técnico integral y oportuno, puede contaminar y afectar los recursos naturales, como de hecho ya ha ocurrido en el pasado.

La experiencia internacional demuestra no sólo que es viable desarrollar las actividades mineras cuidando el ambiente, sino que la excelencia ambiental constituye un imperativo ético imprescindible de solidaridad con las futuras generaciones y para el logro del Bien Común que es la causa final del Estado y la sociedad en todo sistema democrático que se expresa en la seguridad y el bienestar general de las personas sin distinción de raza, sexo, condición económica o de cualquiera otra índole.

La evaluación del impacto de las actividades mineras sobre la calidad del aire constituye una tarea muy importante, tanto para las empresas mineras y sus consultores como para el propio Ministerio de Energía y Minas, en su calidad de autoridad ambiental sectorial. Por ello me complace presentar esta Guía, elaborada con el concurso de expertos canadienses y peruanos, gracias a la colaboración de la Agencia Canadiense de Desarrollo Internacional - ACDI, a través del Proyecto de Reforma del Sector de Recursos Minerales del Perú - PERCAN.

Esta Guía será de gran utilidad para los responsables de las empresas mineras, consultores, funcionarios del Estado y para todas las personas e instituciones interesadas en la identificación, evaluación, prevención y mitigación del impacto de las actividades mineras en la calidad del aire.

El Ministerio de Energía y Minas renueva así su compromiso con los objetivos trazados por el Gobierno en la lucha contra la pobreza y en la promoción de las inversiones responsables en nuestro país.

Lima, 10 de setiembre de 2007

Arq. Juan Valdivia Romero
Ministro de Energía y Minas

1. INTRODUCCIÓN

La presente *Guía para la Evaluación de Impactos en la Calidad del Aire por Actividades Minero-Metalúrgicas* ha sido preparada por el equipo del Proyecto de Reforma del Sector Público Minero (PERCAN), bajo los auspicios de la Agencia Canadiense de Desarrollo Internacional (ACDI) para el Ministerio de Energía y Minas (MEM).

El objetivo de la Guía es proporcionar al personal del MEM responsable de la evaluación de estudios ambientales una base para la revisión de los aspectos de calidad del aire de los Estudios de Impacto Ambiental de proyectos del sector minero.

La Guía desarrolla los principales aspectos relacionados con las emisiones de contaminantes atmosféricos propias de las actividades mineras, de procesamiento de minerales y de metalurgia extractiva, los inventarios de emisiones, el modelamiento del transporte de contaminantes atmosféricos y la interpretación de los resultados del modelamiento.

2. MARCO LEGAL

Los criterios para la evaluación de la calidad del aire están dados por dos tipos de instrumentos legales. Los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) proporcionan los criterios de calidad que se aplican al aire ambiental en su condición de cuerpo receptor de emisiones de contaminantes atmosféricos (i.e. emisiones gaseosas o de material particulado). Los Límites Máximos Permisibles (LMP)¹ proporcionan los criterios de calidad exigidos para las fuentes puntuales de emisión de contaminantes atmosféricos. Los ECA y los LMP están definidos por las siguientes normas:

- Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire – DS 074-2001-PCM.
- Valor Anual de Concentración de Plomo – DS 069-2003-PCM.
- Niveles Máximos Permisibles de elementos y compuestos presentes en emisiones gaseosas provenientes de las unidades minero-metalúrgicas - RM 315-96-EM/VMM (19/07/96)².

En esta Sección se han incluido también a modo de referencia los criterios de calidad del Grupo del Banco Mundial y del Consejo Canadiense de Ministerios del Ambiente (CCMA).

2.1 ESTÁNDARES DE CALIDAD AMBIENTAL Y LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES NACIONALES

2.1.1 Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire

Los ECA se definen como aquellos "niveles de concentración máxima de contaminantes del aire que en su condición de cuerpo receptor es recomendable no exceder para evitar riesgo a la salud humana. Como estos estándares protegen la salud, son considerados estándares primarios"³.

El valor correspondiente para la concentración del plomo fue establecido por DS 069-2003-PCM (15/06/03). En la Tabla 2-1 se muestran los parámetros regulados.

Los ECA son "referencia obligatoria en el diseño y aplicación de las políticas ambientales y de las políticas, planes y programas públicos en general. Ninguna autoridad judicial o administrativa podrá hacer uso de los estándares nacionales de calidad ambiental del aire, con el objeto de sancionar bajo forma alguna a personas jurídicas o naturales"⁴.

¹ La RM 315-96-EM/VMM utiliza la denominación "Niveles Máximos Permisibles". Sin embargo, la Ley General del Ambiente (Ley 28611) acoge el término "Límite Máximos Permisible" de uso más difundido.

² A la fecha de cierre de esta edición, existe una propuesta de nuevos LMP para emisiones atmosféricas de la industria minero-metalúrgica, presentada por el MEM y en proceso de consulta.

³ Art. 3° del D.S. 074-2001-PCM. El término "estándares primarios" hace referencia a la Ley del Aire Limpio de los Estados Unidos (Clean Air Act), la cual define los estándares primarios como aquellos establecidos para proteger la salud pública, incluyendo a las poblaciones sensibles como los asmáticos, niños y ancianos; mientras que los estándares secundarios son establecidos para proteger el bienestar público, incluyendo la protección frente a la reducción de visibilidad y los daños a animales, cultivos, vegetación y edificios (ver además en el glosario la definición de ECA proporcionada por la Ley General del Ambiente).

⁴ Art. 8° del DS 074-2001-PCM.

Tabla 2-1 Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para el Aire

Parámetro	Período	Criterio	
		Valor Límite ($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)*	Observaciones
Dióxido de azufre ⁵ (SO ₂)	anual	80	Media aritmética anual
	24 h	365	No debe excederse más de una vez al año
PM ₁₀	anual	50	Media aritmética anual
	24 h	150	No debe excederse más de 3 veces al año
Monóxido de carbono (CO)	8 h	10 000	Promedio móvil
	1 h	30 000	No debe excederse más de 1 vez al año
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	anual	100	Promedio aritmético anual
	1 h	200	No debe excederse más de 24 veces al año
Ozono (O ₃)	8 h	120	No debe excederse más de 24 veces al año
Plomo (Pb)	anual	0,5	Promedio aritmético de los valores mensuales. En la fracción PM ₁₀ .
	mensual	1,5	No debe excederse más de 4 veces al año
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	24 h	-	(por definir en el futuro)
Valores Transitorios			
Dióxido de azufre (SO ₂)	anual	100	Promedio anual
PM ₁₀	anual	80	Promedio anual
	24 h	200	No debe excederse más de 3 veces al año
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	1 h	250	No debe excederse más de 24 veces al año
Ozono (O ₃)	8 h	160	No debe excederse más de 24 veces al año
Plomo (Pb)	anual	1,0	anual

* : A condiciones estándar (0°C de temperatura y 1 atm de presión).
 - : No hay información.

Por otro lado, la RM 315-96-EM/VMM también estableció estándares de calidad de aire ambiental aplicables en el área de influencia de las operaciones minero-metalúrgicas con carácter provisional, en tanto no se aprobaran los Estándares Nacionales de Calidad de Aire⁶. Con la promulgación del DS 074-2001-PCM, se entiende que dichos estándares quedaron sin efecto. No obstante, la RM 315-96-EM/VMM introdujo un estándar para arsénico, el cual no ha sido recogido por el DS 074-2001-PCM. La Tabla 2-2 muestra los estándares establecidos por la citada RM.

Tabla 2-2 Estándares de Calidad de Aire Introducidos por la RM 315-96-EM/VMM

Parámetro	Media Aritmética Diaria* $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ (ppm)	Media Aritmética Anual* $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ (ppm)	Media Geométrica Anual* $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$	Notas
Dióxido de azufre	572 (0,2) ^(a)	172 (0,06)	--	(1)
Material particulado (PTS)	350 ^(a)	--	150	(2)
Plomo ^(b)	--	0,5	--	(1)
Arsénico ^(c)	6	--	--	(3)

* A condiciones estándar (0°C de temperatura y 1 atm de presión).

(a) No debe excederse más de una vez al año.

(b) Concentración mensual de plomo = 1,5 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$.

(c) Concentración de arsénico para 30 minutos, no debe excederse más de una vez al año = 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

-- = No hay lineamientos.

(1) Valor reemplazado por el DS 074-2001-PCM.

(2) El DS 074-2001-PCM no considera este parámetro, pero en su lugar considera PM₁₀.

(3) Parámetro no considerado en el DS 074-2001-PCM.

⁵ También referido como Anhídrido Sulfuroso.

⁶ Disposición Transitoria de la RM 315-96-EM/VMM.

2.1.2 Niveles de Estados de Alerta

Mediante DS 009-2003-SA (25/06/03) se aprobó el Reglamento sobre los Niveles de Estados de Alerta Nacionales para Contaminantes del Aire. Esta norma define los diferentes estados de alerta para contaminantes de aire basados en las concentraciones críticas (PM₁₀, SO₂, CO y H₂S).

Los estados de alerta que han sido definidos son: de cuidado, peligro y de emergencia. El organismo responsable de declarar y suspender los estados de alerta es la DIGESA. Los valores establecidos se muestran en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3 Niveles de Estados de Alerta Nacionales para Contaminantes del Aire

Tipo de Alerta	PM-10 (µg/m ³)	SO ₂ (µg/m ³)	CO (µg/m ³)	H ₂ S (µg/m ³)
De cuidado	>250 Prom. aritmético de 24 h	>500 Prom. móvil de 3 h consecutivas	>15 000 Prom. móvil de 8 h	>1 500 Prom. aritmético de 24 h
De peligro	>350 Prom. aritmético de 24 h	>1 500 Prom. móvil de 3 h	>20 000 Prom. móvil de 8 h	>3 000 Prom. aritmético de 24 h
De emergencia	>420 Prom. aritmético de 24 h	> 2 500 Prom. móvil de 3 h	>35 000 Prom. móvil de 8 h	>5 000 Prom. aritmético de 24 h

De acuerdo con el DS 009-2003-SA, a cada nivel de estado de alerta se asocian cierto tipo de medidas para la protección de la salud humana ante dichos escenarios.

2.1.3 Límites Máximos Permisibles de Emisiones Gaseosas

Mediante RM 315-96-EM/VMM (19/07/96) se establecieron los LMPs para emisión de contaminantes a la atmósfera. Estos valores se miden en la fuente y son aplicables únicamente a fuentes puntuales. Los niveles de emisión para material particulado, plomo y arsénico son valores constantes y se muestran en la Tabla 2-4. Los niveles de emisión de dióxido de azufre están dados en función del azufre total que ingresa al proceso y son mostrados en la Tabla 2-5.

Tabla 2-4 Niveles Máximos Permisibles para Emisiones Gaseosas

Parámetro	Valor en Cualquier Momento (mg/Nm ³)
Material particulado total	100
Plomo	25
Arsénico	25

Tabla 2-5 Emisiones Máximas Permisibles para Dióxido de Azufre

Azufre que ingresa al Proceso (t/d)	Emisión Máxima Permisible para Dióxido de Azufre (t/d)
<10	20
11-15	25
16-20	30
21-30	40
31-40	50
41-50	60

Tabla 2-5 Emisiones Máximas Permisibles para Dióxido de Azufre (continua)

Azufre que ingresa al Proceso (t/d)	Emisión Máxima Permisible para Dióxido de Azufre (t/d)
51-70	66
71-90	72
91-120	81
121-150	90
151-180	99
181-210	108
211-240	117
241-270	126
271-300	135
301-400	155
401-500	175
501-600	195
601-900	201
901-1200	207
1201-1500	213
>1 500	0,142 (S)*

* (S) = Azufre total ingresando al proceso.

2.2 ESTÁNDARES INTERNACIONALES

Existe una gran diversidad de estándares de calidad de aire y emisiones en las diferentes jurisdicciones. Además, existen estándares emitidos por entidades de nivel supranacional, tales como el Grupo del Banco Mundial y la Organización Mundial de la Salud (OMS). En esta sección se presentan los estándares de calidad de aire y emisiones de estas instituciones, así como los del Gobierno Federal de Canadá y de la Provincia de Ontario, a manera de referencia.

Los estándares de calidad del aire de la OMS y el Grupo del Banco Mundial han sido diseñados para alcanzar una calidad del aire que proteja la salud pública en diversos contextos y como tal no reflejan necesariamente los estándares de calidad del aire ambiental de los países en forma individual. El Grupo del Banco Mundial es el único organismo que se ha revisado y resumido en este documento que proporciona límites de emisión de fuente puntual específicamente para la industria de fundición y refinería.

Los estándares canadienses de calidad del aire varían según el enfoque adoptado para equilibrar los riesgos a la salud, la factibilidad tecnológica, las consideraciones económicas y otros factores políticos y sociales diversos que, a su vez, dependerán, entre otras cosas, del nivel de desarrollo y la capacidad nacional en el manejo de la calidad del aire.

En la mayoría de las jurisdicciones y organismos internacionales los estándares de calidad de aire ambiental se encuentran establecidos en la regulación y los estándares de emisión son calculados de manera específica para cada proyecto con el fin de asegurar el cumplimiento del estándar de calidad de aire ambiental aplicable. Únicamente la Corporación Financiera Internacional (Grupo del Banco Mundial) define límites de emisión para las actividades minero-metalúrgicas. En la Tabla 2-6 se muestra un resumen de los diferentes estándares de calidad de aire ambiental que son discutidos en las siguientes secciones y en la Tabla 2-7 se muestran los estándares de emisión del Grupo del Banco Mundial.

Tabla 2-6 Resumen de los Estándares de Calidad de Aire Ambiental Internacionales

	Material Particulado																							
	Monóxido de Carbono (CO)					Partículas Totales en Suspensión (PTS)					PM10 (diámetro nominal <10 µm)					PM2.5 (diámetro nominal <2.5 µm)								
	Máximo promedio de 1-h		Máximo promedio de 8-h		Máximo promedio de 24-h		Media aritmética anual		Media geométrica anual		Máximo promedio de 24-h		Media aritmética anual		Media geométrica anual		Máximo promedio de 24-h		Media aritmética anual		Máximo promedio de 1/2-h		Máximo mensual	
	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	mg/m³/mes
Guías del Banco Mundial																								
Manual de Prevención y Reducción de la Contaminación (4)																								
Guías Ambientales Generales																								
Valores de Umbral(5)																								
Calidad de Aire Moderadamente Degradada(6)																								
Calidad de Aire Pobre (7)																								
Guías de Medio Ambiente, Salud y Seguridad (9)																								
Minería y Procesamiento - Tajo Abierto																								
Minería y Procesamiento - Subterránea																								
IFC Guidelines																								
Guías Ambientales Generales (10)																								
Organización Mundial de la Salud																								
Guías de Calidad del Aire (11)																								
Guías de Calidad del Aire para Europa(11)	60000																							
Guías de Calidad de Aire (12)																								
Guía (13)																								
Objetivo Interino-1 (14)																								
Objetivo Interino-2 (15)																								
Objetivo Interino-3 (16)																								
Criterios Federales Canadienses																								
Estándares Nacionales Canadienses (17)																								
Objetivos Nacionales de Calidad de Aire Ambiental (18)																								
Desable		15000				8000																		
Aceptable		35000				15000					120													
Tolerable						20000					400													
Criterios de la Provincia de Ontario (19)																								
Ontario Regulation 419/05 (20)																								
Esquema 1	6,000 (m)					100																		
Esquema 2	6,000 (m)					100																		
Esquema 3	6,000 (m)					15700					120													7000
Criterio de Punto de Contacto (POC) de 1/2-hora(21)																								
Criterio de Calidad de Aire Ambiental (22)																								

* Ver guías de calidad de aire de la OMS

Tabla 2-6 Resumen de los Estándares de Calidad de Aire Ambiental Internacionales (continuación)

	Plomo			Arsénico (8)			Cadmio			Mercurio		
	Máximo promedio de 1/2-h	Máximo promedio de 24 h	Media aritmética anual	Máximo promedio de 1/2-h	Máximo promedio de 24 h	Media aritmética anual	Máximo promedio de 1/2-h	Máximo promedio de 24 h	Media aritmética anual	Máximo promedio de 1/2-h	Máximo promedio de 24 h	Media aritmética anual
	µg/m³	µg/m³	µg/m³									
Guías del Banco Mundial												
Manual de Prevención y Reducción de la Contaminación (4)												
Guías Ambientales Generales												
Valores de Umbral(5)												
Calidad de Aire Moderadamente Degradada (6)												
Calidad de Aire Pobre (7)												
Guías de Medio Ambiente, Salud y Seguridad (9)												
Minería y Procesamiento - Tajo Abierto												
Minería y Procesamiento - Subterránea												
IFC Guidelines												
Guías Ambientales Generales (10)												
Organización Mundial de la Salud												
Guías de Calidad del Aire (11)												
Guías de Calidad del Aire para Europa(11)			0.5									
Guías de Calidad de Aire (12)									0.005			1
Guía (13)												
Objetivo Interno-1 (14)												
Objetivo Interno-2 (15)												
Objetivo Interno-3 (16)												
Criterios Federales Canadienses												
Estándares Nacionales Canadienses (17)												
Objetivos Nacionales de Calidad de Aire Ambiental (18)												
Deseable												
Acceptable												
Tolerable												
Criterios de la Provincia de Ontario (19)												
Ontario Regulation 419/05 (20)												
Esquema 1	6						5				5	
Esquema 2	6						0.075				5	
Esquema 3									0.025			2
Criterio de Punto de Contacto (POC) de 1/2-hora(21)												
Criterio de Calidad de Aire Ambiental (22)												
							0.3					

* Ver guías de calidad de aire de la OMS

Tabla 2-6 Resumen de los Estándares de Calidad de Aire Ambiental Internacionales (continuación)

	Ozono (O3)				Dióxido de Nitrógeno (NO2)				Dióxido de Azufre (SO2)				
	Maximo promedio de 1/2-h	Maximo promedio de 1-h	Maximo promedio de 8-h	Maximo promedio de 24-h	Maximo promedio de 1/2-h	Maximo promedio de 1-h	Maximo promedio de 1-h	Maximo promedio de 1-h	Maximo promedio de 1/2-h	Maximo promedio de 1-h	Maximo promedio de 1-h	Maximo promedio de 24-h	Media aritmética anual
	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³	µg/m³
Guías del Banco Mundial													
Manual de Prevención y Reducción de la Contaminación (4)													
Guías Ambientales Generales													
Valores de Umbral(5)													
Calidad de Aire Moderadamente Degradada (6)													
Calidad de Aire Pobre (7)													
Guías de Medio Ambiente, Salud y Seguridad (9)													
Minería y Procesamiento - Tajo Abierto													
Minería y Procesamiento - Subterránea													
IFC Guidelines													
Guías Ambientales Generales (10)													
Organización Mundial de la Salud													
Guías de Calidad del Aire (11)													
Guías de Calidad del Aire para Europa(11)													
Guías de Calidad de Aire (12)													
Guía (13)													
Objetivo Interino-1 (14)													
Objetivo Interino-2 (15)													
Objetivo Interino-3 (16)													
Criterios Federales Canadienses													
Estándares Nacionales Canadienses (17)													
Estándares Nacionales de Calidad de Aire Ambiental (18)													
Deseable													
Aceptable													
Tolerable													
Criterios de la Provincia de Ontario (19)													
Ontario Regulation 419/05 (20)													
Esquema 1													
Esquema 2													
Esquema 3													
Criterio de Punto de Contacto (POI) de 1/2-hora(21)													
Criterio de Calidad de Aire Ambiental (22)													

* Ver guías de calidad de aire de la OMS

Marco Legal

Tabla 2-7 Límites de Emisión del Grupo del Banco Mundial

Compuesto/Contaminante	Unidad ⁽¹⁾	PPAH, Parte III - Sector de Fundición de Cobre ⁽³⁾	EHS Guidelines - Fundición y Refinación de Metales Base ⁽⁴⁾
Dióxido de Azufre (SO₂)			
Tostación, fundición y sinterización primarias.	% en la descarga	1,000	Eficiencia de conversión: > 99.1% (para % SO ₂ en emisión ≤ 4%) > 99.7% (para % SO ₂ en emisión > 4%)
Pretratamiento de materiales, fundición secundaria, refinación térmica, fusión y volatilización y limpieza de escoria - Lavador Alcalino	mg/Nm ³		<50 - 200
Pretratamiento de materiales, fundición secundaria, refinación térmica, fusión y volatilización y limpieza de escoria - Filtro de tela con inyección de cal	mg/Nm ³		<500
Oxidos de Nitrógeno (NO_x) expresado como NO₂ Quemador de bajo NO _x , quemador oxigenado, lavador oxidante	mg/Nm ³		100 - 300
Nieblas Ácidas / Gases Removedor de niebla, Lavador Alcalino	mg/Nm ³		50
Carbon Orgánico Volátil/Solventes (como C) Contenedor, condensador, filtro de carbón y biofiltro	mg/Nm ³		5 - 15
Polvo Filtro de tela con inyección de cal, filtro de tela, control de temperatura	mg/Nm ³		1 - 5
Carbono Orgánico Total (como C) Quemador secundario, combustión optimizada	mg/Nm ³		5 - 50
Dioxinas⁽⁵⁾ Filtro de tela con inyección de cal, filtro de tela, quemador secundario seguido de enfriamiento por inmersión, absorción por carbón activado, Catalizador de oxidación	ng TE/Nm ³		0.1 - 0.5
Amoniaco Lavador ácido	mg/Nm ³		5
Cloro Lavador Alcalino, colección y reutilización	mg/Nm ³		0.5
CO y carbonilos Control de Proceso y Contenedor sellado	mg/Nm ³		5
Arsina Lavador oxidante	mg/Nm ³		0.5
Material Particulado Total (TSP)	mg/Nm ³	20 - 50	
Mercurio (en TSP)	mg/Nm ³	0.05	0.02
Plomo (enTSP)	mg/Nm ³	0.2	
Cadmio (en TSP)	mg/Nm ³	0.05	
Arsénico (en TSP)	mg/Nm ³	0.5	

Notas

- (1) Nm³ se refiere a condiciones estándar: 0 °C y 1 atm.
 (2) Resolución Ministerial No 315-96-EM/VM.
 (3) WBG, 1999 (este documento ha sido reemplaza por ⁽⁴⁾).
 (4) WBG, 2007b.
 (5) Expresado como Concentración Equivalente Tóxica: TE.

2.2.1 Grupo del Banco Mundial

El Grupo del Banco Mundial es un conjunto de organismos especializados de las Naciones Unidas, responsables de proporcionar financiamiento y asesoramiento a los países para propósitos de desarrollo económico y eliminación de la pobreza. Las organizaciones integrantes del Grupo del Banco Mundial son:

- El Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento (BIRF).
- La Asociación Internacional de Fomento (AIF).
- La Corporación Financiera Internacional (CFI).
- El Organismo Multilateral de Garantías de Inversiones (OMGI).
- El Centro Internacional de Arreglo de Diferencias Relativas a Inversiones (CIADI)

El BIRF y la AIF dedican sus actividades a la ayuda financiera a los países y juntos reciben la denominación colectiva de Banco Mundial. Los otros tres están dedicados a la promoción del desarrollo económico a través de la inversión privada sostenible.

Con el fin de asegurar la sostenibilidad de las inversiones del Grupo del Banco Mundial, éste publica diversas guías de desempeño ambiental. En particular, las publicaciones relevantes para este estudio son las siguientes guías de calidad de aire y emisiones de la CFI:

- Manual de Prevención y Reducción de la Contaminación (Pollution Prevention and Abatement Handbook - PPAH (WBG, 1999);
- Guías Generales de Medio Ambiente, Salud y Seguridad de la CFI, (General Environmental Health and Safety Guidelines - General EHS Guidelines (WBG, 2007a);
- Addenda 1 de las Guías Generales de Medio Ambiente, Salud y Seguridad para la Industria Minera y Plantas Concentradoras – Operaciones Subterráneas y a Tajo Abierto (WBG 1995a y 1995b; actualmente en revisión); y
- Guías de Medio Ambiente, Salud y Seguridad para Fundición y Refinación de Metales Base (EHS Guidelines - Base Metal Smelting and Refining) (WBG, 2007b).

Manual de Reducción y Prevención de la Contaminación

El Manual de Prevención y Reducción de la Contaminación fue elaborado en 1999 por el equipo de medio ambiente del Grupo del Banco Mundial y reemplaza cualquier versión anterior del Manual. El PPAH se divide en tres partes principales:

- Parte I: proporciona una visión general del manejo de la contaminación;
- Parte II: proporciona conocimientos sobre “Implementación de Políticas en la Práctica” con capítulos como Principios Básicos, Establecimiento de Prioridades, Manejo de la Calidad del Aire y el Agua, y Manejo de la Contaminación Industrial; y
- Parte III: comprende las “Guías de Proyecto” incluyendo capítulos sobre contaminantes individuales y sus respectivas guías de calidad de aire ambiental, tecnologías para el control de contaminantes y guías para el sector industrial.

Guías Generales de Medio Ambiente, Salud y Seguridad de la CFI

Las Guías Generales de Medio Ambiente, Salud y Seguridad de la CFI (WBG, 2007a) son también un documento del Grupo del Banco Mundial empleado por la CFI. Este documento ha sido concluido recientemente el 30 de abril de 2007 y ha sido diseñado para ser usado conjuntamente con las Guías del Sector Industrial (i.e., Guías de la CFI

para Minería y Procesamiento de Minerales, y para la Fundición y Refinación de Metales Base).

Las Guías Generales de la CFI también recomiendan que "...las emisiones no contribuyan en una proporción significativa a alcanzar los valores guía o estándares de calidad de aire ambiental relevantes. Como regla general, se sugiere utilizar un 25% de los estándares de calidad del aire ambiental que sean aplicables para permitir futuros desarrollos de manera sostenible en la misma cuenca atmosférica."

Guías de Medio Ambiente, Salud y Seguridad de la CFI para Minería y Procesamiento de Minerales

Las Guías de la CFI para la Industria Minera y Procesamiento de Minerales (WBG, 1995a y 1995b) se publicaron como una Addenda al Borrador de las Guías Generales de la CFI en 1995. No se ha podido discernir si estas guías permanecerán en uso en el futuro, pero es seguro que serán actualizadas en cierto grado.

Estas guías son específicas a operaciones de procesamiento de minerales y minería a tajo abierto y subterránea; contienen dos recomendaciones principales relacionadas con la calidad del aire ambiental, incluyendo disposiciones para la reducción de la contaminación (minimizar el polvo generado como material que se transporta y transfiere) así como recomendaciones sobre las concentraciones límite de material particulado ($< 10 \mu\text{m}$), óxidos de nitrógeno (como NO_2) y dióxido de azufre medido en los límites de la propiedad y fuera de ésta.

Guías de Medio Ambiente, Salud y Seguridad de la CFI para la Industria de Fundición y Refinación de Metales Base

Las Guías de la CFI para la Fundición y Refinación de Metales Base (WBG, 2007b) han sido publicadas muy recientemente, el 30 de abril de 2007. Estas guías constituyen un documento de referencia técnica con ejemplos generales y específicos a la industria sobre Buenas Prácticas Internacionales de la Industria (Good International Industry Practices - GIIP). El documento ha sido diseñado para ayudar a los gerentes y a las personas encargadas de la toma de decisiones proporcionando referentes e información técnica relevantes de la industria. Esta información sustenta las acciones dirigidas a evitar, minimizar y controlar los impactos ambientales y a la salud y seguridad durante las etapas de construcción, operación y cierre de un proyecto o instalación.

El documento proporciona guías de emisión específicas al proceso para la industria de fundición y refinación de metales base. Es importante notar que la CFI recomienda que estos niveles sean alcanzados sin dilución en al menos el 95% del tiempo de operación de la planta.

2.2.2 Organización Mundial de la Salud

La Organización Mundial de la Salud (OMS) es una agencia especializada de las Naciones Unidas que funciona como la autoridad guía y de coordinación para los asuntos de salud internacional y salud pública.

Las Guías de Calidad del Aire de la OMS (WHO 2000), publicadas por primera vez en 1987 y actualizadas en 2000, se basan en la evaluación experta de evidencia científica real. En 2006, la OMS publicó las *Guías de Calidad del Aire de la OMS para Material*

Particulado, Ozono, Dióxido de Nitrógeno y Dióxido de Azufre – Actualización Global 2005 (WHO 2006). Para los compuestos no considerados en el documento de 2005, los valores de la publicación de 2000 se mantienen vigentes.

En general, los valores guía recomendados por la OMS supuestamente reflejan las concentraciones umbral bajo las cuales no ocurren efectos adversos. Sin embargo, en muchos casos (por ejemplo, para el ozono y el material particulado), la investigación no ha identificado estos umbrales, de modo que la posibilidad de los efectos adversos en la salud permanece incluso si se alcanza el valor guía.

En áreas con gran contaminación del aire, la OMS propone pasos cada vez mayores (es decir, Objetivo Provisional 1 a 3) para reducir, en forma progresiva, los niveles ambientales. Si se logran los objetivos, se puede esperar una reducción significativa en los riesgos de los efectos crónicos y agudos en la salud provenientes de la contaminación del aire.

La OMS no proporciona guías para los límites de emisión de fuente puntual.

2.2.3 Criterios Federales del Canadá

El gobierno canadiense regula el medio ambiente a nivel tanto federal como provincial. En Canadá, la calidad del aire ambiental para los contaminantes de interés nacional se maneja mediante:

- Estándares Nacionales Canadienses (CCME, 2006); u
- Objetivos Nacionales de Calidad del Aire Ambiental (NAAQO) (Health Canada / Environment Canada 1994, 1998; Health Canada 1999).

No existen guías ni estándares límite para la emisión en la industria de fundición y refinación de metales base en Canadá a nivel nacional; por el contrario, todas las guías y estándares revisados en este documento se relacionan con las fuentes energéticas y de combustión que son publicadas por:

- El Consejo Canadiense de Ministros del Ambiente (Canadian Council of Ministers of the Environment - CCME); y/o
- La Agencia Federal Ambiental - Environment Canada.

Los gobiernos provinciales también pueden publicar listas de límites de emisión en adición a los límites nacionales y tienen la principal responsabilidad en muchas áreas de la reglamentación de fuentes de contaminación del aire.

Estándares Nacionales Canadienses (CWS) y Objetivos Nacionales de la Calidad de Aire Ambiental de Canadá (NAQO)

Los CWS pueden incluir “estándares, guías, objetivos y criterios cualitativos o cuantitativos para proteger el ambiente y reducir los riesgos a la salud humana”. Los CWS de relevancia para esta revisión son los correspondientes al ozono y el material particulado, para los cuales se han establecido estándares a fin de lograr concentraciones objetivo que reducirán los riesgos a la salud y al ambiente dentro de un plazo específico (esto es, para el año 2010). También existen CWS para mercurio, benceno, dioxinas y furanos así como hidrocarburos de petróleo.

Los Objetivos Nacionales de Calidad de Aire Ambiental del Canadá (NAAQOs) *“prescriben objetivos para la calidad del aire, medidos en el receptor relevante (personas, plantas, animales, materiales). Estos objetivos pueden incorporar algún elemento de riesgo costo-beneficio, reflejando una filosofía de protección de la salud ambiental y la reducción de riesgos a largo plazo mientras reconocen los límites tecnológicos y económicos”*.

Se prescriben tres rangos de calidad del aire -- *“deseable”, “aceptable” y “tolerable”*.

- El nivel máximo deseable es el objetivo a largo plazo de calidad del aire y proporciona una base para una política anti-degradación para las partes no contaminadas del país y para el desarrollo continuo de la tecnología de control de la contaminación.
- El nivel máximo aceptable fue diseñado para proporcionar una protección adecuada ante los efectos en el suelo, el agua, la vegetación, los materiales, los animales, la visibilidad y la comodidad y el bienestar personal.
- El nivel máximo tolerable denota concentraciones en base a tiempo de contaminantes del aire mas allá de los cuales, debido a un margen reducido de seguridad, se requiere urgentes acciones apropiadas para proteger la salud de la población en general.

Guías de Límites de Emisión de CCME y de Environment Canada

Las guías de límites de emisión se especifican mediante documentos guía publicados por el CCME y los estándares de emisión son determinados por Environment Canadá. Para este informe se revisaron los siguientes documentos de CCME y Environment Canada:

- Guías Nacionales de Emisión para Turbinas Estacionarias de Combustión (CCME, 1992);
- Guías Nacionales de Emisión para Calderos Comerciales/Industriales y Sistemas de Calefacción (CCME 1997);
- Nuevas Guías de Emisión para Fuentes de Generación Termoeléctrica (Environment Canada 2003); y
- Nuevo Reglamento de Emisión de Motores de Ignición por Compresión Off-Road (Environment Canada 2005).

2.2.4 Criterios Locales de Calidad del Aire en Ontario

El Ministerio del Ambiente de Ontario (Ontario Ministry of the Environment - OMOE) es responsable de las actividades regulatorias y de ejecución enfocadas en los aspectos del aire local que afectan las comunidades de Ontario. Mediante el Reglamento 419/05 de Ontario: Contaminación del Aire – Calidad del Aire Local (Reg.O.419/05), el OMOE establece estándares de aire para un gran número de agentes tóxicos del aire y se encarga de los emisores industriales en forma individual. Estos estándares se basan en la mejor información científica disponible y se establecen a un nivel que salvaguarda la salud humana y el ambiente natural. Esto coloca a Ontario en un lugar preponderante de las jurisdicciones que analizan los problemas locales de calidad del aire. El Reg.O.419/05 impone límites de concentración estándar del aire para los contaminantes que se evaluaron empleando modelos de dispersión aérea y/o de monitoreo ambiental. Si las plantas no cumplen con estos límites, entonces la planta puede desarrollar estándares temporales específicos al sitio de manera alternativa en base a la menor emisión que se pueda lograr en la planta tomando en consideración las limitaciones técnicas y económicas.

Ontario no cuenta con estándares directos de emisión para la minería y fundición pero utiliza las guías de emisión de los Criterios Federales Canadienses.

3. EMISIONES TÍPICAS DE LAS OPERACIONES MINERAS

Las principales fuentes de emisión de aire en las diferentes actividades mineras provienen de:

- Chimeneas de procesos;
- Almacenamiento de materiales en pilas y movimiento de mineral o desmorte;
- Operación de plantas auxiliares (planta de ácidos, planta de energía, almacenamiento de químicos y combustibles, etc.); y
- Operación de las instalaciones de almacenamiento de relaves.

Las operaciones mineras generalmente generan partículas primarias y secundarias y precursores de ozono como parte de sus emisiones. Las partículas primarias son emitidas a la atmósfera como partículas sólidas y se componen de:

- Material particulado total (Partículas Totales en Suspensión - PTS);
- Material particulado inhalable (i.e. con un diámetro aerodinámico menor a 10 μm) (PM_{10});
- Material particulado respirable (i.e. con un diámetro aerodinámico menor a 2,5 μm) ($\text{PM}_{2,5}$); y
- Metales traza.

Las partículas secundarias y los precursores de ozono se definen como aquellas especies que no se emiten ni como material particulado ni como ozono, pero sufren procesos químicos dentro de la atmósfera para convertirse en uno de ellos. Las partículas secundarias y los precursores de ozono contribuyen con el smog e incluyen:

- Óxidos de nitrógeno (NO_x);
- Dióxido de azufre (SO_2);
- Aerosoles ácidos (e.g. sulfatos, nitratos, cloruros);
- Hidrocarburos totales (expresados como metano (CH_4));
- Amoníaco (NH_3);
- Compuestos orgánicos volátiles (VOCs); y
- Compuestos orgánicos semi volátiles (SVOCs).

Muchos de estos contaminantes no están regulados en el Perú para el sector minero, pero sí en otros países⁷, ya que poseen el potencial de generar impactos en la salud humana, debiendo considerarse como tóxicos.

En las secciones siguientes se presentan los contaminantes específicos que pueden ser generados por las principales actividades mineras. La Tabla 3-1 presenta un resumen de las principales actividades en el sector y los posibles contaminantes.

⁷ Véase por ejemplo las guías del CCMA.

Emisiones de Operaciones Mineras

Tabla 3-1 Fuentes y Contaminantes Potenciales Relacionados con la Minería y Otras Fuentes

Fuentes	Parámetros de Descarga			Partículas Primarias				Partículas Secundarias/Precursores de Ozono y Elementos Tóxicos						
	Valor del Flujo*	CO ₂ , O ₂	CO	PTS	PM _{10/2.5}	Metales	Nox NO & NO ₂ (no N ₂ O)	SO ₂	VOC/ SVOC	NH ₃	HCN	H ₂ SO ₄	HCl y/o HNO ₃	Hg
Operación Superficial														
Chancado	H	-	-	M	M	M	-	-	-	-	-	-	-	L
Molienda Húmeda	H	-	-	M	M	M	-	-	-	-	-	-	-	-
Fuentes de Areas Abiertas	-	-	-	L	L	L	-	-	-	-	-	-	-	-
Concentración de Metal Base														
Molienda	H	-	-	M	M	M	-	-	-	-	-	-	-	-
Flotación	H	-	-	M	M	M	-	L	-	-	-	-	-	-
Función de Metal Base														
Sinterización	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L	L	L	L	M
Fundición	H	H	H	H	H	H	H	H	L	L	L	L	L	M
Refinación	H	H	H	H	H	H	H	M	M	L	L	L	L	M
Recuperación Electrolytica de Metales Base														
Tostado	H	H	H	H	H	H	H	M	M	L	L	L	L	M
Lixiviación	H	-	-	-	-	-	-	H	H	H	H	H	H	L
Procesamiento de Oro														
Molienda	L	-	-	M	M	M	-	-	-	-	-	-	-	-
Flotación	L	-	-	M	M	M	-	H	H	M	M	L	L	-
Cianuración	L	-	-	M	M	M	-	H	L	M	M	L	L	-
Extracción del oro del carbón	L	-	-	M	M	M	-	L	L	M	M	L	H	-
Hornos de Regeneración de Carbono	L	-	H	M	M	M	-	L	L	M	M	L	L	M
Refinación	L	-	-	L	L	L	-	-	-	-	-	-	-	L
Electrolítico	L	-	-	-	-	-	-	-	L	L	L	L	L	L
Recuperación de Hg	L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	L
Area de Relaves de Oro	-	-	-	L	L	L	-	-	L	L	M	-	-	L
Procesos Auxiliares														
Planta de Ácidos	H	-	-	-	-	-	-	H	L	-	-	H	-	-
Calderas a petróleo	H	H	H	M	M	M	H	L	L	-	-	-	-	-
Calderas a Gas Natural	H	H	H	L	L	L	M	L	L	-	-	-	-	-
Almacenamiento de Químicos y Combustible	-	-	-	-	-	-	-	-	M	-	M	-	-	-
Emisiones de Polvo en Carretera	-	-	-	H	H	H	-	-	-	-	-	-	-	-
Area de Relaves (sin oro)	-	-	-	L	L	L	-	-	-	-	-	-	-	-
Talleres (Pintura/soldadura)	L	-	-	-	-	-	-	M	-	-	-	-	-	-
Laboratorio	L	-	-	M	M	L	L	L	L	-	L	L	L	L
Elevaciones de desfogue subterráneo	H	H	H	H	H	M	M	L	-	M	-	-	-	L

L – Baja prioridad debido a la limitada toxicidad o baja masa
 * Incluye el valor volumétrico del flujo, temperatura y contenido de humedad.

Se conocen como emisiones fugitivas aquellas emisiones no descargadas por chimeneas o desfogue de procesos, es decir, fuentes en las que no es posible identificar el punto exacto de la emisión. Ejemplos de emisiones fugitivas incluyen polvo de pilas de materiales, manipuleo de materiales, o volatilización del vapor de recipientes y tanques. Las emisiones fugitivas de las operaciones mineras pueden constituir una fuente importante de emisión de contaminantes.

3.1 MINERÍA SUBTERRÁNEA

Las siguientes actividades y fuentes asociadas con la minería subterránea son potenciales emisores de contaminantes de preocupación:

- Movimientos de tierra asociados con el desarrollo de las actividades en superficie;
- accesos a piques y rampas;
- desarrollo de la ventilación;
- extracción, transporte y descarga de mineral;
- chancado de mineral;
- beneficio del mineral;
- operaciones de talleres y operaciones de plantas de energía por combustión;
- erosión eólica de pilas de materiales, botaderos, áreas de relaves y otras áreas expuestas;
- descargas (gases de combustión) por ventilación de la mina; y
- actividades de voladura.

Adicionalmente, el contenido de metales de los depósitos puede incrementar los umbrales de emisión.

3.2 MINERÍA A TAJO ABIERTO

Las siguientes actividades y fuentes asociadas con la minería superficial son potenciales emisores de contaminantes de preocupación:

- Retiro de vegetación y suelo superficial;
- Retiro del material de cubierta;
- Voladura;
- Retiro de material de desbroce, desmonte o mineral;
- Transporte y apilamiento de material de desbroce, desmonte o mineral;
- Extracción, transporte y descarga de mineral;
- Chancado de mineral;
- Beneficio del mineral;
- Operaciones de talleres y plantas de energía; y
- Erosión eólica del tajo abierto, pilas de materiales y áreas expuestas.

Al igual que en la minería subterránea, el contenido de metales en los materiales, puede hacer posible que se alcancen los umbrales de emisión.

3.3 OPERACIONES METALÚRGICAS

Las emisiones de las operaciones metalúrgicas varían dependiendo del mineral procesado.

Fundición de Metales Base

Las emisiones de hornos/fundiciones y refinерías de metales base son principalmente material particulado, metales, óxidos de azufre y material particulado fugitivo. El material particulado está principalmente compuesto de óxidos y sulfuros metálicos, elementos nativos como mercurio, sulfatos metálicos y ácido sulfúrico. El procesamiento de minerales de sulfuros producirá emisiones con elevadas concentraciones de dióxido de azufre (SO₂). De ser factible, éste es recuperado típicamente y convertido en ácido sulfúrico.

Procesamiento de Minerales Auríferos

Las principales emisiones atmosféricas que se podrían generar por las actividades realizadas en los diferentes tipos de procesamiento de minerales auríferos se presentan en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2 Fuentes de Emisión para el Procesamiento de Oro

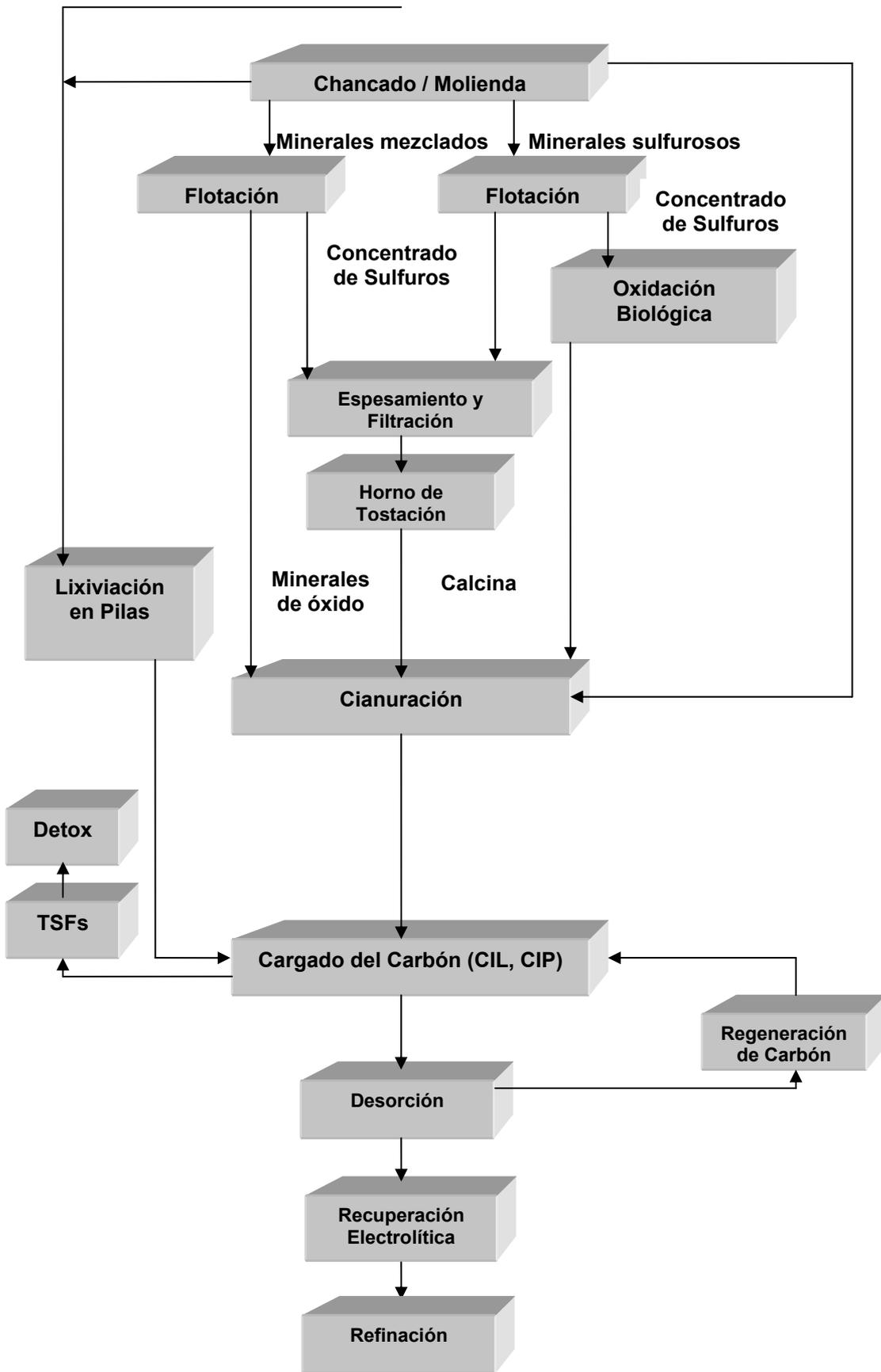
Fuente de Emisión	Tipo de Emisión
Chancado y Molienda	PTS, PM10, PM2,5, Metales
Horno de tostación	PTS, PM10, PM2,5, Metales, VOCs, NOx, SO2, HCN
Procesos de Lixiviación CIP, CIL, Vat y Heap Leaching Lixiviación y captura en carbón	PTS, PM10, PM2,5, Metales, VOCs, NH3, HCN, HCl, HNO3
Regeneración de carbón	PTS, PM10, PM2,5, Metales, CO, VOCs, SVOCs, HCN, HCl/HNO3
Extracción del oro del carbón	PTS, PM10, PM2,5, VOC, HCN, HCl/HNO3
Recuperación electrolítica	Metales, HCN, NH3
Refinación	PTS, PM10, PM2,5, Metales
Recuperación de mercurio	Hg

Las actividades y fuentes principales de emisiones de contaminantes provenientes del procesamiento de oro son:

- Movimiento de materiales (emisiones fugitivas);
- Almacenamiento en pilas;
- Chancado y/o molienda;
- Hornos de tostación y refinерías pequeñas;
- Circuitos de CIP/CIL y lixiviación; y
- Disposición de relaves.

A continuación se describen con mayor detalle las emisiones de algunas de estas actividades y fuentes.

Emisiones de Operaciones Mineras



Transporte

Los vehículos de la mina, incluyendo tractores, excavadoras, topadoras, niveladoras, camiones y cargadores, producirán emisiones de material particulado, CO, NO_x, SO₂, y VOCs por la combustión de su combustible diesel (Ciccone & Short 2003).

Asimismo, el transporte de vehículos y maquinaria en las áreas de operación minera no pavimentadas originan la generación de emisiones de polvo por la aplicación de fuerza mecánica (i.e., llantas, cuchillas) y por la acción de la erosión eólica.

Chancado y Molienda

El chancado, molienda y molienda secundaria son operaciones mineras comunes. El propósito de estas tres es reducir el tamaño del mineral ya sea en un ambiente seco o húmedo. Las partículas y metales son las emisiones atmosféricas más importantes generadas por estos procesos.

Pilas de Almacenamiento

Las pilas de almacenamiento y las áreas de relaves pueden constituir fuentes de emisiones de material particulado durante su manipulación y por la erosión eólica. En las áreas activas se levanta gran cantidad de polvo atmosférico debido a la alteración mecánica del material granular expuesto al aire. La pulverización y abrasión de los materiales de la superficie origina la generación de polvo por la aplicación de fuerza mecánica (i.e., llantas, cuchillas). En las áreas inactivas, las emisiones de polvo se generan por el arrastre de las partículas de polvo por la acción de corrientes de aire, tales como la erosión eólica de una superficie expuesta a velocidades de viento mayores a 19 km/h.

Instalaciones de Disposición de Relaves

En las instalaciones de disposición de relaves cianurados, el cianuro puede liberarse al aire o degradarse. El cianuro se libera al aire como HCN; sin embargo, su liberación depende del pH, siendo significativa sólo a valores bajos de pH.

El cianuro se degrada naturalmente en dióxido de carbono y amonio, este último se oxida a nitrato, el cual es observado en los efluentes líquidos.

Un segundo componente que puede ser emitido de las instalaciones de almacenamiento de relaves es el mercurio, el cual se encuentra asociado al oro y es extraído por el proceso.

Las instalaciones de almacenamiento de relaves mineros de oro también descargarán mercurio en menor cantidad.

3.4 MINERÍA NO METÁLICA

Las siguientes actividades y fuentes asociadas con la minería no metálica (canteras de materiales de construcción, etc.) son potenciales emisores de contaminantes de preocupación:

Emisiones de Operaciones Mineras

- Retiro de vegetación y suelo superficial;
- Retiro del material de cubierta;
- Voladuras;
- Retiro de material de desbroce y desmonte;
- Movimiento de tierras;
- Transporte y apilamiento de material de desbroce, desmonte o material;
- Generación de polvo por tráfico y erosión;
- Extracción, transporte y descarga de materiales;
- Operaciones de talleres y plantas de energía; y
- Erosión eólica de las áreas de canteras y otras áreas expuestas.

Al igual que en la minería subterránea y a tajo abierto, el contenido de metales en los materiales, puede hacer posible que se alcancen los umbrales de emisión.

4. INVENTARIO DE EMISIONES

En las siguientes secciones se describen los requerimientos para la evaluación de los impactos en la calidad del aire. Las metodologías específicas de monitoreo, requisitos de aseguramiento y control de calidad (QA/QC), especificación de la operación de equipos e instalaciones meteorológicas, establecimiento de registros, procesamiento de registros, reporte de resultados y técnicas de calibración se detallan en el Protocolo de Monitoreo de Calidad de Aire y Emisiones Atmosféricas⁸.

4.1 DESCRIPCIÓN DEL INVENTARIO DE EMISIONES

Un inventario de emisiones identifica todos los contaminantes de preocupación emitidos por una instalación y especifica las cantidades y el estado físico en el que son liberadas. Este tipo de análisis permite evaluar el impacto potencial de una instalación sobre el medio circundante. En muchos casos, también permite la evaluación de las emisiones de una instalación comparándolas con los límites de emisiones. Además, cuando los resultados del inventario son usados en el modelamiento de dispersión, tal como se describe a continuación, el impacto de la instalación puede compararse con los estándares de calidad de aire ambiental.

A fin de completar un inventario de emisiones, deben identificarse y evaluarse todos los contaminantes. Bajo ciertas circunstancias, puede ser que algunas fuentes no emitan contaminantes de preocupación. En la Sección 3 se presenta una discusión de las fuentes de emisiones comunes para la industria minera.

En el caso de un inventario, para cada fuente de contaminantes deberán proporcionarse parámetros para la descarga. En el caso de chimeneas, estos parámetros incluyen (Ciccone & Short 2003):

- Índice de flujo volumétrico de descarga, temperatura y contenido de humedad.
- Concentraciones de oxígeno, dióxido de carbono y monóxido de carbono (i.e. especies diluyentes).

Una vez identificadas todas las fuentes de emisiones y sus contaminantes potenciales, deberán estimarse los índices de emisión. Existen muchas técnicas para la estimación de índices de emisiones.

Un inventario de emisiones completo comprenderá lo siguiente:

- Definición del área geográfica circundante a la instalación;
- Lista completa de todos los contaminantes emitidos;
- Lista completa de todas las fuentes de contaminantes o categorías de fuentes;
- Descripción detallada de cada fuente, incluyendo los parámetros de chimeneas;
- Definición del intervalo de tiempo usado para la evaluación e.g. emisiones de media hora, por hora o anuales; y
- Explicación de cómo se estimaron todas las emisiones.

⁸ A la fecha, el MEM se encuentra elaborando una actualización de dicho protocolo.

4.2 ESCENARIOS DE EMISIONES MÁXIMAS

Los inventarios de emisiones pueden describir las emisiones bajo condiciones normales de operación, así como bajo el peor escenario de emisiones. Por lo general, los inventarios de emisiones preparados como soporte para la obtención de permisos deben describir los escenarios de emisiones máximas (peor escenario).

Para las emisiones de polvo de una operación minera, las peores condiciones pueden ser modeladas asumiendo lo siguiente:

- Período de actividad máxima;
- Atmósfera estable;
- Equipos operando continuamente;
- Tráfico continuo;
- Receptores sensibles cercanos;
- Velocidad baja del viento;
- Ausencia de precipitaciones;
- Ausencia de árboles que capturen las emisiones; y
- Ausencia de aplicación de metodologías de control.

4.3 TÉCNICAS DE ESTIMACIÓN DE EMISIONES

Existen una variedad de métodos disponibles para estimar las emisiones de fuentes identificadas. Algunos métodos son mejores que otros en la estimación de emisiones de determinadas fuentes. Además, la exactitud de los estimados de las emisiones variarán según el método, con algunos estimados significativamente más confiables que otros. A continuación se enumeran y discuten en mayor detalle cinco técnicas de estimación de emisiones comúnmente aplicadas:

1. Evaluación de Fuentes (incluyendo Monitoreos de Emisiones Continuas)
2. Balances de Masa
3. Software/Modelos
4. Factores de Emisiones
5. Cálculos de Ingeniería

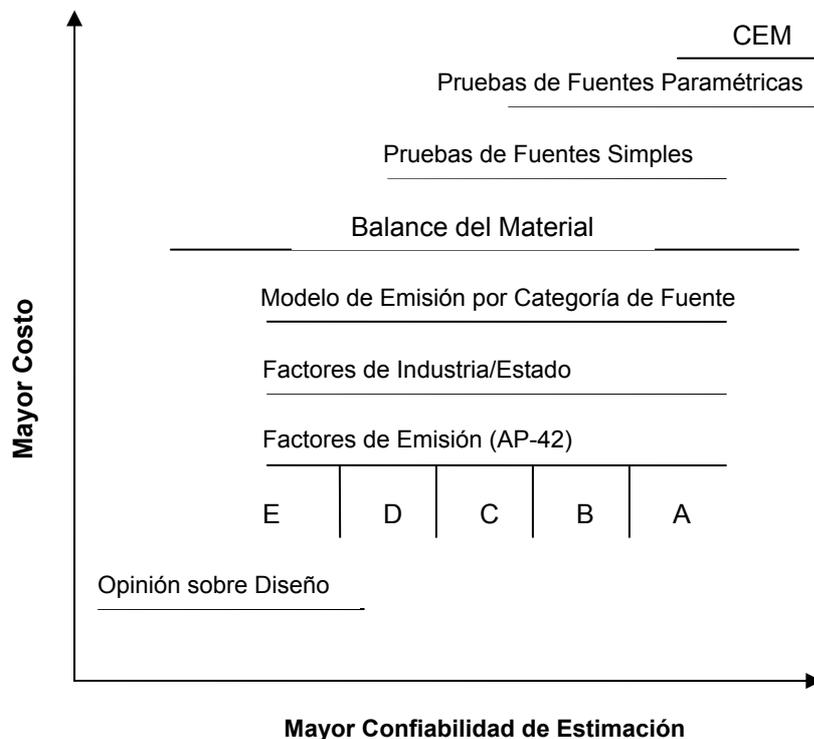
El uso de monitoreo de emisiones continuas y la selección de la técnica apropiada se basarán en la información disponible, calidad requerida de los resultados y el costo relativo de cada técnica. La Figura 4-1 muestra la relación entre la calidad de los resultados estimados y el costo relativo de cada técnica. La evaluación de fuentes deberá ser de primera prioridad ya que estos métodos generan datos más precisos que los que pueden obtenerse usando los factores de emisión para las fuentes puntuales de procesos. Sin embargo, para algunas fuentes y parámetros secundarios, es aceptable el uso de factores de emisión reconocidos. En las secciones 4.4 y 4.5 se presenta un resumen de la técnica de estimación de emisiones que mejor se aplica a las fuentes de operaciones mineras comunes.

Las técnicas de estimación de emisiones presentadas se relacionan principalmente con las emisiones de procesos promedio. En la literatura raramente se discute las emisiones resultantes de eventos no rutinarios y en general no se cuenta con técnicas

Inventario de Emisiones

para la estimación en tales eventos. Sin embargo, es importante reconocer que las emisiones resultantes de desvíos importantes de situaciones operativas normales y/o situaciones accidentales (e.g. derrames) pueden ser significativas.

Figura 4-1 Sensibilidad del Riesgo según Estimación de Emisiones



4.3.1 Evaluación de Fuentes

La evaluación de fuentes ofrece muchas ventajas en relación a otras formas de estimación de emisiones:

- Los datos representan específicamente la fuente a evaluarse;
- Permite la caracterización de una fuente de emisión en donde podría desconocerse la composición de los gases de descarga; y
- Los métodos de evaluación de fuentes estipulan procedimientos rigurosos y detallados, ofreciendo un alto grado de confianza en los datos resultantes. En las condiciones de diseño específicas de campo o en condiciones de corrientes de gas de alta humedad, el alto contenido de material particulado puede generar confusión en la interpretación de resultados.

Cuando esta evaluación es adecuadamente realizada por personal competente y experimentado, de acuerdo a metodologías validadas y reconocidas, esta técnica ofrece la fuente más confiable de datos rigurosos para su uso en el desarrollo de un inventario de emisiones de aire. La evaluación de fuentes directas es, por supuesto, la técnica más costosa e intensiva para la determinación de emisiones atmosféricas.

Es necesario indicar que los resultados del programa de evaluación de fuentes dependen de las condiciones de operación del proceso asociado en el momento que la evaluación es realizada. Los informes de muestreo de chimeneas frecuentemente

Inventario de Emisiones

presentan datos de emisiones en términos de kilogramos por hora o gramos por metro cúbico estándar (dscm). El muestreo puede realizarse bajo condiciones operativas representativas o bajo máximas cargas, dependiendo del propósito del inventario de emisiones (e.g., informe de emisiones, permisos).

Para determinar el índice de emisión de los datos de concentración, la concentración debe determinarse bajo condiciones estándar secas (i.e., estandarizadas a 0°C de temperatura y 1 atm de presión), tal como se muestra en la Ecuación 4-1, de donde el índice de emisión o carga en la atmósfera puede estimarse de la Ecuación 4-2.

$$C_i = \frac{M_f}{V_{m,STP}} \quad 4-1$$

donde,

C_i = concentración o carga del i-ésimo contaminante [g/dscm]⁹;

M_f = captura del filtro [g]; y

$V_{m,STP}$ = volumen medido de muestra en STP¹⁰ [dscm].

y

$$E_i = C_i Q_d 3,6 \left(\frac{273}{273 + T} \right) \quad 4-2$$

donde,

E_i = emisiones por hora de la i-ésima especie [kg/h];

C_i = concentración o carga del i-ésimo contaminante [g/dscm];

Q_d = índice de flujo volumétrico de gas de chimenea a la temperatura T [dscm/s];

T = temperatura de la muestra de gas [oC].

Otra alternativa es usar el índice de actividad o producción en la fuente de emisiones al momento de la medición para estimar los factores de emisión, que pueden ser usados en otros índices de producción tal como se muestra en la Ecuación 4-3.

$$EF_i = \frac{E_i}{A_t} \quad 4-3$$

donde,

EF_i = emisiones del i-ésimo contaminante por tonelada de producto [kg/t];

E_i = emisiones del i-ésimo contaminante [kg/h]; y

A_t = producción durante la evaluación de emisiones [t/h].

⁹ dscm = dry standard cubic meter (m³ seco en condiciones estándar).

¹⁰ STP = Standard Temperature and Pressure (condiciones estándar de presión y temperatura).

Inventario de Emisiones

En los párrafos anteriores se presentan las emisiones como una función de la actividad, lo que permite el desarrollo de un factor de emisión específico a la extensión del sitio (EF), que puede usarse en el futuro si una instalación aumenta en producción.

Monitoreo de Emisiones Continuas (CEM)

Para medir SO₂, NO_x, THC y/o emisiones de CO, la instalación deberá tener instalado un sistema de CEM que mida constantemente las concentraciones contaminantes en partes por millón por volumen (ppmv). El sistema de CEM por lo general está equipado con medidores de oxígeno (O₂) y/o (CO₂); estos gases son gases diluyentes (más que contaminantes) y son monitoreados para obtener el índice del flujo de gas de descarga y/o flujo de aire en exceso. Las concentraciones O₂ y CO₂ generalmente se reportan en unidades de porcentaje (por volumen) debido a que son mayores que los niveles de los otros gases (i.e. ppmv). Dependiendo de los requerimientos regulatorios y el tipo de fuente, estos instrumentos pueden ser instalados tanto para coleccionar continuamente datos durante la operación de la unidad como usados temporalmente para coleccionar datos durante un determinado período. Los datos de concentraciones de CEM generalmente son transmitidos desde el instrumento hasta el sistema de registro de datos programado para almacenar los datos y preparar informes en el formato específico del sitio. Los datos de concentración frecuentemente son promediados para los intervalos específicos de tiempo (e.g., 10 min, 1 h, 24 h).

Si bien los CEMs son por lo general el medio más caro para la generación de datos de emisiones, los rigurosos requisitos de QA/QC, las especificaciones de operación y los grupos de datos de monitoreo continuo a largo plazo generados, proporcionan el más alto nivel de confiabilidad de los estimados de emisiones resultantes.

Además de las unidades de concentración, frecuentemente los datos de emisiones son reportados en otras unidades, como los índices de emisión de masa (e.g., kg/h) o factores de emisión (kg/unidad de proceso). Para la conversión de las unidades de concentración, se requiere datos adicionales. Para la conversión de los datos de concentración en datos de índice de masa, debe medirse o estimarse el índice del flujo volumétrico de gas de descarga (e.g., en unidades de metros cúbicos por hora). La fuente puede equiparse con un medidor de flujo de salida, el cual provee datos continuos de flujo al sistema; o el flujo puede medirse usando un tubo de Pitot. También es posible estimar el flujo en base a mediciones empíricas, mediciones de los índices de combustible, concentraciones de gas diluyente o mediciones de toma de aire (e.g., velocidad del ventilador).

Para determinar el índice de emisión en los datos de concentración de CEM, se requiere el índice promedio de flujo volumétrico seco según la Ecuación 4-4.

$$E_i = \frac{C_i \times MW_i \times Q_d \times 3600}{22.4 \times 10^6} \times \frac{273}{273 + T} \quad 4-4$$

Donde,

- E_i = emisiones del i -ésimo contaminante [kg/h];
- C_i = concentración del i -ésimo contaminante [ppm_{v,d}];
- MW_i = peso molecular del i -ésimo contaminante [kg/kmol];
- Q_d = índice del flujo volumétrico del gas de chimenea [m³/s seco] a la temperatura T;

Inventario de Emisiones

22,4 = volumen ocupado por una mol de gas a temperatura y presión estándar (0°C y 1 atm) [m³/kmol];

T = temperatura de la muestra de gas [°C].

Métodos de Pruebas de Fuentes

La USEPA proporciona métodos de pruebas de fuentes¹¹. Cada uno de los métodos ha sido validado por la agencia de publicación respectiva. Normalmente los métodos publicados por diferentes agencias para los mismos contaminantes, son sólo variaciones menores de la misma metodología básica.

La Tabla 4-1 presenta un resumen de los métodos de pruebas de fuentes recomendados para el desarrollo de inventarios de emisiones de aire. Aunque la lista no incluye todos los métodos posibles y las modificaciones de los métodos que existen para estos contaminantes, sí se proporciona los métodos considerados en general como los de mayor aceptación y confiabilidad para la mayoría de los casos. Cada uno de estos métodos estipula el rango de condiciones bajo las cuales se aplican; los métodos detallados deben ser consultados directamente. En la práctica, el rendimiento del programa para chimeneas puede verse afectado por un gran número de limitaciones prácticas como:

- Las condiciones de gas de chimenea (incluyendo la concentración, temperatura, contenido de humedad relativa a las instalaciones de depuración húmeda, flujo ciclónico o turbulento) que están fuera de los límites normales de aplicabilidad del método;
- Mal acceso a un punto de muestreo adecuado y/o mala distribución del ducto; y
- Un ambiente inadecuado para el equipo de pruebas de campo, como condiciones extremas de temperatura y atmósferas agresivas y tóxicas.

Estos temas deben ser abordados durante las etapas de planeamiento del programa, y podrían requerir la modificación de los métodos estándares o la selección de métodos alternativos.

Las metodologías de muestreo de la USEPA mencionadas en el presente documento fueron promulgadas en el Título 40 de Código de Reglamentos Federales, Parte 60, Apéndice A (40 CFR, Part 60, Appendix A), y están disponibles gratuitamente en Internet en la sección del Centro de Mediciones de Emisiones (Emissions Measurement Center - EMC) del portal electrónico de la Red de Transferencia de Tecnología (Technology Transfer Network - TTNWeb)¹².

Tabla 4-1 Lista de Métodos de Pruebas de Fuentes Aprobadas

Parámetro	Nombre del Método	Referencia del Método	Agencia de Publicación	Método Analítico
Valor del flujo volumétrico, Peso molecular y material particulado	Método de Referencia para la Prueba de Fuentes: Medición de Descargas de Partículas de Fuentes Estacionarias	Métodos A - E, EPS 1/RM/8	Environment Canada	Gravimétrico
Monóxido de carbono	Determinación de Emisiones de Monóxido de Carbono de Fuentes Estacionarias	Método 10	USEPA	Infrarrojo no dispersivo (NDIR)

¹¹ <http://www.epa.gov>.

¹² <http://www.epa.gov/ttn/emc/>.

Inventario de Emisiones

Tabla 4-1 Lista de Métodos de Pruebas de Fuentes Aprobadas (continuación)

Parámetro	Nombre del Método	Referencia del Método	Agencia de Publicación	Método Analítico
Oxígeno y dióxido de carbono	Determinación de Oxígeno y Concentraciones de Dióxido de Carbono en Emisiones de Fuentes Estacionarias (Procedimiento del Instrumento Analizador)	Método 3A	USEPA	
Partículas finas (PM ₁₀ y PM _{2.5})	Determinación de Emisiones de PM ₁₀ (Procedimiento del Valor Constante de Muestreo)	Método 201A	USEPA	Gravimétrico
	Método Borrador para la Determinación de Emisiones de PM ₁₀ y PM _{2.5} (Procedimiento del Valor Constante de Muestreo)			Gravimétrico
	Determinación de Emisiones de Partículas Condensables de Fuentes Estacionarias	Método 202	USEPA	Gravimétrico
Metales Traza	Determinación de Emisiones de Metales de Fuentes Estacionarias	Método 29	USEPA	ICAP/GFAA/CVAA
Óxido de Nitrógeno	Determinación de Emisiones de Óxido de Nitrógeno de Fuentes Estacionarias (Procedimiento del Instrumento Analizador)	Método 7E	USEPA	Quimioluminiscente
Dióxido de Sulfuro	Determinación de Emisiones de Dióxido de Azufre de Fuentes Estacionarias (Procedimiento del Instrumento Analizador)	Método 6C	USEPA	Ultravioleta no dispersivo (NDUV)
Hidrocarburos Totales	Determinación de Concentración Orgánica de Gases Totales Usando el Analizador de Ionización de Fuego	Método 25A	USEPA	Detección de Ionización de fuego (FID)
Compuestos Orgánicos Volátiles	Medición del Tren de Muestreo Orgánico Volátil de Emisiones de Compuestos Orgánicos Gaseosos por Cromatografía de Gases	Método 0030 Método 18	USEPA USEPA	Desorción térmica GC-MS
Compuestos Orgánicos Semi volátiles	Método de Referencia para la Prueba de Fuentes: Medición de Descargas de Compuestos Orgánicos Semi volátiles Seleccionados de Fuentes Estacionarias	Método 0010 EPS 1 /RM/2	Environment Canada USEPA	GC-MS de Alta/Baja Resolución
Ácido Sulfúrico	Determinación de Emisiones de Ácido Sulfúrico y Dióxido de Azufre de Fuentes Estacionarias	Método 8	USEPA	GC-MS

4.3.2 Balance de Masa

El balance del material (conocido también como balance de masa) es un método comúnmente usado para la estimación de emisiones de muchas categorías. El método del balance de material puede usarse en el caso que no se cuente con datos de pruebas, factores de emisión u otros métodos desarrollados. En realidad, para algunas fuentes, el balance de material es el único método práctico para obtener estimados exactos de las emisiones.

El uso del balance de material involucra el análisis de un proceso para determinar si las emisiones pueden estimarse únicamente sobre el conocimiento de parámetros operativos y las composiciones de materiales específicos. Aunque el balance de material es una herramienta valiosa para la estimación de emisiones de muchas fuentes, su uso requiere que se conozca la medición del material en cada punto del proceso. El uso del balance de material es más apropiado en casos donde se pueden

realizar mediciones precisas de todos los componentes, sobre todo los componentes en las emisiones. En el caso que se desconozca o se base en supuestos, podrían resultar errores graves.

La aplicación más común se realiza al determinar emisiones de SO₂ a partir del contenido de azufre en los combustibles y la cantidad consumida. El análisis de combustibles puede usarse para predecir las emisiones basadas en la aplicación de leyes de conservación. La presencia de ciertos elementos en los combustibles puede usarse para predecir su presencia en las emisiones. Esto incluye elementos tóxicos como metales, así como otros elementos como el azufre que puede convertirse en otros componentes durante el proceso de combustión.

La ecuación básica usada en los cálculos de emisión de análisis de combustibles es:

$$E_{kpy,i} = Q_f \times \frac{C_f}{100} \times \frac{MW_i}{MW_f} \quad 4-5$$

Donde,

$E_{kpy,i}$ = emisiones anuales del i -ésimo contaminante [kg/año];

Q_f = uso de combustible [kg/h];

C_f = concentración del i -ésimo contaminante en el combustible, porcentaje en peso [%];

MW_i = peso molecular de i -ésimo contaminante emitido [kg/kmol];y

MW_f = peso molecular de contaminante en el combustible [kg/kmol].

El balance de material se simplifica bajo el supuesto de que el material que está siendo generado es emitido a la atmósfera.

4.3.3 Software/Modelos

Los modelos de emisiones pueden usarse para estimar emisiones en los casos en donde el enfoque del cálculo es engorroso, o en los casos en los que se ha identificado una combinación de parámetros que afectan las emisiones pero individualmente no presentan una correlación directa. Por ejemplo, el programa TANKS de USEPA incorpora variables como el color del tanque, temperatura y velocidad del viento en el tanque para obtener el estimado de emisiones fugitivas de compuestos orgánicos volátiles y semi volátiles seleccionados. Los modelos de emisiones pueden basarse en valores medidos o empíricos. El modelo computarizado puede basarse en ecuaciones teóricas que fueron calibradas usando datos reales, o pueden ser netamente empíricos, en cuyo caso las ecuaciones usualmente se basan en correlaciones estadísticas con variables independientes.

El Sistema de Datos de Factores para la Recuperación de Información (Factor Information Retrieval - FIRE - Data System) es una base de datos que contiene los factores de emisión recomendados por la EPA para los contaminantes de aire peligrosos o importantes. Los usuarios pueden buscar en los registros de la base de datos o seleccionar factores de emisión específicos por categoría de fuente, el código de clasificación de fuentes (Source Classification Code - SCC), nombre del contaminante, número de CAS o aparato de control. El programa FIRE contiene

factores de emisión de la Compilación de Factores de Emisión de Contaminantes AP 42 (USEPA 1995) Suplemento D y partes del Suplemento E (1999).

Las emisiones de polvo fugitivo pueden estimarse con la ayuda del programa computarizado MECH que estima las emisiones de partículas de las carreteras pavimentadas, carreteras no pavimentadas, manipuleo de materiales, trabajos agrícolas y operaciones de construcción y demolición. Este programa automatiza las rutinas de cálculo contenidas en el documento "Control de Fuentes Abiertas de Polvo Fugitivo" EPA 450/3-88-008.

Las emisiones de tráfico sobre caminos pueden ser estimadas usando MOBILE6, desarrollado por la USEPA. Este programa puede estimar emisiones actuales y futuras de vehículos autorizados en carreteras; esto es para automóviles a gasolina, diesel, gas natural, camiones, buses y motocicletas. MOBILE6 proporciona factores de emisión para hidrocarburos, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, material particulado (tanto del escape, frenos como llantas), dióxido de azufre, amoníaco, contaminantes peligrosos y dióxido de carbono (USEPA 2003b).

Estos modelos pueden encontrarse en <http://www.epa.gov/ttn/chief/software/index.html>.

4.3.4 Factores de Emisión

Los factores de emisión constituyen una herramienta extremadamente útil para la estimación de emisiones atmosféricas de operaciones futuras o de instalaciones específicas con costos mucho más bajos y compromisos de tiempo que las técnicas de muestreo directo de emisiones. Los factores de emisión por lo general se construyen en base a un rango de pruebas de fuente realizadas en un proceso típico bajo condiciones operativas variables. Por ello, se desarrolla una relación que exprese las emisiones atmosféricas como función del nivel de actividad del proceso (como el índice de producción, producto del material o consumo de combustibles). Las emisiones pueden ser estimadas simplemente conociendo el nivel de actividad aplicable.

El valor, la precisión y confiabilidad de la estimación de un factor de emisión depende de varios factores:

- La calidad, confiabilidad y el número de pruebas realizadas como datos de base para el factor de emisión;
- El número de fuentes de procesos muestreados, y el grado de representatividad que estos procesos poseen para éstos en la industria; y
- El grado de aplicabilidad del factor de emisión en el proceso en consideración para el inventario de emisiones.

A través de USEPA u otras fuentes se obtienen los factores de emisión y generalmente se expresan como el peso de una sustancia emitida multiplicada por el peso de la unidad, volumen, distancia, o duración de la actividad emisora de la sustancia (e.g. kilogramos de dióxido de azufre emitido por tonelada de mineral procesado).

Los factores de emisión se usan para estimar las emisiones de una instalación por la ecuación general:

$$E_{kph,i} = A \times EF_i \times \left(1 - \frac{CE_i}{100}\right) \quad 4-6$$

donde

- $E_{kpy,i}$ = índice de emisión del i -ésimo contaminante [kg/h];
- A = índice de actividad [t/h];
- EF_i = factor de emisión no controlada del i -ésimo contaminante [kg/t]; y
- CE_i = eficiencia del control del i -ésimo contaminante [%].

Es importante tener en cuenta que el factor (EF_i) usado en la fórmula es el factor de emisión no controlada.

Usualmente, los datos de las actividades se relacionan directamente con el proceso emisor. Para los procesos industriales, los datos de actividades por lo general se reportan como índices de peso de procesos (e.g., kg, t, o L por mes de material usado o manufacturado). De manera similar, para el equipo de quema de combustible, los datos se reportan como índices de consumo de combustible (e.g., t, L, o m³, o MJ por hora). En muchas ocasiones deben aplicarse factores de conversión para convertir los valores de consumo o producción reportados a unidades que correspondan a la unidad de producto del factor de emisión (e.g., t, barriles, etc.).

Un factor de emisión es una relación entre la cantidad de un contaminante liberado a la atmósfera y la unidad de actividad. Los factores de emisiones generalmente se clasifican en dos tipos: basados en el proceso y basados en el censo. Los factores de emisión basados en el proceso comúnmente se usan para desarrollar los estimados de emisión de fuentes puntuales. La eficiencia del control total es el producto de la eficiencia de captura del equipo por la eficiencia del equipo de control. La eficiencia de captura del equipo de control indica el porcentaje del flujo de emisión captado por el sistema de control y la eficiencia del control del equipo indica el porcentaje de contaminante atmosférico que es retirado del flujo de emisión antes de su liberación a la atmósfera. Pueden determinarse los datos de la eficiencia del equipo de control para equipos específicos por pruebas de fuentes que miden concentraciones de contaminantes antes y después de la aplicación del equipo de control, a partir de los valores de la literatura o de las especificaciones de diseño del fabricante o especificaciones de rendimiento garantizado. La eficiencia del control total puede también necesitar un ajuste para reflejar los tiempos en que el equipo de control no funciona durante las operaciones de mantenimiento o condiciones regulares.

A continuación se presenta una variación de la ecuación del factor de emisión:

$$E_{kph,i} = \frac{C_i}{1000} \times V_{flow} \times \frac{T_{STP}}{T} \quad 4-7$$

Donde,

- $E_{kph,i}$ = índice de emisión del i -ésimo contaminante [kg/h];
- V_{flow} = índice de flujo volumétrico de descarga [m³/h];
- T = temperatura de descarga [K];
- T_{STP} = temperatura estándar garantizada por el fabricante [K]; y
- C_i = concentración de salida garantizada por el fabricante [g/m³].

Inventario de Emisiones

Se usa la ecuación anterior cuando la información es proporcionada por el proveedor del equipo de control, i.e., la concentración de salida del equipo de control y el índice de flujo volumétrico.

Todos los factores de emisión deberán usarse con precaución. Se debe considerar siempre el rango de condiciones bajo las cuales los factores fueron desarrollados para evaluar si los factores son adecuados para la actividad particular en consideración.

Fuentes de Factores de Emisión de la USEPA

Los factores de emisión publicados se encuentran disponibles en la USEPA para una variedad de fuentes. Tal vez la más completa y ampliamente usada sea el documento *AP 42 Compilación de Factores de Emisión Contaminantes Atmosféricos* (USEPA, 1995). Además, la base de datos del FIRE de USEPA es una consolidación de factores de emisión tanto para los contaminantes atmosféricos comunes como para los tóxicos¹³. Esta referencia cubre los factores de emisión de procesos específicos para una gran variedad de industrias, incluyendo los procesos mineros primarios, basados en años de datos compilados de muestreo de chimeneas en los Estados Unidos. Además de las emisiones de chimeneas de procesos específicos, las técnicas de estimación también se utilizan para las emisiones fugitivas de pozas de sedimentación, lagunas, operaciones de manipuleo de material, pilas de desmonte y equipos de procesos (como sellos, válvulas y empaquetaduras).

Periódicamente USEPA actualiza el documento de factores de emisión AP 42 ya que se incluyen datos nuevos y se validan y mejoran los datos. El documento completo, incluyendo los documentos de base e informes asociados, pueden obtenerse gratuitamente del portal electrónico del Inventario de Emisiones/Factores de Emisión de USEPA (Clearinghouse for Inventories & Emissions Factors - CHIEF), en <http://www.epa.gov/ttn/chief>.

Clasificaciones de Factores de Emisión

Muchos factores de emisión publicados presentan un código de clasificación de factores de emisión asociados (Emission Factor Rating - EFR). Estos códigos EFR se basan en sistemas de clasificación desarrollados por la USEPA y por la Agencia Ambiental Europea (EEA).

Mientras menor sea la confiabilidad de un factor de emisión determinado, mayor será la probabilidad de que ese factor de emisión para una fuente o categoría específica no sea representativo de ese tipo de fuente. Estas clasificaciones, sin embargo, no incluyen el criterio principal que afecta la incertidumbre de un factor de emisión; que es el grado de similitud entre el equipo/proceso seleccionado en la aplicación del factor y el proceso/equipo del que se deriva el factor.

Los Factores de Emisión AP 42 presentan clasificaciones para la calidad de datos de A-E, siendo A la que representa estimados con el más alto nivel de confianza (mediciones de fuentes directas, validadas con múltiples pruebas) y E la que representa el nivel de confianza más bajo (algunas pruebas con resultados

¹³ La US EPA ha establecido criterios de calidad para seis contaminantes atmosféricos comunes (ozono, material particulado, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y plomo), a los que se les conoce como "criteria pollutants" debido a que para ellos se han establecido estándares nacionales. Además, existe una lista de 188 compuestos considerados "contaminantes tóxicos" (toxic pollutants) debido a su potencial cancerígeno o de causar efectos nocivos para la salud o el ambiente.

inconsistentes). Este sistema de clasificación también puede aplicarse igualmente a cualquier factor de emisión que se haya basado en datos de muestreo de fuentes.

4.3.5 Cálculos de Ingeniería

Otro método para la estimación de emisiones es el uso de cálculos basados en la mejor información disponible, juicios de ingeniería o cálculos de la ingeniería química. Este método por lo general es empleado en casos donde no se disponga de datos; ya sea de mediciones de emisión anteriores o factores de emisión, y la operación del proceso no se acerca a un enfoque de balance de masa.

4.4 EMISIONES DE PROCESOS

La estimación de emisiones de operaciones mineras requerirá el uso de alguno o todas las técnicas descritas anteriormente. Para cada combinación de fuente y contaminante habrá una técnica óptima para estimar las emisiones. La Tabla 4-2 presenta un resumen de los métodos generalmente disponibles para fuentes de emisiones y contaminantes seleccionados.

4.4.1 Minería Subterránea y a Tajo Abierto

Las emisiones de polvo de las actividades mineras pueden estimarse usando factores de emisión no controlados provistos en las siguientes secciones de la AP 42:

- Minería Carbonífera Superficial del Oeste.
- Procesamiento de Minerales Metálicos.

Sin embargo, las principales emisiones atmosféricas de la minería consisten en polvo fugitivo. Las emisiones fugitivas se discuten en la Sección 4.5. Asimismo, en la Sección 4.5 se presenta una lista de procesos con tecnologías de control disponibles y mayor detalle en relación a la aplicación de Factores de Emisión AP 42.

4.4.2 Operaciones de Fundición

Fundición de Metales Base

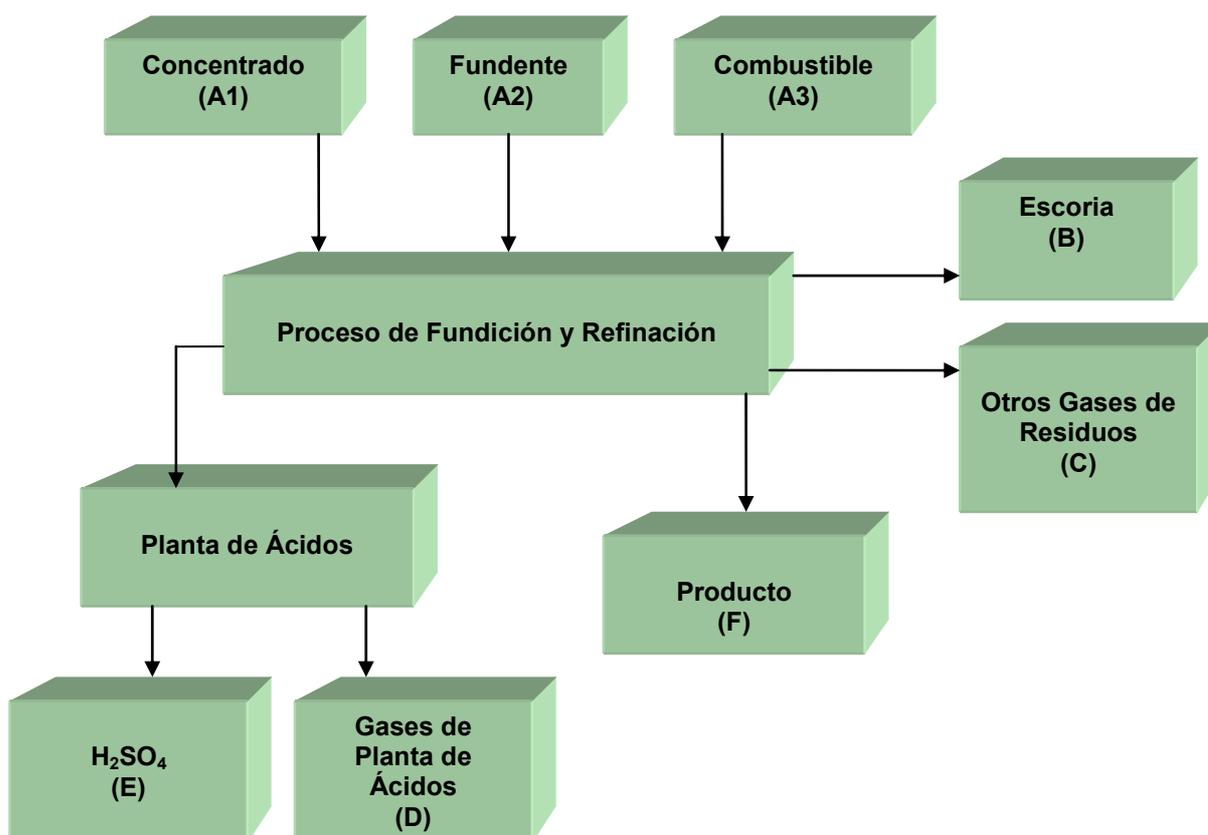
Se usan las pruebas de fuentes, los balances de masa y los factores de emisiones para estimar las emisiones de estas instalaciones. Las emisiones (como SO₂ y metales) de las operaciones de fundiciones y refinación pueden estimarse con un balance de masa. Un ejemplo de balance de masas para un proceso de fundición y refinación es mostrado de manera gráfica en la Figura 4-2. Sin embargo, pueden ser necesarias algunas pruebas de fuentes para mejorar los componentes del cálculo del balance de masa (i.e., cantidades de ingreso y salida del proceso).

La emisión de material particulado puede contener una fracción de metal, que representará parte de las emisiones de metales de la instalación. Estas emisiones pueden estimarse usando el enfoque del factor de emisión, en base al contenido de metal del cuerpo mineral y los estimados de la generación de polvo. La fracción de masa de los diferentes metales para todas las fuentes de polvo de procesamiento se asume de la misma manera que para el mineral no procesado, en ausencia de datos más apropiados. Es posible que las fracciones de masa se deriven de los ensayos

específicos de la instalación. Los factores de emisión para el procesamiento de metales base pueden encontrarse en las siguientes secciones de la AP 42:

- Fundición Primaria de Cobre;
- Fundición Primaria de Plomo; y
- Fundición de Zinc.

Figura 4-2 Muestra de Balance de Masa en el Proceso de Fundición y Refinación



Procesamiento de Oro

Son varias las técnicas que pueden aplicarse para estimar las emisiones del procesamiento de oro. Estas técnicas se resumen a continuación de acuerdo a la fuente.

Preparación del Mineral

Las estimaciones de las emisiones de material particulado y metales que producen la chancadora y el molino pueden realizarse usando ya sea factores de emisión o el cálculo de balance de masa.

Inventario de Emisiones

Tostación

Los metales y el SO₂ emitidos por el proceso de tostado pueden ser calculados usando un enfoque de balance de masa. Esta técnica puede mejorarse con la prueba de fuentes.

Al identificar la concentración del contaminante específico en tres de las cuatro corrientes (composición de alimentación, composición de los residuos sólidos y composición de los productos), podemos identificar los contaminantes emitidos al aire ya sea a través de la chimenea o por emisiones fugitivas.

Lixiviación/Adsorción

Para estimar las descargas de cianuro de las unidades del proceso de lixiviación/adsorción, deberá realizarse mediciones directas a las emisiones de la chimenea, cuando sea posible. También pueden usarse las alternativas, como los modelos de balance de masa e ingeniería de transferencia de masa; sin embargo, deberá ponerse mucho cuidado al aplicar estas técnicas. Para el enfoque del balance de masa, todas las formas de cianuro en y fuera de las unidades de proceso deben considerarse y corregirse según el mismo peso molecular. Debido a que las unidades/tanques están bajo equilibrio, no se presenta acumulación de cianuro. No ocurrirá generación de cianuro dentro de las unidades/tanques de proceso pero pueden ocurrir degradación de cianuro bajo ciertas condiciones (aunque esto puede ser un componente relativamente pequeño dentro de los circuitos CIL/CIP). Es de mayor importancia someter todas las formas de cianuro a análisis cuando se muestree y analice la pulpa y los relaves de las unidades/tanques de proceso. Esto significa cianuro libre en solución, cianuro complejo en solución, cualquier compuesto de cianuro precipitado en suspensión y cualquier cianuro que pudiera ser adsorbido o haberse acomplejado en las partículas sólidas (i.e. minerales) dentro de la pulpa. Este último componente puede ser muy significativo dependiendo del contenido mineral y el tipo de mineral procesado. Este aspecto requiere que los laboratorios realicen toda la digestión de la muestra de las muestras de la pulpa cuando usen los enfoques de balance de masa en donde los sólidos en suspensión se encuentran presentes. A continuación se describe un enfoque típico de balance de masa para estas unidades/tanques de proceso en los circuitos de lixiviación de CIP/CIL.

$$\begin{array}{|c|} \hline \text{Masa de cianuro} \\ \text{perdido por} \\ \text{volatilización (y} \\ \text{otros destinos)} \\ \text{(kg)} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline \text{Masa de cianuro} \\ \text{que ingresa al} \\ \text{proceso (reactivo} \\ \text{+ pulpa de la} \\ \text{corriente) (kg)} \\ \hline \end{array} - \begin{array}{|c|} \hline \text{Masa de cianuro que} \\ \text{sale del proceso} \\ \text{(pulpa de relave) (kg)} \\ \hline \end{array} - \begin{array}{|c|} \hline \text{Masa de cianuro} \\ \text{destruido proveniente} \\ \text{de la degradación del} \\ \text{cianuro (kg)} \\ \hline \end{array}$$

Para estimar las emisiones de la lixiviación en pilas, se usa el enfoque de balance de masa. Aunque la siguiente ecuación de balance de masa es relativamente simple, puede ser difícil obtener resultados exactos sin considerar los siguientes aspectos.

$$\begin{array}{|c|} \hline \text{Masa de cianuro} \\ \text{perdido por} \\ \text{volatilización (y} \\ \text{otros destinos)} \\ \text{(kg)} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline \text{Masa de cianuro} \\ \text{que se agrega al} \\ \text{sistema de} \\ \text{lixiviación (kg)} \\ \hline \end{array} - \begin{array}{|c|} \hline \text{Masa de cianuro} \\ \text{descargado en el} \\ \text{ambiente por} \\ \text{infiltración (kg)} \\ \hline \end{array} - \begin{array}{|c|} \hline \text{Masa de cianuro} \\ \text{descargado por} \\ \text{acomplejamiento con} \\ \text{oro recuperado (y} \\ \text{otros metales y} \\ \text{sólidos) (kg)} \\ \hline \end{array}$$

Como se asume que todo lo que no se ha considerado en la infiltración o en el producto es una emisión atmosférica, este enfoque de balance de masa produce un

estimado conservador de las descargas de contaminantes atmosféricos. Debe indicarse que puede ser difícil evaluar correctamente la cantidad acumulada de cianuro acomplejado/adsorbido en los sólidos (minerales) y en el agua intersticial de las pilas de lixiviación a partir de este enfoque de balance de masa. Además, existe evidencia que el cianuro se descompone en otros componentes bajo ciertas condiciones (e.g., exposición a la luz ultravioleta) y esto deberá considerarse en todos los cálculos de balance de masa de cianuro antes de asumir que cualquier residuo de cianuro no considerado se descarga al aire.

Otro medio de estimar las emisiones de fuentes fugitivas como pilas de lixiviación es a través de modelos de ingeniería de transferencia de masa. Estos modelos calculan la velocidad con la cual el HCN escapa de la solución hacia el aire. Los cálculos se basan en teorías de transferencia de masa (ERM 2000).

Regeneración de Carbón

Aunque los enfoques de balance de masa pueden usarse para algunos contaminantes emitidos durante la regeneración de carbón, los estimados de las emisiones son por lo general obtenidos usando la prueba de fuentes en chimeneas con factores de operación. Luego éstos son usados para producir factores de emisión que pueden usarse para estimados de descargas futuras para el proceso de la unidad.

Desorción, Recuperación Electrolítica y Refinación

Las emisiones de cianuro por descarga, recuperación electrolítica y refinación pueden determinarse por el balance de masa, pero se requieren mediciones directas para producir estimados exactos de descargas. Tal como se mencionara en discusiones anteriores sobre los enfoques de balance de masa para el cianuro, se debe considerar las formas libres y complejas en solución, más las que son adsorbidas por partículas sólidas (carbón o partículas de la pulpa) para todas las entradas o salidas de la unidad de proceso. Además, la descomposición de cianuro puede ocurrir bajo ciertas condiciones (e.g., calentamiento); lo que puede afectar significativamente los cálculos de balance de masa. Debido al bajo nivel de emisiones para otros parámetros posibles asociados con estos procesos unitarios (material particulado, metales, amonio y mercurio), generalmente se prefieren las mediciones directas que otras técnicas de estimación.

4.4.3 Fuentes de Combustión

Las emisiones de los vehículos diesel en el sitio pueden estimarse usando factores de emisión. Estos factores a nivel del mar para los diferentes vehículos de la mina se presentan en la Tabla 4-2.

Las emisiones de otros tipos de equipos que funcionan con diesel se pueden estimar usando los factores de emisión USEPA AP42. Estos factores de emisión dependen del tipo de equipo y su alimentación térmica.

De manera similar, las emisiones de combustión de gas natural pueden estimarse usando los factores de emisión USEPA AP42. Nuevamente estos factores de emisión dependen del tipo de equipo y el volumen de alimentación.

Para el cálculo de emisiones de vehículos de la mina es importante considerar los efectos de la altitud de las emisiones potenciales. La baja presión atmosférica a

Inventario de Emisiones

grandes altitudes conduce a elevadas temperaturas de escape y aumento de la velocidad turbo de los motores, lo que podría dañar el motor. Como resultado, se produce una disminución del ingreso de combustible al motor. Sin embargo, al reducirse el ingreso de combustible, también se reduce la potencia del motor.

La manera más efectiva en cuestión de costos para compensar esta reducción de la potencia es adaptar a los vehículos mineros que operan a grandes altitudes motores más grandes que los que usarían si operaran a nivel del mar. Por lo que, al predecir las emisiones de los vehículos que operan en altura, es importante considerar las especificaciones propias del motor y la reducción de consumo de combustible de los vehículos.

Tabla 4-2 Factores de Emisión para las Descargas de Tubos de Escape de los Vehículos en la Mina

Tipo de Equipo	Factor de Emisión (kg/1000 L combustible diesel)						Clasif.
	PTS	CO	NO _x	SO ₂	VOC	Formaldehído	
Tractor de tipo rastreador	9,8	30,6	111,4	12,1	10,7	2,4	N/A
Tractor	18,0	104,4	169,8	12,1	25,0	4,0	N/A
Dozer	5,8	49,9	115,7	12,3	5,3	2,3	N/A
Scraper	11,3	34,8	106,1	12,8	7,9	4,0	N/A
Niveladora	8,9	21,9	101,6	12,4	5,1	1,7	N/A
Camión fuera de carretera	7,1	49,9	115,7	12,6	5,3	3,1	N/A
Cargador a ruedas	11,5	38,5	125,2	12,2	16,9	2,8	N/A
Cargador de tipo rastreador	9,3	32,2	132,7	12,1	15,8	1,4	N/A

Fuente: NPI 2003, Sección 3.4.1, Tabla 5.

Asumiendo que el valor de calentamiento de diesel es 38.21 MJ/L (Fuente: op.cit., Anexo 1, Tabla 25).

Los factores de emisión de PM₁₀ para estas fuentes son idénticos a los factores de emisión de material particulado.

Para obtener factores de emisión para PM_{2,5}, multiplicar por 0,5.

Las emisiones de otros tipos de equipos que funcionan con diesel se pueden estimar usando los factores de emisión USEPA AP42. Estos factores de emisión dependen del tipo de equipo y su alimentación térmica.

De manera similar, las emisiones de combustión de gas natural pueden estimarse usando los factores de emisión USEPA AP42. Nuevamente estos factores de emisión dependen del tipo de equipo y el volumen de alimentación.

4.4.4 Chancado y Molienda

Las emisiones por las actividades de chancado, y molienda pueden estimarse usando una variedad de técnicas. Las emisiones de material particulado y metales pueden calcularse usando ya sea la prueba de fuentes o un balance de masa. Sin embargo, para el procesamiento de minerales no metálicos, las emisiones de material particulado pueden calcularse usando factores de emisión.

4.5 EMISIONES FUGITIVAS

En la mayoría de los casos, las emisiones fugitivas pueden estimarse usando factores de emisión, combinados con información específica del sitio (e.g., el limo y el contenido de humedad del material que es manipulado) para determinar la emisión de

Inventario de Emisiones

la operación que es analizada. La mayor parte del trabajo desarrollando factores de emisión para emisiones fugitivas ha sido realizado por la USEPA.

Para emisiones fugitivas de material particulado y metales del sector minero, se presentan factores de emisión no controlados en las siguientes secciones de USEPA AP 42:

- Emisiones Fugitivas – Carreteras Pavimentadas.
- Emisiones Fugitivas – Carreteras No Pavimentadas.
- Emisiones Fugitivas – Operaciones de Construcción Pesada.
- Emisiones Fugitivas – Manipuleo de Agregados y Pilas de Almacenamiento.
- Emisiones Fugitivas – Erosión Eólica Industrial.

Las emisiones de metales se calculan como una fracción de las emisiones de material particulado, generalmente en base al análisis. Las operaciones mineras pueden considerarse como una serie de operaciones unitarias. El uso de factores de emisión para estimar emisiones de polvo fugitivo requiere el uso de datos específicos del sitio como contenido de limo y contenido de humedad.

La reducción de emisiones se encuentra en las siguientes fuentes:

- Remoción de Suelo Superficial por Rasgado
- Cargadores frontales
- Perforación
- Voladura
- Tráfico de camiones de acarreo
- Tráfico ligero y medio en carreteras selladas
- Niveladoras
- Erosión del viento en pilas de almacenamiento
- Carga de camiones
- Manipuleo misceláneo, transferencia y transporte
- Chancadora primaria
- Chancadora secundaria
- Chancadora terciaria
- Molienda Húmeda
- Molienda Seca con transporte de aire y clasificación
- Molienda Seca sin transporte de aire y clasificación
- Secado
- Emisiones de sistemas integrados de eliminación de polvo

En ausencia de datos medidos o conocimiento de la eficiencia de la colección de un componente particular de un equipo dado, deberá usarse una eficiencia de 80 % en la ecuación de estimación de emisiones para calcular las emisiones de masa reales. Este valor deberá usarse sólo si no se cuenta con otro control de eficiencia.

4.5.1 Pilas de Almacenamiento

La generación de polvo por el tráfico en las áreas de relaves o fuentes superficiales abiertas (i.e., cargadores frontales, camiones, etc.) deberán calcularse por viaje sobre

Inventario de Emisiones

carreteras no pavimentadas. La generación de polvo por la actividad en el sitio se calcula usando factores de emisión.

Las emisiones de polvo generadas por el viento en las áreas de relaves deberán ser calculadas sólo para áreas con un problema de potencial emisión. Una gama de factores influyen la generación de polvo, incluyendo:

- contenido de humedad;
- cobertura de vegetación y materia orgánica (líquenes, musgo, etc.);
- estructura superficial (rajaduras estructurales y de textura y heterogeneidad);
- tráfico; e
- intemperismo.

En ausencia de información específica del sitio, se deben hacer los siguientes supuestos:

- generación de polvo cero desde áreas “húmedas” de relaves;
- generación de polvo cero desde relaves con cubierta de vegetación; y
- generación de polvo cero desde superficies.

La erosión del viento depende de las velocidades del viento en la superficie, que exceden la velocidad umbral para el movimiento de partículas. Por lo general, los vientos “más rápidos” se usan para calcular la potencial de erosión eólica.

El factor de emisión de la erosión eólica de una mezcla de material superficial erosionable y no erosionable sujeto a perturbación, se expresa de la siguiente manera:

$$EF = k \sum_{i=1}^N P_i \quad 4-8$$

donde,

- EF = Factor de emisión ($\text{g}/\text{m}^2/\text{año}$);
- k = Factor del tamaño de la partícula ($k = 1$ para PTS; 0,5 para PM_{10} ; 0,2 para $\text{PM}_{2,5}$);
- N = número de perturbaciones por año; y,
- P_i = erosión potencial correspondiente a la milla de viento más rápida¹⁴ para el i -ésimo período de perturbación (g/m^2).

La erosión potencial para una superficie expuesta y seca se obtiene de la siguiente manera:

$$P_i = 58(u_* - u_{*t})^2 + 25(u_* - u_{*t})$$

$$P_i = 0; \quad \text{para} \quad u_* \leq u_{*t} \quad 4-9$$

¹⁴ Ver más adelante.

Inventario de Emisiones

donde,

u^* = velocidad de fricción para la milla de viento más rápida (m/s) durante el i -ésimo período; y

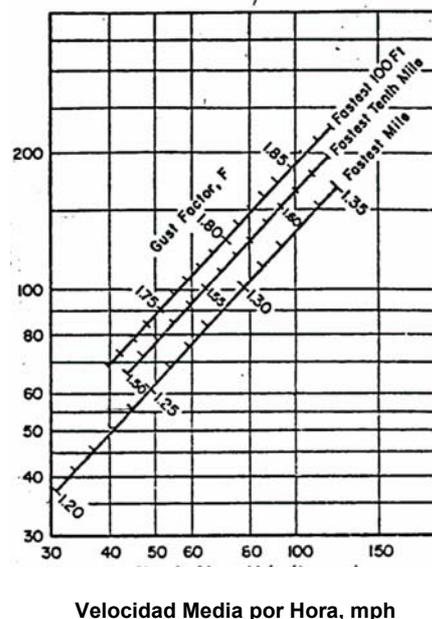
u^*_{t} = velocidad umbral de fricción de la superficie (m/s).

Las emisiones de polvo fugitivo se calculan multiplicando P_i por el área expuesta por el período de interés durante los días sin precipitación. La ecuación anterior asume que existe un “reservorio limitado” de material que será descargado fuera del sitio y se asume que durante un evento de erosión, todo el polvo fugitivo es llevado por el viento hasta su agotamiento

Las emisiones fugitivas generadas por erosión eólica dependen de la frecuencia de perturbación (N) de superficies erosionables, porque cada vez que una superficie es disturbada, se restaura su potencial de erosión. N es el número de perturbaciones por año (donde la perturbación se define como una acción que resulta en la exposición de material superficial fresco). Para emisiones fugitivas máximas (i.e., conservadoras) o reservorio “ilimitado” de material, se puede asumir que existen perturbaciones diarias (i.e., $N = 365$). Para considerar los días con precipitación ($> 0,25$ mm) se puede reducir N por esos días. Por intuición, N presenta un valor máximo de 365.

El concepto de milla de viento más rápida es difícil y anticuado, pero todavía se usa en el diseño de edificios y erosión eólica. La milla más rápida es la velocidad en millas por hora determinada por el tiempo más corto requerido para que una milla de viento pase por una posición dada (Fig. 4-3). Esto se relaciona con un factor de ráfaga. Por lo general, se usa un valor de 1,24 para relacionar la milla de viento más rápida con la velocidad media del viento (i.e., la velocidad de viento de milla más rápida es 1,24 veces mayor que la velocidad promedio del viento).

Figura 4-3 Velocidad Promedio Horario vs. Velocidad Observada



Inventario de Emisiones

La velocidad de fricción es una medida del esfuerzo de corte del viento en la superficie, según lo define la pendiente del perfil logarítmico de velocidad:

$$u(z) = \frac{u_*}{0,4} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (Z > Z_0) \quad 4-10$$

donde,

- u = velocidad del viento [m/s] a la altura z ;
- u_* = velocidad de fricción [m/s];
- z = altura de la medición [m];
- z_0 = altitud de rugosidad [m]; y,
- 0,4 = constante de von Karman.

Asumiendo una altura de rugosidad de 0,5 cm (0,005 m) y una altura medida de 10 m, la ecuación anterior se convierte en:

$$u(z) = \frac{u_*}{0,4} \ln\left(\frac{10}{0.005}\right)$$
$$u = 19u_* \quad 4-11$$
$$u_* = 0,0526u$$

Para determinar la velocidad de fricción asociada con la milla más rápida para la ecuación 4-11, la Ecuación 4-12 se convierte en:

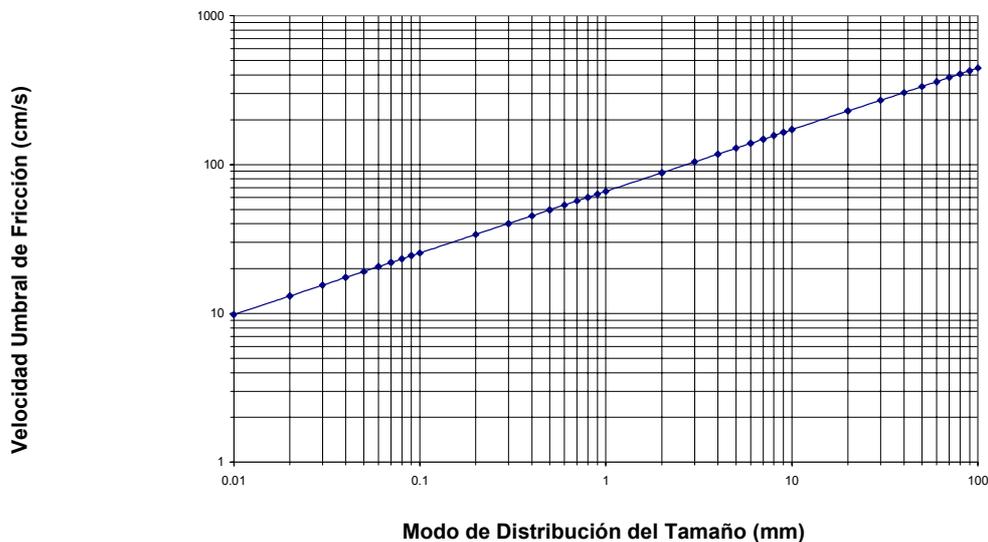
$$u_* = 1,24(0,0526u)$$
$$u_* = 0,0653u \quad 4-12$$

donde,

- u = velocidad de viento promedio [m/s] durante las perturbaciones; y
- u_* = velocidad de fricción [m/s].

La velocidad umbral de fricción (u_{*t}) es la velocidad de viento mínima requerida para llevar material particulado al aire y puede estimarse de la estructura seca del material superficial. Cualquier formación de costra natural de la superficie fija el material erosionable y reduce el potencial de erosión. Para las superficies sin costra, USEPA AP-42 recomienda estimar la velocidad umbral de fricción a través del modo de la granulometría de muestras de material superficial (de acuerdo al procedimiento de tamizado descrito en AP42). Se puede estimar la velocidad umbral de fricción interpolando el valor en un gráfico (Figura 4-4).

Figura 4-4 Velocidad Umbral de Fricción



Una vez conocida la velocidad umbral de fricción puede sustituirse por la Ecuación 4-16 para determinar la velocidad umbral del viento (u_t).

$$u_t = \frac{1}{0,0653} \times u_{*t}$$

$$u_t = 15,3 \times u_{*t} \tag{4-13}$$

Una vez conocida u_t , es simple calcular mensualmente el número de períodos en que el viento sobrepasa el valor u_t . Esto puede usarse para calcular los valores de P_i y EF .

Se sugiere el siguiente método para calcular las emisiones fugitivas de áreas de relaves:

- Determinar la velocidad umbral de fricción u_{*t} .
- Calcular la velocidad de viento umbral correspondiente, u_t .
- A partir de los datos representativos del clima, determinar el número de días “húmedos” con al menos 0,25mm de precipitación (P).
- Para los días sin precipitaciones, determinar la velocidad del viento máxima promedio, u .
- Para aquellos días donde u excede a u_t , calcular u_* .
- Usando u_* y u_{*t} , calcular el potencial de erosión diaria, P_i .
- Multiplicar P_i por el área expuesta para obtener las emisiones fugitivas diarias para ese día.
- Repetir para cada día sin precipitación y sol.

Además, el contenido de metal de las emisiones de relaves deberá basarse en muestreos representativos de la matriz superficial de relaves.

5. MODELAMIENTO DE LA DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES

Después de desarrollar el inventario de emisiones, deberá realizarse el modelamiento de la dispersión de contaminantes para evaluar el impacto potencial de las emisiones en el medio circundante. Este modelamiento usa una representación matemática del medio local para predecir el destino de los contaminantes emitidos al ambiente. Considerando la meteorología y las características del terreno, los modelos de dispersión pueden predecir cómo se dispersará o se diluirá la emisión en el ambiente.

La mayoría de los modelos son semi empíricos y “orientados a la fuente”. Los modelos pueden usarse para evaluar los escenarios que se clasifican desde simples (e.g. una fuente en un terreno llano), hasta muy complejos (e.g., múltiples fuentes en una región montañosa, con emisiones que sufren reacciones químicas en la atmósfera) durante diferentes tiempos promedio (e.g., de 1 hora a 24 horas hasta anual).

Las fuentes son representadas por fuentes puntuales, fuentes lineales, fuentes volumétricas o fuentes superficiales. Esta designación no sólo afectará la manera cómo se modelará la descarga de contaminantes, sino también cómo éstos se dispersan o transformarán en la atmósfera. Por ejemplo, una pluma de una fuente puntual emitida desde un edificio podría verse afectada significativamente por la estela que se forma a barlovento del edificio.

Para evaluar la dispersión de contaminantes, los modelos requieren alguna información general. En este capítulo se presentarán algunos modelos comunes y la información requerida. Todos los modelos requieren por lo menos de la siguiente información:

- Información meteorológica, incluyendo velocidad y dirección de viento, precipitación, turbulencia, estabilidad atmosférica y altura de mezcla; Generalmente, se requiere contar con datos de por lo menos un año de información horaria para determinar los parámetros de dispersión. Si esto no es posible, se debe contar como mínimo con datos horarios de un mes por estación climática en el año. Lo ideal es contar con datos continuos de 5 años de monitoreo para validar los datos estadísticos.
- Descripción de la instalación: incluyendo la ubicación de todos los edificios en el sitio y límites de la propiedad;
- Descripción de las fuentes: incluyendo el tipo de fuente (e.g. puntual superficial, volumen, etc.), ubicación, altura de descarga, índice de flujo contaminante, diámetro de salida, temperatura de descarga, velocidad de descarga;
- Descripción del terreno circundante: incluyendo la topografía y rugosidad superficial;
- Ubicación de los receptores: los puntos donde las concentraciones de contaminantes deberán evaluarse (e.g. residencias cercanas, zonas ecológicamente sensibles, etc.); y,
- Definición del área de estudio, debiendo incorporar a los receptores más sensibles dentro de la cuenca atmosférica de interés que pudiesen ser impactados por las emisiones. Generalmente, el área de estudio debe extenderse unos 5 km desde los límites de la propiedad o desde la fuente de emisión.

Una discusión detallada sobre los criterios para el modelamiento de calidad de aire se presenta en la Guía de Modelos de Calidad de Aire de la USEPA (2003a). Asimismo, la USEPA cuenta con un servicio de asesoramiento e información sobre modelamiento de calidad de aire llamado Support Center for Regulatory Air Modeling (SCRAM), el cual está disponible en el sitio electrónico de la USEPA (<http://www.epa.gov/scram001>). El SCRAM contiene una descripción y documentación sobre los modelos recomendados

por la USEPA en la Guía de Modelos de Calidad de Aire, así como de otros modelos alternativos aceptados por la USEPA para casos específicos.

5.1 CONSIDERACIONES GENERALES

Antes de pensar en aplicar un modelo de calidad de aire, deben tenerse en cuenta las siguientes consideraciones contenidas en la Guía de Modelos de Calidad de Aire de la USEPA:

- No existe un modelo capaz de responder apropiadamente a todas las situaciones posibles, aún dentro de una categoría específica como las fuentes puntuales. Los fenómenos meteorológicos asociados con las excedencias de los estándares de calidad ambiental son raras veces susceptibles de tratamiento matemático simple, requiriéndose del análisis caso por caso y del juicio profesional. En la medida en que los esfuerzos de modelamiento se vuelven más complejos, es cada vez más importante que éstos sean dirigidos por especialistas altamente competentes con amplia experiencia y conocimientos en meteorología de la calidad del aire.
- La aplicabilidad de un modelo específico de calidad de aire depende de varios factores, incluyendo: (1) la complejidad meteorológica y topográfica del área, (2) el nivel de detalle y precisión requerido, (3) la competencia del personal a cargo del modelamiento, (4) los recursos disponibles y (5) el nivel de detalle y precisión de la base de datos, i.e., inventario de emisiones, datos meteorológicos y datos de calidad de aire. Antes de intentar cualquier modelamiento debe asegurarse que se cuenta con la información apropiada. Un modelo que requiere datos de entrada detallados y precisos no debe ser empleado cuando no se dispone de dichos datos. No obstante, asumiendo que dichos datos están disponibles, cuanto mayor sea el detalle con que el modelo considera las variaciones temporales y espaciales de las emisiones y condiciones meteorológicas, mayor será su habilidad para evaluar los impactos de las fuentes y distinguir los efectos de las diferentes estrategias de control.
- Los modelos de calidad de aire han sido aplicados con la mejor exactitud, o el mínimo grado de incertidumbre, a las simulaciones de promedios de largo plazo en áreas con topografía relativamente simple. Las áreas sujetas a mayores influencias topográficas experimentan complejidades meteorológicas que son extremadamente difíciles de simular. Aunque existen modelos apropiados para tales circunstancias, éstos son generalmente específicos para el sitio y demandan grandes recursos.
- Los modelos son herramientas altamente especializadas. Contar con personal competente y experimentado es requisito para la aplicación exitosa de los modelos de simulación. La necesidad de especialistas es crítica cuando se usan los modelos más sofisticados o cuando el área investigada tiene componentes topográficos o meteorológicos complicados. Un modelo aplicado de manera inapropiada o con datos inapropiados puede conducir a serios errores en la interpretación de los impactos de las fuentes o los resultados de una estrategia de control.
- Los recursos requeridos por los diferentes modelos varían ampliamente dependiendo de las aplicaciones específicas. Los requerimientos de recursos dependen de la naturaleza del modelo y su complejidad, el nivel de detalle de los datos de entrada, las dificultades en la aplicación y la cantidad y nivel de los expertos requeridos. Los costos de personal y requerimientos computacionales pueden ser también factores importantes en la selección y uso de un modelo para un análisis específico. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que bajo determinadas circunstancias físicas y requerimientos de exactitud podrían no existir ningún modelo apropiado.

En general, debe tenerse en cuenta que la simulación numérica de los fenómenos de calidad de aire es una ciencia que se encuentra en proceso de desarrollo y, aunque en los últimos años los desarrollos en la informática han brindado nuevas herramientas para el desarrollo de los modelos numéricos, en la actualidad los modelos de calidad de

aire todavía son bastante imperfectos y no siempre se comportan bien ante situaciones de meteorología y topografía complejas. Antes de pretender utilizar un modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos para la predicción y la toma de decisiones importantes como son la implementación de un plan de contingencias para eventos críticos, deberá desarrollarse un detallado conocimiento de la naturaleza del fenómeno de contaminación que se desea modelar y se requerirá de un cuidadoso período de pruebas de validación del modelo. De otro modo, el riesgo de tomar decisiones equivocadas será alto, con los costos que ello implique.

Los procesos de dispersión atmosférica son estocásticos, mientras que los modelos en general predicen solo cálculos promedios y no cálculos individuales. Esto significa que hay un problema conceptual básico con el procedimiento de comparar directamente los estimados de un modelo con las observaciones, por lo que no se puede esperar que tengan la misma distribución estadística.

Cuando se comparen los cálculos del modelo con los valores estimados de tasas de emisión, se debe considerar que la meteorología haya sido medida de modo tal que se asegure una adecuada comparación.

5.1.1 Escalas Espacial y Temporal

Las escalas espacial y temporal para el modelamiento de la predicción de calidad de aire deben ser claramente definidas debido a que estas escalas determinan el tipo de requerimientos meteorológicos y otros requerimientos de datos. Las diferentes escalas espacial y temporal se resumen en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1 Escalas Utilizadas para los Estudios de Modelamiento Meteorológico y de Calidad de Aire

Escala	Alcance Espacial	Alcance Temporal
Global	4,000 km – 20,000 km	1 - 2 semanas
Sinóptica	400 km – 4,000 km	1 día– 1 semana
Mesoescala	10 km – 400 km	1 hr – 1 día
Urbana	5 km - 50 km	1 h - 4 h
De Vecindario	500 m - 5 km	1 min – 1 hr

En base a la escala que se requiere para la resolución de datos, la predicción debe considerar características meteorológicas y geográficas importantes, tales como:

- brisa del mar
- viento de montañas/valles;
- inversiones térmicas; y,
- grandes alturas para considerar la eficiencia de los procesos de combustión.

5.1.2 Requerimientos de Cómputo

La predicción de la contaminación del aire requiere considerar recursos de equipos de cómputo. Los estudios de modelamiento más completos (e.g., para correr un modelo meteorológico de mesoescala) requieren contar con recursos de cómputo de alto rendimiento. Sin embargo, muchos estudios pueden realizarse en computadoras personales (PC) o estaciones de trabajo (WS) ya que se dispone rápidamente de los datos de pronóstico del tiempo (e.g., del Internet).

Por ejemplo, el modelo TAPM de CSIRO incluye toda la información GIS necesaria para operarla en cualquier parte del mundo. Es un modelo de predicción de contaminación de aire 3-D para PC.

5.1.3 Acceso a Datos Confiables

Es esencial el acceso a datos de predicción sinóptica para un sistema de pronóstico que calcula concentraciones de la calidad de aire y parámetros meteorológicos.

Por ejemplo, en los Estados Unidos, estos datos están disponibles a través de la Administración Atmosférica y Oceánica Nacional (NOAA). Los datos se encuentran en diferentes formatos y pueden obtenerse a través del Internet.

Además de los datos del tiempo, los datos del inventario de emisiones son también de considerable importancia. La calidad del inventario determinará en gran medida la calidad de la predicción.

5.1.4 Calidad de la Predicción

La calidad también varía considerablemente y depende sobremanera de la disponibilidad de la información y de cómo se ingresen los datos.

Por las razones anteriormente mencionadas, es necesario que los datos sean de adecuada calidad. Estos datos son empleados en la predicción y en las etapas de evaluación.

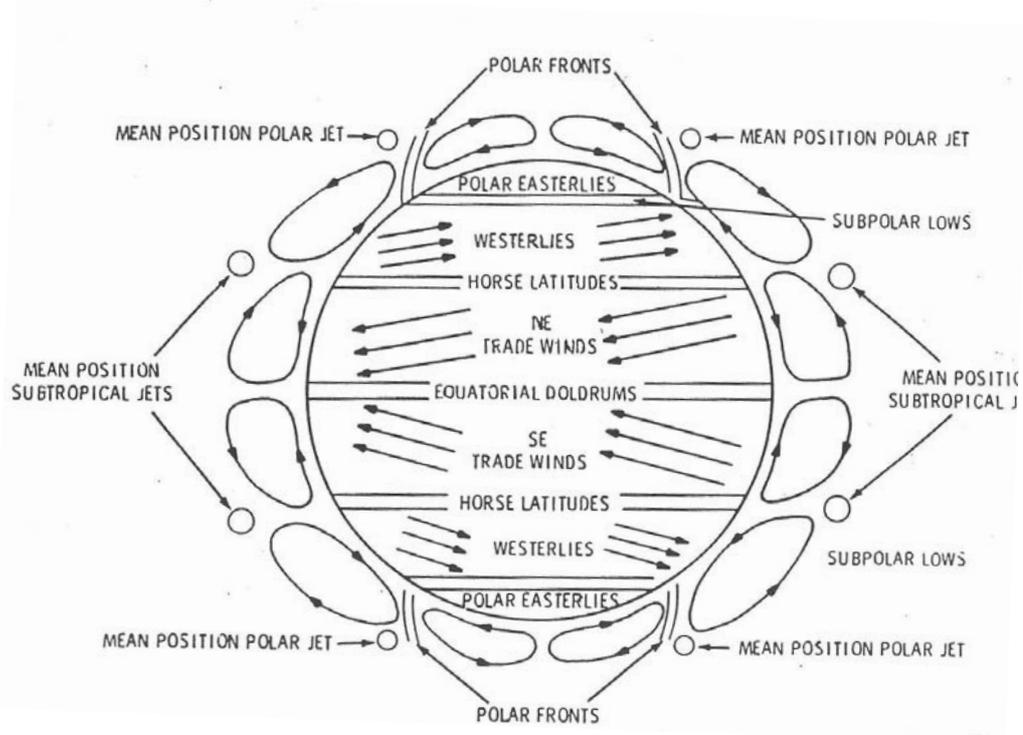
5.2 METEOROLOGÍA

El movimiento global de la atmósfera resulta de la interacción de los siguientes efectos (Figura 5-1):

- El calentamiento en el ecuador y el enfriamiento en los polos resulta en la transferencia de energía del ecuador a los polos, a través de una serie de celdas convectivas;
- La rotación de la tierra da lugar a vientos del este en el ecuador, ya que la tierra rota más rápido que la atmósfera;
- En latitudes medias, la atmósfera se mueve más rápido que la tierra, lo que desarrolla vientos del oeste;
- En latitudes altas, predominan los vientos polares del este; y
- El calentamiento diferencial de los océanos y las áreas continentales dan lugar a áreas con baja presión sobre los continentes en verano y áreas con alta presión sobre los continentes en invierno.

Estos efectos producen patrones de clima a escala sinóptica en forma de ondas de presión alta y baja responsables de los patrones de clima principales mayores a latitud media.

Figura 5-1 Circulación General de la Atmósfera



En menor escala, las influencias a mesoescala pueden modificar los patrones sinópticos de flujo (Figura 5-2). Las características resultantes incluyen:

- La brisa marina durante el día, cuando la temperatura en tierra es mayor que sobre el agua;
- La brisa de la tierra durante la noche, cuando la temperatura del agua es mayor que sobre la tierra;
- Los flujos anabáticos del calentamiento superficial que produce un flujo ascendente;
- Los flujos catabáticos nocturnos más fríos;
- Diferentes condiciones de flujo que dependen de las condiciones meteorológicas, de las características importantes del terreno; en algunos casos las características del terreno pueden conducir a deflexión del viento;
- Canalización topográfica por las características de terreno, en donde la forma del terreno juega un rol importante; y
- Circulación de la isla de calentamiento urbano.

Mientras que los fenómenos globales, sinópticos y de mesoescala contribuyen con el transporte de emisiones atmosféricas, un científico de calidad de aire se preocupa más de la Capa Límite Atmosférica (Atmospheric Boundary Layer - ABL). La ABL es la capa más baja de la atmósfera relacionada con el calentamiento/enfriamiento de la superficie y donde se descargan las emisiones (Figura 5-3).

Figura 5-2 Flujos Mesoscala

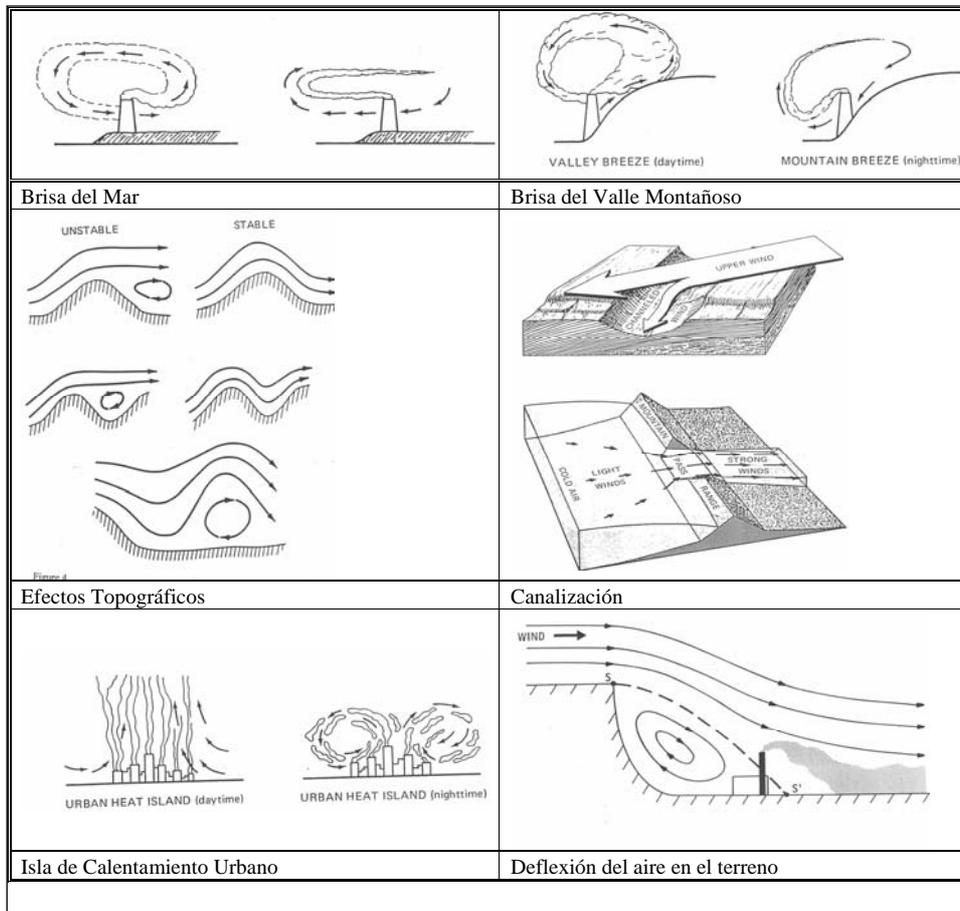


Figura 5-3 Capa Límite Atmosférica



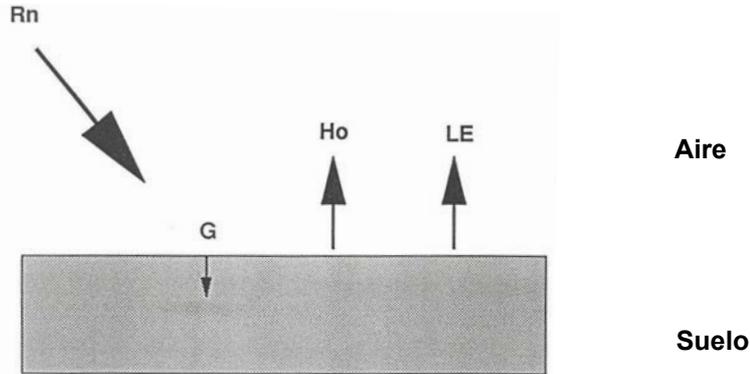
5.2.1 Capa Límite Atmosférica

La ABL o capa de mezcla se puede clasificar ampliamente como convectiva, neutral o estable, de acuerdo al flujo del calor de la superficie (el índice de transferencia de energía del suelo al aire). La Figura 5-4 muestra el balance del calor en la atmósfera y en la Figura 5-5 se presenta la variación de la temperatura con la altura.

Los períodos en los que el flujo de calor en la atmósfera es positivo (día) se llaman convectivos o inestables. La profundidad de ABL aumenta durante el día, variando entre algunos cientos de metros después de la puesta del sol hasta 1,000 a 2,000 m a

media tarde. La capa límite convectiva se encuentra bastante mezclada debido a los remolinos grandes generados por el calor superficial. Estos remolinos provocan la mezcla rápida y uniforme de los contaminantes atmosféricos.

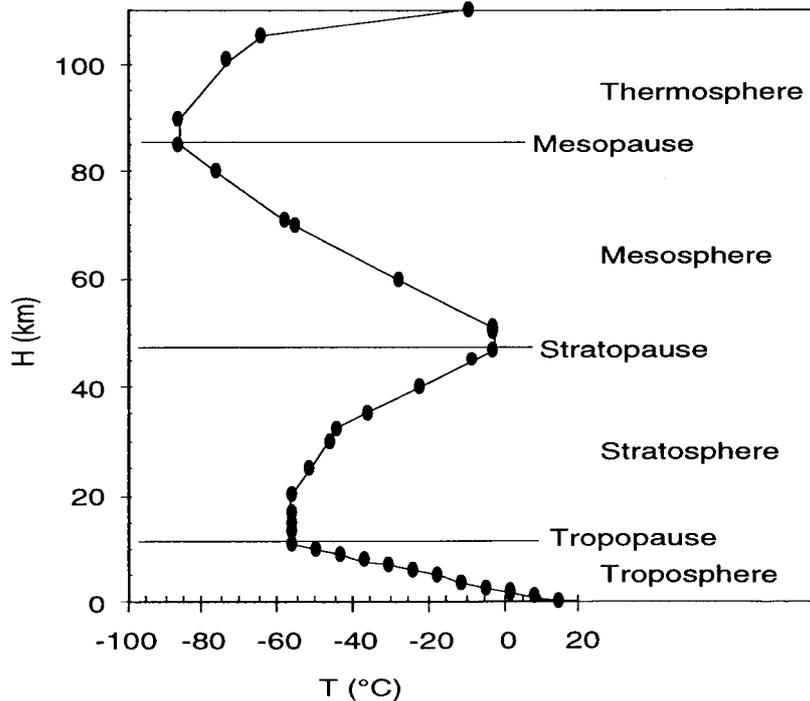
Figura 5-4 Balance de Energía Superficial



$$Rn = H_o + LE - G$$

- Rn = Radiación neta de ondas recibidas por la superficie;
- G = flujo del calor hacia el suelo que origina cambios en la temperatura del suelo;
- LE = flujo de calor latente que ocurre por la evaporación o condensación del agua en la superficie; y
- H_o = flujo de calor sensible directamente responsable por el cambio de temperatura atmosférica.

Figura 5-5 Perfil Vertical de la Temperatura

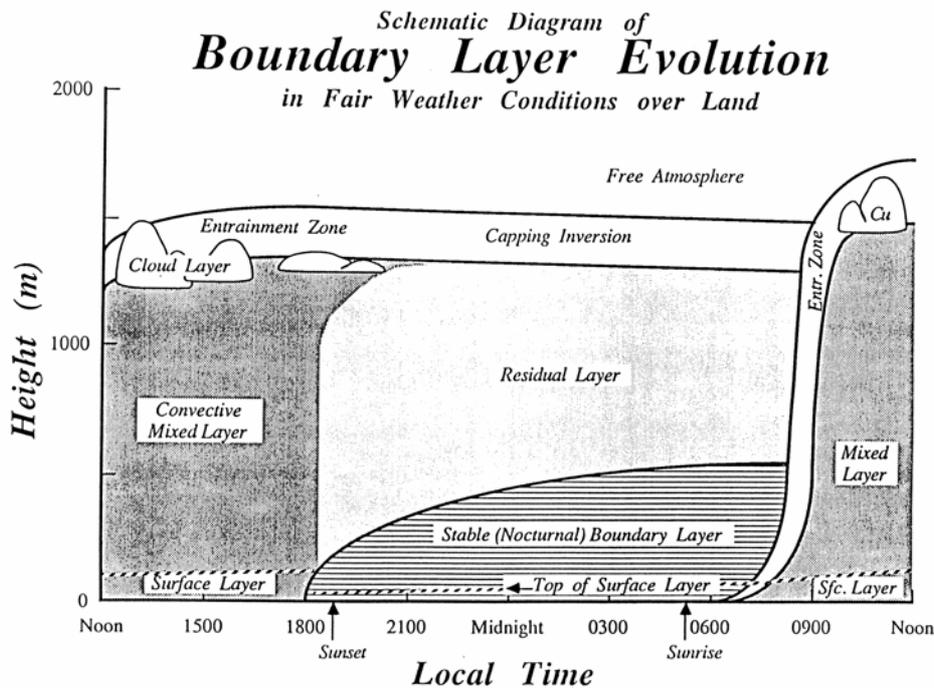


Al ocaso, el flujo del calor es negativo, lo que reduce o suprime la turbulencia en la atmósfera. Estos períodos se denominan estables y los contaminantes no están bien mezclados, tendiendo a permanecer de forma más compacta y no diseminándose rápidamente. A diferencia de las condiciones convectivas, en la ABL predominan los efectos de corte del viento y su profundidad varía entre 100 y 300 m.

Las condiciones neutrales ocurren cuando la turbulencia no es ni reforzada ni suprimida, en los períodos de transición (convectivas a estables y viceversa) o bajo velocidades de viento altas cuando las fuerzas mecánicas de corte dominan la producción de turbulencia.

La Figura 5-6 muestra la variación diurna de ABL. Tal como se muestra, cuando cesa el calentamiento superficial (al caer la noche), el límite convectivo colapsa, y empieza a formarse la capa estable. De manera similar, en horas de la mañana el calentamiento de la superficie y el límite convectivo empieza a formarse.

Figura 5-6 Variación Diurna de la ABL



Los parámetros de la capa límite atmosférica cambian con la altura sobre el suelo, así como con el tiempo de día. Son dos los parámetros importantes: la temperatura y la velocidad de viento.

5.2.2 Estabilidad

La estabilidad atmosférica se determina por la gradiente vertical de la temperatura. El índice de lapso es el parámetro usado para describir la gradiente de la temperatura atmosférica:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = - \frac{T_2 - T_1}{z_2 - z_1} \quad 5-1$$

donde

$\partial T/\partial z$ = índice del lapso [K/km];

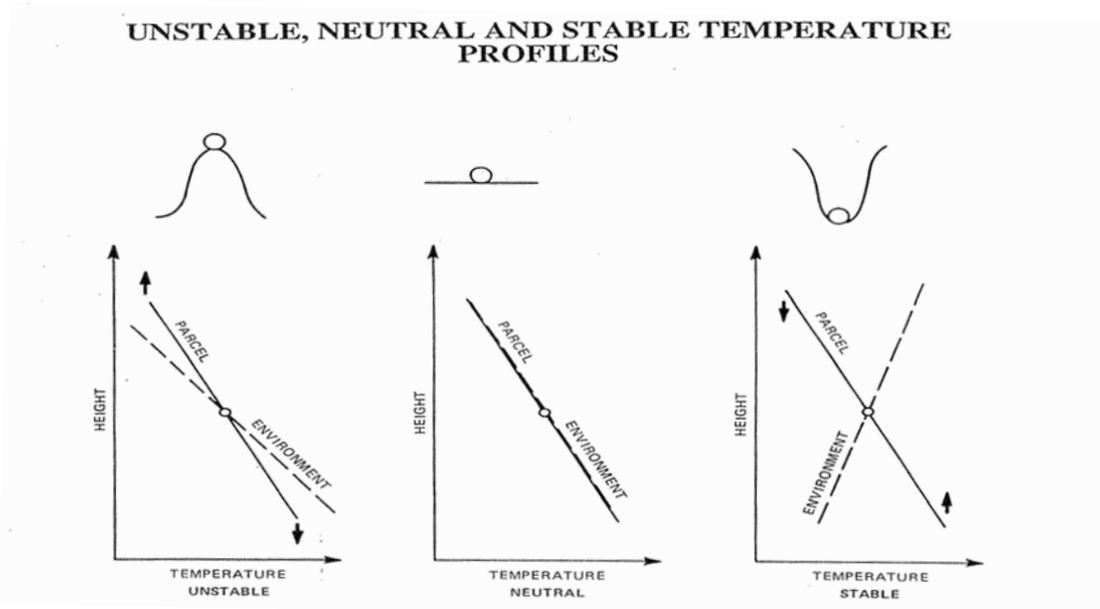
T = temperatura [K]; y

z = altitud [km], siendo z_2 más alto que z_1 .

El signo negativo en la ecuación del índice del lapso es una convención: por lo general, la temperatura en la atmósfera disminuye con la altitud. Cuando éste es el caso, la gradiente de la temperatura se definirá como un índice de lapso positivo.

Debido a la disminución de la presión con la altura, una celda de aire que se eleva de un nivel a otro generalmente enfriará a $1^\circ\text{C}/100\text{ m}$, lo que se denomina índice de lapso adiabático seco (DALR o Γ) (Figura 5-7).

Figura 5-7 Perfiles de la Temperatura de la Capa de Mezcla



Convectivo: Si una celda de aire ubicada en el punto A se eleva, continuará elevándose porque es más caliente que su ambiente.

Si una celda de aire ubicada en el punto A desciende, continuará descendiendo porque es más fría que su ambiente.

Durante las condiciones inestables, los movimientos verticales se refuerzan.

Estable: Si una celda de aire ubicada en el punto A se eleva, retornará al punto A porque es más fría que su ambiente.

Si una celda de aire ubicada en el punto A desciende, retornará al punto A porque es más cálida que el ambiente.

Durante condiciones estables, se suprimen los movimientos verticales.

Neutral: Una celda de aire ubicada en el punto A puede ascender y descender sin ninguna tendencia para continuar el movimiento o retornar a su posición original.

Modelamiento Dispersión Contaminantes

Los índices de lapso afectarán directamente la dispersión de las plumas emitidas a la atmósfera. La Tabla 5-2 presenta una lista de algunos índices de lapsos atmosféricos y el comportamiento de la pluma que generan.

Tabla 5-2 Efecto de los Índices de Lapsos Atmosféricos en el Comportamiento de la Pluma

Descripción del índice de Lapso	Comportamiento de la Pluma
Índice de lapso mayor que DALR	Pluma de Espiral; la pluma tienden a oscilar en dirección vertical
Índice de lapso menor que DALR	Pluma de Cono; la pluma presenta forma de cono en la atmósfera, con la punta en el punto de emisión
Índice de lapso negativo (Inversión)	Pluma de Abanico; la pluma presenta una profundidad vertical muy pequeña
Índice de lapso negativo (Inversión) cerca al suelo, índice de lapso positivo en las partes altas	Pluma de Flotación; la pluma es casi horizontal en la parte inferior, pero se expande con la distancia de la fuente hacia la parte superior
Índice de lapso positivo cerca al suelo, índice de lapso negativo (Inversión) en las partes altas; índice de lapso positivo mayor a DALR	Pluma de Fumigación; la pluma es casi horizontal en la parte superior, pero su parte inferior alcanza el suelo
Índice de lapso positivo cerca al suelo, índice de lapso negativo (Inversión) en las partes altas; índice de lapso positivo menor a DALR	Pluma Entrampada; la pluma es casi horizontal en la parte superior, pero su parte inferior se acerca lentamente al suelo

Nota: la velocidad y dirección de viento rigen la conducta horizontal.

5.2.3 Velocidad y Dirección del Viento

La velocidad y dirección del viento son factores determinantes para la dispersión de las emisiones de aire. La velocidad del viento afecta el grado de dispersión, mientras que la dirección determina dónde ocurrirán los mayores impactos.

Una mayor velocidad del viento incrementa la dispersión, lo que significa que la concentración de contaminantes disminuirá en cualquier lugar y se expandirá el área del impacto. Sin embargo, el aumento de la velocidad del viento también puede incrementar la resuspensión del polvo de la superficie de ciertos terrenos.

Por el contrario, una menor velocidad del viento disminuye la dispersión, lo que significa una mayor concentración de contaminantes cerca al punto de emisión. Asimismo, una menor velocidad del viento disminuirá la resuspensión del polvo de superficie.

La velocidad el viento aumenta con la altitud, pero se mide en la superficie. Sin embargo, para el modelamiento de dispersión es necesaria la velocidad del viento a la altura de la emisión. Para el cálculo de velocidad del viento puede usarse la siguiente ecuación.

$$u(z) = \frac{u_*}{0,4} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (z > z_0)$$

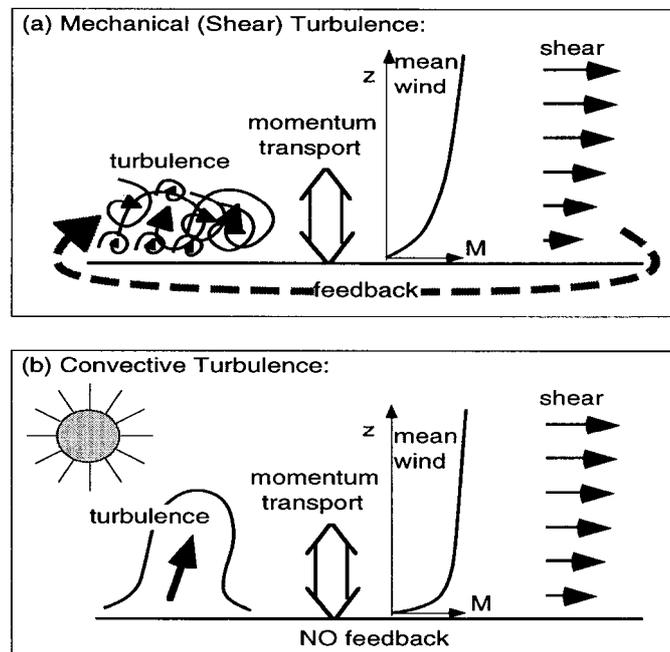
5-2

donde,

- u = velocidad del viento [m/s] a la altura z ;
- u_* = velocidad de fricción [m/s];
- z = altura de la medición [m];
- z_0 = altura de rugosidad [m]; y,
- 0,4 = constante de von Karman.

Las regiones con poca rugosidad de terreno (e.g. áreas rurales) presentan una gradiente empinada de velocidad de viento, lo que significa que la velocidad del viento se incrementa rápidamente con la altura (Figura 5-8). Por lo tanto, la velocidad del viento se acerca a un valor constante a una altura relativamente baja. Por el contrario, las regiones con alta rugosidad (e.g. áreas urbanas) tienden a presentar una velocidad del viento que aumenta gradualmente con la altura y sólo se acerca a un valor constante cuando llega a una altura mucho mayor.

Figura 5-8 Variación de la Velocidad del Viento con la Altura

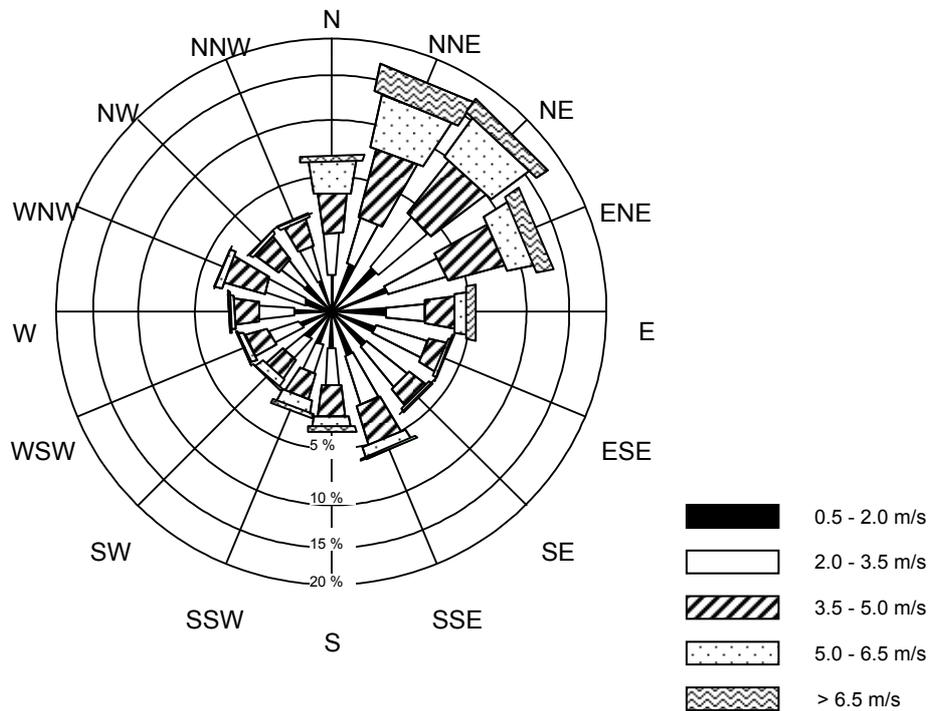


La dirección del viento afectará el lugar donde ocurrirán los impactos por emisiones atmosféricas. La dirección del viento también se mide en la superficie, pero también puede cambiar con la altitud. Por ejemplo, sobre un terreno plano, la dirección del viento a 1500 m de altura puede diferir en 15° a 30° en sentido horario, de la dirección del viento a nivel del suelo.

La velocidad y dirección del viento a menudo se reportan gráficamente con una "rosa de viento". En la Figura 5-9 se muestra un ejemplo de la rosa de viento. La dirección

de donde proviene el viento se muestra alrededor de perímetro del círculo exterior. Los círculos concéntricos representan el incremento de la frecuencia. De hecho, una rosa de viento es muy similar a un gráfico de barras, sólo que representado en un círculo. Cada "brazo" que se origina en el centro del círculo representa una dirección del viento. La longitud del brazo indica la frecuencia de ese viento en particular, según se mida en los círculos concéntricos. El brazo también muestra las frecuencias de velocidad del viento, como se describe en la leyenda al pie del gráfico. Generalmente, los vientos menores de 0.5 m/s son considerados como calma y no tienen una dirección asociada.

Figura 5-9 Ejemplo de una Rosa de Viento



5.2.4 Turbulencia

Existen dos componentes principales para la turbulencia: el componente mecánico y el componente térmico.

La turbulencia mecánica es una función de la velocidad del viento y la rugosidad de la superficie. Ocurre cuando cambia la velocidad del viento cerca a la superficie. Puede ocurrir un cambio en la velocidad del viento cuando existe un obstáculo que interrumpe el flujo del viento sobre la superficie. La rugosidad de la superficie se define por una "longitud" característica (z_0), como se muestra en la Ecuación 5-2. Los árboles y los edificios presentan alta rugosidad de superficie, mientras que el agua y la arena presentan baja rugosidad de superficie.

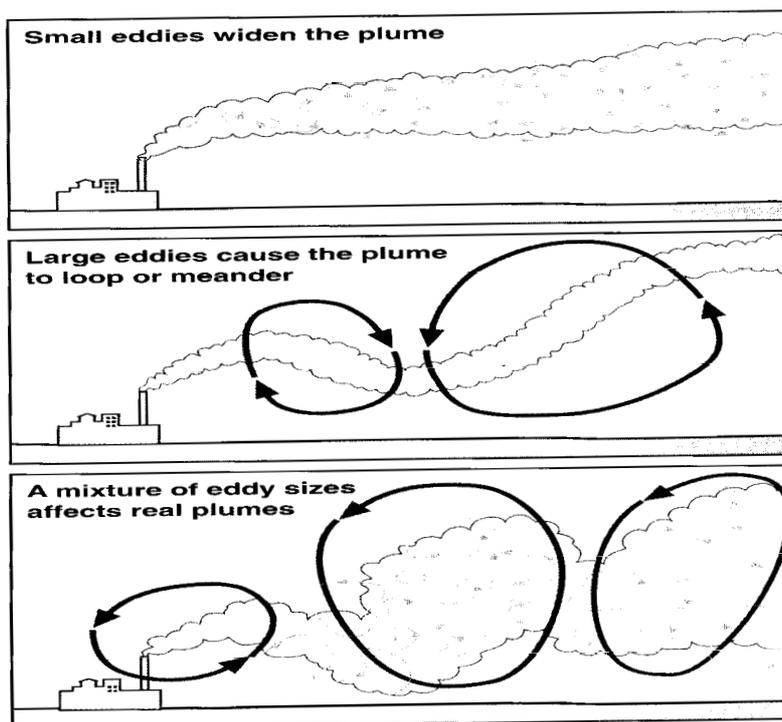
La turbulencia térmica también es conocida como turbulencia inducida ascendente. Esta ocurre cuando el aire caliente cercano al suelo se eleva, disturbando el aire sobre este. La turbulencia térmica tiende a ser máxima cuando comienza la tarde y mínima cuando se acerca el ocaso, siguiendo una tendencia de temperatura diurna de la superficie de la Tierra. Esto significa que la turbulencia también resulta afectada por el

albedo de la superficie. El albedo de la superficie es la fracción de radiación solar incidente que se refleja a la atmósfera. La fracción restante (i.e., $1 - \text{albedo}$), es la radiación absorbida por la superficie, lo que consecuentemente afectaría su temperatura. Las superficies con un alto nivel de albedo (e.g., las regiones árticas cubiertas de nieve) probablemente presentarán una pequeña fluctuación diurna en la temperatura de la superficie, y por lo tanto una pequeña turbulencia térmica.

Otro parámetro importante en la caracterización de la superficie para el modelamiento de dispersión es la relación Bowen. Esta es la relación entre el calor emitido hacia arriba por la superficie de la Tierra (flujo de calor sensible) y la pérdida de energía de la superficie por la evaporación del agua (flujo de calor latente). Mientras que esta relación por sí sola no afecta directamente el ascenso térmico, tanto el flujo de calor sensible como el latente contribuirían a la turbulencia atmosférica.

La turbulencia puede ocurrir tanto a pequeña como a gran escala. La turbulencia a pequeña escala puede considerarse una turbulencia dentro de una misma ráfaga, mientras que una turbulencia a gran escala, podría producir el desplazamiento de la ráfaga en la atmósfera. (Figura 5-10).

Figura 5-10 Escalas de Turbulencia



5.2.5 Longitud Monin-Obukhov

Un parámetro que a menudo se discute en relación a la meteorología y el modelamiento de dispersión es la Longitud Monin-Obukhov (L). Esta escala de longitud se utiliza para describir la estabilidad de la atmósfera. A elevaciones por debajo de la Longitud Obukhov, la principal causa de turbulencia son los efectos mecánicos antes que los efectos ascendentes. La Longitud Obukhov generalmente es de una a decenas de metros. Cuando L es cero, la atmósfera presenta estabilidad

neutral, cuando L es positivo la atmósfera es estable, y cuando L es negativo la atmósfera es inestable. Se utiliza la siguiente fórmula para calcular el valor de L:

$$L = -\frac{c_{pa}\rho_a u_*^3 T_a}{kgH_0} \quad 5-3$$

donde,

- u_* = velocidad de fricción;
- T_a = temperatura ambiental;
- c_{pa} = calor específico de la atmósfera;
- ρ = densidad del aire;
- k = constante de von Kármán;
- g = aceleración debido a la gravedad; y
- H_0 = flujo de calor en la superficie.

5.3 MODELAMIENTO DE LA DISPERSIÓN

Los modelos de calidad de aire proporcionan un vínculo fundamental entre las emisiones y los cambios en el aire del ambiente. El enfoque regulatorio más común es la aplicación de los modelos gaussianos de dispersión para calcular las concentraciones a nivel del suelo (USEPA 2005). La ecuación de la distribución gaussiana es la siguiente (USEPA 2005):

$$\chi = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2} \left\{ e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2} + e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2} \right\} \quad 5-4$$

donde

- χ = concentración del contaminante a nivel del suelo (g/m^3);
- Q = índice de emisión (masa/tiempo);
- σ_y = desviación estándar de la concentración del contaminante (dirección horizontal perpendicular a la dirección de la pluma);
- σ_z = desviación estándar de la concentración contaminante (dirección vertical);
- u = velocidad del viento;
- y = distancia en dirección horizontal (perpendicular a la dirección de la pluma);
- z = distancia en dirección vertical; y
- H = altura efectiva de la chimenea.

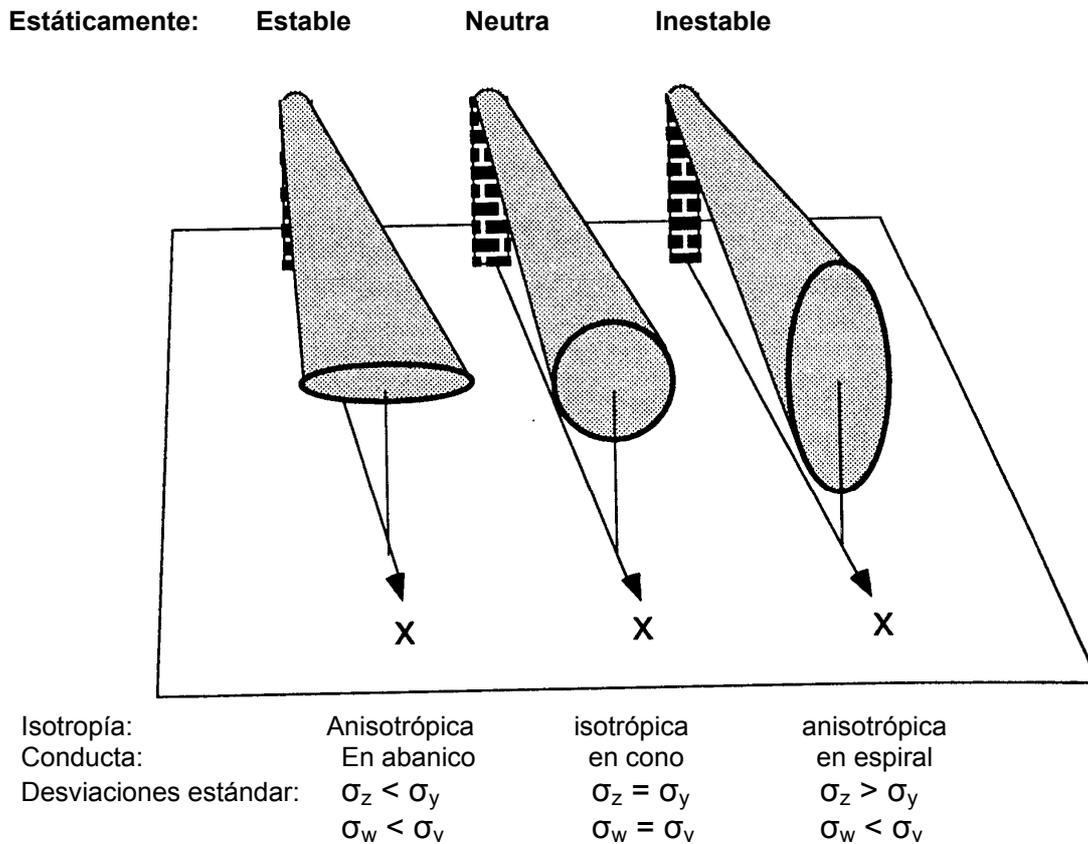
La anterior ecuación básicamente asume que:

- el viento promedio causa el transporte, y
- la desviación del viento causa la dispersión.

Modelamiento Dispersión Contaminantes

Los modelos que se basan en la ecuación de distribución gaussiana asumen que las plumas presentan una distribución gaussiana (i.e., en forma de campana) alrededor de su línea céntrica, tanto en dirección vertical como horizontal (USEPA 2005). La concentración del contaminante en la pluma se calcula en base a dos variables de dispersión (σ_y , σ_z) (USEPA 2005). La pluma es isotrópica cuando σ_y es igual a σ_z y anisotrópica cuando no son iguales (Figura 5-11). Estos parámetros de dispersión son "...funciones de la velocidad del viento, cobertura de nubes y calentamiento de la superficie por el sol" (i.e., estabilidad atmosférica).

Figura 5-11 Dispersión de la Pluma y Estabilidad Atmosférica



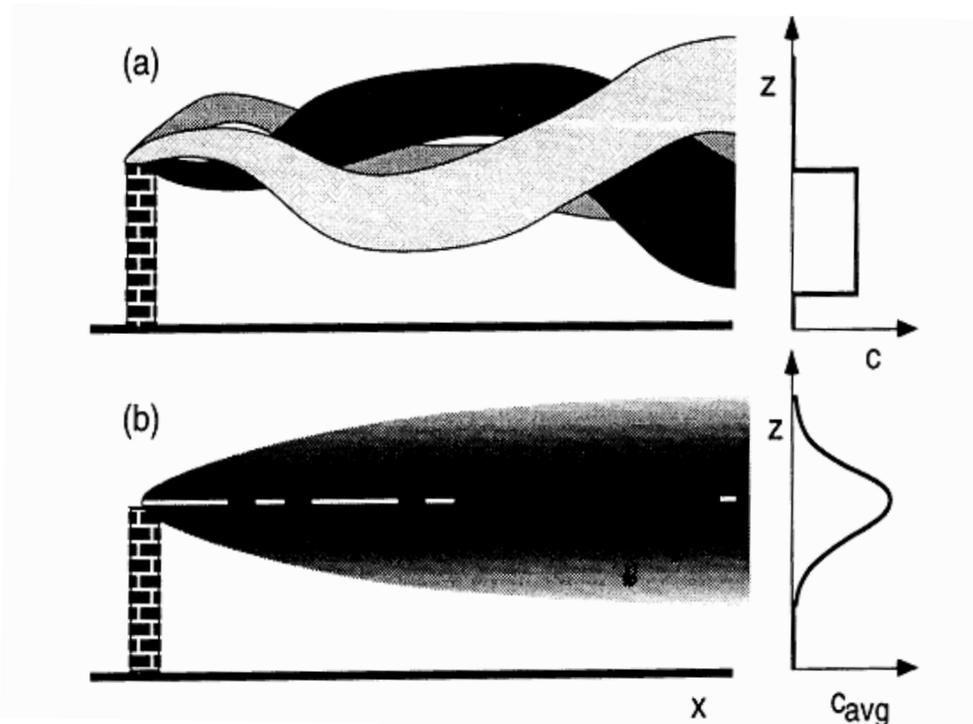
Los coeficientes o sigmas de la dispersión constituyen el índice de propagación de la pluma. La ecuación de distribución utiliza las "variables atmosféricas de tiempo promedio" (promediando períodos de 10 minutos a 1 hora), lo que valida la suposición de una distribución gaussiana de contaminantes en la pluma (Figura 5-12).

Los supuestos planteados al aplicar la ecuación de distribución gaussiana al modelamiento de la dispersión son los siguientes (USEPA 2005):

- La propagación de la pluma presentan una distribución gaussiana";
- "El índice de emisión (Q) es constante y continuo";
- "La velocidad y dirección del viento es uniforme"; y
- "La reflexión total de la pluma tiene lugar en la superficie" (i.e., no se pierde masa de la pluma cuando toca el suelo).

Cabe indicar que en un terreno complejo, la suposición de una distribución gaussiana en la pluma ya no es válida y debe realizarse algunos ajustes a la ecuación (USEPA 2005).

Figura 5-12 Efectos del Promedio en el Tiempo



5.3.1 Propagación de la Pluma en Base a la Estabilidad

Los parámetros de dispersión pueden estar relacionados con la cantidad de turbulencia atmosférica o la clase de estabilidad atmosférica, la distancia a sotavento y el tiempo promedio. Pasquill (1961) formuló un esquema de clases de estabilidad atmosférica que se convirtió en las Clases de Estabilidad de Pasquill-Gifford (USEPA 2005). Este esquema presenta seis clases de estabilidad que se basan en “cinco categorías de velocidad del viento de superficie, tres tipos de insolación diurna y dos tipos de nubosidad nocturna” (USEPA 2005). El esquema de clasificación se encuentra en la Tabla 5-3 (USEPA 2005).

La estabilidad decrece de la Clase A (más inestable) a la Clase F (más estable), representando la Clase D condiciones neutrales. Como se muestra en la Tabla 5-3, la estabilidad depende del sol y la velocidad del viento.

En base a las Clases de Estabilidad de Pasquill-Gifford, pueden determinarse los coeficientes de dispersión para los modelos gaussianos.

Los modelos regulatorios de la USEPA utilizan las ecuaciones de Pasquill-Gifford para los parámetros de dispersión y se basan en un promedio de tiempo de 3 minutos y una rugosidad de superficie (z_0) de 3 cm para distancias de hasta 1 km y un z_0 de 30 cm para distancias entre 10 y 100 km. Estos parámetros están diseñados para captar la concentración “máxima”.

Tabla 5-3 Clases de Estabilidad de Pasquill-Gifford

Velocidad de Viento de Superficie (a 10 m) (m/s)	Insolación			Noche	
	Fuerte	Moderado	Leve	Ligeramente nublado o pequeña cubierta de nubes $\geq 4/8$	Cubierta de nubes de $\leq 3/8$
< 2	A	A-B	B	-	-
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

Nota: Las condiciones de nubosidad (diurna o nocturna) corresponden a la Clase D.

Fuente: USEPA (2005).

5.3.2 Elevación de la Pluma

La elevación de la pluma es un factor muy importante a considerar en el modelamiento de la dispersión. Cuando una pluma sale de una chimenea usualmente tiende a elevarse. Esta elevación es controlada por dos fuerzas: el momento y la flotación (USEPA 2005).

El momento de la pluma cambiará después de salir de la chimenea debido a la influencia del viento. Cuando el viento golpea la pluma que se eleva, provocará un momento horizontal en la pluma. La magnitud del momento horizontal dependerá de la velocidad del viento y la dirección de la pluma dependerá de la dirección del viento. Como se indicó anteriormente, la velocidad del viento tiende a aumentar con la altura, de manera que los vientos tendrán un mayor efecto en el momento de la pluma en las partes altas de la atmósfera.

El efecto de flotación en la elevación de la pluma se rige por la diferencia de temperatura entre la pluma emitida y el aire ambiental (USEPA 2005). Mientras mayor sea la diferencia, mayor será el efecto de flotación y mayor la elevación de la pluma. En una atmósfera inestable, la pluma ascendente continuará elevándose (de manera similar a una celda de aire desplazada, tal como se discute en la Sección 5.2.2), mientras que en una atmósfera estable se conglomerará la flotación de la pluma. El incremento de la velocidad del viento provoca una mayor mezcla y una pérdida más rápida de la flotabilidad (USEPA 2005).

La altura de la pluma (Figura 5-13) se define como la distancia entre el suelo y el centro horizontal de la pluma (USEPA 2005). Existen muchos medios para calcular la elevación de la pluma, pero los métodos más comúnmente empleados son los propuestos por Briggs (USEPA 2005). El método de Briggs es semi-empírico y depende de la velocidad de salida de la pluma, la diferencia de temperatura respecto del aire ambiental, la altura de descarga y la estabilidad atmosférica. Estos parámetros se basan en la elevación de la chimenea (h).

La Figura 5-14 muestra la ecuaciones de Riggs de elevación de la pluma, con la siguiente información adicional, principalmente el parámetro de flujo de flotación (F_b) y el(los) parámetro(s) de estabilidad.

$$F_b = g \times v_s \times r_s^2 \times \left(\frac{T_s - T_a}{T_s} \right) \quad 5-5$$

Figura 5-13 Elevación de la Pluma

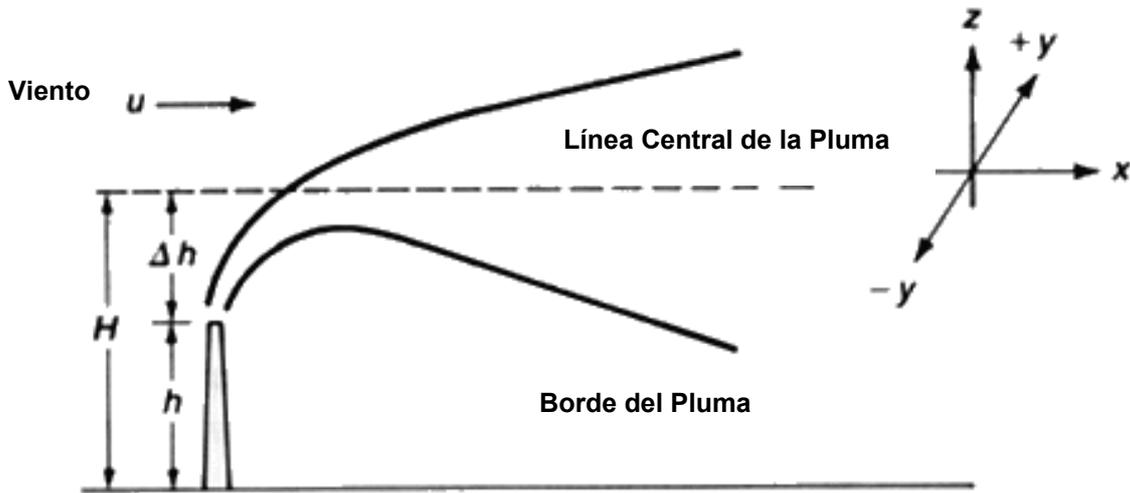
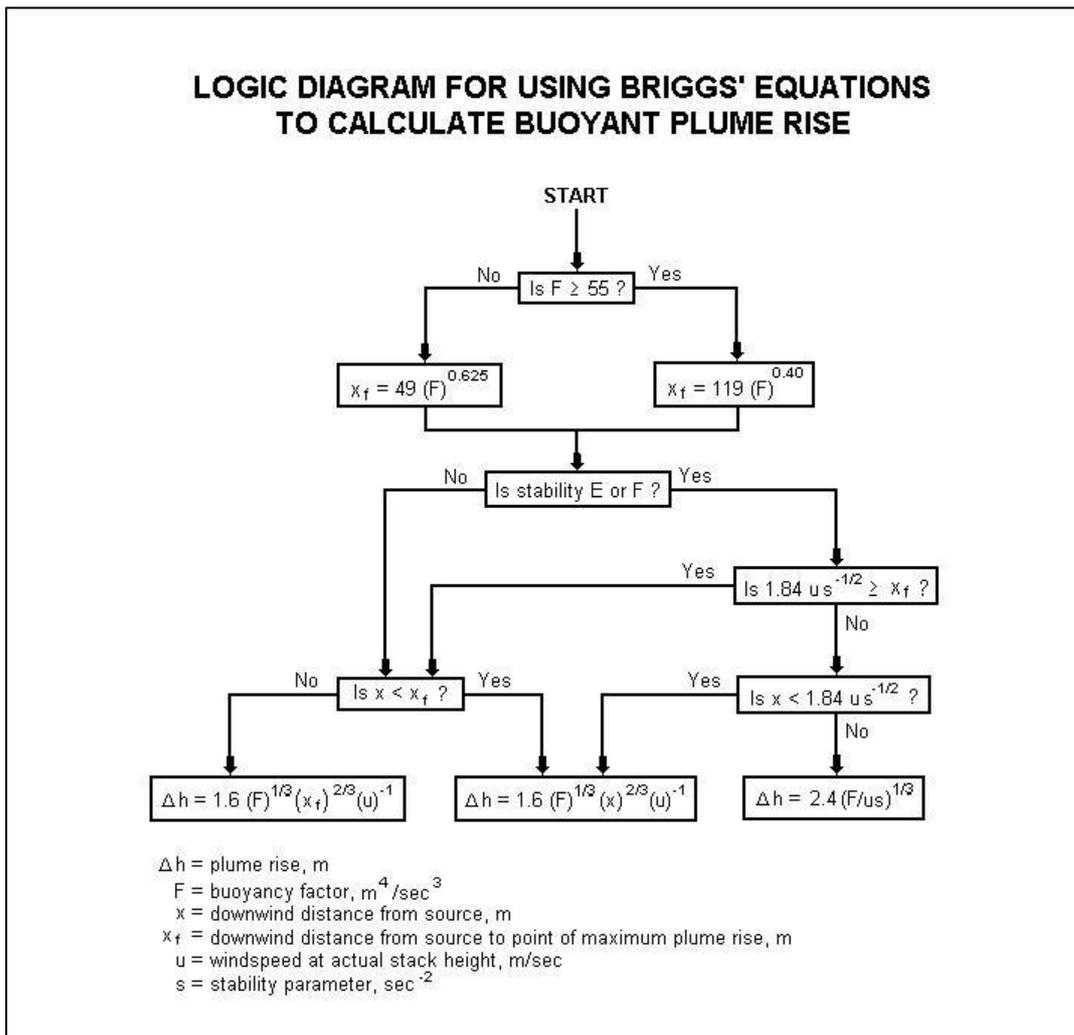


Figura 5-14 Ecuaciones de la Elevación de la Pluma de Briggs



donde,

- g = aceleración gravitacional [9,81 m/s²];
- v_s = velocidad de salida vertical de la pluma [m/s];
- r_s = radio de la chimenea en el punto de salida [m];
- T_s = temperatura de salida de la pluma [K]; y
- T_a = temperatura ambiental a la altura de la salida [K].

El ISC-PRIME utiliza este método. AERMOD utiliza este método cuando la atmósfera es estable, pero en una atmósfera inestable, AERMOD cambia su método de cálculo para considerar la convección (USEPA 2003).

5.3.3 Altura de Mezcla

La “altura de mezcla” atmosférica o capa límite atmosférica es la profundidad de la región, desde el suelo hasta cierta altitud, en donde la atmósfera se encuentra bien mezclada. En una noche clara, puede ocurrir una inversión cerca a la superficie de la tierra, es decir, la temperatura aumenta con la altura. Sin embargo, una vez que el sol sale y comienza a calentar el aire, empieza a formarse una gradiente vertical negativa. Casi a la mitad del día, se forma una capa inestable y mezclada (Figura 5-6). La altura de la capa de mezcla se basa generalmente en observaciones del aire en la parte más alta.

Bajo ciertas condiciones, las plumas pueden interactuar con los techos de inversión. Si la pluma puede penetrar totalmente la inversión, entonces la concentración a nivel del suelo se reducirá debido a que la inversión evitará la dispersión a sotavento. Si la pluma no puede penetrar la inversión, entonces las emisiones quedarán “atrapadas” dentro de la capa atmosférica. Los contaminantes emitidos por debajo de la altura de mezcla pueden dispersarse dentro de la capa mezclada, pero no pueden escapar de forma vertical. Por lo tanto, la altura de la capa de mezcla determinará el volumen de aire disponible para la dispersión y, consecuentemente, las concentraciones de contaminantes.

$$s = \frac{g}{T_a} \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad 5-6$$
$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial z} + \Gamma$$

donde,

- g = aceleración gravitacional [9,81 m/s²];
- T_a = temperatura ambiental [K];
- $\partial T / \partial z$ = gradiente de temperatura vertical o gradiente vertical (K/km);
- $\partial \theta / \partial z$ = gradiente de temperatura vertical potencial (K/km); y
- Γ = DALR (1 K/100 m).

5.4 CONSIDERACIONES PARA EL MODELAMIENTO

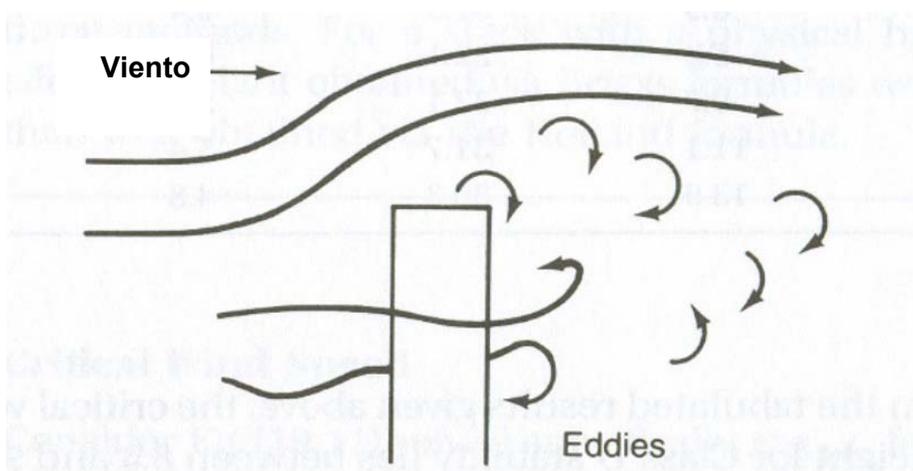
5.4.1 Efectos Aerodinámicos

En algunas circunstancias una pluma emitida por una chimenea puede ser “capturada” en la estela aerodinámica de la chimenea o de un edificio. Una estela aerodinámica es una región de flujo turbulento a sotavento de una obstrucción.

Deflexión del aire por la punta de chimenea

Si el momento de emisión de la chimenea (i.e., la velocidad) es muy bajo, la pluma puede ser dirigida al área de baja presión localizada a sotavento de la chimenea. Cuando una pluma es capturada en esta estela de la chimenea de emisión, se denomina “deflexión del aire por la punta de la chimenea” (Figura 5-15). Esto tiende a ocurrir cuando la velocidad del viento es significativamente mayor que la velocidad de salida de la pluma (USEPA 2005).

Figura 5-15 Deflexión del Aire por la Punta de la Chimenea



Se ha desarrollado un método para ajustar la elevación de la pluma cuando ocurre deflexión del aire por la punta de la chimenea, en base al método de elevación de la pluma de Briggs. El ajuste utiliza un factor de corrección, f , que depende del cálculo de la velocidad de salida de la chimenea y velocidad del viento. La elevación de la pluma es ajustada de acuerdo a:

$$\Delta h' = f\Delta h \quad 5-7$$

donde: Si la velocidad de salida de la chimenea es menor o igual que la velocidad del viento, no se observará elevación de la pluma; la pluma es capturada en la estela de la chimenea inmediatamente después de su emisión (i.e., $f=0$).

Si la velocidad de salida de la chimenea es mayor que 1,5 veces la velocidad del viento, no se observará deflexión del aire por la punta de la chimenea, la pluma no es afectada ($f=1$).

Si la velocidad de salida de la chimenea es mayor a la velocidad del viento, pero menor o igual a 1,5 veces la velocidad del viento, entonces:

$$f = \frac{3(v_s - u)}{v_s}$$

5-8

donde: u = velocidad del viento a la altura de la chimenea.
 v_s = velocidad de salida de la chimenea.

Deflexión del Aire por Edificios

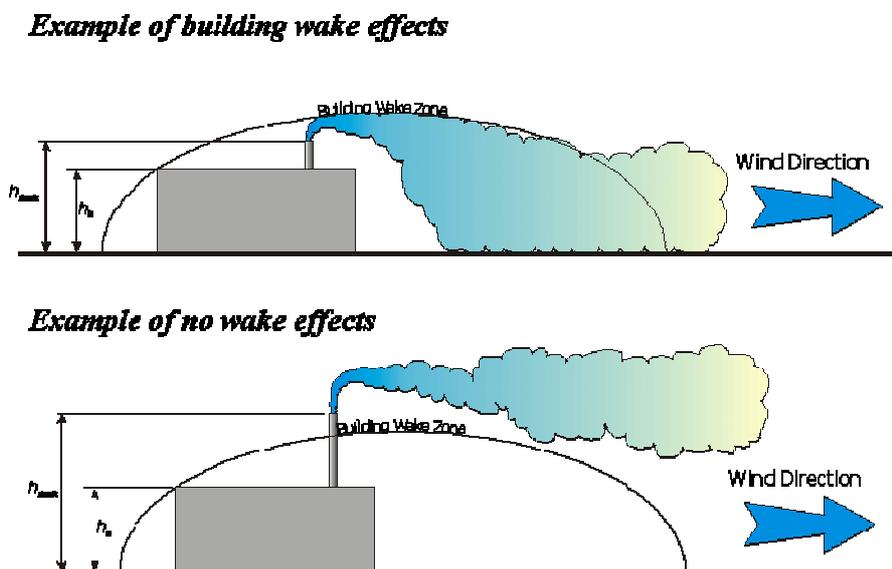
La deflexión del aire por edificios es similar a la deflexión del aire por la punta de la chimenea, i.e., se crea una zona de baja presión o cavidad a sotavento del edificio. El flujo de aire sobre y alrededor de un obstáculo tal como un edificio puede producir una cavidad de deflexión del aire que se extiende 0,5 veces la longitud del edificio por encima de éste y de 2 a 4 veces la longitud del edificio a sotavento del obstáculo, cuando la longitud del edificio es menor a la altura o ancho del edificio. A distancias de sotavento de 10 a 20 veces la longitud del edificio, el flujo de aire retorna a las condiciones previas al obstáculo.

La dispersión de contaminantes es tratada de dos maneras:

1. se reduce la elevación de la pluma; y
2. se mejoran los coeficientes de dispersión (en forma vertical y horizontal).

El potencial de que ocurra una deflexión del aire por edificios depende, por lo menos en parte, de la altura de emisión de la pluma (Figura 5-16). Si la chimenea es lo suficientemente alta, no será necesario tomar en cuenta los efectos de la deflexión del aire por edificios. USEPA define una altura GEP de chimenea (i.e., de Buena Práctica en Ingeniería) como la altura del edificio más 1,5 veces la altura o ancho del edificio, el que fuera más pequeño (USEPA 2005). Las emisiones de las chimeneas que cumplen este criterio de altura no necesitan ser evaluadas con relación a los efectos de la deflexión del aire por edificios. Es necesario considerar la altura de todos los edificios aledaños en esta evaluación.

Figura 5-16 Efectos de Estela de Edificios



Para determinar qué edificios se encuentran “cerca”, puede definirse un área de influencia para cada edificio (MOE 2005). Una Zona de Influencia de la Estructura rectangular (Structure Influence Zone - SIZ) puede definirse de la siguiente manera, donde L es la altura del edificio o ancho proyectado, el que fuera más pequeño (MOE 2005):

1. Dos líneas, una a 5L a sotavento del edificio, y otra a 2L a barlovento; y
2. Dos líneas que conectan las dos líneas anteriores formando un rectángulo, cada una ubicada a 0,5L de cada lado del edificio.

Un método comúnmente utilizado para la contabilización de los efectos de la estela del edificio en el modelamiento de la dispersión es el PRIME: Plume Rise Model Enhancements (Mejoramiento del Modelo de Elevación de la Pluma). Este algoritmo ha sido aplicado tanto en el ISCST3 (para producir ISC-PRIME) como en el AERMOD (MOE 2005). PRIME realiza las siguientes dos funciones (MOE 2005):

1. modela el incremento de dispersión en la estela de turbulencia, incrementando los valores de los coeficientes de dispersión, σ_y y σ_z ; y
2. disminuye la elevación de la pluma para aumentar el arrastre del aire ambiental en la pluma y el retorno de las líneas de flujo desplazadas a sus vectores originales.

Los modelos que incorporan el algoritmo PRIME requieren ingreso de datos producidos por otro programa, BPIP-PRIME: Building Profile Input Program – Plume Rise Model Enhancement (Programa para Ingreso de Perfiles de Edificio – Mejoramiento del Modelo de Elevación de la Pluma) (MOE 2005). El BPIP-PRIME realiza las siguientes tareas (MOE 2005):

1. una evaluación inicial de las chimeneas que serán afectadas por las estelas de los edificios (si hubieran); y
2. para estructuras que afecten las emisiones de la chimenea, se calculan las “alturas GEP y los anchos proyectados para los edificios”.

5.4.2 Terreno Complejo

La trayectoria que sigue una pluma y la turbulencia que causa su dispersión son afectadas por varias características del terreno incluyendo:

- Vientos del valle (anabático, catabático);
- Brisa de la Tierra/Mar;
- Convergencia de Canalización/Banda de sotavento; y
- Levantamiento orográfico.

La magnitud de los efectos del terreno depende de factores tales como la elevación, la forma del terreno, la altura relativa de la pluma con relación al terreno y las condiciones meteorológicas prevalecientes.

Cuando el viento se aproxima a un obstáculo que se encuentra en su camino, éste bordeará el obstáculo, pasará por encima de él, o hará ambas cosas (Figura 5-17). En algunos casos, golpeará directamente en la colina. Puede usarse el número de Froude (Fr) para calcular lo que hará la pluma. Éste representa la relación de energía cinética en el fluido para que la energía potencial pase por encima de la colina. El número de Froude está dado por:

$$Fr = \sqrt{\frac{\text{Energía cinética del fluido}}{\text{Energía potencial necesaria para sobrepasar la colina}}}$$

Remolinos

$$Fr = \frac{U_p}{NH_t} \quad 5-9$$

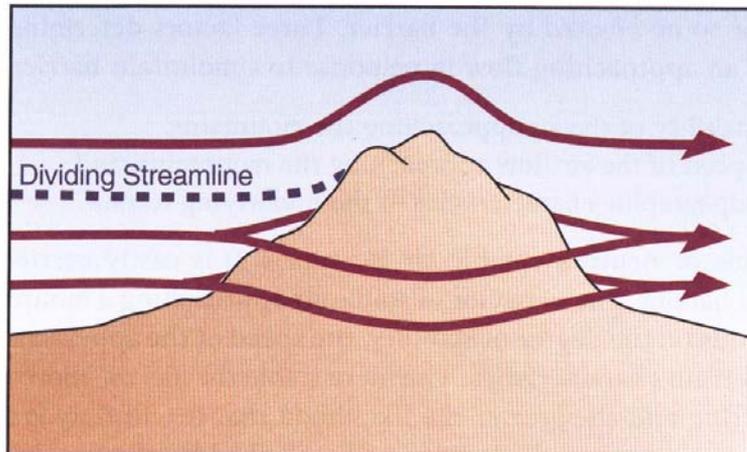
$$N^2 = s = \frac{g}{T_a} \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad 5-10$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial z} + \Gamma$$

donde,

- N = Frecuencia de Brunt-Vaisala;
- U_p = velocidad del viento en la cima de la chimenea hasta la capa de la altura de la colina;
- H_t = altura de la colina;
- g = aceleración gravitacional [9,81 m/s²];
- T_a = temperatura ambiental [K];
- $\partial T / \partial z$ = gradiente vertical de temperatura o índice del lapso [K/km]; y
- $\partial \theta / \partial z$ = gradiente de temperatura vertical potencial [K/km].

Figura 5-17 Flujo sobre Terreno Elevado



Una línea de flujo divisoria (H_0) representa la división del flujo de aire alrededor y sobre la colina (Figura 5-17) y se define de la siguiente manera:

$$H_d = H_h(1 - Fr) \quad 5-11$$

Donde,

H_h = altura de la colina: y

Fr = Número Froude.

El ISC-PRIME y el AERMOD son capaces de manejar terrenos complejos. El AERMOD utiliza la teoría de la línea de flujo anteriormente descrito, mientras que el ISC-PRIME presenta un enfoque simplificado.

5.5 DISPONIBILIDAD DE LOS MODELOS

5.5.1 Selección de Modelos

Tal como lo establece la Guía de Modelos de Calidad de Aire de la USEPA (2003a), la aplicabilidad de un modelo específico de calidad de aire para la evaluación del impacto de una fuente depende de varios factores, entre los cuales se incluyen:

- el nivel de detalle y precisión requerido para cumplir con los objetivos del análisis,
- el detalle, precisión y disponibilidad de los datos de entrada necesarios para el modelo (i.e., inventario de emisiones, información meteorológica, información de calidad de aire)
- la naturaleza física del sistema a ser analizado (i.e., características de los contaminantes, fuentes y procesos de transporte y dispersión en el área),
- la competencia técnica de las personas que realizarán el modelamiento,
- los recursos disponibles (e.g., computadoras, software).

Los objetivos del análisis pueden incluir la selección de ubicaciones para las estaciones de monitoreo de calidad de aire o la evaluación del cumplimiento de una fuente con los estándares de calidad de aire ambiental. En los estudios de selección de ubicaciones deben identificarse las áreas de mayor frecuencia de concentraciones altas. Cuando se trata de evaluar el cumplimiento de una fuente, sólo la mayor o la segunda mayor concentración estimada podrían ser de interés. Los enfoques para el modelamiento en estos dos casos podrían no ser los mismos.

Deben estar disponibles los datos apropiados antes de pretender aplicar un modelo. Un modelo que requiera datos de entrada detallados y precisos no debería ser usado cuando tales datos no están disponibles. Sin embargo, asumiendo que los datos son los adecuados, cuanto mayor sea el detalle con el que un modelo considera las variaciones espaciales y temporales en las emisiones y las condiciones meteorológicas, mayor será su capacidad para evaluar el impacto de la fuente y distinguir los efectos de diferentes estrategias de control.

La mayoría de los programas de procesamiento de información meteorológica y los modelos de dispersión de aire requieren datos completos de todos los parámetros por una determinada cantidad de horas. Los datos que falten deben ser reemplazados con datos promedio para asegurar que los modelos de dispersión de aire puedan funcionar. En los casos en que falten datos de una o dos horas, se puede realizar una interpolación lineal de los datos.

Para los periodos en que falten datos de hasta siete días, se pueden sustituir los datos con promedios sintetizados de los registros de la estación meteorológica. Para periodos continuos mayores a siete días, se debe considerar que falta información y la extensión de la base de datos debe reducirse a la extensión de los datos que faltan. Por ejemplo, en el caso de que falten datos de tres semanas de muestreo, la extensión total de la base de datos cubrirá 49 semanas, en vez de cumplir el estándar de 52 semanas en el año. Es importante, sin embargo, asegurar que se tenga un registro adecuado de datos de todas las estaciones climáticas del año.

Existen tres tipos de datos de ingreso en un modelo de dispersión que generaran concentraciones. Estos son, datos meteorológicos, fuente y datos geofísicos, y opciones de control. Los datos meteorológicos requieren la mayor parte del QA/QC y en muchos casos no se brinda la debida atención a asegurar que estos datos sean representativos del área de interés. La configuración de la fuente, incluyendo las características de la chimenea y las tasas de emisión pueden generar los mayores errores en los resultados del modelamiento. Los datos geofísicos incluyen la información del terreno y tipos de usos del suelo para poder representar las características del terreno en el área de interés y así generar resultados acertados. La interpretación de los datos resultantes no debe restringirse a comparar las concentraciones máximas estimadas con los estándares de aire, ya que estos resultados son generalmente datos atípicos o debidos a condiciones climáticas extremas. Generalmente, el 98° percentil de los datos resultantes es un índice estable para ser utilizado en la comparación con los estándares de calidad de aire.

La naturaleza física de los sistemas a ser analizados depende de los siguientes elementos:

1. Las características del contaminante:

- a) Proceso de producción
 - i) Primario (el contaminante es directamente emitido a la atmósfera)
 - ii) Secundario (el contaminante es formado a partir de otros contaminantes que son emitidos a la atmósfera)
- b) Proceso de remoción
 - i) Ninguno
 - ii) Químico (e.g., decaimiento exponencial)
 - iii) Físico (e.g., sedimentación de partículas)

2. Características de la fuente:

- a) Número de fuentes (desde fuentes simples o aisladas hasta fuentes múltiples en un área industrial compleja),
- b) Geometría
 - i) Fuentes puntuales (emisiones de chimenea o sistema de venteo)
 - ii) Fuentes de área (fuentes fugitivas, fuentes cuyas emisiones no son evacuadas a través de una chimenea; generalmente para fuentes de baja altura, tales como pilas de almacenamiento de materiales y pilas de residuos)
 - iii) Fuentes lineales (emisiones que provienen de una serie de áreas, tales como el tráfico en una carretera)
 - iv) Fuentes volumétricas (e.g., emisiones en techos de edificios)

3. Características de transporte y difusión

- a) Información meteorológica (tal como velocidad y dirección del viento, temperatura, estabilidad atmosférica, altura de mezcla)
- b) Topografía
 - i) Terreno simple (considerado como un área donde todos los elementos de relieve son de menor elevación que la chimenea o fuente considerada en la evaluación)
 - ii) Terreno complejo (considerado como un área donde los elementos del relieve son de mayor elevación que el extremo de la chimenea o la fuente considerada en la evaluación)
- c) Ubicación del receptor respecto de la fuente
 - i) Campo cercano (generalmente considerado como los receptores ubicados a menos de 50 km de la fuente)
 - ii) Campo lejano (generalmente considerado los receptores ubicados a más de 50 km de la fuente).
- d) Uso del terreno (e.g., rural o urbano)
- e) Comportamiento de la pluma
 - i) Pluma que desciende desde la chimenea
 - ii) Pluma que desciende por las paredes de los edificios (i.e., relación entre la altura de la chimenea y la altura y ancho de los edificios y estructuras adyacentes)
 - iii) Dispersión horizontal y vertical de la pluma

Los modelos de calidad de aire han sido aplicados con la mayor precisión o el menor grado de incertidumbre a las simulaciones de promedios de largo plazo en áreas de topografía relativamente simple. Áreas sujetas a mayores influencias topográficas experimentan complejidades meteorológicas que son extremadamente difíciles de simular. Aunque existen modelos disponibles para tales circunstancias, estos son frecuentemente específicos para el sitio y exigen grandes requerimientos de recursos. En ausencia de un modelo capaz de simular tales complejidades, sólo aproximaciones preliminares son posibles hasta que mejores modelos y bases de datos estén disponibles.

Las demandas de recursos generadas por el uso de modelos de calidad de aire varían ampliamente dependiendo de la aplicación específica. Los recursos requeridos dependen de la naturaleza del modelo y su complejidad, el nivel de detalle de la base de datos, la dificultad de la aplicación y la cantidad y nivel de expertos requerida. Los costos de personal y facilidades de cómputo pueden también ser factores importantes en la selección y uso de un modelo para un análisis específico. Sin embargo, debe reconocerse que bajo ciertas circunstancias físicas y requerimientos de precisión, ningún modelo podría ser apropiado. Por lo tanto, tomar en cuenta estos factores ayudará a evitar la selección de un modelo inapropiado.

Además, los modelos que están basados en principios científicos más sólidos y que estiman de manera más confiable la concentración del contaminante que los modelos corrientes deben ser evaluados y cumplir con ciertos requerimientos antes de usarlos para evaluar el cumplimiento con los estándares regulatorios. Estos requerimientos son:

1. El modelo debe ser computarizado y funcionar en un lenguaje de programación común (e.g., Fortran) tal que pueda ser utilizado en una variedad de sistemas de computador.

2. El modelo debe estar documentado en un manual del usuario, el cual debe identificar los principios matemáticos del modelo, los requerimientos de datos y las características operativas del programa a un nivel de detalle comparable con otros modelos disponibles para una diversidad de usos y ampliamente aceptados (tal como el modelo Industrial Source Complex Short-Term - ISCST).
3. El modelo debe estar acompañado de un complejo juego de datos de prueba, incluyendo parámetros de entrada y resultados. Estos datos de prueba deben ser incluidos en el manual del usuario y proporcionados en forma digital.
4. El modelo debe ser útil para los usuarios típicos (e.g., las agencias de control ambiental) para los problemas específicos de control de la calidad del aire. Tales usuarios deben ser capaces de operar el programa de cómputo a partir de la información disponible.
5. La documentación del modelo debe incluir una comparación con datos de calidad de aire o con otra técnica analítica de amplia aceptación.
6. La persona que desarrolla el modelo debe estar dispuesta a hacer el modelo disponible a los usuarios a un costo razonable o hacerlo de libre disponibilidad. El modelo no puede ser propietario.

El proceso de evaluación incluye la determinación de los méritos técnicos, de acuerdo con los seis ítems mencionados, incluyendo el carácter práctico del modelo para su uso en los programas regulatorios vigentes. Cada modelo estará también sujeto a una evaluación de rendimiento mediante una base de datos apropiada y por parte de un revisor científico experto.

Como un ejemplo, un nuevo modelo llamado AERMOD ha pasado por la evaluación mencionada. En 1991, la American Meteorological Society (AMS) y la USEPA iniciaron una colaboración formal con la meta de introducir los conceptos actuales de capa límite planetaria en un modelo de dispersión que satisfaga los requerimientos de uso regulatorios. Un grupo de trabajo (AMS/EPA Regulatory Model Improvement Committee, AERMIC) compuesto por científicos de la AMS y USEPA se formó para este esfuerzo conjunto. En muchas de las aplicaciones de calidad de aire uno debe tratar con la capa límite planetaria, la capa turbulenta de aire cerca de la superficie terrestre que es controlada por el calentamiento de la superficie y la fricción en la estratificación superior. La capa límite planetaria típicamente varía desde unos pocos cientos de metros en profundidad durante la noche hasta 1 o 2 km durante el día.

El nuevo modelo llamado AERMOD (por AMS/EPA Regulatory Model) está diseñado para la dispersión de rango corto desde fuentes industriales estacionarias, el mismo escenario del modelo ISCST de la USEPA. El AERMIC estuvo originalmente enfocado a los modelos regulatorios que son diseñados para estimar impactos de campo cercano desde una variedad de tipos de fuentes industriales. La plataforma regulatoria de la USEPA para el modelamiento en campo cercano durante los últimos 25 años ha permanecido invariable, con pocas excepciones. Durante este período, el ISCST3 fue el modelo regulatorio estándar con una estructura de código sujeta a cambios.

Por lo tanto, AERMIC seleccionó el modelo ISCST de la USEPA para efectuarle un cambio profundo. El objetivo del AERMIC era desarrollar un reemplazo completo para el ISCST3 mediante 1) la adopción de la arquitectura de ingreso y salida de datos a la computadora, 2) la actualización, en tanto práctica, de los anticuados algoritmos del ISCST3 con las últimas técnicas de modelamiento desarrolladas; y 3) asegurando que las fuentes y procesos atmosféricos actualmente modelados por el ISCST3 continúen siendo manejados por el modelo (AERMOD), aunque de una manera mejorada.

En el desarrollo del AERMOD, AERMIC adoptó un criterio de diseño para obtener un modelo con los atributos regulatorios deseables. Se estimó que el modelo debería: 1) proporcionar estimados de concentración razonables bajo una amplia variedad de condiciones con mínimas discontinuidades; 2) ser de uso amigable y requerir datos de entrada y recursos de cómputo razonables como el modelo ISCST3; 3) capturar los procesos físicos esenciales permaneciendo fundamentalmente simple; y 4) acomodar las modificaciones con facilidad según evoluciona la ciencia.

Con respecto al ISCST3, el AERMOD actualmente contiene algoritmos nuevos o mejorados para: 1) la dispersión tanto en capas límite convectivas como estables; 2) elevación de la pluma y flotabilidad; 3) penetración de la pluma en inversiones elevadas; 4) cálculo de perfiles verticales de viento, turbulencia y temperatura; 5) la capa límite nocturna urbana; 6) el tratamiento de los receptores en todos los tipos de terreno, desde la superficie hasta la altura de la pluma y por encima de ella; 7) el tratamiento del efecto de los edificios; 8) un enfoque mejorado para caracterizar los parámetros fundamentales de la capa límite; y 9) el tratamiento de la deformación de la pluma.

En abril del 2000, la EPA propuso inicialmente el reemplazo del ISCST3 por el AERMOD. En base a los comentarios recibidos del público, se agregaron elementos adicionales al AERMOD. En setiembre de 2003 la USEPA puso a disposición del público y los expertos documentación adicional para recibir la aprobación para reemplazar el ISCST3 por el AERMOD en el año 2004.

5.5.2 Clases de Modelos

Los procedimientos de modelamiento de calidad de aire pueden ser clasificados en varias clases genéricas: estadísticos, sistemas expertos, modelos de caja, gaussianos, de trayectoria, gaussianos multifuente y de pronóstico. Entre estas clases, especialmente entre los gaussianos y los de pronóstico, existen un gran número de algoritmos computacionales individuales, cada uno de ellos con su aplicación específica. Mientras que cada uno de tales algoritmos puede tener la misma base genérica (e.g., gaussiano), es práctica aceptada el referirse a cada uno de ellos como modelos individuales.

Las técnicas estadísticas son frecuentemente empleadas en situaciones donde la incompleta comprensión científica de los procesos físicos y químicos o la falta de los datos requeridos hace poco práctico el uso de modelos gaussianos. Estos modelos usan la información meteorológica desarrollada en forma de estadísticas (e.g., promedio anual de la frecuencia de ocurrencia de una dirección de viento observada, velocidad de viento y estabilidad atmosférica registrada en una estación).

Los modelos de sistemas expertos usan los datos de calidad de aire y se basan en condiciones meteorológicas sinópticas para predecir los impactos en la calidad del aire. Estos modelos comparan las condiciones meteorológicas históricas con los períodos en los que las mediciones de concentración en un área son altas. En base a estas comparaciones, se realizan predicciones basadas en las predicciones meteorológicas.

Los modelos de caja son métodos simples para estimar la concentración de un contaminante en el aire asumiendo que las emisiones son ingresadas y distribuidas uniformemente en una "caja". La "caja" está definida como un área (i.e., largo y ancho)

que se extiende dentro de la atmósfera hasta la altura de mezcla (i.e., la altura de la caja).

Los modelos gaussianos son las técnicas más usadas para estimar los impactos de contaminantes no reactivos. Estos modelos estiman la dispersión horizontal y vertical de una pluma que viaja viento abajo desde una fuente usando la fórmula matemática gaussiana que describe las concentraciones en la pluma como una curva de campana (i.e., para una distancia dada desde la fuente, las máximas concentraciones son asignadas a la línea central y decrecen desde esta línea central). Estos modelos generalmente usan datos meteorológicos horarios en la forma de condiciones de "peor caso" definidas por el usuario o registradas en una estación meteorológica cercana.

Los modelos de trayectoria usan datos meteorológicos y ecuaciones matemáticas para simular el transporte en la atmósfera y generalmente son usados para predecir el transporte de contaminantes a largas distancias. Generalmente, la posición de las partículas o celdas de aire en el tiempo son calculadas en base a la información meteorológica tal como velocidad y dirección del viento, temperatura, humedad y presión. Luego de cada intervalo de tiempo (e.g., una hora), las emisiones son liberadas y traceadas como una nube. Los resultados del modelo dependen de la resolución espacial y temporal de la información atmosférica utilizada, así como de la complejidad del modelo en sí. Modelos más simples pueden trabajar sólo con el transporte eólico en dos dimensiones, mientras que los modelos más complejos pueden incluir procesos químicos y termodinámicos en 3 dimensiones, tales como la formación de aerosoles, convección y difusión turbulenta.

Los modelos de pronóstico son modelos que estiman las concentraciones de calidad del aire mediante el uso de condiciones meteorológicas estimadas. Estos modelos consisten en varias clases de modelos, tales como los previamente descritos, así como modelos numéricos. Muchos de los modelos actuales de pronóstico usan información meteorológica horaria detallada llamada datos Mesoescala Model Generarion 5 (MM5), que son campos de viento pronosticados o campos estimados. Las variables meteorológicas horarias usadas para crear estos datos (viento, temperatura, punto de rocío, depresión, y altura geopotencial para ocho niveles estándar y hasta 15 niveles significativos) son extensas.

Los modelos recomendados por la USEPA en la Guía de Modelos de Calidad de Aire corresponden a modelos de dispersión detallados. Además, el SCRAM incluye información de soporte sobre los modelos detallados recomendados por la USEPA, modelos detallados alternativos de uso específico y modelos de tamizado.

Los modelos de dispersión recomendados por la USEPA son:

- Buoyant Line and Point Source Dispersion Model (BLP),
- Caline 3,
- Calpuff,
- Complex Terrain Dispersion Model Plus Algorithms for Unstable Situations (CTDMPLUS),
- Emissions and Dispersion Modeling System (EDMS) 3.1,
- Industrial Source Complex Model (ISC3) y
- Offshore and Coastal Dispersion (OCD).

Los modelos de Lagrange, como por ejemplo el CALPUFF, son aceptables y preferibles para las condiciones de topografía compleja en el Perú. Sin embargo estos

modelos requieren el ingreso de una cantidad significativamente mayor de datos para poder ejecutar el modelo y para poder interpretar los resultados.

Existen algunos modelos disponibles para predecir las concentraciones de la calidad de aire. Estos vienen siendo desarrollados y usados en diversas predicciones de la calidad de aire y otras actividades relacionadas con la contaminación del aire, incluyendo:

- Advertencias al público, control de emisiones de ciertas industrias y restricciones al transporte vehicular ante condiciones adversas;
- Suministro de datos de casos estudio utilizados para el desarrollo y evaluación de estrategias alternativas de manejo de la contaminación del aire o para la selección de ubicación para nuevas instalaciones industriales; y
- Registro de los resultados para permitir la investigación de problemas de largo plazo, tales como el riesgo de exposición a contaminantes relacionados con el cáncer (e.g., benceno), y otros problemas como lluvia ácida y nitrificación de cuerpos de agua.

5.5.3 Niveles de Sofisticación de los Modelos

Además de las diversas clases de modelos mencionadas, existen dos niveles de sofisticación. El primer nivel consiste en técnicas de estimación generales relativamente simples que proporcionan estimados conservadores del impacto en la calidad del aire de una determinada fuente o categoría de fuente. Estas son técnicas de tamizado o modelos de tamizado. El propósito de estas técnicas es el de eliminar la necesidad de modelamiento más detallado en aquellas fuentes que claramente no causarán o contribuirán de manera significativa a las concentraciones del aire ambiental por encima de los estándares de calidad. Si la técnica de tamizado indica que el aporte de la fuente excede los niveles estándar, entonces debe aplicarse un segundo nivel de modelos más sofisticados.

El segundo nivel consiste en aquellas técnicas analíticas que proporcionan un tratamiento más detallado de los procesos físicos y químicos de la atmósfera. Estos modelos requieren datos más detallados y precisos y proporcionan estimados de concentración más especializados. Como resultado, estos modelos proporcionan un estimado más refinado y, al menos teóricamente, más preciso del impacto de la fuente y de la efectividad de la estrategia de control. Estos modelos son referidos como modelos refinados.

El uso de técnicas de tamizado seguido de un análisis más refinado es siempre deseable. Sin embargo, hay situaciones en las que las técnicas de tamizado son práctica y técnicamente la única opción viable para la estimación del impacto de una fuente. En tales casos, deben realizarse esfuerzos para mejorar las bases de datos necesarias y para desarrollar técnicas analíticas apropiadas.

Estos modelos han sido usados ampliamente en aplicaciones en ciudades como Oslo, Copenhague, Sydney, y Londres. Por ejemplo, el modelo TAPM de CSIRO ha sido aplicado en Australia y el sudeste asiático.

Modelamiento Dispersión Contaminantes

5.6 MODELOS COMÚNMENTE UTILIZADOS

Los modelos de dispersión utilizados con mayor frecuencia, el ISC-PRIME y el AERMOD, se describen a continuación en mayor detalle. Los principales atributos y diferencias entre estos modelos se resumen en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3 Comparación de Modelos de Dispersión Comúnmente Utilizados

Parámetro	ISC-PRIME	AERMOD
Descripción	Modelo de pluma gaussiana de estado estable que puede ser utilizado para evaluar las concentraciones contaminantes de una amplia variedad de fuentes relacionadas con un complejo industrial. Modelo estándar, de trabajo pesado en base a la tecnología anterior a 1970	Modelo de pluma gaussiana en equilibrio que incorpora conceptos de capa límite planetaria e interacciones pluma/terreno. Comenzó tratando la atmósfera como un continuo y no como clases. Física basada en la ciencia de los 1990's.
Representación Meteorológica	Se basa en la descripción simple del uso del suelo para todo el modelamiento y una superficie local simple y estación de aire de la parte superior.	Se permite la variación del uso del terreno con la dirección del viento pero no puede variar con la distancia a sotavento. Los datos locales pueden ser integrados en el grupo de datos meteorológicos
Dispersión	Se basa en curvas de dispersión anteriores a 1960	Utiliza la teoría de similitud de capa de superficie tal como la velocidad de fricción, longitud Monin-Obukhov, etc.
¿Efectos en la línea costera?	No	No
¿Deflexión del aire por edificios?	Sí, con PRIME	Sí, con PRIME
¿Topografía local?	Ajuste de altura del receptor/pluma relativos y limitados y terreno general urbano/rural.	Altura relativa receptor/pluma, poca interacción pluma/terreno y descripción de terreno multizona.
Limitaciones/Desventajas	No puede modelar condiciones calmas.	No puede modelar condiciones en calma.
Ventajas	Simple, comprobado. Sabemos qué podemos esperar de este modelo con respecto a las predicciones de impacto de olor	El tratamiento de la meteorología es una mejora por sobre el ISC (más detallado, puede ajustarse específicamente al sitio). Menos intenso que el CALPUFF (por lo tanto reduce un poco el costo)

Tanto el ISC-PRIME como el AERMOD son modelos de pluma de estado estable. En general, estos tipos de modelos se basan en las siguientes suposiciones:

- Las emisiones viajan en línea recta;
- la meteorología no varía en el tiempo ni en el espacio;
- no se consideran emisiones previas en ningún momento; y
- las velocidades del viento son siempre mayores a cero.

5.6.1 ISC – PRIME

El modelo de dispersión Industrial Source Complex Short Term - ISC3ST (Complejo de Fuentes Industriales de Corto Plazo) fue desarrollado originalmente con el objetivo de cumplir con los requerimientos de las regulaciones para el modelamiento de dispersión de USEPA. Es un modelo de antigua generación, y como tal carece de muchas de las capacidades de los modelos de nueva generación. En 1998, el USEPA recomendó el

ISC3ST para la evaluación de los efectos de corto rango (i.e. menos de 50 km) (USEPA 1998).

La adición del ISC3ST al algoritmo PRIME (Plume Rise Model Enhancement – Mejoramiento del Modelo de Elevación de la Pluma) ha brindado al modelo técnicas mejoradas para el manejo de los efectos de la estela. El nuevo modelo es llamado “ISC-PRIME”.

El único pre-procesador asociado con el ISC-PRIME es el PCRAMMET, un pre-procesador meteorológico. No existe un pre-procesador de terreno para este modelo. Si se considera un terreno complejo, se deberá proporcionar al modelo la elevación de cada receptor (USEPA 2003).

La exactitud del modelo ISC-PRIME se ha calculado en $\pm 10\%$ a $\pm 100\%$.

Base Matemática

Formulación y Capacidades Generales

El ISC-PRIME es un modelo de equilibrio y de línea recta. Las fuentes pueden estar representadas como puntos, volúmenes, áreas y tajos abiertos (MOE 2005). Las fuentes lineales pueden ser representadas tanto como “fuentes de áreas alargadas” o como “cadena de fuentes volumétricas”. El ISC-PRIME puede manejar múltiples fuentes y grupos de fuentes.

Los índices de emisión de las fuentes pueden ser constantes o variar por mes, estación u hora del día. Los índices de emisión variables de emisión pueden ser asignados a fuentes únicas o a grupos de fuentes.

El ISC-PRIME puede modelar depósitos húmedos/secos, así como valores de concentración. Algunas transformaciones químicas en la atmósfera también pueden ser modeladas a través de una función de descomposición.

Este modelo emplea un tratamiento muy simplista de los efectos del terreno complejo. El ISC-PRIME no puede modelar los efectos de línea costera.

Establecimiento de Parámetros de Dispersión

El ISC-PRIME es un modelo gaussiano, i.e., la dispersión de la pluma se basa en la distribución gaussiana.

La elevación de la pluma en este modelo se basa en el método Briggs (USEPA 2003). La velocidad del viento y la temperatura son tomadas en la parte superior de la chimenea. Se utiliza un gradiente vertical de temperatura en base a la clasificación de Pasquill-Guifford para la estabilidad atmosférica (USEPA 2003).

La deflexión del aire por edificios es evaluada para conocer las emisiones de puntos de fuente usando el algoritmo PRIME. También se incluye la deflexión del aire por la punta de la chimenea en el modelamiento de dispersión (USEPA 2003).

Los receptores para el modelamiento pueden ser descritos usando tanto coordenadas cartesianas como polares. Además, los receptores pueden ser definidos en cuadrículas o pueden ser discretos. Los receptores en cuadrícula son útiles para la

investigación de efectos potenciales sobre un área extensa, mientras que los receptores discretos pueden ser utilizados para investigar los impactos en un punto específico, e.g., una residencia identificada.

Entradas

Entrada General del Modelo

Se requieren las siguientes entradas de datos para ejecutar el ISC-PRIME:

1. Datos meteorológicos producidos a partir del preprocesador meteorológico PCRAMMET.
2. Datos digitales de la elevación del terreno, para situaciones que involucran terrenos complejos.
3. Información sobre la deflexión del aire por edificios producida por el BPIP-PRIME.
4. Información general del sitio enumerada como se indica en la introducción de la Sección 5.

Entradas de Datos Meteorológicos y Tratamiento de Datos

El preprocesador meteorológico PCRAMMET requiere que tanto los datos de superficie (incluyendo los datos precipitación para los cálculos de depositación húmeda) así como los datos de aire superior (i.e altura de combinación) generen datos meteorológicos por hora. Sin embargo, sólo “un nivel de datos” puede ser ingresado en el modelo de dispersión (USEPA 2003). Adicionalmente, los datos de la fuente serán utilizados para modelar la dispersión a lo largo de la pluma, en todas las distancias desde la chimenea (USEPA 2003). Los datos deberán ser horarios.

La velocidad del viento será “escalada” para la altura de la emisión usando las relaciones logarítmicas lineales.

La rugosidad de la superficie está definida como rural o urbana (USEPA 2003). Estas dos áreas tienen una rugosidad de superficie bastante diferente: las áreas urbanas presentarán muchos obstáculos para el flujo de viento estratificado, dando como resultado más turbulencia y efectos de estela, mientras que las áreas rurales generalmente presentarán una superficie más suave.

Sólo se evalúan seis clases de estabilidad para determinar la influencia sobre la dispersión. Las clases de estabilidad de Pasquill-Gifford son usadas para determinar los coeficientes de dispersión (USEPA 2003).

El ISC-PRIME establece parámetros para la capa límite planetaria en base a la velocidad del viento, altura de combinación y clase de estabilidad (USEPA 2003b). Éste es un enfoque muy simplista cuando se compara con los modelos de la siguiente generación.

La altura de mezcla se basa en el esquema de Holzworth. Este método interpola las alturas mínima y máxima de combinación para la mañana y la tarde, respectivamente, en base a las temperaturas observadas y al índice de lapso adiabático seco (USEPA 2003b). Este método de interpolación de alturas de combinación horaria tiene algunas deficiencias:

- La estructura vertical de la atmósfera se basa en observaciones de la superficie;
- El uso del índice de lapso adiabático seco puede no ser válido durante eventos de precipitación; y
- Durante un periodo de advección de aire frío, cuando las temperaturas de la tarde son bajas, el método de Holzworth establecerá la altura de combinación a nivel del suelo, cuando en realidad debería ser por encima del suelo, con una inversión sobre éste.

Este método no es tan exacto como los métodos empleados por los modelos más actuales (USEPA 2003b). La penetración de la pluma de la capa de inversión es igualmente 0% ó 100% y ninguno es muy realista.

El ISC-PRIME puede ejecutarse en modo urbano o rural, pero no en los dos a la vez (i.e. todas las fuentes deben ser de la misma categoría) (USEPA 2003b). Todas las áreas urbanas son tratadas idénticamente, e.g., no se hacen ajustes en base a la población (USEPA 2003b).

Salidas

Datos de Salida

El ISC-PRIME producirá salidas de datos de concentración y depositación húmeda/seca, en los periodos promediados especificados en el archivo de entrada.

QA/QC

No hay salidas de modelos específicamente diseñados para los propósitos de QA/QC.

5.6.2 AERMOD

El AERMOD fue desarrollado por la Sociedad Meteorológica Americana / Comité de Mejora del Modelo de Regulación de EPA, como un reemplazo para el modelo ISC3ST y está diseñado para aplicaciones de regulación a pequeña escala.

El algoritmo PRIME ha sido añadido al AERMOD, dándole al modelo técnicas mejoradas para el manejo de efectos de estela.

El AERMOD modela una pluma de emisiones bajo condiciones de estado estable (USEPA 2004).

Existen dos pre-procesadores asociados con el AERMOD: el AERMER y el AERMAP (MOE 2005). El programa AERMET es el pre-procesador meteorológico. Éste producirá dos archivos de entrada para el AERMOD (USEPA 2002):

- Un archivo que contiene “parámetros de escala de superficie” i.e. parámetros de capa límite de superficie; y
- Una archivo que contiene “perfiles verticales de los datos meteorológicos”, tales como la velocidad del viento, dirección del viento y turbulencia.

El AERMAP es el preprocesador del terreno (USEPA 2002). Con terrenos elevados el AERMOD requiere de una escala de altura de colina. El AERMAP proporcionará esta escala de altura (USEPA 2002) y elevaciones para todos los receptores. El preprocesador AERMAP utiliza datos de un Modelo Digital de Elevación (Digital Elevation Model – DEM) (USEPA 2003b).

Base Matemática

Formulación General y Capacidades

El AERMOD es un modelo de pluma en equilibrio (USEPA 2004).

Las fuentes pueden estar representadas como puntos, volúmenes o áreas (USEPA 2002). Las fuentes lineares pueden estar representadas como “fuentes superficiales alargadas” o como “cadenas de fuentes volumétricas” (USEPA 2002). El AERMOD puede manejar múltiples fuentes y grupos de fuentes (USEPA 2002). Además, el AERMOD tiene la capacidad de realizar análisis de fuentes de contribución (USEPA 2002). Esto puede utilizarse para determinar la contribución de fuentes individuales a la concentración global de contaminantes atribuida a un grupo de fuentes diversas (USEPA 2002).

Se especifican los índices de emisión para las fuentes modeladas. Estos índices pueden ser constantes o “variar por meses, estación, hora del día”...etc. (USEPA 2002). Se puede asignar índices variables de emisión a fuentes únicas o a grupos de fuentes (USEPA 2002). Cabe resaltar que sólo un contaminante puede ser modelado en una sola corrida de AERMOD. Si se requiere evaluar múltiples contaminantes, se requerirán múltiples corridas del AERMOD.

El modelamiento de dispersión puede ser realizado sobre varios periodos promedio diferentes. De hecho, se pueden evaluar múltiples periodos promedio en una sola corrida de modelo (USEPA 2002).

El AERMOD ha mejorado en funcionalidad respecto del ISC-PRIME en todo menos en un aspecto: no calcula los índices de depositación húmeda/seca (USEPA 2004).

El terreno complejo también puede ser considerado por el AERMOD. El tratamiento del terreno complejo se basa en el “concepto de divisorio de trayectoria de flujo” (MOE 2005). El comportamiento de la pluma que resulte de los efectos del terreno es un promedio compensado de los dos flujos discutidos anteriormente: Uno por encima del obstáculo, y otro alrededor de este (USEPA 2004). La compensación de cada uno de los flujos depende de los siguientes aspectos (USEPA 2004):

1. la estabilidad de la atmósfera (el concepto de divisorio de trayectoria de flujo sólo se aplica en atmósferas estables);
2. la velocidad del viento; y
3. la altura de la pluma sobre el suelo (no respecto al pie de la colina).

En atmósferas estables, el flujo horizontal alrededor del obstáculo es más pesado, mientras que en atmósferas neutras e inestables, la altura de la divisorio de trayectoria de flujo está al nivel del suelo (USEPA 2004).

La altura de la divisorio de trayectoria de flujo, H_d , es calculada por el AERMOD para cada receptor, en base a la “altura representativa de la influencia del terreno” o “escala de altura”, h_d , calculada para cada receptor por el AERMAP (USEPA 2004). Con este método, el AERMOD puede utilizar los mismos cálculos tanto para el terreno simple como para el complejo (USEPA 2004). Este método de cálculo de dispersión en terrenos complejos es superior al enfoque simplista tomado por el ISC-PRIME (MOE 2005).

El AERMOD no puede modelar efectos costeros debido a que no reproduce la fumigación de pluma (MOE 2005).

Establecimiento de Parámetros de Dispersión

El AERMOD es un modelo de dispersión en parte gaussiano. Se asume que la dispersión de la pluma sigue una distribución gaussiana, tanto en la dirección vertical como en la horizontal, bajo condiciones estables; pero bajo condiciones inestables sólo se asume que la distribución horizontal es gaussiana (USEPA 2004). Este tratamiento diferente es un medio para establecer los parámetros de los efectos de la corriente atmosférica ascendente y descendente sobre una pluma (USEPA 2004).

Los coeficientes de dispersión por sí solos no se basan en las Clases de Estabilidad Pasquill-Gifford con relación al modelo de ISC-PRIME. En el AERMOD, la dispersión es una función de parámetros de estabilidad y altura continuos. Los coeficientes de dispersión están compuestos de dos fuerzas de dispersión diferentes: turbulencia del ambiente y flotación de la pluma (USEPA 2004). Cada una de estas fuerzas producirá coeficientes individuales de dispersión, que luego son combinados según la siguiente ecuación (USEPA 2004):

$$\sigma_{y,z}^2 = \sigma_{ya,za}^2 + \sigma_b^2 \quad 5-12$$

Donde,

- $\sigma_{y,z}$ = coeficientes totales de dispersión en las direcciones horizontal y vertical;
- $\sigma_{ya,za}$ = coeficientes de dispersión en base a turbulencia en el ambiente en direcciones horizontal, vertical; y
- σ_b = coeficiente de dispersión en base a la flotación de la pluma.

La dispersión debida a la turbulencia en el ambiente depende en gran medida de altitud, con la mayor variación cerca de la superficie (USEPA 2004). El AERMOD toma en cuenta esta variabilidad (USEPA 2004).

La ecuación 5-12 se aplica a todas las dispersiones, tanto en las capas estables como en las de límite convectivo, excepto a las fuentes que penetran en la capa de límite convectivo (USEPA 2004). Asimismo, los efectos de estela de edificios no son considerados en esta formulación (USEPA 2004).

La deflexión del aire por edificios es evaluada para las emisiones de fuente puntual usando el algoritmo PRIME (MOE 2005). La deflexión del aire por la punta de la chimenea también se incluye en el modelamiento de dispersión (USEPA 2002).

La elevación de la pluma en el AERMOD se calcula de manera diferente dependiendo de la estabilidad de la atmósfera. En atmósferas inestables, la elevación de la pluma se base en el método Briggs y toma en cuenta tanto el momentum de la pluma como la flotación (USEPA 2004). Este cálculo considera el efecto de la corriente atmosférica ascendente y descendente sobre la elevación de la pluma (USEPA 2003). La siguiente ecuación se utiliza para calcular la elevación de la pluma, Δh (USEPA 2004):

$$\Delta h_d = \left(\frac{3F_m x}{\beta_1^2 u_p^2} + \frac{3}{2\beta_1^2} \cdot \frac{F_b x^2}{u_p^3} \right)^{1/3} \quad 5-13$$

donde,

- r_s = radio de la chimenea, ajustado para tomar en cuenta la deflexión del aire por la punta de la chimenea (m);
- β_1 = parámetro de arrastre 0,6;
- u_p = velocidad del viento a la altura de la chimenea ajustada para tomar en cuenta la deflexión del aire por la punta de la chimenea (m/s); y
- F_m = flujo del momentum de la chimenea (m^4/s^2), definido como:

$$F_m = \left(\frac{T}{T_s} \right) w_s^2 r_s^2 \quad 5-14$$

- donde, T = temperatura ambiente (K);
- T_s = temperatura de salida de la chimenea (K);
- w_s = velocidad de salida de la chimenea (m/s); y

F_b = flujo de flotación de la chimenea (m^4/s^3), definida como:

$$F_b = g w_s r_s^2 \left(\frac{\Delta T}{T_s} \right) \quad 5-15$$

- donde, g = aceleración debida a la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$); y
- ΔT = diferencia entre la temperatura de la salida de la chimenea y las temperaturas ambiente (K).

Para las plumas en la capa límite estable, la elevación de la pluma se calcula de una manera diferente. Esta diferencia se debe al hecho de que a medida que la pluma se eleva en una atmósfera estable, su ascenso relacionado con su entorno decae (USEPA 2004). La elevación de la pluma es dada como:

$$\Delta h_s(x_f) = 2.66 \left(\frac{F_b}{u_p N^2} \right)^{1/3} \quad 5-16$$

donde,

- N = Frecuencia de Brunt-Vaisala (s^{-1}).

Los receptores pueden ser especificados en coordenadas cartesianas o polares, como redes grilladas o como ubicaciones discretas (USEPA 2002). Si los receptores se ubican en terreno elevado, se requerirá el AERMAP para proporcionar los datos necesarios del terreno (USEPA 2002).

Entradas

Entradas Generales del Modelo

Las siguientes entradas de datos son necesarias para ejecutar el AERMOD (MOE 2005):

1. Datos meteorológicos producidos por el preprocesador meteorológico AERMET (dos archivos).
2. Datos de la elevación del Terreno producidos por el preprocesador del terreno AERMAP, para situaciones que involucren terrenos complejos.
3. Información de la deflexión del aire por edificios producida por el BPIP-PRIME.
4. Información general del sitio, como se detalla en la introducción de la Sección 5.0

Entradas de Datos Meteorológicos y Tratamiento de Datos

Para modelar la dispersión atmosférica, el AERMOD requiere dos archivos de entrada de datos meteorológicos, tal como se detallada la introducción del AERMOD. Los archivos meteorológicos son producidos por el AERMET, en una forma directamente compatible con el AERMOD (USEPA 2004). Las entradas de datos requeridos por el AERMET incluyen (USEPA 2004):

- Las características de la superficie: albedo, rugosidad, relación de Bowen; y
- Las observaciones meteorológicas: la velocidad del viento y dirección, temperatura, cobertura de nubes.

Estos requerimientos de datos pueden ser descritos de manera más general como datos de estación climática, datos del aire que se encuentra en la parte superior y datos del sitio. Dados estos datos, el AERMET calcula los siguientes parámetros describiendo la Capa Límite Atmosférica (USEPA 2004). Estos parámetros, junto con los datos atmosféricos, son pasados seguidamente al AERMOD (USEPA 2004).

- Velocidad de fricción;
- Longitud de Monin-Obukhov;
- Escala de velocidad convectiva;
- Escala de temperatura;
- Altura de combinación; y
- Flujo de calor de superficie.

Luego, estos parámetros son procesados adicionalmente en AERMOD para producir la información requerida por el modelamiento de dispersión (USEPA 2004). Específicamente, las siguientes variables son determinadas en base a “expresiones de similitud” y medidas:

- Gradiente de la velocidad del viento;
- Variaciones de turbulencia, horizontal y vertical;
- Gradiente de temperatura potencial¹⁵; y
- Temperatura potencial.

¹⁵ Ver glosario.

A pesar de haber producido estos perfiles verticales de parámetros meteorológicos, el AERMOD es un modelo de estado estacionario que calcula la dispersión en base a un solo valor de cualquier parámetro dado (USEPA 2004). Como tal, el AERMOD calcula los valores “efectivos” de la velocidad del viento, turbulencia horizontal y vertical, la gradiente potencial de temperatura y la escala de tiempo “Lagrangiana” (USEPA 2004). Los parámetros meteorológicos son promediados sobre la porción de la capa de interés que realmente contiene el material de pluma (i.e. el fondo de pluma puede estar por encima de la altura receptora) (USEPA 2004).

El cálculo de la altura de mezcla del AERMOD es considerado como superior al ISC-PRIME (USEPA 2003). El AERMOD toma en cuenta la contribución de las combinaciones mecánicas y convectivas en atmósferas inestables, mientras que sólo la combinación mecánica se aplica a las atmósferas estables (USEPA 2004). Mientras que el modelo cuenta con algoritmos para calcular estos valores, se prefiere el uso de las observaciones de altura de combinación si es que se encuentran disponibles (USEPA 2004).

Cuando tanto las combinaciones mecánicas como las convectivas se encuentran presentes, la más grande de las alturas de combinación es establecida como la Capa Límite Planetaria (USEPA 2004). La altura de combinación mecánica se puede calcular en base a la velocidad de fricción de la superficie, la Longitud Monin-Obukhov, y el parámetro Coriolis¹⁶

El AERMOD soporta la penetración parcial de la pluma en una capa de inversión (MOE 2005). Esta es una aproximación más realista que la penetración cero o completa descrita por el ISC-PRIME.

El AERMOD también incluye una representación más realista de las áreas urbanas. Los coeficientes de dispersión sobre un área urbana cambiarán debido al efecto de isla de calor de las grandes áreas construidas. El AERMOD utiliza la población de las áreas urbanas como un dato de entrada. Esto permite que la magnitud del efecto de isla de calor se coloque en una escala apropiada al tamaño de la ciudad. Además, mientras que el ISC-PRIME requiere que todas las fuentes tanto rurales como urbanas sean modeladas, el AERMOD permite que cada fuente sea definida ya sea como urbana o rural (USEPA 2003).

Salidas

Datos de Salida

EL AERMOD produce tres salidas generales (USEPA 2002):

- “resúmenes de valores altos... por receptor para cada periodo de integración y cada combinación de grupos de fuentes”;
- “resúmenes de todos los valores máximos...para cada periodo de integración y combinación de grupos de fuentes”; y
- tablas de valores concurrentes resumidos por receptor para cada periodo de integración y combinación de grupos de fuentes para cada día de datos procesados”.

Existen opciones disponibles para presentar los datos para receptores en términos de fuentes individuales o grupos de fuentes (USEPA 2002). Además, cuando se presentan valores máximos para las fuentes, el AERMOD puede presentar el valor

¹⁶ Ver la definición de parámetro Coriolis en el glosario.

máximo para una fuente o el valor para una fuente que contribuya al máximo total del grupo (USEPA 2002).

El AERMOD también puede generar tres archivos de salida que contienen información adicional (USEPA 2002).

- un archivo sin formato con datos de concentración que puede ser utilizado en las aplicaciones post-proceso;
- un archivo de coordenadas (x,y) y “valores de diseño” que puede ser utilizado para graficar los resultados del modelo; y
- un archivo que contiene una lista de todas las condiciones en las que la concentración modelada excede algunos valores predeterminados.

QA/QC

AERMOD también produce dos archivos que pueden ser útiles en la determinación de la precisión del modelo (USEPA 2002):

- Rangos de datos de concentración que, al ser combinados con las observaciones, pueden ser utilizados para producir un gráfico de percentiles para un análisis estadístico; y
- Un archivo conteniendo “resultados de máxima de arco” y las características de la pluma asociada”.

5.7 EXACTITUD DEL MODELO DE DISPERSIÓN

En comparación con otras disciplinas de la ingeniería y sus cálculos asociados, los errores asociados con el modelamiento de dispersión pueden ser relativamente mayores. La exactitud asociada con un modelo está usualmente determinada por la comparación de predicciones para una condición meteorológica dada con observaciones concurrentes de calidad de aire del ambiente. Existen muchas áreas en donde las incertidumbres pueden degradar las estadísticas del rendimiento del modelo.

Incertidumbre de la Elevación de la Pluma

Los modelos gaussianos de dispersión utilizan las ecuaciones de elevación de pluma de Briggs para predecir la elevación de una pluma flotante. Estas ecuaciones pueden predecir las verdaderas elevaciones de la pluma con un error de $\pm 20\%$.

Coefficientes de Dispersión

La mayoría de los modelos gaussianos utilizan modificaciones de los coeficientes de dispersión derivados experimentalmente por Pasquill en un área rural de terreno abierto de nivel mediano y para distancias de viaje de pluma relativamente moderadas. Estos coeficientes podrían tener un error de ± 25 por ciento, especialmente cuando son usados para terrenos complejos no nivelados y para grandes distancias de hasta 50 km o más. El mismo Pasquill ha propuesto una reexaminación de estos coeficientes y ha sugerido que sean revisados.

Períodos Promedios de Concentración

Existe la duda sobre qué periodo promedio de tiempo representa la concentración calculada a nivel de terreno cuando se utilizan los coeficientes de dispersión de Pasquill (i.e., 3 min a 10 min).

Muchos modelos de dispersión utilizados para fines regulatorios, asumen que la ecuación de dispersión gaussiana produce concentraciones promedio de 1 hora. Se puede ver que, asumiendo que los valores de concentración representan un promedio de 1 hora en lugar de un promedio de 10 minutos, éste constituye un factor de sobreestimación “inherente” de hasta 2,5.

Otras Suposiciones y Limitaciones

De la ecuación de dispersión gaussiana también se puede asumir lo siguiente:

- La velocidad y dirección del viento son constantes desde el punto fuente al receptor (para una velocidad de viento de 2 m/s y una distancia de 10 km, se requerirían 80 minutos de condiciones constantes).
- La turbulencia atmosférica también es constante a lo largo de la distancia de viaje de la pluma.
- Toda la pluma se conserva, lo que significa que no hay depositación o lavado de los componentes de la pluma; los componentes que alcanzan el suelo son reflejados de vuelta a la pluma; no hay componentes absorbidos por cuerpos de agua o por vegetación; y los componentes no son transformados químicamente. (Algunos modelos de dispersión más complejos se ajustan a la depositación y a la transformación química. Sin embargo, tales ajustes son separados de la ecuación básica de dispersión de gaussiana).
- Sólo ocurre dispersión vertical y de viento cruzado (i.e. no hay dispersión de deflexión del aire).
- El patrón de dispersión es probabilístico y puede ser descrito exactamente por una distribución gaussiana.
- La pluma se expande de forma cónica a medida que viaja hacia adelante, mientras que la “pluma cónica” ideal sólo es uno de los muchos comportamientos observados de la pluma.
- Las condiciones del terreno pueden ser ajustadas usando un juego de coeficientes para terreno rural y otro juego para terreno urbano. La ecuación básica de dispersión gaussiana no tiene como objetivo el manejo de los regímenes de terreno tales como los valles, montañas o líneas costeras.

La tarea más difícil para un modelo es poder predecir con exactitud las concentraciones de corto plazo (i.e promedio horario) para una condición meteorológica dada en un receptor en particular. Para este caso, la comparación entre observación y predicción se dice que es “adecuada en tiempo y en espacio”. Otras comparaciones sólo son adecuadas en espacio o en tiempo.

En resumen, los modelos de calidad de aire sólo pueden aproximarse a los procesos atmosféricos y se realizan simplificaciones para describir los fenómenos reales. Un mayor potencial para la mejora de las predicciones del modelo (minimizando errores reducibles) se puede lograr usando datos meteorológicos representativos y datos mejorados de inventarios de emisiones.

Interpretación de los Resultados

6. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

6.1 RENDIMIENTO DE LAS OPERACIONES AMBIENTALES

La evaluación del rendimiento ambiental de una operación involucra la identificación y cuantificación de los potenciales efectos ambientales de una operación específica y luego la comparación de dichos efectos con los estándares de la industria.

Por ejemplo, la cantidad total de óxidos de nitrógeno producidos por unidad de producción anual de la mina (e.g. g NO_x/t de mineral procesado) podría ser usada para comparar una operación específica de la mina con la industria minera en forma global.

El rendimiento ambiental de una operación también podría ser evaluado comparando sus emisiones con las guías de emisiones publicada por el Grupo del Banco Mundial (WBG 1995a, 1995b, 1998). Esto permitiría una comparación entre las operaciones de una instalación específica y los estándares de operación generalmente aceptados sobre una escala internacional. La Tabla 6-1 muestra un resumen de las guías del Grupo del Banco Mundial.

Tabla 6-1 Guía Internacional de Emisiones

Sector Industrial	PTS (mg/Nm ³)		SO _x as SO ₂ (mg/Nm ³)	NO _x (mg/Nm ³)		Metales (mg/Nm ³)	
Minería y Producción de Carbón	50						
Fundición de Cobre	Fundiciones:	20	1,000			Arsénico:	0,5
	Otros:	50				Cadmio:	0,05
						Cobre:	1
						Plomo:	0,2
						Mercurio:	0,05
Fundición de Cobre y Zinc	20		400			Arsénico:	0,1
						Cadmio:	0,05
						Cobre:	0,5
						Mercurio:	0,05
						Plomo:	0,5
						Zinc:	1
Minería y Molienda – tajo abierto ^a	100 µg/m ^{3b}	500 µg/m ^{3c}	100 µg/m ^{3b}	100 µg/m ^{3b}	200 µg/m ^{3c}		
Minería y Molienda – subterránea ^a	100 µg/m ^{3b}	500 µg/m ^{3c}	100 µg/m ^{3b}	100 µg/m ^{3b}	200 µg/m ^{3c}		
Guías Ambientales Generales			2,000	Carbón:	750	PTS:	50 si ≥ 50MWe
				Petróleo:	460		100 si < 50MWe
				Gas:	320	Dioxina:	2,3,7,8-TCSS: :equivalente): máximo de 1 ng/Nm ³

Fuente: WBG 1995a, 1995b, 1998

^a Fuera de la propiedad; PM₁₀, NO_x como NO₂.

^b Media aritmética anual.

^c Máximo de 24-horas en promedio.

Interpretación de los Resultados

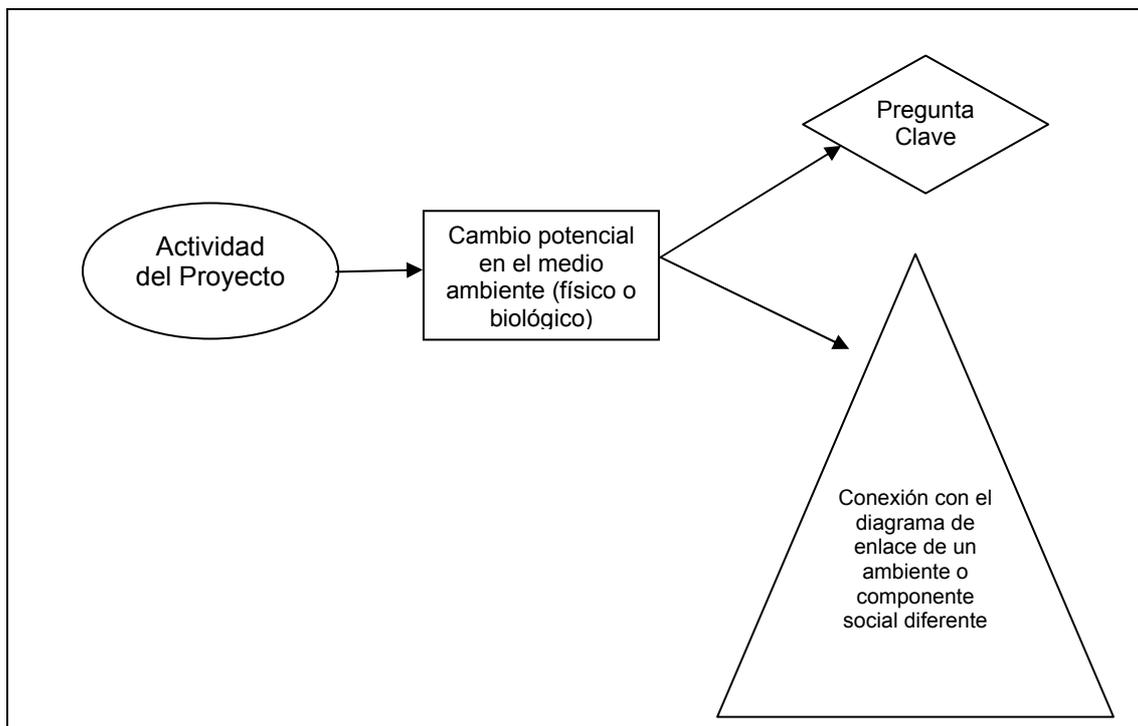
Además, la IFC (WBG 1995a) presenta una lista de las medidas que deben ser adoptadas para reducir las emisiones fugitivas de material particulado de las operaciones de minería subterránea. Se podría evaluar una operación específica en base a si cumple o no con estos criterios de la IFC.

6.2 MÉTODOS DE EVALUACIÓN DEL IMPACTO

El propósito de desarrollar un inventario de emisiones y de analizar el comportamiento de esas emisiones a través del modelamiento de la dispersión es evaluar los potenciales impactos de una operación. Los impactos potenciales del proyecto tienen que ser cuantificados para que cualquier efecto adverso en la salud humana o el ambiente pueda ser mitigado. Los impactos deben ser evaluados sobre un área espacial definida y por un periodo de tiempo razonable.

Un método común para ilustrar los impactos potenciales de las actividades del proyecto es mediante el uso de diagramas de enlace. Los diagramas de vinculación muestran las conexiones potenciales entre las actividades del proyecto y los impactos ambientales. Una clave para el uso de los diagramas de articulación se muestra en la Figura 6-1.

Figura 6-1 Clave para el Uso de Diagramas de Enlace



La actividad del proyecto se refiere típicamente a un estado del proyecto, por ejemplo: construcción, operación, cierre. Además, como actividades del proyecto, también se podrían incluir los proyectos existentes o aquellos que tiene aprobación para iniciar su construcción/operación. Mientras que las emisiones de estas actividades no están directamente relacionadas con la operación en evaluación, las emisiones de cualquier operación no pueden ser evaluadas en forma aislada. La pregunta clave se refiere a un método estándar de evaluación de impacto. Se plantea una serie de preguntas significativas (p.e., ¿El proyecto afectará negativamente la calidad del aire?, la que

Interpretación de los Resultados

será respondida con los resultados de la evaluación. El diagrama de enlace muestra que el potencial cambio ambiental causado por la actividad del proyecto debe ser tomado en cuenta al momento de responder la pregunta clave. Los vínculos a otros diagramas de enlace muestran los efectos de rangos de cambio potencialmente grandes en el ambiente. De manera alternativa, si las conexiones son vinculadas a la pregunta clave, estas ilustran los diferentes componentes que se ven afectados por la respuesta a la pregunta (e.g., una disminución de la calidad del aire podría afectar la salud de las personas, vegetación y la salud de la vida animal; ver Figura 6-2).

Figura 6-2 Diagrama de Enlace para Calidad de Aire

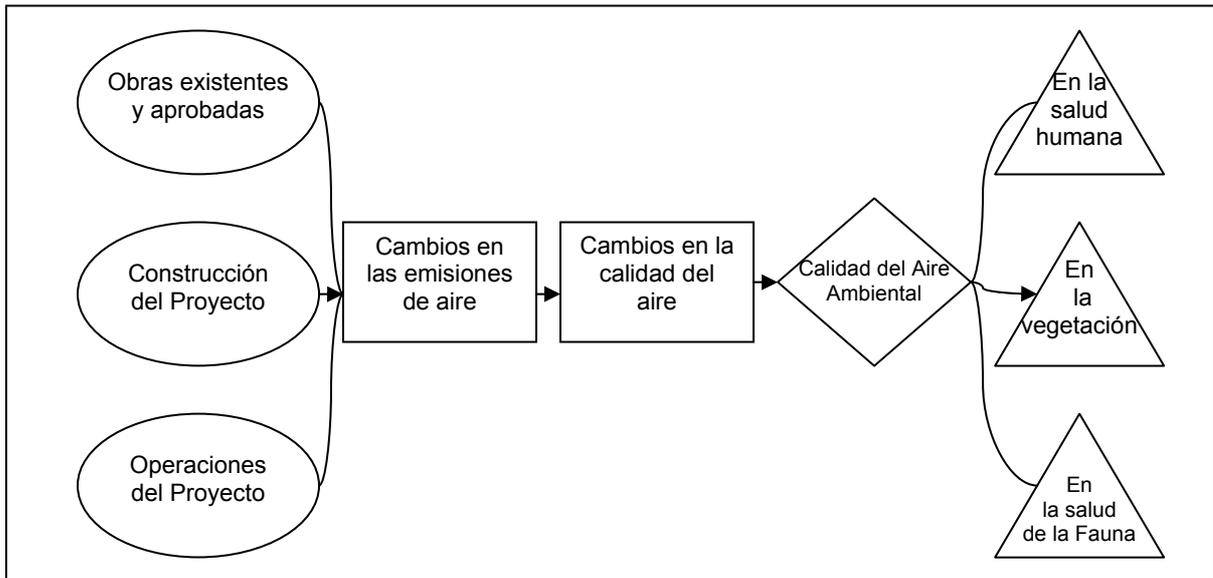


Figura 6-3 Diagrama de Enlace para la Depositación de Ácido

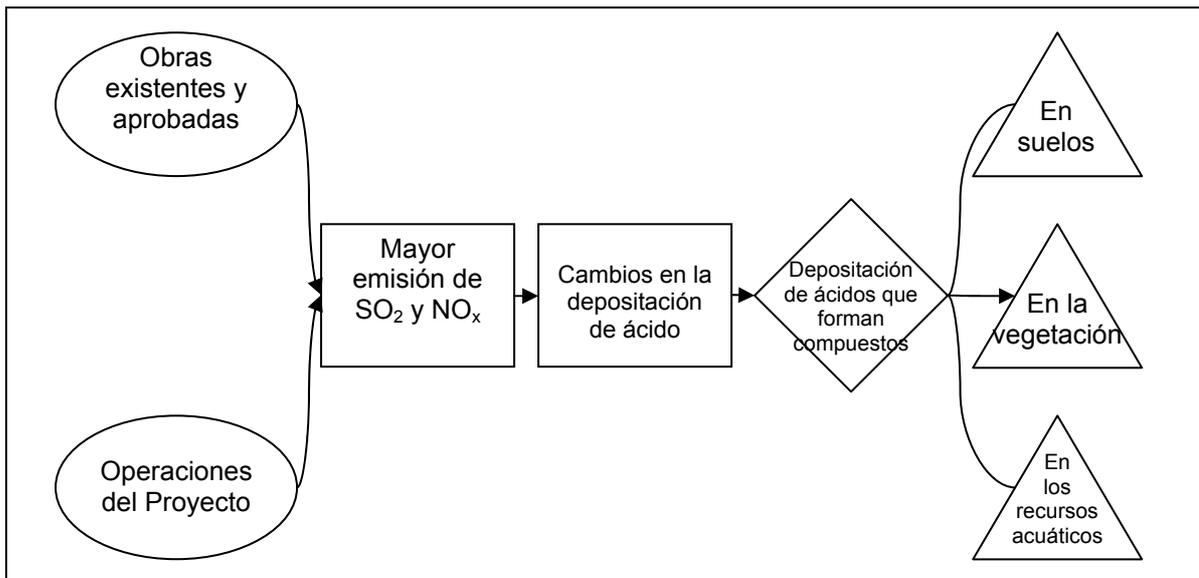


Figura 6-4 Diagrama de Enlace para el Ozono

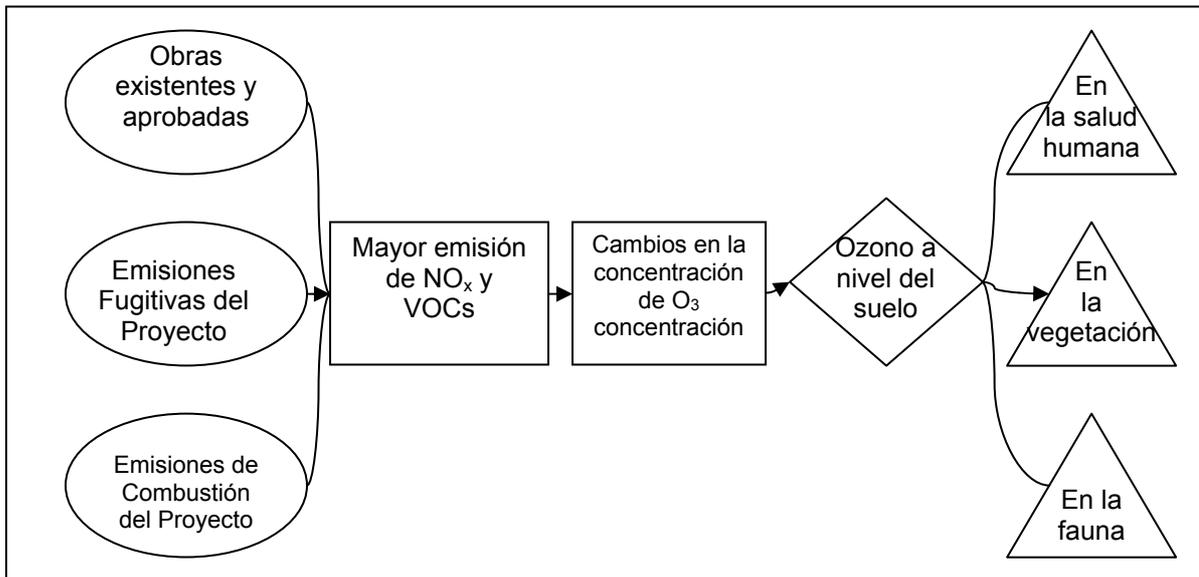
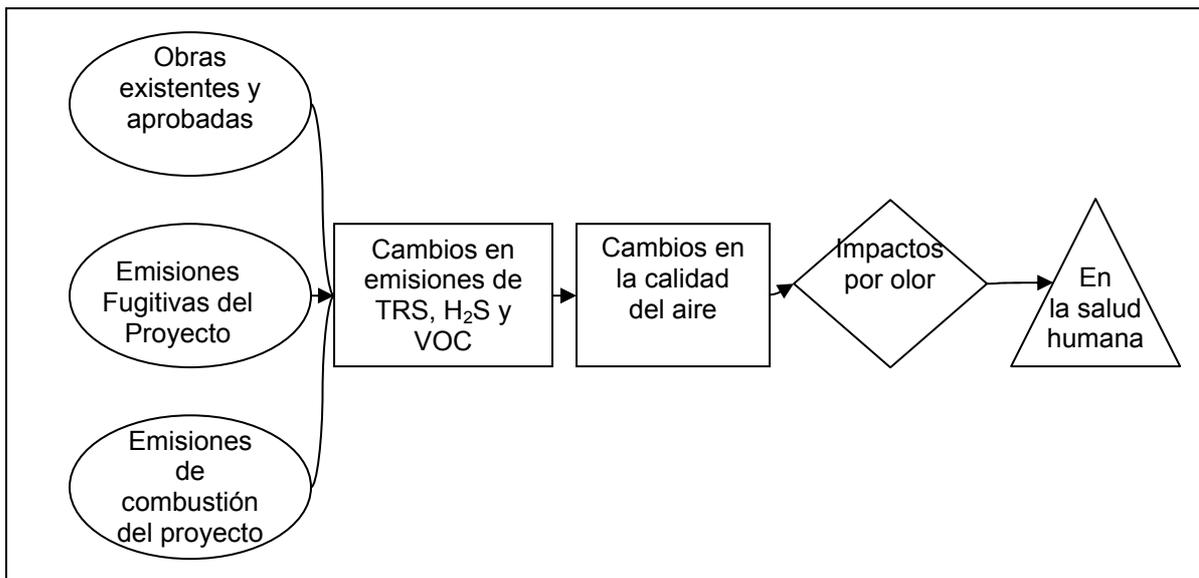


Figura 6-5 Diagrama de Enlace para el Olor



A continuación se presenta un diagrama de enlace que ilustra los efectos potenciales de las emisiones atmosféricas de las operaciones mineras. Como se puede observar, los efectos potenciales de las emisiones de la operación sobre la calidad del aire deben ser evaluados en términos de impactos principales en la salud humana, vegetación y vida animal.

Específicamente, el incremento de emisiones de dióxido de azufre y óxido de nitrógeno en una región pueden causar un incremento en la depositación de ácido (e.g., lluvia ácida). Esto puede afectar en forma negativa a los suelos, la vegetación y los recursos acuáticos)

Interpretación de los Resultados

Las emisiones de óxido de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles pueden contribuir a la formación de ozono a nivel del suelo (O_3), lo que posteriormente puede generar smog. El ozono a nivel del suelo puede tener impactos en la salud de la vida animal, salud humana y en la vegetación.

Otro aspecto a ser considerado son las emisiones de sulfuro (e.g., H_2S) y compuestos orgánicos volátiles (VOC) y los potenciales impactos de olores que puedan tener en la salud humana.

El principal método para evaluar el impacto de una operación es comparando los índices máximos de emisiones contaminantes de la operación y las máximas concentraciones pronosticadas en receptores identificados (determinadas a través del modelamiento de dispersión) con las guías publicadas de emisión y exposición.

Se puede realizar un análisis más detallado evaluando hasta qué punto las concentraciones pronosticadas de la operación cumplen con las guías: Por ejemplo, si la concentración pronosticada es sólo 10% del valor de que se indica en la guía, entonces el impacto puede ser identificado como insignificante (Tabla 6-2).

Tabla 6-2 Muestra de Magnitudes del Impacto

Relación entre la concentración pronosticada y el valor de la guía (R)	Magnitud del Impacto
$R \leq 0,10$	Insignificante
$0.10 < R \leq 0,50$	Bajo
$0.50 < R \leq 1,00$	Moderado
$R > 1,00$	Alto

Si se pronostica que una operación va a exceder cualquiera de estas guías, se deben tomar medidas para mitigar el problema, e.g. a través de la instalación de dispositivos de control de contaminación o cambios de procesos. Se aplica lo mismo si la suma de las emisiones de esta operación con las emisiones de operaciones existentes origina que se excedan los niveles de las guías.

Los efectos potenciales de cualquier operación específica no deben ser considerados aisladamente. Todos los anteriores diagramas de enlace incluyen actividades de proyectos asociados con desarrollos existentes y aprobados. En las regiones con múltiples operaciones que se dan simultáneamente, la contribución de cada operación debe ser evaluada. Los impactos acumulados de múltiples operaciones pueden ser significativa-mente más graves que los impactos aislados de cada operación.

Una forma de evaluar la contribución que pueda tener una sola operación en una cuenca atmosférica es comparando el índice de emisión de cada contaminante de la operación con el total de índices de emisiones de las operaciones existentes.

7. EJEMPLOS

En esta sección se desarrolla la evaluación de un ejemplo, una operación minera ficticia. El ejemplo se desarrolla en pasos, como si fuera una evaluación real:

- se identificarán los objetivos de la evaluación, se especificará la operación que será evaluada, y se preparará una descripción general del método de evaluación;
- se preparará el inventario de emisiones;
- modelo de dispersión; e
- interpretación de los resultados.

El foco de la evaluación será las emisiones de material particulado.

7.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo del estudio es evaluar los impactos potenciales en la calidad de aire de un proyecto de mina de oro.

La operación propuesta (El Proyecto) procesará 3 millones de toneladas de mineral de oro anualmente. Habrá una concentradora en el sitio para procesar el oro recuperado. El proyecto producirá cuatro (4) toneladas de oro por año. Para cumplir con estos objetivos de producción, el Proyecto contará con:

- Una mina a tajo abierto que cubre un área de 4 ha (40 000 m²);
- Una (1) concentradora;
- Una (1) chancadora;
- Una (1) pila de material en la chancadora; y
- Rutas de acarreo y de acceso.

(Nota: En este ejemplo no se han considerado todas las fuentes de emisión que se asocian normalmente a una mina).

El Proyecto se ubicará al sur del Perú, en el lado oriental de la Cordillera de los Andes. El terreno adyacente es montañoso y tendrá por lo tanto un impacto significativo en la dispersión de las emisiones.

Los impactos potenciales del Proyecto en la calidad del aire serán evaluados a través de la preparación de un inventario de emisiones y el uso de un modelo de dispersión. Las emisiones de cada actividad de la mina serán estimadas usando diversas técnicas ampliamente aceptadas. Estos valores de emisiones serán los valores de entrada de AERMOD-PRIME, junto con los datos de meteorología y datos topográficos, para predecir las concentraciones de contaminantes máximas que pudiesen resultar de las operaciones del Proyecto.

7.2 INVENTARIO DE EMISIONES

Las emisiones potenciales de cada fuente deben ser estimadas usando técnicas reconocidas. A modo de ejemplo, se proporcionarán los cálculos para cada una de las fuentes mencionadas. El inventario de emisiones debe incluir las emisiones de las

actividades mineras y las emisiones fugitivas. Las emisiones de material particulado pueden producirse durante la fase de operación desde las siguientes fuentes:

- Voladura;
- Chancado;
- Manipuleo de material;
- Erosión eólica de las pilas de material;
- Polvo fugitivo de los accesos; y
- Concentración.

(Nota: Para los fines de este ejemplo, sólo se evaluará las emisiones de material particulado. Además, sólo se han considerado las emisiones de la fase de operación; en el caso de evaluaciones reales debe considerarse la fase de desarrollo y construcción).

7.2.1 Antecedentes

Las tasas de emisión están directamente relacionadas con un parámetro operacional o a una tasa de utilización de producción máxima, tal como fue proporcionada. En los casos en que no se contaban con valores de ciertos parámetros, se utilizaron valores estimados. Cada tasa de emisión fue estimada usando una o más de las siguientes técnicas de estimación de emisión:

- Factores de emisión publicados; y
- Estimaciones de ingeniería basadas en condiciones operacionales, datos de la literatura y datos físicos.

Para la evaluación de emisiones de la mina se utilizaron los factores de emisión de la USEPA (1995) y el Inventario Nacional de Contaminantes de Australia (NPI 2003).

7.2.2 Descripción del Proyecto

El mineral de oro será extraído a tajo abierto. Aproximadamente 8 800 t/d de mineral será transportado por camiones desde el tajo hasta la pila de material de la chancadora. La chancadora será alimentada por un cargador frontal usando el mineral de esta pila. El mineral chancado será conducido a la planta de molienda. La alimentación de la molienda es de aproximadamente 8200 t/d. La salida del aire será conducida hacia filtros de manga de alta eficiencia, las cuales pueden capturar el 99.7% de las emisiones de partículas.

Las fuentes de emisión incluidas en el modelo de dispersión AEROMOD se presentan en la Tabla 7-1.

Tabla 7-1 Actividades Operacionales de la Mina

Actividad
Voladura
Chancado Primario
Manipuleo de material
Erosión eólica en el área relaves
Polvo fugitivo de los caminos
Molienda seca

(Nota: El proceso ha sido simplificado para los fines de este ejercicio. No todas las emisiones han sido incluidas, e.g., transporte y botaderos de desmonte).

7.2.3 Estimación de las Emisiones

Las secciones siguientes detallan los métodos utilizados para calcular las emisiones de cada una de las fuentes de la mina. Dichas emisiones fueron calculadas en términos de PTS, PM₁₀; y PM_{2,5}.¹⁷.

Molienda Seca

La Planta de Molienda tratará 8200 t/d (3 000 000 t/a). El polvo generado por la molienda seca será controlado por filtros de manga que capturan el 99,7% de las emisiones de material particulado. La eficacia de captura de polvo de los filtros de mangas (filtros de tela) es superior al 99% y depende de varios factores, incluyendo la carga de entrada y el tamaño de las partículas. El documento AP 42 (USEPA 1995), sugiere que las emisiones se pueden reducir a menos de 0,05 gramos por metro cúbico seco estándar (g/dscm) con un promedio de 0,015 g/dscm.

Las estimaciones de tasas de emisión de material particulado (PTS, PM₁₀, PM_{2,5}) se basan en información del proceso y la Sección 11-24 Factores de Emisión del Procesamiento de Minerales Metálicos de la AP 42. La Ecuación 7-1, es la ecuación general que se usa para la estimación de tasas de emisión con factores de emisión de molienda seca.

$$E_i = EF_i \times A \times \left(1 - \frac{CE_i}{100}\right) \times CF \quad 7-1$$

Donde:

- E_i = tasa de emisión de la i -ésima sustancia, [g/s];
- EF_i = factor de emisión descontrolada del i -ésimo contaminante [kg/t];
- A = tasa de actividad [t/a];
- CE_i = eficiencia de control global del i -ésimo contaminante [%];
- CF = factor de conversión

El siguiente es el cálculo del material particulado. El factor de emisión (EF_i) es el valor de la AP 42 para “Molienda seca con conducción de aire y/o clasificación del aire” y 3 000 000 t/a es la cantidad de mineral que el Proyecto procesará.

$$E_{PM} = 14,4 \frac{\text{kg}}{\text{t}} \times 3,000,000 \frac{\text{t}}{\text{a}} \times (1 - 99,7\%) \times 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \times \frac{1 \text{ a}}{365 \text{ d}} \times \frac{1 \text{ d}}{24 \text{ h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3,600 \text{ s}}$$

$$E_{PM} = 4,1 \text{ g/s}$$

La emisión de material particulado mostrado arriba es posteriormente distribuida equitativamente entre dos (2) chimeneas, dando una tasa de emisión de 2,05 g/s.

¹⁷ Ver glosario.

Ejemplos

Dado que el flujo volumétrico de cada chimenea es $106 \text{ m}^3/\text{s}$ a 373 K , el resultado es una concentración de salida de chimenea de $0,019 \text{ g/m}^3$. Esta corresponde a un flujo de $0,025 \text{ g/m}^3$ a 20 °C , lo cual excede el límite aceptable de $0,023 \text{ g/m}^3$. El 99.7 % de eficiencia de los filtros de manga se aplicará a todos los tamaños del material particulado. La eficiencia cambia la distribución del tamaño de partículas, siendo más ineficiente con los tamaños pequeños. Para este ejercicio se asume que la eficiencia es constante.

Contaminante	Factor de Emisión (kg/t) ^a	Tasa Total de Emisión (g/s)	Tasa Única de Emisión de Chimenea (g/s)
PTS	14,4	4,1	2,05
PM ₁₀	13	3,7	1,85
PM _{2,5}	6,5	1,85	0,93

^a Se supone que el factor de emisión PM_{2,5} corresponde al 50% del factor de emisión PM₁₀.

Voladura

Las emisiones fugitivas de polvo de voladura se basaron en los factores de emisión de material particulado de la Sección 4.4.1 del Manual Técnico de Estimación de Emisiones para Minería del NPI Australiano (NPI 2003). Los factores de emisión fueron calculados usando la siguiente ecuación:

$$EF_i = k \times \frac{344 \times A^{0,8}}{M^{1,9} \times D^{1,8}} \quad 7-2$$

donde:

- EF_i = factor de emisión no controlada del i-ésimo contaminante [kg/disparo];
- k = factor del tamaño de partícula [adimensional];
- A = área disparada [m^2];
- M = contenido de humedad del material [%]; y
- D = profundidad de los barrenos [m].

Las voladuras tienen lugar una vez por día en el área del tajo. Cada voladura tiene un área horizontal de 8000 m^2 y taladros de 15 m . El contenido de humedad del material es 5% . El siguiente es un cálculo de muestra del factor de emisión del material particulado.

$$EF_{PM} = 1 \times \frac{344 \times (8000 \text{ m})^{0,8}}{(5\%)^{1,9} \times (15 \text{ m})^{1,8}} \quad 7-3$$

$$EF_{PM} = 164 \frac{\text{kg}}{\text{voladura}}$$

Se ha estimado la duración de cada disparo en 15 segundos. El factor de emisión es convertido a gramos por metro cuadrado por segundo de tasa de emisión de acuerdo a la Ecuación 7-4.

Ejemplos

$$E_i = EF_i \times \frac{CF}{A} \quad 7-4$$

donde:

- E_i = tasa de emisión de la i-ésima sustancia [g/s];
- EF_i = factor de emisión descontrolada del i-ésimo contaminante [kg/disparo];
- N = número de disparos por año [disparos/a];
- CF = factor de conversión; y
- A = área total [m²].

El siguiente es el cálculo para la tasa de emisión promedio anual de material particulado de la voladura:

$$E_{PM} = 164 \frac{\text{kg}}{\text{disparo}} \times 365 \frac{\text{disparos}}{\text{año}} \times \frac{1 \text{ a}}{365 \text{ d}} \times \frac{1 \text{ d}}{24 \text{ h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \times 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \quad 7-5$$

$$E_{PM} = 1,9 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

Tabla 7-2 Emisiones por Voladura

	Factor de Emisión (kg/voladura)	Multiplicador del Tamaño de Partícula	Tasa de Emisión (g/s)
PTS	164	1	1,9
PM ₁₀ ^a	85	0,52	0,98
PM _{2,5} ^b	4,9	0,03	0,057

^a NPI 2003

^b AP 42, Sección 11.9 Industria de Productos Minerales (USEPA 1995).

Erosión Eólica

Las emisiones de polvo pueden producirse por el viento que sopla sobre pilas de almacenamiento expuestas y que contienen material fino (el desmonte, por ejemplo, no emitirá cantidades significativas de polvo por de erosión). En el Proyecto existe una pila de almacenamiento de ese tipo. Se asumió que no se aplicarán medidas de control en la pila de almacenamiento. Los factores de emisión de material particulado fueron calculados usando un método estadístico y ecuaciones del AP 42, Sección 13.2.5 Erosión Eólica en la Industria. El método estadístico se ha diseñado para considerar el hecho que la erosión eólica sólo ocurrirá bajo condiciones específicas; e.g., cuando las velocidades del viento son altas.

Primero se establecieron series de clases de velocidades de viento basadas en la máxima velocidad del viento durante el periodo de estudio. Estas clases son similares a definir una distribución de velocidad de viento. Las clases de velocidad de viento se muestran en la Tabla 7-3.

El segundo paso fue calcular la velocidad de fricción (u^*) asociada con la “milla más rápida” para cada clasificación del viento. Un ejemplo del cálculo se muestra a continuación. Todos los valores de velocidades son mostrados en la Tabla 7-3.

Ejemplos

$$u^* = 1,24 \times 0,053 \times u \quad 7-6$$

donde:

u^* = velocidad de fricción [m/s];

u = velocidad del viento [m/s];

$$\begin{aligned} u^* &= (1,24)(0,053)(20,0 \text{ m/s}); \text{ y} \\ &= 1,31 \text{ m/s.} \end{aligned}$$

Tercero, para cada velocidad de fricción que excedió la velocidad umbral de fricción, se calculó la erosión potencial usando la ecuación 7-7. Se escogió un valor de 1,12 m/s (NPI 2003) como velocidad umbral de fricción para el material de la pila¹⁸.

$$P = 58(u^* - u_t^*)^2 + 25(u^* - u_t^*) \quad 7-7$$

donde:

P = erosión potencial de la superficie [g/m²];

u^* = velocidad de fricción [m/s]; y

u_t^* = velocidad umbral de fricción [m/s].

Usando la ecuación 7-6, el potencial de erosión se calculó como sigue:

$$\begin{aligned} P &= 58 \left(1,3144 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 1,12 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 + 25 \left(1,3144 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 1,12 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \\ P &= 7,05 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} \end{aligned}$$

Cuarto, cada potencial de erosión en unidades de g/(m²/h) se escala para considerar el porcentaje de la pila que es activa; luego es convertido a una base de segundo. Un ejemplo de cálculo se muestra a continuación:

$$ER = P \times \frac{A_A}{A_T} \times \frac{1\text{hr}}{3600\text{s}} \quad 7-8$$

donde,

ER = Tasa de emisiones [g/(m²s)];

P = Potencial de erosión [g/(m²/h)];

A_A = área active de la pila [m²]; y

A_T = área total de la pila [m²].

Quinto, se dividió cada tasa de emisión calculada (como se muestra en la Tabla 7-3) por la tasa de emisión máxima para obtener el factor de emisión. Estos factores de emisión pueden ser ingresadas directamente en AERMOD donde se escalarán las

¹⁸ Esta velocidad de fricción corresponde a la pila de carbón sin costra y se usó por motivos ilustrativos.

Ejemplos

emisiones desde la pila, en base a la velocidad del viento. Así, por ejemplo, cuando la velocidad del viento es mayor que 19 m/s pero menor o igual a 20 m/s, la tasa de emisión de esta fuente será sólo 59% del valor máximo calculado.

Tabla 7-3 Análisis Estadístico de Erosión Eólica

Categoría velocidad de viento	Velocidad de fricción [m/s]	Erosión Potencial [g/(m ² h)]	Tasa de emisión [g/(m ² s)]	Factor de emisión
0 – 10	0,26	0,00	0,00	0,00
10 – 15	0,66	0,00	0,00	0,00
15 – 18	0,99	0,00	0,00	0,00
18 – 19	1,18	1,80	$1,75 \times 10^{-4}$	0,26
19 – 20	1,25	4,18	$4,06 \times 10^{-4}$	0,59
>20 ^a	1,31	7,05	$6,85 \times 10^{-4}$	1,00

^a A todas las velocidades de viento mayores a 20 m/s se le asignará la tasa de emisión máxima calculada.

Caminos sin Pavimento

El tránsito vehicular a lo largo de los caminos sin pavimento hace que por acción mecánica del rodar de los neumáticos y las turbulencias del viento se lance al aire material particulado. Las emisiones de material particulado son afectadas por el peso de los vehículos y el contenido de limo de la superficie del camino. Se usó la Sección 13.2.2 Caminos sin Pavimento de la AP-42 (USEPA 1995) para el cálculo de los factores de emisión de material particulado.

$$EF_i = CF_1 k \times \left(\frac{s}{12}\right)^a \times \left(\frac{W}{3}\right)^b \times CF \quad 7-9$$

donde:

- EF_i = factor de emisión [kg/VKT];
- CF_1 = factor de conversión = 281,9 kg/VKT por lb/VMT;
- k, a, b = constantes empíricas;
- s = contenido de limo del material de superficie [%];
- W = peso promedio de los vehículos que transitan por el camino [t];
- CF = factor de conversión = 1 kg/1000 g; y
- VKT = kilómetros viajados por el camino.

En el Proyecto el contenido de limo en la superficie de camino es aproximadamente de 10%. Sólo los camiones pesados han sido considerados en esta evaluación. Como vehículos pesados se han considerado los camiones de acarreo de mineral que pesan 143 toneladas vacíos y 354 toneladas a máxima carga. La ecuación de la USEPA para factores de emisión de polvo de caminos no pavimentados no se usa para calcular un factor de emisión específicos para clases de vehículos basadas en peso. La ecuación se usa para calcular el factor de emisión de una “flota promedio”. Por esta razón, las emisiones de los camiones pesados se calcularon usando un peso promedio de 248,7 toneladas. El siguiente es un ejemplo de cálculo para factores de emisión de polvo de caminos para el tráfico de vehículos pesados.

Ejemplos

$$EF_{PM} = 281,9 \frac{\text{g}}{\text{VKT}} \times 4,9 \times \left(\frac{10\%}{12}\right)^{0,7} \times \left(\frac{248,7 \text{ ton}}{3}\right)^{0,45} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \quad 7-10$$

$$EF_{PM} = 8,88 \frac{\text{kg}}{\text{VKT}}$$

Los factores de emisión se multiplicaron por la distancia recorrida, la eficiencia del control del contaminante y los factores de conversión. La tasa de emisión para el camino es entonces distribuida de manera homogénea en un número determinado de segmentos de camino. La fórmula se presenta a continuación.

$$E_i = EF_i \times D_t \times \left(1 - \frac{CE_i}{100}\right) \times \frac{CF}{S} \quad 7-11$$

Donde:

- E_i = tasa de emisión de la i -ésima sustancia [g/s];
- EF_i = factor de emisión [kg/VKT];
- D_t = distancia anual viajada [km/a];
- CE_i = eficiencia global de control del i -ésimo contaminante;
- CF = factores de conversión; y
- S = número de segmentos del camino.

La distancia anual recorrida fue calculada de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$D_t = M \times C \times D_i \times CF \quad 7-12$$

Donde:

- D_i = distancia anual viajada [km/año];
- M = cantidad anual de material transportado [Mt/a];
- D_i = distancia del viaje [km/viaje];
- C = capacidad del camión [t/camión]; y
- CF = factor de conversión.

El siguiente es un cálculo de la distancia anual recorrida en el Proyecto:

$$D_t = 3 \frac{\text{Mt}}{\text{año}} \times \frac{1 \text{ camión}}{232 \text{ t}} \times 1058 \frac{\text{m}}{\text{viaje}} \times \frac{1\,000\,000 \text{ t}}{1 \text{ Mt}} \times \frac{1 \text{ km}}{1000 \text{ m}} \times 2 \text{ viajes} \quad 7-13$$

$$D_t = 27\,362 \frac{\text{km}}{\text{año}}$$

La información presentada arriba se usa con la Ecuación 7-13 para calcular la tasa de emisión de PTS horaria de caminos no pavimentados para vehículos pesados como sigue:

Ejemplos

$$E_{PM} = 8,9 \frac{\text{kg}}{\text{VKT}} \times 27\,362 \frac{\text{km}}{\text{año}} \times \left(1 - \frac{75}{100}\right) \times \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ d}} \times \frac{1 \text{ d}}{24 \text{ h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \times 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \div 19 \text{ segmentos}$$

$$E_{PM} = 0,10 \frac{\text{g/s}}{\text{segmento}}$$

La Tabla 7-4 resume los factores de emisión, tasas de emisión y el número de segmentos para la ruta. Como sugiere Watson y Chow (2000), las emisiones de polvo de caminos pueden reducirse en 75%, reflejando la rápida deposición del polvo generado por el vehículo. Si bien el trabajo hecho por Watson y Chow es principalmente para polvo urbano y específicamente PM_{10} , una vez que la partícula ha sido expelida al aire, la física que actúa sobre la partícula (e.g., fuerzas gravitacionales) es la misma en la situación urbana o en el camino de acarreo de la mina. Adicionalmente las medidas de mitigación de generación de polvo como humedecimiento de los caminos para la supresión de polvo durante los períodos secos, no han sido incluidas.

Tabla 7-4 Factores y Tasas de Emisión y Segmentos

ID de la Fuente	Distancia Anual Recorrida (km/año)	Número de Segmentos	Factor de Emisión (kg/VKT)			Tasa de Emisión (g/s/segmento)			Emisión Total Anual por Camino (Toneladas/año)		
			PTS	PM_{10}	$PM_{2,5}$	PTS	PM_{10}	$PM_{2,5}$	PTS	PM_{10}	$PM_{2,5}$
LINE1	54 698	19	8,9	2,6	0,4	0,10	0,030	0,0046	61	18	2,7

Operaciones en el Chancador Primario

El Proyecto tendrá una operación de chancado, procesando material proveniente del tajo abierto. Se usaron los factores de emisión del AP 42 Sección 11.24 Procesamiento de Minerales Metálicos (USEPA 1995) y la Ecuación 7-1 para estimar las emisiones de material particulado del chancado.

Con frecuencia, las emisiones de la chancadora primaria y las operaciones relacionadas, son conducidas a través de un ducto a un sistema de control simple, como un depurador húmedo o un filtro de manga. La eficacia del control de emisiones puede variar desde 70% en un depurador a 95% o más en un filtro de manga. Para controlar las emisiones se usará un filtro de manga, estimándose un control de eficacia razonable del 85% (Barrick 2004) para las operaciones de la chancadora primaria.

El siguiente es el cálculo para el promedio anual de la tasa de emisión de material particulado:

$$E_{PM} = 0,2 \frac{\text{kg}}{\text{Mg}} \times 3\,000\,000 \frac{\text{Mg}}{\text{año}} \times \left(1 - \frac{85}{100}\right) \times 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \times \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ d}} \times \frac{1 \text{ d}}{24 \text{ h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}$$

$$E_{PM} = 2,85 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

Contaminante	Factor de Producción (ton/año)	Factor de Emisión (kg/Mg)	Tasa de Emisión (g/s)	Emisión Anual (ton/año)
PTS	3 000 000	0,2	2,85	90
PM_{10}	3 000 000	0,02	0,285	9
$PM_{2,5}$	3 000 000	0,01	0,143	4,5

7.3 MODELO DE DISPERSIÓN

Se eligió AERMOD-PRIME para el modelamiento de dispersión de este ejercicio porque posee la habilidad de manejar terrenos complejos elevados, tales como los que rodean al Proyecto. El modelo predice concentraciones horarias máximas usando datos meteorológicos desde noviembre 2003 a octubre 2004. Las predicciones del promedio anual y el promedio mensual máximo son las salidas del modelo. El archivo de ingreso del AERMOD se encuentra disponible en el portal electrónico del Ministerio de Energía y Minas (http://www.minem.gob.pe/dgaam/normas_tecdisamb.asp) y el archivo de control del AERMOD se presenta en la Figura 7-1.

7.3.1 Fuentes de Emisión

Se modelaron tanto las fuentes puntuales como no puntuales para esta evaluación del Proyecto. La ubicación de las fuentes de emisión se presenta en la Figura 7-2. Los caminos no pavimentados contribuyen a la emisión de material particulado desde el sitio. El camino se representa como una serie de fuentes lineales, para los propósitos del modelamiento de dispersión.

Un mapa de modelamiento de la dispersión, mostrando las ubicaciones y los parámetros de todas las fuentes se proporciona en la Figura 7-2.

Tabla 7-5 Descripción de Fuentes Puntuales

Identificación de Fuente Puntual	Descripción	Elevación base (m)	Altura Chimenea (m)	Temperatura Chimenea (K)	Velocidad de Salida (m/s)	Flujo (m³/s)	Diámetro Chimenea (m)
STK1	Planta de Molienda Seca	4579	70	373	15	106	3
STK2	Planta de Molienda Seca	4580	69	373	15	106	3

Tabla 7-6 Fuentes Superficiales

Identificación de Fuente Superficial	Descripción	Área (m²)	Elevación Base (m)	Coordenadas UTM	
				UTM-X	UTM-Y
AREA 1	Chancadora	3,200	4456	776821	8395692
AREA 6	Pila de Acopio Activa de la Chancadora	28,600	4373	777192	8395988
OPIT4700	Tajo Abierto	41,752	4362	775293	8394851

Tabla 7-7 Fuentes Asociadas a los Caminos

Identificación de Fuente Lineal	Descripción	Largo del Camino (m)	Número de Segmentos	Ancho de Segmento de Carretera (m)	Coordenada Inicial X,Y,Z (m)	Coordenada Final X,Y,Z (m)
LINE 1	Camino	1058	19	40	X=776993 Y=8394974 Z=4388	X=777029 Y=8395529 Z=4567

Figura 7-1 Archivo de Control del AERMOD

```

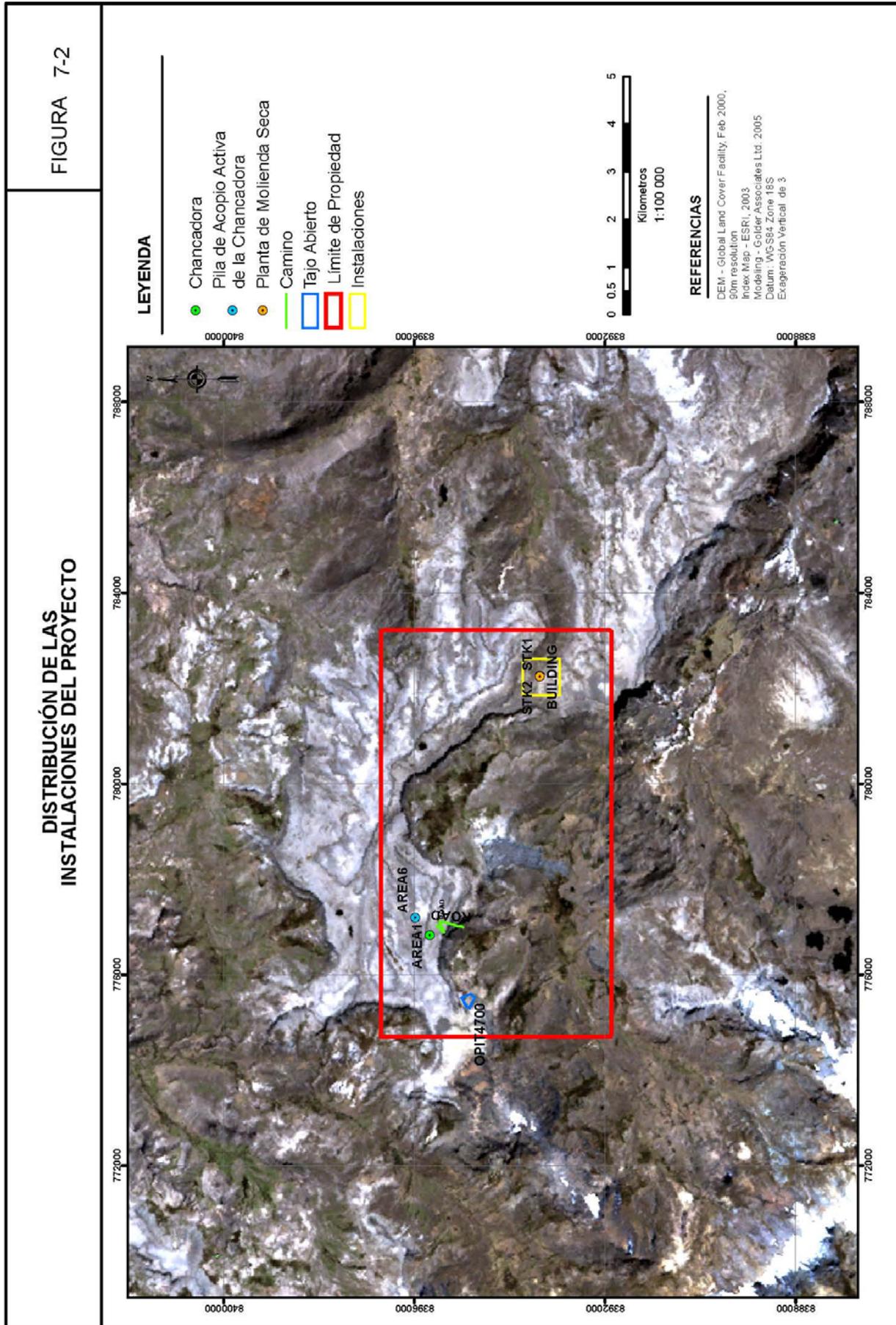
CO STARTING
  TITLEONE Percan Sample AERMOD Run 03-1118-006 (4319)
  TITLETWO February 2006
  MODELOPT DFAULT CONC
  AVERTIME MONTH ANNUAL
  POLLUTID OTHER
  RUNORNOT RUN
  ERRORFIL ERRORS.OUT
CO FINISHED

SO STARTING
** Source Location **
** SRC ID      Type      X Coord.      Y Coord.      Elev
LOCATION STK1   POINT    782256.3500  8393377.2900  4579.0000
...
** Point Source Parameters
** SRC ID  Q(g/s) HT(m)  T(K)  VEL(m/s) Dia(m)
SRCPARAM STK1  4.10  70.000  373.00  15.000  3.000
...
** Building Downwash Parameters
BUILDHGT STK1  15.00  15.00  15.00  15.00  15.00
...
BUILDHGT STK2  15.00  15.00  15.00  15.00  15.00
...
** Deposition
PARTDIAM STK1-STK2  30.0  10.0  2.5
MASSFRAX STK1-STK2  0.10  0.45  0.45
PARTDENS STK1-STK2  1.7  1.7  1.7
** Area Source Parameters
** SRC ID  Q(g/m2/s) RelHT(m) Xinit  Yinit  Angle(ø)
SRCPARAM AREA1  8.9E-04  1.000  80.000  40.000  0.000
...
** Emission Factors W Cat  1  2  3  4  5  6
EMISFACT AREA6  WSPPEED  0.00  0.00  0.00  0.26  0.59  1.00
** Polyarea Source Parameters
** SRC ID  Q(g/m2/s) RelHT(m) Nverts  Szinit
SRCPARAM OPIT4700  4.5E-5  1.000  5
...
AREAVERT OPIT4700  775293.36  8394851.42  775323.76  8394908.18  775517.59  8395016.70
AREAVERT OPIT4700  775595.16  8394817.26  775512.27  8394731.00
** Deposition
PARTDIAM AREA1  30.0  10.0  2.5
MASSFRAX AREA1  0.88  0.07  0.06
PARTDENS AREA1  1.7  1.7  1.7
...
** Volume Source Parameters
** SRC ID  Q(g/s) RelHt Syinit
SRCPARAM 4237  1.00E-01  3.2  13.95  2.98
...
** Deposition
PARTDIAM 4237-4255  30.0  10.0  2.5
MASSFRAX 4237-4255  0.71  0.25  0.04
PARTDENS 4237-4255  1.7  1.7  1.7
** Source Group **
SRCGROUP ALL
SO FINISHED

RE STARTING
** Grid 10 x 10 km, 500 m spacing Zelev Hill Scale
DISCCART 773963.14 8389283.21 4623.77 5026.00
DISCCART 773963.14 8389783.21 4807.38 5026.00
...
RE FINISHED

ME STARTING
SURFFILE Percan.SFC
PROFFILE Percan.PFL
SURFDATA 0854880 2003
UAIRDATA 99999 2003
SITEDATA 99999 2003
PROFBASE 4927.0
STARTEND 03 11 01 04 10 31
WINDCATS 10.0 15.0 18.0 19.0 20.0
ME FINISHED

OU STARTING
RECTABLE ALLAVE FIRST-THIRD
PLOTFILE MONTH ALL FIRST TSP-MO.txt
POSTFILE MONTH ALL PLOT TSP-MO.pst
PLOTFILE ANNUAL ALL FIRST TSP-ANNU.txt
  
```



Las tasas de emisión asignadas se dan en la Tabla 7-8.

Tabla 7-8 Tasas de Emisión de Material Particulado Modelado

Identificador de la Fuente	Tasa de Emisión
STK1 ^a	4,1
STK2 ^a	4,1
AREA1 ^b	$8,9 \times 10^{-4}$
AREA6 ^b	$6,9 \times 10^{-4}$
OPIT4700 ^b	$4,5 \times 10^{-5}$
LINE1 ^c	0,10

^a Unidades de g/s ^b Unidades de g/s/m² ^c Unidades de g/s/segmento

7.3.2 Receptores

Los efectos potenciales de las operaciones del Proyecto fueron evaluados en dos tipos de receptores. El primer tipo de receptores se ubica en el límite de propiedad del Proyecto, espaciado cada 100 m. El segundo tipo de receptores se ubican en los nodos de la grilla de 10 km por 10 km, con un espaciado de nodo de 500 m (receptores dentro del límite de propiedad del Proyecto no se evaluaron). Se consideraron un total de 557 receptores. Los dos grupos de receptores se muestran en la Figura 7-3.

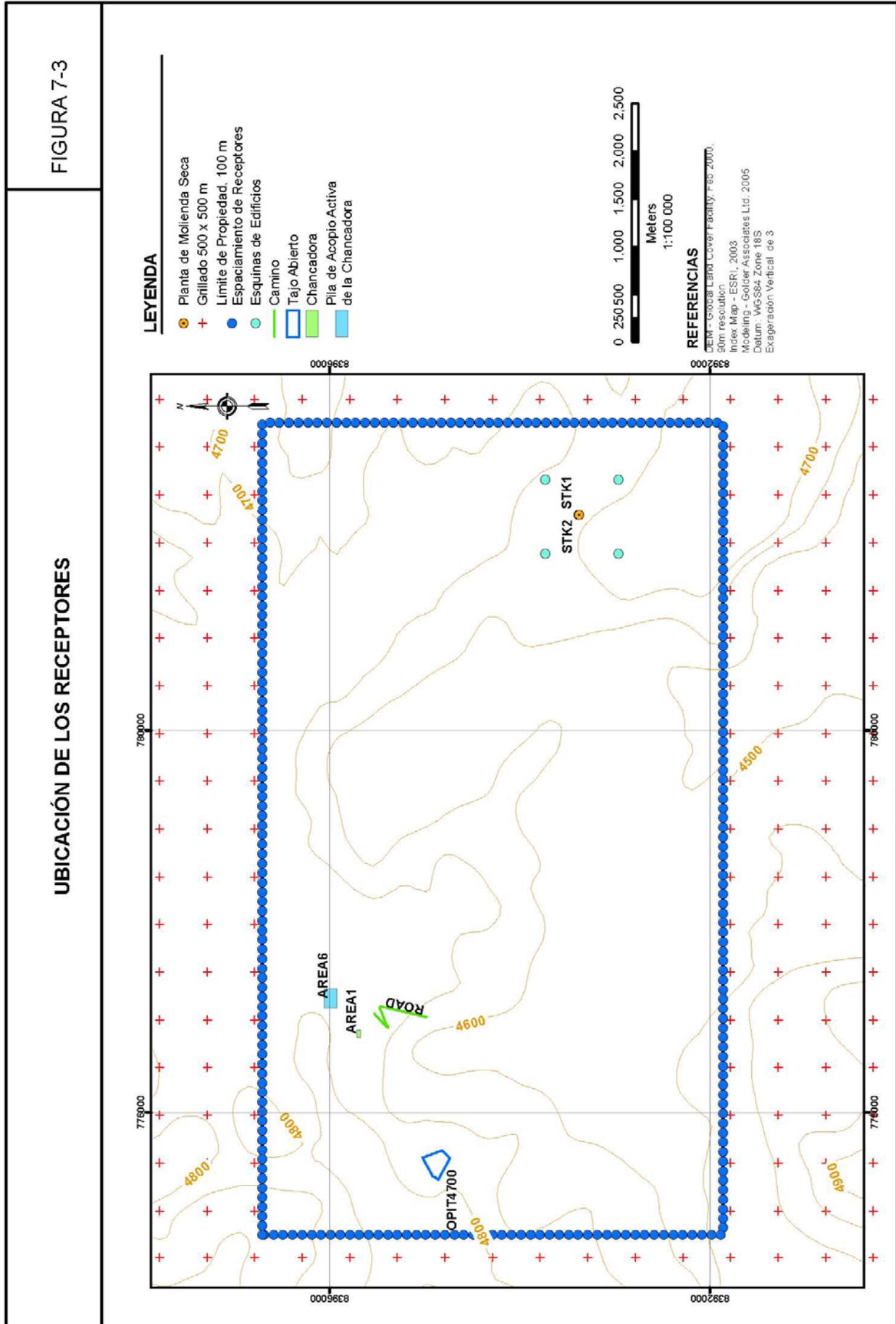
7.3.3 Meteorología

Se usaron mediciones horarias de la velocidad del viento en superficie, dirección del viento, temperatura, presión, altura del techo, nubosidad, humedad relativa y sondeos de altura para crear una base de datos meteorológica horaria usando el procesador meteorológico AERMET.

Los archivos de ingreso meteorológicos (Percan, SFC y Percan, PFL) se encuentran disponibles en el portal electrónico del Ministerio de Energía y Minas (http://www.minem.gob.pe/dqaam/normas_tecdisamb.asp).

7.3.4 Terreno Complejo

El uso de información específica del terreno circundante a una instalación, ofrece un modelamiento más detallado y precisa los impactos de emisiones sobre receptores cercanos, incluyendo los efectos que las emisiones podrían tener sobre los receptores con mayores o menores elevaciones (medidas sobre el nivel del mar) que las fuentes de las emisiones. Las elevaciones del terreno y las alturas de las montañas a escala (elevación de la cima más cercana que influye en el receptor en consideración) obtenidas de datos topográficos de la mina y de las áreas circundantes, se procesaron por medio de AERMAP para su aplicación en el modelo AERMOD. Esto permitió a AERMOD factorizar los efectos del terreno montañoso en la dispersión del material particulado de la mina.



Una vista tridimensional del Proyecto y el terreno circundante se presenta en la Figura 7-2. En una evaluación más detallada, los cambios de la topografía resultantes de las actividades de la mina podrían ser usados como parte del procesamiento de terreno AERMAP. Los cambios en la topografía no pueden ser integrada en la meteorología, pero puede ser usado en la grilla de los receptores.

Los archivos de ingreso y salida del AERMAP se encuentran en el portal electrónico del Ministerio de Energía y Minas (http://www.minem.gob.pe/dqaam/normas_tecdisamb.asp) Los datos de terreno se proveyeron a AERMAP en la forma de un archivo de Mapa de Elevación Digital (DEM) de 7 grados.

7.3.5 Depositación por Edificaciones

Los efectos de la depositación por edificaciones en las emisiones desde las dos chimeneas fue incluida en el modelo de dispersión. Se utilizó BPIP para determinar los parámetros que fueron luego incluidos en el archivo de ingreso de AERMOD-PRIME. Los archivos de ingreso y salida del BPIP se proveen en el Anexo A.

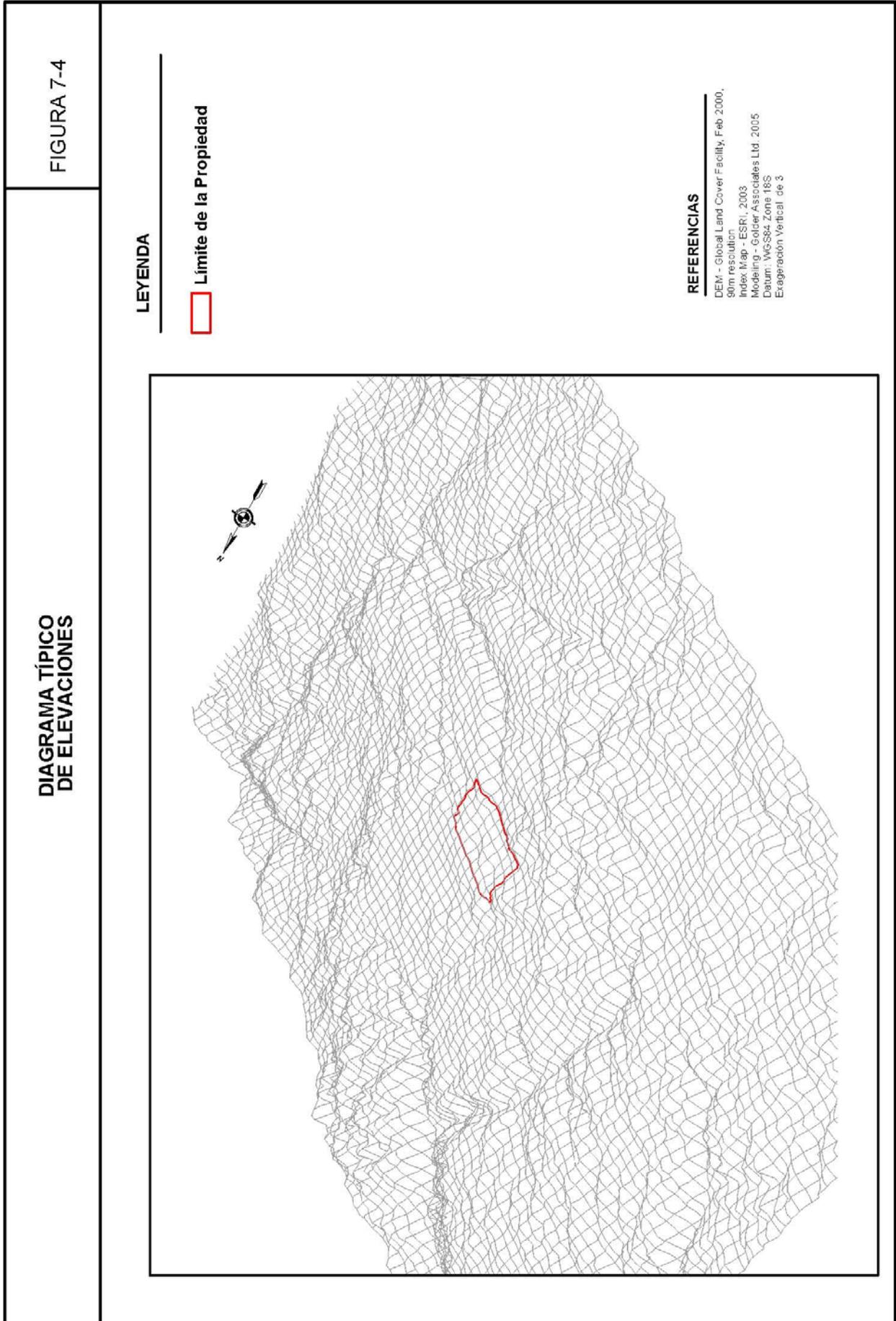
7.4 RESULTADOS DEL MODELAMIENTO

AERMOD estimó las concentraciones de material particulado anuales y mensuales en receptores específicos. Se crearon los siguientes archivos de salida:

- a. Archivo de salida de AERMOD (TSP.OUT) conteniendo la siguiente información.
 - Resumen de archivos de ingreso AERMOD, incluyendo parámetros de las fuentes, opciones del modelo seleccionadas, receptores y datos de meteorológicos;
 - Una lista de la concentración promedio anual ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) de cada receptor;
 - Una lista de las concentraciones promedio mensual más altas, segunda y tercera más altas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en cada receptor (Nota: la primera, segunda y tercera concentración más alta puede ocurrir en tiempos diferentes para cada receptor);
 - Una lista de las 10 más altas concentraciones anuales ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y los receptores en los que ocurren;
 - Una lista de las 3 más altas concentraciones anuales ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y los receptores en los que ocurren;
 - Un resumen de todos los mensajes de advertencia generados por el modelo durante el modelamiento.
- b. Un resumen de todos los mensajes de advertencia generados por el modelo durante el modelamiento.
- c. Dos archivos conteniendo material particulado (Nota: No se han calculado los parámetros de depositación en esta evaluación).
- d. Dos archivos de resultados formateados para ploteo: uno conteniendo la concentración diaria ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en cada receptor y uno conteniendo la concentración promedio anual ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en cada receptor.
- e. Un archivo con datos crudos diarios, formateado para ploteo de contornos en aplicaciones de post-procesado.

La concentración promedio anual estimada y la mayor concentración en 24 horas en cada receptor se muestran en la Figura 7-5 y la Figura 7-6 respectivamente.

Estos resultados ilustran la habilidad de AERMOD para manejar terrenos complejos y elevaciones de manera precisa.



**ISOPLETAS DE CONCENTRACIONES ANUALES
PROMEDIO DE MATERIAL PARTICULADO**

FIGURA 7-5

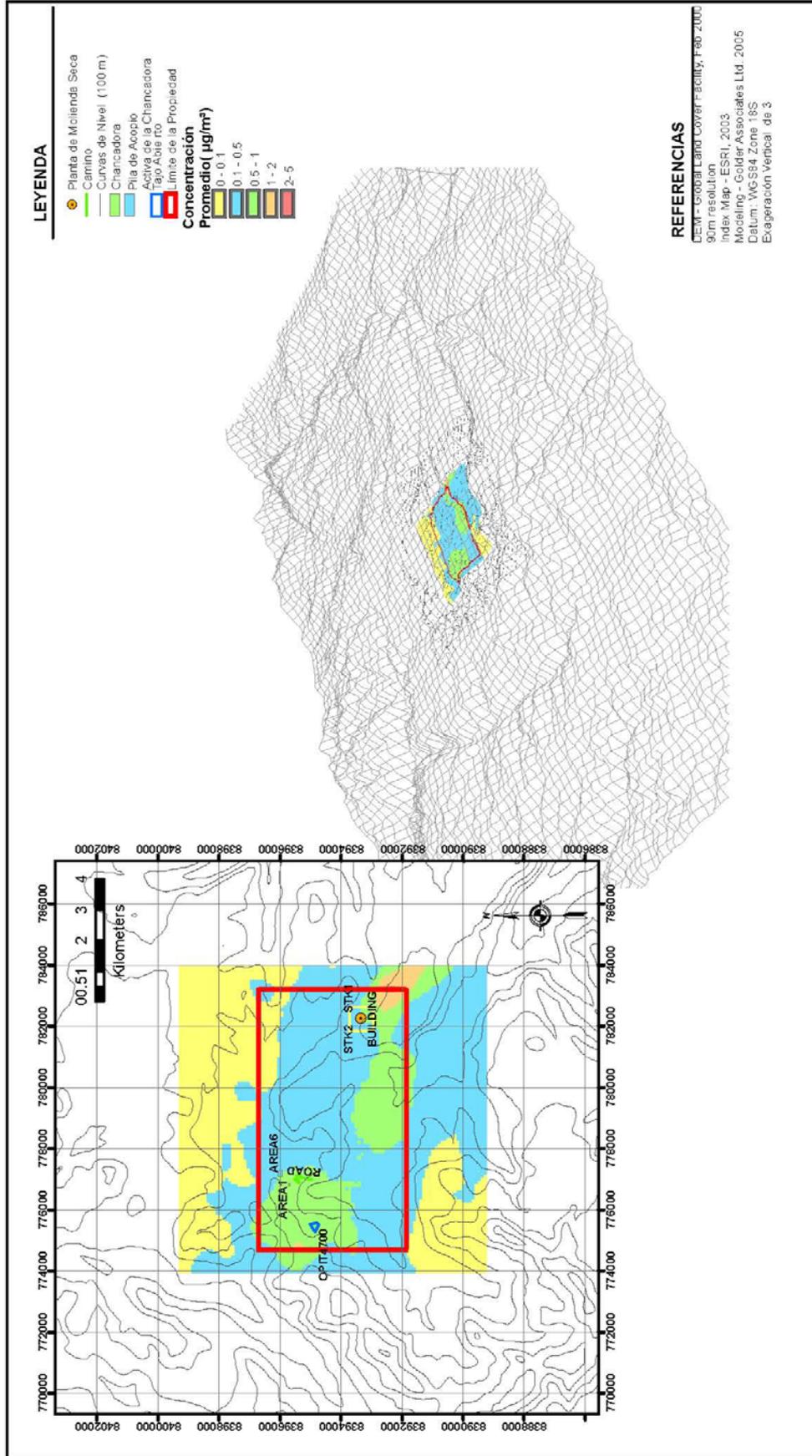
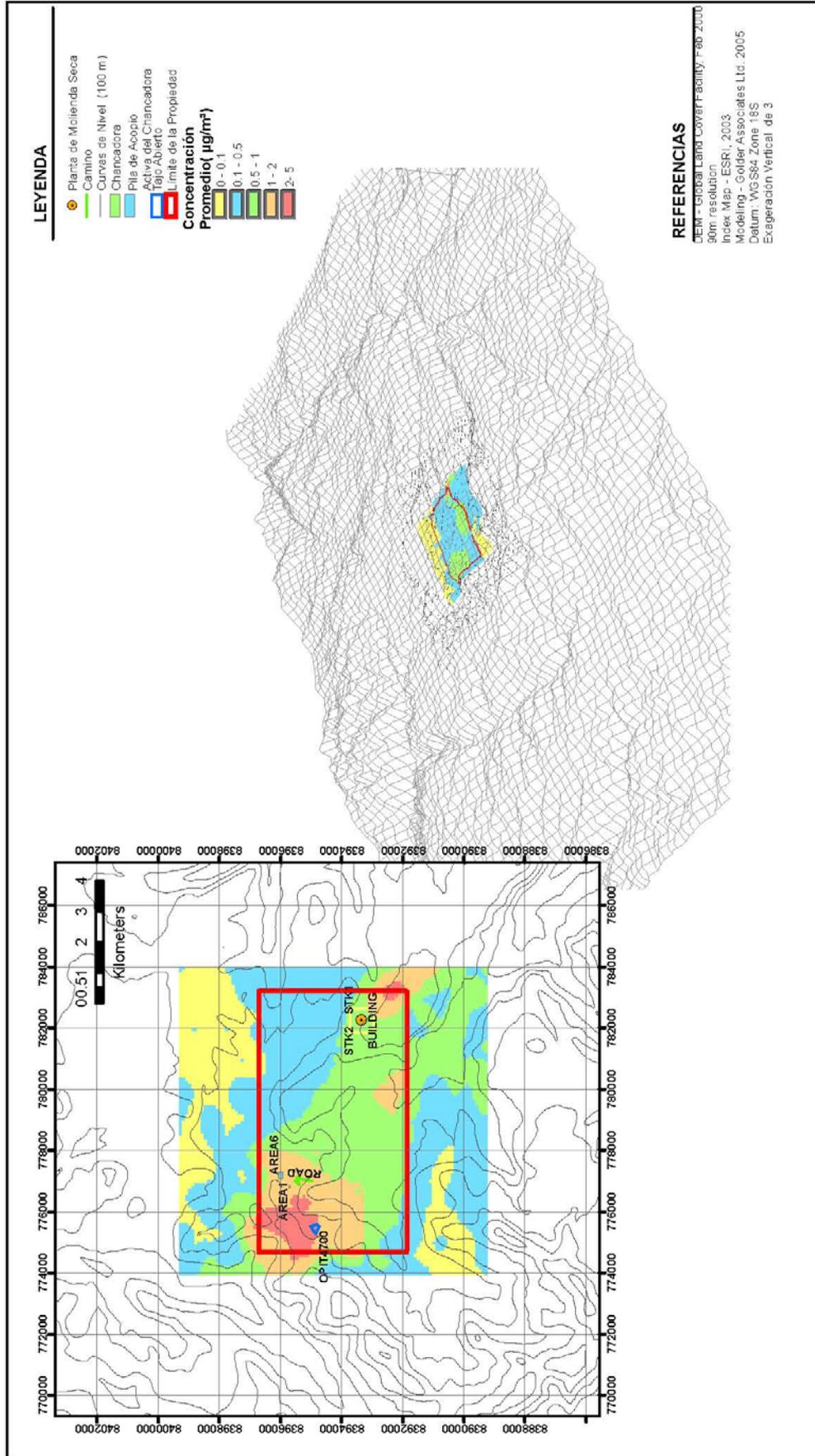


FIGURA 7-6

ISOPLETAS DE CONCENTRACIÓN PROMEDIA MENSUAL



8. REFERENCIAS

- American Meteorological Society (AMS). n.d. Glossary of Meteorology, Second Edition, Obukhov Length. Internet. Last Updated: n.d. <<http://amsglossary.allenpress.com/glossary>> Last Accessed: January 9, 2006.
- Andrews, David G. 2000. An Introduction to Atmospheric Physics. Cambridge University Press: New York.
- Barrick Exploraciones Argentina S.A. - Exploraciones Mineras Argentinas S.A. (2004). Proyecto Pascua-Lama, Informe de Impacto Ambiental. EXP. ADM. N° 425-292-B-00, Etapa de Explotacion: Apendice P – Analisis de Calidad del Aire
- Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). 1992. National Emission Guidelines for Stationary Combustion Turbines.
1997. National Emission Guidelines for Commercial/Industrial Boilers and Heaters.
2006. Canada-wide Standards for Particulate Matter and Ozone. November 2006.
- Ciccione, Anthony and Short, Melanee. 2003. Guidelines for Compiling Emission Inventories for the Ontario Mining Association, 2003 Revision. February 2003. Earth Tech Canada Inc.
- Environment Canada. 2003. New Source Emission Guidelines for Thermal Electricity Generation. January 4, 2003. <<http://canadagazette.gc.ca/part1/2003/20030104/html/notice-e.html>>
2005. Off-Road Compression-Ignition Engine Emission Regulations. P.C. 2005-138. February 8, 2005. <http://www.ec.gc.ca/CEPARRegistry/documents/regs/g2-13904_r1.pdf>
- Environmental & Resource Management, Inc. (ERM). 2000. Protocol for HCN Emission Estimation from Fugitive Sources. September, 2000.
- Health Canada/Environment Canada. 1994. National Ambient Air Quality Objectives for Carbon Monoxide. November, 1994. <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/air/naaqo-onqaa/carbon-monoxide-carbone/index_e.html>
1998. National Ambient Air Quality Objectives for Particulate Matter. <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/air/naaqo-onqaa/particulate_matter_matiere_particulaires/summary-sommaire/index_e.html>
- Health Canada. 1999. National Ambient Air Quality Objectives for Ground-Level Ozone. July, 1999. <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/air/naaqo-onqaa/ground_level_ozone_tropospherique/summary-sommaire/index_e.html>
- National Pollutant Inventory (NPI). 2003. Emission Estimation Technique Manual for Combustion Engines. Version 2.3. Australian Government - Department of the Environment and Heritage. October 22, 2003.

Referencias

- Ontario Ministry of the Environment. 2005. Air Dispersion Modelling Guideline for Ontario. Version 1.0. July, 2005.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). 1995. AP 42 - Compilation of Air Pollutant Emission Factors. 5th edition (with updates up to 2007). <<http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/index.html>>
1998. A Comparison of CALPUFF with ISC3. Internet. Dated: December 1998. <www.epa.gov/ttn/scram/7thconf/calpuff/calisc3.pdf> Last Accessed: January 5, 2006.
2002. User's Guide for the AMS/EPA Regulatory Model – AERMOD, Revised Draft. August 10, 2002.
- 2003a. Guidelines on Air Quality Models. Code of Federal Regulations, Title 40, Part 51, Appendix W.
- 2003b. Comparison of Regulatory Design Concentrations, AERMOD vs. ISCT3, CTDMPPLUS, ISC-PRIME. Internet. Dated: June 2003. <www.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/compar.pdf> Last Accessed: January 5, 2006.
2004. AERMOD: Description of Model Formulation. Internet. Dated: September 2004. <http://www.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aermod_mfd.pdf> Last Accessed: January 11, 2006.
2005. APTI Virtual Classroom, SI: 409 Basic Air Pollution Meteorology, Lesson 6: Plume Dispersion and Air Quality Modeling. Internet. Last Updated: April 18, 2005. <[http://yosemite.epa.gov/oaqps/EOGtrain.nsf/fabbfcfe2fc93dac85256afe00483c4/c9862a32b0eb4f9885256b6d0064ce2b/\\$FILE/Lesson%206.pdf](http://yosemite.epa.gov/oaqps/EOGtrain.nsf/fabbfcfe2fc93dac85256afe00483c4/c9862a32b0eb4f9885256b6d0064ce2b/$FILE/Lesson%206.pdf)> Last Accessed: January 4, 2006.
- Watson, John G. and Chow, Judith C., 2000. Reconciling Urban Fugitive Dust Emissions Inventory and Ambient Source Contribution Estimates: Summary of Current Knowledge and Needed Research. Desert Research Institute Document No. 6110.4F.
- World Bank Group (WBG). 1995a. World Bank Environmental, Health, and Safety Guidelines - Attachment 1, Mining and Milling Underground. August 11, 1995.
- 1995b. World Bank Environmental, Health, and Safety Guidelines - Mining and Milling Open Pit. August 11, 1995.
1999. Pollution Prevention and Abatement Handbook 1998. - Toward Cleaner Production. The World Bank Group in collaboration with the United Nations Environment Program and the United Nations Industrial Development Organization, April, 1999.
- 2007a. Environmental, Health, and Safety General Guidelines. International Finance Corporation, April 30, 2007.

Referencias

- 2007b. Environmental, Health, and Safety Guidelines - Base Metal Smelting and Refining. International Finance Corporation, April 30, 2007.
- World Health Organization Regional Office for Europe (WHO). 2000. Air Quality Guidelines for Europe, 2nd ed.
<http://www.euro.who.int/air/activities/20050223_3>.
2006. Air Quality Guidelines - Global Update 2005. Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide.
http://www.euro.who.int/InformationSources/Publications/Catalogue/20070323_1>
- Young, James W.S. 1999a. Introduction to Air Pollution Meteorology. February 1999. In Air Pollution Meteorology, Modelling and Monitoring. An Introductory Course. 1999. Senes Consultants Ltd.
- 1999b. Short Range Air Pollution Modelling – The Basics. February 1999. In Air Pollution Meteorology, Modelling and Monitoring. An Introductory Course. 1999. Senes Consultants Ltd.
- 1999c. Mixing Heights. February 1999. In Air Pollution Meteorology, Modelling and Monitoring. An Introductory Course. 1999. Senes Consultants Ltd.
- Young, James W.S. and Paula T. Coutts. 1999. Garbage In – Garbage Out, The Problem with Emissions. February 1999. In Air Pollution Meteorology, Modelling and Monitoring. An Introductory Course. 1999. Senes Consultants Ltd.
- Zannetti, Paolo. 1990. Air Pollution Modeling, Theories, Computational Methods and Available Software. Van Nostrand Reinhold: New York.