



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, INGENIERÍA Y MEDICINA

**PROGRAMA MULTIDISCIPLINARIO DE POSGRADO EN CIENCIAS
AMBIENTALES**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

**MODELADO DEL TRANSPORTE Y PROPUESTA DE METODOLOGÍA
PARA LA UBICACIÓN DE ESTACIONES DE MONITOREO DE PM10
EN UNA MINA A CIELO ABIERTO**

PRESENTA:

FIS. DAVID ENRIQUE FLORES JIMÉNEZ

DIRECTOR DE TESIS:

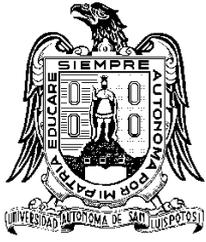
DR. ALFREDO ÁVILA GALARZA

ASESORES:

DR. ISRAEL RAZO SOTO

DR. ROBERTO BRIONES GALLARDO

SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P., SEPTIEMBRE 2011



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, INGENIERÍA Y MEDICINA

**PROGRAMA MULTIDISCIPLINARIO DE POSGRADO EN CIENCIAS
AMBIENTALES**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES

**MODELADO DEL TRANSPORTE Y PROPUESTA DE METODOLOGÍA
PARA LA UBICACIÓN DE ESTACIONES DE MONITOREO DE PM10
EN UNA MINA A CIELO ABIERTO**

PRESENTA:

FIS. DAVID ENRIQUE FLORES JIMÉNEZ

COMITÉ TUTELAR:

DIRECTOR: DR. ALFREDO ÁVILA GALARZA

ASESOR: DR. ISRAEL RAZO SOTO

ASESOR: DR. ROBERTO BRIONES GALLARDO

SINODALES:

PRESIDENTE: DR. ALFREDO ÁVILA GALARZA

SECRETARIO: DR. ROBERTO BRIONES GALLARDO

VOCAL: DR. GUILLERMO VELASCO MARTÍNEZ

CRÉDITOS INSTITUCIONALES

PROYECTO REALIZADO EN:

FACULTAD DE INGENIERÍA

CON FINANCIAMIENTO DE:

**CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA (CONACYT)
BECANRIO NO. 331859 PERIODO: AGOSTO 2009 – AGOSTO 2011**

A TRAVÉS DEL PROYECTO DENOMINADO:

**MODELADO DEL TRANSPORTE Y PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA
UBICACIÓN DE ESTACIONES DE MONITOREO DE PM10 EN UNA MINA A
CIELO ABIERTO**

AGRADEZCO A CONACyT EL OTORGAMIENTO DE LA BECA-TESIS

Becario No. 331859

**LA MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES RECIBE APOYO A TRAVÉS
DEL PROGRAMA NACIONAL DE POSGRADOS DE CALIDAD (PNPC)**

**MODELADO DEL TRANSPORTE Y PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA
UBICACIÓN DE ESTACIONES DE MONITOREO DE PM10 EN UNA MINA A
CIELO ABIERTO**

FIS. DAVID ENRIQUE FLORES JIMÉNEZ

Descargo

La información contenida en el presente trabajo de investigación debe ser usada de manera integral. El autor de la tesis y su director no se hacen responsables del uso que terceras personas puedan hacer de los contenidos de este documento.

DEDICADO

A mi abuelo Jonathan, que en paz descanse.

A toda mi familia.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por estar siempre conmigo, y la Virgen María por su gran amor.

A mamá y papá, por creer en mí y nunca permitir que me rinda ante la adversidad.

A mis hermanos: Alejandro, por cuidarme y apoyarme todo este tiempo; y Daniel, porque su forma de vivir la vida me enseña a tener valor. A Fer (Susanita), Marianita (Caminito) y mi sobrinita Danielita, por todas sus buenas vibras.

A mi futura esposa Adry (Milagrito), por su amor, amistad y apoyo incondicional.

A mis abuelos: Enrique y Lolita, y Queta y Jonathan, por su cariño y apoyo.

A mis suegros: Sra. Tere y Sr. Silverio, y mi cuñado David, por su confianza y amistad.

A la Sra. Lourdes, lo y Gaby, por abrirme las puertas de su casa y de su corazón la primera vez que llegué a San Luis.

A mis amigos Miguel Mauricio, Stevens, Mary Chuy, Natalia, Karlita, Leslie, Edith, Claudia, Erika, Lena, Jenny, Gretel, Jascha, Vilmaurora, Bere, Victor, Guadalupe y la Chilenita por todos aquellos momentos que compartimos.

A la Sra. Alejandra, Sr. Alejandro y su esposa, por su amistad, hospitalidad, confianza y apoyo.

A mi Comité Tutelar: Dr. Alfredo Ávila Galarza, Dr. Israel Razo Soto y Dr. Roberto Briones Gallardo, por la oportunidad y la confianza depositadas en mí durante estos dos años, y al Dr. Guillermo Velasco Martínez, por su apoyo a lo largo de este proyecto.

A todo el personal de la Industria Minera San Xavier del estado de San Luis Potosí, por su tiempo, confianza y apoyo invertidos durante esta maestría.

A Marcos y Hugo, por su amistad y apoyo para aprender a usar el HYSPLIT.

Índice

INTRODUCCIÓN	1
I. ESTUDIO DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA POR MATERIAL PARTICULADO Y SU MONITOREO	3
I.1 MARCO TEÓRICO	3
I.1.1 ATMÓSFERA	3
I.1.2 PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN EL ESTUDIO DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA	5
I.1.2.1 Estabilidad atmosférica y altura de la capa de mezcla	7
I.1.3 CONTAMINACIÓN POR GASES Y MATERIAL PARTICULADO	13
I.1.4 DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN EL AIRE	16
I.2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE UNA MINA A CIELO ABIERTO	17
I.2.1 PRINCIPALES ACTIVIDADES LLEVADAS A CABO EN UNA MINA A CIELO ABIERTO	19
I.3 TRANSPORTE DEL MATERIAL PARTICULADO	20
I.3.1 FACTORES DE EMISIÓN E INVENTARIO DE EMISIONES	20
I.3.2 MODELADO DEL TRANSPORTE DE MATERIAL PARTICULADO	24
I.3.2.1 Programas de cómputo para el modelado del transporte de PM10	26
I.3.2.2 Estudio de los parámetros meteorológicos a considerar	27
I.3.2.3 El transporte y difusión de contaminantes	29
I.3.2.3.1 Modelo Gaussiano para el estudio de un gas emitido desde una fuente puntual	31
I.3.2.3.2 Modelo Gaussiano para el estudio de material particulado emitido desde una fuente de área	33
I.3.3 ANÁLISIS DEL FLUJO DE VIENTOS	34
I.3.3.1 Cuenca atmosférica	34
I.3.3.2 El Modelo Lagrangiano HYSPLIT	36
I.3.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE UTILIZAR LOS MODELOS HYSPLIT Y AERMOD VIEW	

	37
I.4 MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE	38
I.5 NORMAS Y LEYES PARA REGULAR LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA	40
I.5.1 NORMAS Y LEYES A NIVEL NACIONAL	40
I.5.2 NORMAS Y LEYES CORRESPONDIENTES AL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ	45
II. PRESENTACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	46
II.1 PLANTEAMIENTO HISTÓRICO	46
II.2 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL CERRO DE SAN PEDRO Y SUS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS	47
II.3 ESPECIFICACIONES DE LA INDUSTRIA MINERA QUE ES OBJETO DE ESTUDIO	48
II.3.1 ESTACIONES DE MONITOREO PARA EL ESTUDIO DE MATERIAL PARTICULADO	51
II.4 OBJETIVOS DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	54
III. METODOLOGÍA	55
III.1 MODELADO DE LOS PATRONES DE VIENTOS Y DEL TRANSPORTE DE PM10	56
III.1.1 TRAYECTORIAS Y ROSAS DE VIENTOS	56
III.1.2 TRANSPORTE DE PM10	58
III.1.2.1 Evaluación del modelo AERMOD View	60
III.2 METODOLOGÍA PARA LA DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	61
III.3 METODOLOGÍA PARA PROPUESTA DE UBICACIÓN DE ESTACIONES DE MONITOREO DE PM10	61
IV. MODELADO DE LOS PATRONES DE VIENTOS Y DEL TRANSPORTE DE PM10 EN UNA MINA A CIELO ABIERTO	62
IV.1 BASES DE DATOS METEOROLÓGICOS PARA LOS MODELOS HYSPLIT Y RAMMET VIEW	62

IV.2 MODELADO DE TRAYECTORIAS Y ROSAS DE VIENTOS EN LA PARTE NORTE DEL SITIO DE ESTUDIO	64
IV.3 BASE DE DATOS DE PM10 PARA EL MODELO AERMOD VIEW	74
IV.4 MODELADO DE LAS CONCENTRACIONES DE PM10 EN LA ZONA NORTE DEL SITIO DE ESTUDIO	78
IV.4.1 MODELADO DEL PROMEDIO DIARIO DE LAS CONCENTRACIONES DE PM10 EN TAJO-TERREROS-CAMINOS	78
IV.4.2 MODELADO DEL PROMEDIO ANUAL DE LAS CONCENTRACIONES DE PM10 EN TAJO-TERREROS-CAMINOS	79
IV.5 MODELADO DE ROSAS DE VIENTOS EN LA PARTE SUR DEL SITIO DE DE ESTUDIO	82
IV.6 MODELADO DE LAS CONCENTRACIONES DE PM10 EN LA ZONA SUR DEL SITIO	87
IV.6.1 MODELADO DEL PROMEDIO DIARIO DE LAS CONCENTRACIONES DE PM10 EN PATIO DE LIXIVIACIÓN-CAMINOS	88
IV.6.2 MODELADO DEL PROMEDIO ANUAL DE LAS CONCENTRACIONES DE PM10 EN PATIO DE LIXIVIACIÓN-CAMINOS	88
IV.7 EVALUACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO AERMOD VIEW	92
IV.7.1 ZONA NORTE DE LA INDUSTRIA MINERA	92
IV.7.2 ZONA SUR DE LA INDUSTRIA MINERA	94
IV.8 MODELADO DE LAS CONCENTRACIONES DE PM10 POR ESTACIÓN DEL AÑO	98
IV.8.1 MODELADO DEL TRANSPORTE DE PM10 EN LA ZONA NORTE Y CAMINOS DE LA MINA POR ESTACIÓN DEL AÑO	98
IV.8.2 MODELADO DEL TRANSPORTE DE PM10 EN LA ZONA SUR Y CAMINOS DE LA MINA POR ESTACIÓN DEL AÑO	99
IV.9 EVALUACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO AERMOD VIEW PARA LAS CUATRO ESTACIONES DEL AÑO	106
V. UBICACIÓN DE ESTACIONES DE MONITOREO DE PM10 EN UNA MINA A CIELO ABIERTO	109
V.1 ÁREA PROPUESTA PARA LA UBICACIÓN DE UNA ESTACIÓN DE MONITOREO DE PM10 EN LA ZONA NORTE	110
V.2 ÁREA PROPUESTA PARA LA UBICACIÓN DE UNA ESTACIÓN DE MONITOREO DE PM10 EN LA ZONA SUR	112

V.3	ZONAS DE ESTUDIO DE LA CALIDAD DEL AIRE POR ESTACIÓN DEL AÑO	114
V.4	PUNTOS DE UBICACIÓN – ESTACIONES DE MONITOREO DE PM10	117
VI.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	120
APÉNDICES		
APÉNDICE A.	DETERMINACIÓN DEL GRADIENTE DE TEMPERATURA POR DESPLAZAMIENTO ADIABÁTICO VERTICAL DE LAS MASAS DE AIRE	1A
APÉNDICE B.	FACTORES DE EMISIÓN DE PM10 Y CÁLCULO DE EMISIONES	1B
APÉNDICE C.	EMISIONES DE PM10 PARA CADA FASE DE OPERACIÓN	1C
APÉNDICE D.	MODELOS UTILIZADOS PARA EL ESTUDIO DEL TRANSPORTE DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS	1D
APÉNDICE E.	DEDUCCIÓN DE LA ECUACIÓN DE DIFUSIÓN DE UN SOLUTO A TRAVÉS DE UN FLUIDO	1E
APÉNDICE F.	OBTENCIÓN DE LAS ECUACIONES DE TIPO GAUSSIANO PARA EL ESTUDIO DEL TRANSPORTE DE GASES Y MATERIAL PARTICULADO	1F
APÉNDICE G.	MÉTODOS ESTADÍSTICOS UTILIZADOS PARA EVALUAR LOS RESULTADOS DEL MODELO AERMOD VIEW.	1G

BIBLIOGRAFÍA

Índice de tablas

Tabla I.1.	Categorías de Estabilidad de Pasquill	12
Tabla I.2.	Turbulencia de la atmósfera. Clases de estabilidad (Moragues, s.f.).	13
Tabla I.3.	Características principales del modelo ISC3 (Bustos, 2004).	26
Tabla I.4.	Valores Normados de la calidad del aire en México (SEMARNAT, INE, 2005)	44
Tabla II.1.	Actividades que generan emisiones de PM10 clasificadas de acuerdo a la zona minera a la que pertenecen (Gallegos Martínez, 2010).	48
Tabla II.2.	Descripción de las estaciones de monitoreo (Minera San Xavier, S.A. de C.V., s.f.).	52
Tabla III.1	Variables meteorológicas de entrada a los modelos AERMOD View, Rammet View y HYSPLIT.	57
Tabla IV.1.	Georeferencia de cada estación meteorológica en la industria minera.	62
Tabla IV.2.	Rosa de los vientos y su notación (www.diccionario-nautico.com.ar).	63
Tabla IV.3.	Superficie que ocupan las zonas de interés en la industria minera a cielo abierto.	77
Tabla IV.4.	Concentraciones promedio diarias de PM10 calculadas en el modelo AERMOD View $C_{PM10 (Mod)}$ y calculadas a partir de las mediciones hechas en la estación de monitoreo $C_{PM10 (Med)}$, ubicada al norte de la industria minera.	93
Tabla IV.5.	Concentraciones medias de PM10 y desviación estandar de las concentraciones modeladas y medidas en la parte norte del sitio de estudio.	93
Tabla IV.6.a	Concentraciones promedio diarias de PM10 calculadas en el modelo AERMOD View $C_{PM10 (Mod)}$ y calculadas a partir de las mediciones hechas en la estación de monitoreo $C_{PM10 (Med)}$, ubicada al sur de la industria minera.	95

Tabla IV.6.b	Concentraciones promedio diarias de PM10 calculadas en el modelo AERMOD View $C_{PM10 (Mod)}$ y calculadas a partir de las mediciones hechas en la estación de monitoreo $C_{PM10 (Med)}$, ubicada al sur de la industria minera.	96
Tabla IV.7.	Concentraciones promedio diarias de PM10 calculadas en el modelo AERMOD View $C_{PM10 (Mod)}$ y calculadas a partir de las mediciones hechas en la estación de monitoreo $C_{PM10 (Med)}$, ubicada al sur de la industria minera.	97
Tabla IV.8.	Medias y desviaciones estandar para cada estación del año de la estación de monitoreo y el modelo AERMOD View respectivamente.	106
Tabla IV.9.	Coefficientes de correlación de Pearson por estación del año– Zona Sur.	108
Tabla V.1.	Promedios de las concentraciones de PM10 en los puntos donde está proponiendo la ubicación de estaciones de monitoreo al norte y sur de la industria minera.	119
Tabla VI.1.	Concentraciones cercanas o superiores a lo establecido por la NOM-025-SSA1-1993.	123

Índice de figuras

Figura I.1.	Capas de la atmósfera (Morán y col., 1994).	5
Figura I.2.	A determinada altura z_0 , tanto la parcela de aire (figura no-uniforme) como el ambiente, están a cierta temperatura (T). Se observa que la parcela ejerce un trabajo (presión x distancia) sobre el ambiente y viceversa.	6
Figura I.3.	Parcela de aire envuelta en una atmósfera inestable.	8
Figura I.4.	Parcela de aire envuelta en una atmósfera estable.	9
Figura I.5.	Parcela envuelta en una atmósfera neutra.	10
Figura I.6.	Inversión térmica durante la noche.	11
Figura I.7.	Tamaño de las partículas tanto de origen natural como industrial (Moreton y col., 1980).	15
Figura I.8.	Flujo laminar y turbulento (Rivas Nieto, 2003).	16
Figura I.9.	Mina a cielo abierto conocida como “El Chino”, localizada en Silver City, New Mexico. Al fondo de la fotografía se pueden observar las franjas horizontales (bancos) extraídas (Guinther, 2003).	18
Figura 1.10.	Diagrama de las actividades realizadas en una mina a cielo abierto de oro y plata.	19
Figura I.11.	Zona de barrenación en una mina a cielo abierto de oro y plata (Minera San Xavier, s.f.). El recuadro en color rojo representa una fuente de superficie o área en donde se lleva a cabo dicha actividad.	21
Figura I.12.	Principales fases del modelado (Kiely, 1999; Bustos, 2004).	25
Figura I.13.	Modelo Gaussiano de un gas emitido desde una fuente puntual.	32
Figura I.14.	Ejemplo de sucesión de fuentes puntuales que en conjunto forman una fuente de área y cuya fuente virtual emite la sumatoria del contaminante.	33
Figura I.15	Asentamiento de material particulado.	34

Figura I.16.	Ejemplo de definición de una cuenca atmosférica (Magaña, s.f.).	35
Figura I.17.	a) Aproximación Euleriana; b) Aproximación Lagrangiana	36
Figura I.18.	Ejemplo de sistema Lagrangiano.	37
Figura II.1.	Templo edificado en el Cerro de San Pedro en la segunda mitad del siglo XVIII (Enciclopedia de los Municipios de México, 2005).	47
Figura II.2.	Ubicación del Municipio del Cerro de San Pedro. (INEGI, 2005; Mapa editado en Power Point, 2010).	47
Figura II.3.	Zonas mineras a estudiar (Imagen editada en Google Earth, 2010)	49
Figura II.4	La minera a cielo abierto cuenta con dos estaciones meteorológicas (Imagen editada en Google Earth, 2010).	50
Figura II.5.	Curvas de nivel editadas en ArcGIS (INEGI, 2007).	51
Figura II.6	Ubicación de estaciones de monitoreo de material particulado (imagen editada en Google Earth, 2010).	52
Figura III.1.	Diagrama de flujo de los modelados que se realizan en esta investigación	55
Figura III.2.	Diagrama de flujo de la metodología para evaluar y validar los resultados y proponer mejoras al proceso	56
Figura IV.1.	Modelado de las trayectorias de vientos en el sitio de estudio y representación de la rosa de vientos para el periodo de primavera del 2009 (Rammet View y HYSPLIT).	65
Figura IV.2.	Distribución de frecuencias a) de las velocidades de los vientos y b) de las estabildades atmosféricas en la primavera de 2009 (Rammet View).	66
Figura IV.3.	Modelado de las trayectorias de vientos en el sitio de estudio y representación de la rosa de vientos para el periodo de verano del 2009 (Rammet View y HYSPLIT).	68
Figura IV.4.	Distribución de frecuencias a) de las velocidades de los vientos y b) de las estabildades atmosféricas en la verano de 2009 (Rammet View).	69
Figura IV.5.	Modelado de las trayectorias de vientos en el sitio de estudio y representación de la rosa de vientos para el periodo de otoño del 2009 (Rammet View y HYSPLIT).	71

Figura IV.6.	Distribución de frecuencias a) de las velocidades de los vientos y b) de las estabilidades atmosféricas en la otoño de 2009 (Rammet View).	72
Figura IV.7.	Modelado de las trayectorias de vientos en el sitio de estudio y representación de la rosa de vientos para el periodo de invierno del 2009 (Rammet View y HYSPLIT).	73
Figura IV.8.	Distribución de frecuencias a) de las velocidades de los vientos y b) de las estabilidades atmosféricas en la invierno de 2009 (Rammet View).	74
Figura IV.9.	Imagen tridimensional del sitio de estudio modelada en el AERMOD View 6.5.0.	75
Figura IV.10.	Modelado de la topografía del sitio de estudio realizado en el AERMOD View 6.5.0.	75
Figura IV.11.	Malla en la que se dividió el sitio de estudio para calcular las concentraciones de PM10 a partir del modelo AERMOD View. A cada nodo se le asocia su altitud correspondiente.	76
Figura IV.12.	Simulación de las alturas asignadas a cada nodo de la malla receptora realizado en el AERMOD View 6.5.0.	76
Figura IV.13.	Modelado del transporte de PM10 en las zonas del tajo, terreros y caminos para un periodo de 24 horas realizado en el AERMOD View 6.5.0.	80
Figura IV.14.	Modelado del transporte de PM10 en las zonas del tajo, terreros y caminos para un periodo de un año realizado en el AERMOD View 6.5.0.	81
Figura IV.15.	Rosa de vientos por estación del año de 2009 que se calcularon para la zona sur de la industria minera.	83
Figura IV.16.	Distribución de frecuencias a) de las velocidades de los vientos y b) de las estabilidades atmosféricas en primavera de 2009 (Rammet View).	84
Figura IV.17.	Distribución de frecuencias a) de las velocidades de los vientos y b) de las estabilidades atmosféricas en verano de 2009 (Rammet View).	85
Figura IV.18.	Distribución de frecuencias a) de las velocidades de los vientos y b) de las estabilidades atmosféricas en otoño de 2009 (Rammet View).	86
Figura IV.19.	Distribución de frecuencias a) de las velocidades de los	

	vientos y b) de las estabilidades atmosféricas en invierno de 2009 (Rammet View).	87
Figura IV.20.	Modelado del transporte de PM10 en el patio de lixiviación-caminos para un periodo de 24 horas (realizado en el AERMOD View 6.5.0).	90
Figura IV.21.	Modelado del transporte de PM10 en el patio de lixiviación-caminos para un periodo de un año (realizado en el AERMOD View 6.5.0).	91
Figura IV.22.	Comparación entre las concentraciones de PM10 medidas por la estación de monitoreo del poblado del municipio del Cerro de San Pedro y las concentraciones de PM10 calculadas por el modelo AERMOD View para el año 2011.	94
Figura IV.23.	Comparación entre las concentraciones de PM10 medidas por la estación de monitoreo de la Zapatilla y las concentraciones de PM10 calculadas por el modelo AERMOD View para el año 2009.	97
Figura IV.24.a	Curvas de isoconcentración en la zona norte del sitio de estudio y caminos de la industria minera, para las estaciones de a) primavera (izquierda) y b) verano (derecha), respectivamente (Modelo Aermom View 6.5.0).	101
Figura IV.24.b	Curvas de isoconcentración en la zona norte del sitio de estudio y caminos de la industria minera, para las estaciones de a) primavera (izquierda) y b) verano (derecha), respectivamente (Modelo Aermom View 6.5.0).	101
Figura IV.25.a	Curvas de isoconcentración en la zona norte del sitio de estudio y caminos de la industria minera, para las estaciones de c) otoño (izquierda) e d) invierno (derecha), respectivamente (Modelo Aermom View 6.5.0).	102
Figura IV.25.b	Curvas de isoconcentración en la zona norte del sitio de estudio y caminos de la industria minera, para las estaciones de c) otoño (izquierda) e d) invierno (derecha), respectivamente (Modelo Aermom View 6.5.0).	102
Figura IV.26.	Ejemplos de cómo influyen las trayectorias de vientos modeladas en el HYSPLIT sobre el transporte de PM10 modelado en el AERMOD View para cada una de las estaciones del año al norte y caminos de la industria minera	103
Figura IV.27.a	Curvas de isoconcentración en la zona sur del sitio de	

	estudio y caminos de la industria minera, para las estaciones de f) primavera (izquierda) y g) verano (derecha), respectivamente (Modelo Aermod View 6.5.0).	104
Figura IV.27.b	Curvas de isoconcentración en la zona sur del sitio de estudio y caminos de la industria minera, para las estaciones de f) primavera (izquierda) y g) verano (derecha), respectivamente (Modelo Aermod View 6.5.0).	104
Figura IV.28a.	Curvas de isoconcentración en la zona sur del sitio de estudio y caminos de la industria minera, para las estaciones de h) otoño (izquierda) e i) invierno (derecha), respectivamente (Modelo Aermod View 6.5.0).	105
Figura IV.28.b	Curvas de isoconcentración en la zona sur del sitio de estudio y caminos de la industria minera, para las estaciones de h) otoño (izquierda) e i) invierno (derecha), respectivamente (Modelo Aermod View 6.5.0).	105
Figura IV.29.	Comparación entre las concentraciones de PM10 medidas por la estación de monitoreo de la Zapatilla y las calculadas por el modelo AERMOD View para la primavera de 2009.	107
Figura IV.30.	Comparación entre las concentraciones de PM10 medidas por la estación de monitoreo de la Zapatilla y las calculadas por el modelo AERMOD View para la verano de 2009.	107
Figura IV.31.	Comparación entre las concentraciones de PM10 medidas por la estación de monitoreo de la Zapatilla y las calculadas por el modelo AERMOD View para la otoño de 2009.	108
Figura IV.32.	Comparación entre las concentraciones de PM10 medidas por la estación de monitoreo de la Zapatilla y las calculadas por el modelo AERMOD View para la primavera de 2009.	108
Figura V.1.	Área en la que, de acuerdo con los resultados del modelo, la concentración calculada de PM10 para un periodo de 24 h podría rebasar la NOM-025-SSA1-1993 al norte, sur y caminos de la industria minera.	110
Figura V.2.	Área en la que, de acuerdo con los resultados del modelo, la concentración calculada de PM10 para el periodo de un año podría rebasar la NOM-025-SSA1-1993 al norte y caminos de la industria minera.	111
Figura V.3.	Área en la que, de acuerdo con los resultados del	

	modelo, la concentración calculada de PM10 para un periodo de 24 h podría rebasar la NOM-025-SSA1-1993 al sur y caminos de la industria minera.	112
Figura V.4.	Área en la que, de acuerdo con los resultados del modelo, la concentración calculada de PM10 para el periodo de un año podría rebasar la NOM-025-SSA1-1993 al sur y caminos de la industria minera.	113
Figura V.5.	Áreas de influencia en donde se rebasaría el límite de las concentraciones de PM10 para las cuatro estaciones del año 2009 al norte y caminos de la industria minera.	115
Figura V.6.	Áreas de influencia en donde se rebasaría el límite de las concentraciones de PM10 para las cuatro estaciones del año 2009 al sur y caminos de la industria minera.	116
Figura V.7.	Propuesta de ubicación de estaciones de monitoreo de PM10 en la zona norte del sitio de estudio de la industria minera a cielo abierto. La estación EM_ZAP_01 ubicada en el poblado de la Zapatilla continuará operando en el sitio que está instalada.	118

Introducción

Hoy en día, el estudio de la contaminación atmosférica es uno de los temas ambientales más nombrados debido al enorme impacto que ésta tiene a nivel mundial sobre el cambio climático, la tecnología, la salud y la toma de decisiones sobre cuestiones políticas y económicas.

Los contaminantes que son emitidos al aire pueden ser de distintos tipos, ya que son generados por medios naturales y antropogénicos, teniendo impactos a escala local, regional y global.

Actualmente para las empresas resulta costoso operar equipos de monitoreo de contaminantes atmosféricos y decidir en donde resulta más conveniente ubicarlos.

Una manera menos honerosa de identificar las áreas de influencia más afectadas por los contaminantes atmosféricos generados por una empresa, es utilizando modelos que permitan simular el comportamiento de éstos.

En esta investigación se analiza a escala local el transporte de material particulado (polvo) menor de diez micrómetros (PM10) que se genera en una industria minera a cielo abierto debido a los daños que puede ocasionar en el ambiente e incluso en la salud de las personas.

El trabajo de investigación que se lleva a cabo en esta tesis de maestría es la identificación de aquellas concentraciones de PM10 en la atmósfera, que se generan por las distintas actividades llevadas a cabo en una industria minera a cielo abierto, y en base a esta información, proponer la ubicación de estaciones de monitoreo para dicho material particulado.

Las herramientas que serán utilizadas en este proyecto para realizar dicho análisis son modelos especializados en el cálculo de las concentraciones de material particulado y el análisis de los parámetros meteorológicos que influyen en su dispersión.

En el capítulo I se presentan las bases teóricas y matemáticas sobre las cuales descansa este proyecto, así como la descripción de las características más importantes de una mina a cielo abierto y las Normas Mexicanas que regulan los niveles en las concentraciones de varios tipos de polvos, particularmente de PM10.

El segundo capítulo contiene el planteamiento del caso de estudio desde un punto de vista histórico, geográfico y técnico, además de que se establecen los objetivos sobre los cuáles descansa este proyecto.

Los procedimientos a seguir para realizar los modelados de los patrones de vientos y el transporte de PM10 se presentan en el tercer capítulo, además de que también contiene los pasos con los que se procederá más adelante para delimitar las zonas de estudio de la calidad del aire y proponer la ubicación de estaciones de monitoreo de PM10.

En los capítulos IV y V se presentan los modelados de los patrones de vientos y de las concentraciones de PM10 junto con sus respectivas interpretaciones, además de que se muestra la aplicación de procedimientos estadísticos que permiten evaluar y validar las concentraciones calculadas de PM10.

Finalmente en el capítulo VI se muestran las conclusiones de esta investigación con la intención de mostrar los resultados más importantes y explicar su trascendencia en esta investigación, además de mencionar cuáles podrían ser algunos proyectos a futuro.

Capítulo I. Estudio de la contaminación atmosférica por material particulado y su monitoreo

I.1 MARCO TEÓRICO

Un tema de trascendencia en la actualidad a escala local, regional y global es la contaminación atmosférica y sus implicaciones sobre el medio ambiente natural y antropogénico.

La sección siguiente está dedicada al estudio de la composición y clasificación de las diversas capas que forman la atmósfera, principalmente de aquella en la que se determina el clima de la Tierra y ocurre el fenómeno de la contaminación del aire.

I.1.1 ATMÓSFERA

Las características físicas y químicas de la atmósfera varían dependiendo de su altura. Los estudiosos la han dividido en cinco capas. De mayor a menor altura con respecto al nivel del mar, la **exósfera** es la de mayor altitud; en ésta, los átomos escapan al espacio exterior. Su límite inferior de altura está entre 600 y 700 kilómetros, mientras que su extremo con el espacio exterior, se extiende a una altura de hasta 10,000 kilómetros (CEPIS, s.f.).

La capa siguientes es la **termósfera**, cuya altura promedio está en un rango de 85 y 700 kilómetros, y alcanza una temperatura máxima de hasta 1,500°C. Su límite superior con la exósfera es conocido como termopausa. Más abajo se encuentra la **mesósfera**, en donde la temperatura disminuye a medida que

aumenta la altura (por ejemplo, a 80 kilómetros de altitud, la temperatura llega a los 80 grados centígrados bajo cero); además, contiene sólo el 0.1% de la masa total del aire. Su límite superior con la termósfera es la mesopausa y el inferior con la estratósfera es la estratopausa (CEPIS, s.f.).

Al continuar con el descenso, se encuentra la **estratósfera**, la cual está contenida en un rango aproximado de 11 a 50 kilómetros de altura. La temperatura aumenta progresivamente con la altitud, yendo de los 55 grados centígrados bajo cero hasta los cero grados centígrados. Además, es aquí donde se encuentra la capa de ozono, cuyo espesor impide que se filtren en demasía los rayos ultravioleta (López, 2009). El límite superior con la mesósfera es la estratopausa y el inferior es conocido como tropopausa (CEPIS, s.f.).

Finalmente, la **tropósfera** está formada por casi tres cuartos de la masa atmosférica y contiene la mayoría de los componentes hídricos (vapor, nubes y precipitación). En esta se encuentran las masas de aire, los frentes y las tormentas, es la capa más agitada y la que determina el clima de la superficie terrestre. Su profundidad varía con la latitud y la estación del año. Sobre el ecuador, la parte superior (tropopausa) está aproximadamente a 16.5 km de altura, mientras que sobre los polos está a 8.5 km. Los cambios estacionales determinan su grosor, provocando que sea más gruesa en verano (cuando el aire es más cálido) que en invierno. Su profundidad cambia constantemente debido a variaciones en la temperatura, además, casi toda la contaminación del aire se emite en ésta capa (CEPIS, s.f.).

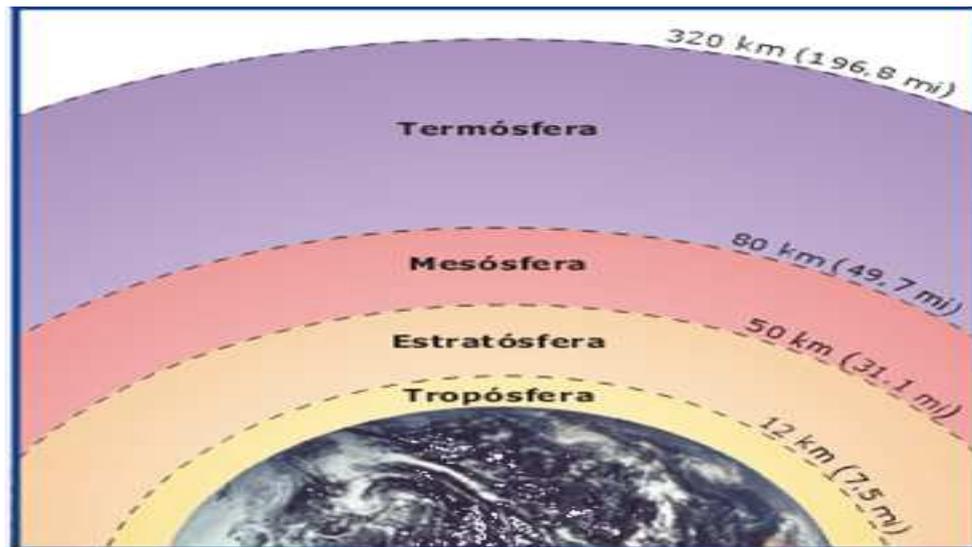


Figura I.1. Capas de la atmósfera (Morán y col., 1994).

Con el objeto de comprender la relación que existe entre los fenómenos físicos que rigen el comportamiento de la tropósfera y los contaminantes que se encuentran en ella, en la sección siguiente se presentan los conceptos básicos que permiten analizarlos de manera conjunta.

I.1.2 PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN EL ESTUDIO DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

En el estudio de los contaminantes atmosféricos, la “dispersión” en sí misma es un fenómeno físico que ayuda a entender el transporte de los contaminantes en la tropósfera, y cuyo significado se entiende como un proceso relacionado con el complejo comportamiento de las masas de aire que depende de las variaciones globales y locales del clima. (Santa Cruz, 2000).

La dispersión de un contaminante en el aire depende de varios factores, entre ellos: 1) la velocidad del viento, cuya magnitud depende de las características físicas del sitio de estudio (topografía, temperatura, humedad, etc.), y 2) la estabilidad atmosférica (M. Morán y col., 1997), que se relaciona esencialmente con los cambios de temperatura vertical; es decir, la variación en la temperatura del aire conforme va cambiando la altura respecto del suelo.

En el estudio de la estabilidad atmosférica se comparan básicamente dos parámetros cuyo valor depende de la altura sobre el nivel del mar a la que sean medidos o calculados: 1) el gradiente de temperatura adiabático (GAD) y el gradiente de temperatura del ambiente (GAMB).

En un proceso adiabático, la única forma en que una parcela que se define como una unidad de masa de aire de 1g y lo que está a su alrededor puedan ganar o perder calor, es mediante el trabajo mecánico que realizan una sobre la otra, respectivamente, a través de la presión que ejercen entre sí. Este fenómeno viene acompañado de la variación vertical de la temperatura de dicha parcela (GAD) y de sus alrededores (GAMB).

Para entender mejor los conceptos de gradiente vertical, sistema adiabático y trabajo mecánico (presión), se muestra la figura siguiente:

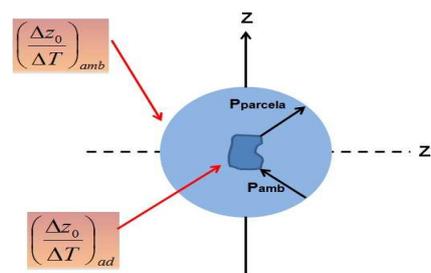


Figura I.2. A determinada altura Z_0 , tanto la parcela de aire (figura no-uniforme) como el ambiente, están a cierta temperatura (T). Se observa que la parcela ejerce un trabajo (presión x distancia) sobre el ambiente y viceversa.

La velocidad de las parcelas de aire, dependen entre otras cosas de la rugosidad de la superficie del suelo (M. Morán y col., 1997), ya que a menor altitud de éstas, mayor fricción habrá entre ambas.

Hasta este punto se han analizado tres parámetros meteorológicos. Además se ha visto como éstos se relacionan entre sí cuando se estudian los fenómenos físicos de “dispersión” y “temperatura vertical”.

Para comprender la relación que existe entre temperatura, presión, velocidad del viento y contaminación atmosférica, es importante analizar los conceptos de “altura de la capa de mezcla” y “estabilidad atmosférica”.

I.1.2.1 Estabilidad atmosférica y altura de la capa de mezcla

Un método para estudiar y clasificar a la estabilidad atmosférica, se basa en la determinación del “gradiente de temperatura” (Santa Cruz, 2000), cuya deducción matemática, a partir de parámetros de la termodinámica, se encuentra en el apéndice A. A continuación se plasman las expresiones finales:

$$\begin{aligned} 1) \left(\frac{dT}{dz} \right)_{amb} < \left(\frac{dT}{dz} \right)_{ad} &\Rightarrow \text{atmósfera inestable.} \\ 2) \left(\frac{dT}{dz} \right)_{amb} = \left(\frac{dT}{dz} \right)_{ad} &\Rightarrow \text{atmósfera neutra.} \\ 3) \left(\frac{dT}{dz} \right)_{amb} > \left(\frac{dT}{dz} \right)_{ad} &\Rightarrow \text{atmósfera estable.} \end{aligned} \quad \text{(Ecuación I.1)}$$

En estas expresiones matemáticas, la derivada total con subíndice “amb” se refiere al GAMB, y la que tiene el subíndice “ad” representa al GAD. Para entender éstas tres desigualdades se deben estudiar dos conceptos: el estado de equilibrio dinámico y la saturación de presión de vapor. De acuerdo a M. Morán y col. (1997), cada una se presenta en las siguientes situaciones:

- a) **Estado de equilibrio dinámico:** Puede darse cuando el agua en estado líquido comienza a convertirse en vapor de agua, a la misma proporción y velocidad que el vapor de agua comienza a convertirse en líquido. Esto es, el flujo de moléculas de agua es el mismo en ambas direcciones”.
- b) **Saturación de presión de vapor:** Se presenta cuando al encontrarse las moléculas de agua en estado de equilibrio dinámico, la presión de vapor es constante, donde ésta depende de la velocidad de vaporización del agua en estado líquido, y que a su vez es regulada por la temperatura.

En base a estos dos conceptos se considera un sistema adiabático en el cual, en estado de equilibrio dinámico se tiene una parcela de aire “no saturada”; es

decir, que no se encuentra a presión constante en el ambiente y por lo tanto, su temperatura y la de sus alrededores puede variar. Bajo estas condiciones, la atmósfera puede tener alguno de los casos siguientes:

- 1) **Atmósfera inestable (figura I.3.):** Se presenta cuando una parcela de aire permanece más caliente (y por lo tanto menos densa) que el aire del ambiente y continúa ascendiendo o descendiendo, cuando dicha parcela permanece más fría (y por lo tanto más densa) que el aire del ambiente:

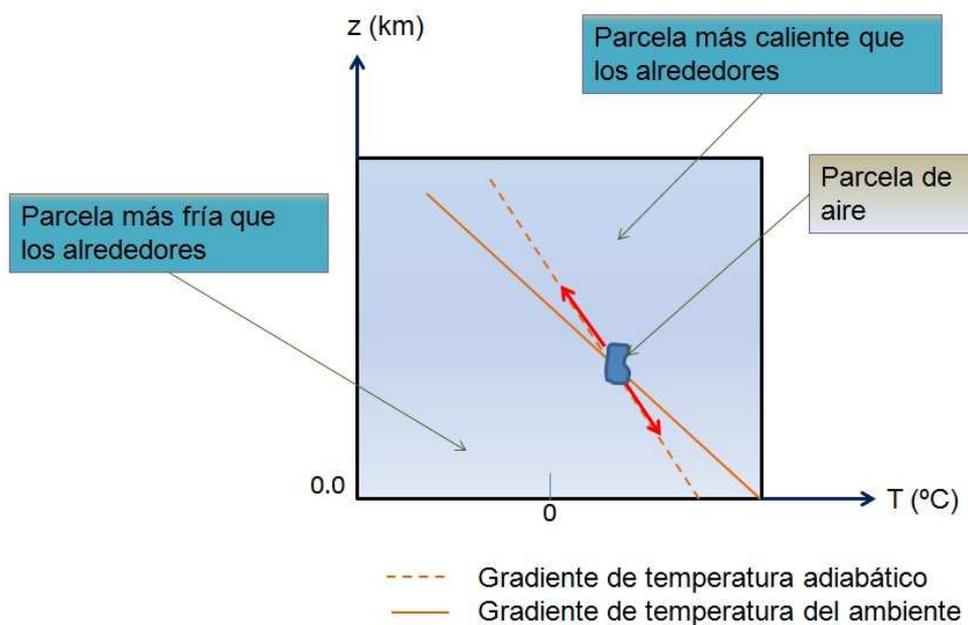


Figura I.3. Parcela de aire envuelta en una atmósfera inestable.

- 2) **Atmósfera estable (figura I.4.):** Ésta ocurre cuando una parcela de aire ascendiendo, comienza a tener una menor temperatura (y mayor densidad) que el aire del ambiente; o bien, cuando una parcela de aire descendiendo comienza a tener una mayor temperatura (y menor densidad) que el aire del ambiente. Por lo tanto, cualquier desplazamiento hacia arriba o hacia abajo de ésta parcela bajo estas condiciones, provoca un movimiento de fuerzas tal, que desplazará a la parcela de aire a su altitud original. El comportamiento de la parcela se presenta en la siguiente figura:

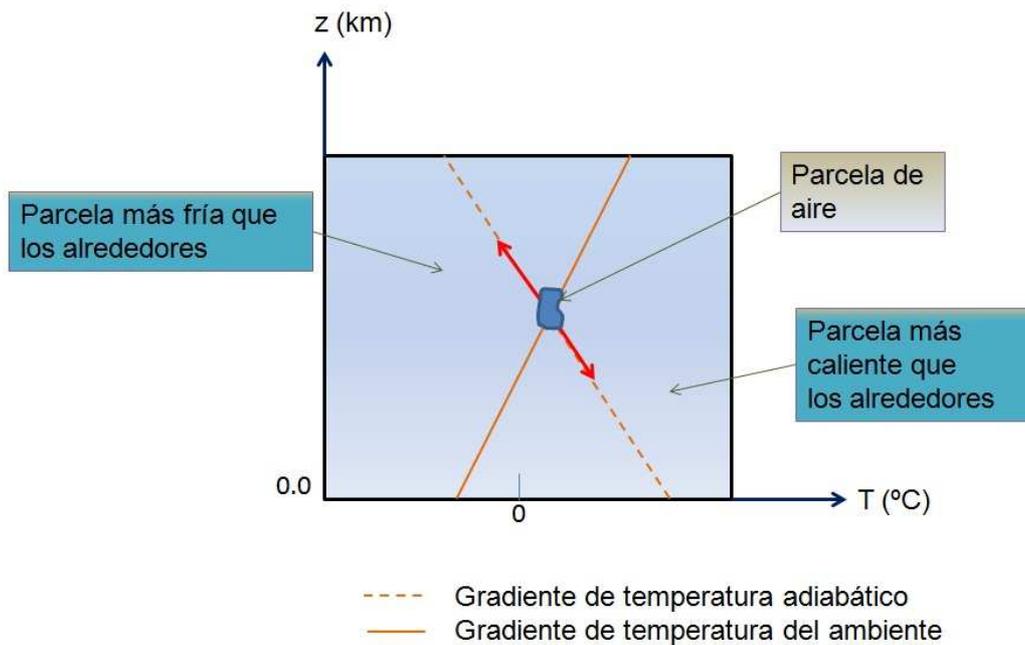


Figura I.4. Parcela de aire envuelta en una atmósfera estable.

- 3) **Atmósfera Neutra (figura I.5.):** Ésta se produce cuando el gradiente de temperatura adiabático (GAD) es igual al gradiente de temperatura del ambiente (GAMB). Dichas condiciones en un sistema adiabático no estimulan ni inhiben el movimiento vertical del aire; es decir, la parcela tiene el mismo patrón de comportamiento que sus alrededores. Este fenómeno constituye el límite entre la atmósfera estable y la inestable (CEPIS, s.f.):

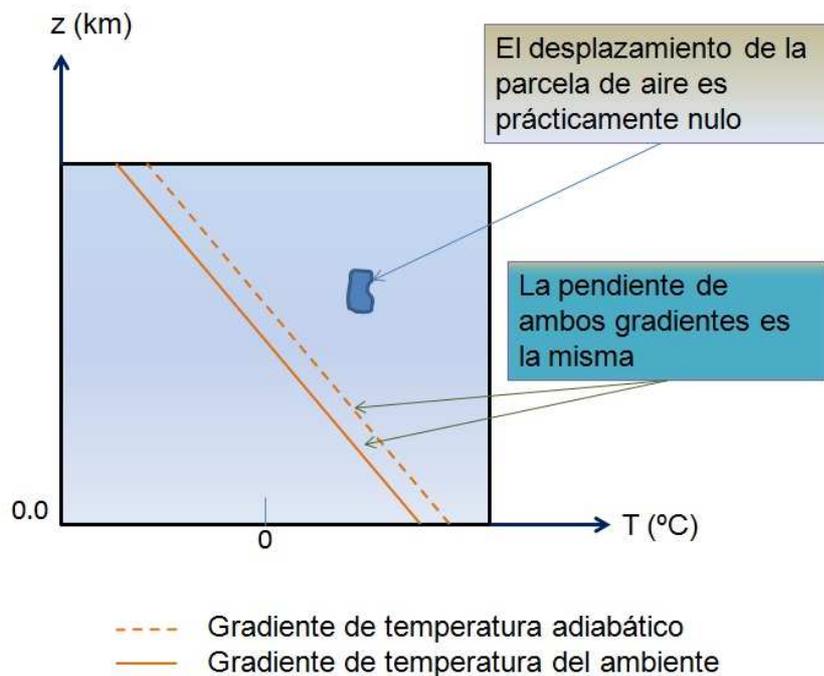


Figura I.5. Parcela envuelta en una atmósfera neutra.

Como se observa en las figuras I.3., I.4. y I.5., las pendientes del GAD son negativas, lo cual significa que cerca de la superficie hay mayor temperatura que lejos de ésta. Este fenómeno ocurre comúnmente durante el día debido a que la energía solar (generada por la radiación proveniente del sol) calienta dicha superficie. Sin embargo, durante la noche el suelo se enfría, provocando un fenómeno conocido como “inversión térmica (o inversión nocturna), tal y como se muestra en la figura siguiente:

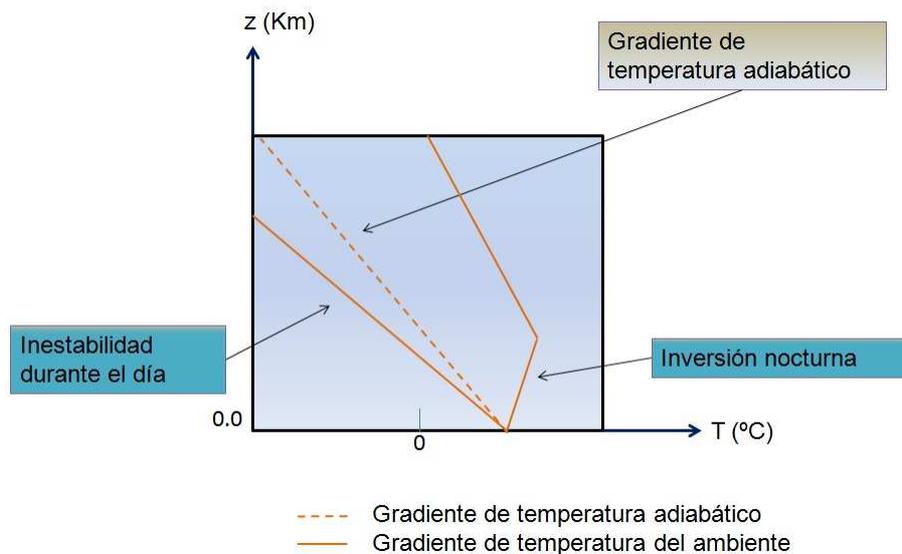


Figura I.6. Inversión térmica durante la noche.

La mayoría de los contaminantes atmosféricos no ascienden más allá de los límites de la tropósfera. El aire de dicha capa está en contacto con la superficie terrestre y su movimiento se ve afectado por la fricción que se genera entre ambos debido a la rugosidad del suelo tal y como se mencionó anteriormente. Esto ocasiona que haya movimientos turbulentos entre el aire y los contaminantes, dando lugar a la mezcla de ambos, lo que ha llevado a que la capa más baja de la atmósfera, también sea conocida como la “capa de mezcla” (Moragues, s.f.).

En las figuras I.3 y I.4 se observa a una cierta altura, un punto de intersección entre las pendientes del gradiente de temperatura adiabático y el gradiente de temperatura del ambiente. A la altitud a la que se encuentra éste cruce de rectas, se le conoce como “altura de la capa de mezcla” (ACM), (CEPIS, s.f.), que es la elevación máxima sobre el nivel del mar a la que se pueden mezclar los contaminantes con el aire de la tropósfera.

Moragues (s.f.) indica que: *“la estabilidad de la atmósfera depende de la diferencia de temperatura entre una porción de aire (parcela de aire) y el aire que la rodea. Por consiguiente, se pueden producir diferentes niveles de estabilidad según cuán grande o pequeña sea la diferencia de temperatura entre la porción de aire y el aire circundante”*

El método más común para clasificar la estabilidad atmosférica es el que se basa en los principios básicos ya explicados y que dan lugar a distintas categorías, mejor conocidas como “clases de estabilidad de Pasquill-Guifford”, las cuales se presentan en la tabla siguiente:

Tabla I.1. Categorías de Estabilidad de Pasquill

Nomenclatura	Clase de estabilidad
A	Muy inestable
B	Inestable
C	Ligeramente inestable
D	Neutra
E	Ligeramente estable
F	Estable

La tabla I.2 indica el método indirecto para definir la estabilidad atmosférica en función de parámetros medidos regularmente por estaciones meteorológicas como, velocidad del viento, nubosidad y radiación solar incidente. Algunas precisiones de la tabla son:

- (1) Las unidades de radiación solar se expresan en cal/cm^2 o en kWh/m^2 , donde $1 \text{ cal/cm}^2 = 0.0116 \text{ kWh/m}^2$.
- (2) La noche se mide como el periodo desde una hora después de la puesta del sol, hasta una hora antes de la salida del mismo.
- (3) La nubosidad se mide en octavos, lo cual significa que $0/8$ es cielo despejado; $4/8$ es la mitad del cielo cubierto y $8/8$ es el cielo totalmente cubierto.

Tabla I.2. Turbulencia de la atmósfera. Clases de estabilidad (Moragues, s.f.).

Velocidad del viento (m/s) a 10 m de altura	Día			Noche (2)	
	Radiación solar incidente (1)				
	Fuerte	Moderada	Débil	$4/8 \leq \text{Nubosidad} \leq 7/8$	Nubosidad $\leq 3/8$
	Mayor que 50 cal/cm ² h	Entre 25 y 50 cal/cm ² h	Menor que 25 cal/cm ² h		
<2	A	A-B	B	F	F
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

I.1.2 CONTAMINACIÓN POR GASES Y MATERIAL PARTICULADO

Los contaminantes atmosféricos pueden presentarse en las tres fases de la materia (sólido, líquido y gaseoso) y por ello son estudiados como gases o partículas.

Los gases contaminantes son emitidos a la atmósfera a partir de distintos tipos de fuentes, ya sean naturales o antropogénicos. Thad Godish, en su libro sobre la calidad del aire (Air Quality) dice lo siguiente: *“Cientos de diferentes químicos pueden estar presentes en el aire contaminado de muchas áreas metropolitanas que existen en el planeta. Alrededor de 400 especies de gases han sido identificadas tan sólo en automóviles, y muchas otras sustancias son producidas como resultado de la química atmosférica”*. Algunos ejemplos de contaminantes en fase gaseosa que presentan un riesgo potencial en la salud de las personas son: óxidos de carbono, dióxido de carbono, compuestos de nitrógeno, óxido nitroso y compuestos de hidrocarburos (Godish, 2005), entre otros.

Por otro lado, las partículas atmosféricas comprenden sustancias en estado líquido y sólido que varían en tamaño, masa, densidad, morfología, composición química entre otras propiedades físicas. (Godish, 2005).

De acuerdo a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y al Instituto Nacional de Ecología (INE), el término “material particulado” (PM por sus siglas en inglés), se refiere a *“cualquier partícula sólida o líquida de hollín, polvo, aerosoles, humos y nieblas”*. Además, respecto a los tipos de PM, menciona lo siguiente: *“Algunas clasificaciones del PM incluyen partículas totales, partículas primarias y secundarias, partículas suspendidas totales (PST), partículas suspendidas (PS), partículas con diámetro aerodinámico menor que 10 micras (PM10), partículas con diámetro aerodinámico menor que 2.5 micras (PM2.5); así como partículas filtrables y condensables”* (SEMARNAT, INE, 2005).

Thad Godish, en su libro sobre la calidad del aire (Air Quality), con el objeto de describir a las partículas primarias y secundarias, dice lo siguiente: *“Las partículas primarias son emitidas directamente a la atmósfera desde una variedad de fuentes naturales y antropogénicas. Las partículas secundarias son emitidas desde sustancias en fase gaseosa... como resultado de procesos químicos en los que se ven envueltos gases, partículas de aerosol, agua y vapor de agua”* (Godish, 2005).

Las PST están integradas por toda la materia emitida a la atmósfera en forma sólida, líquida y de vapor, y que a su vez, se encuentran “suspendidas” en el aire y tienen un diámetro aerodinámico máximo de 100µm. Aquellas con un diámetro mayor tienden a depositarse rápidamente en la superficie y no deben ser consideradas como emisiones al aire.

El depósito en el suelo de aquellas partículas con un diámetro entre 30 y 100 µm es considerado inestable (SEMARNAT, INE, 2005); es decir, en un principio son depositadas en el suelo y tiempo después pueden ser arrastradas nuevamente por el aire a otro sitio.

Las PS son aquellas con un diámetro menor que 30 µm; además, con frecuencia este término es utilizado como sustituto de las PST para dicho rango de tamaño de partículas. Finalmente, las partículas condensables están formadas por materia en fase vapor (SEMARNAT, INE, 2005).

En la figura I.7 se muestran los diferentes tipos de material particulado, acotados en tamaño de acuerdo a su diámetro.

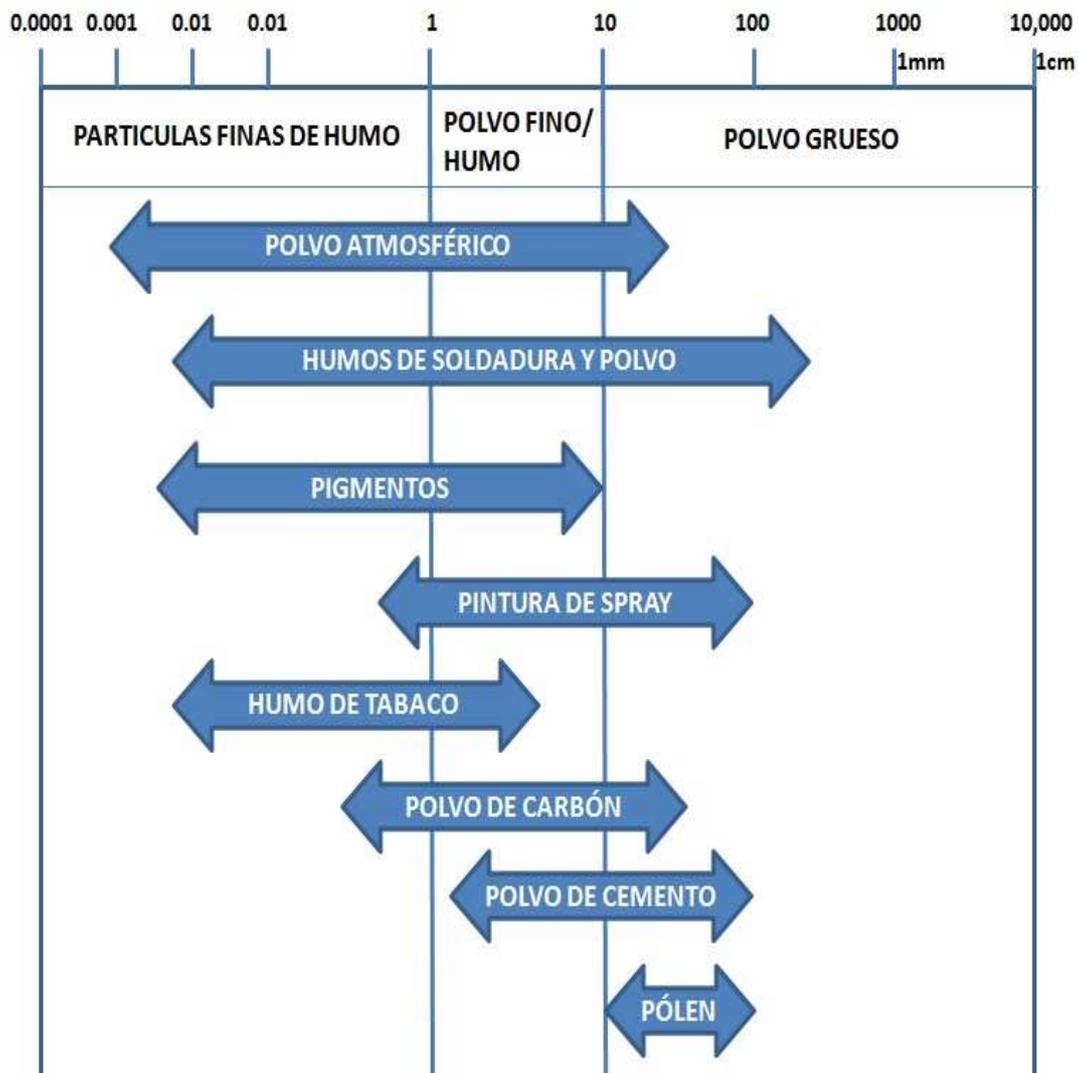


Figura I.7. Tamaño de las partículas tanto de origen natural como industrial (Moreton y col., 1980).

Una vez estudiada a grosso modo, la contaminación atmosférica generada por gases y partículas, es importante ahora dedicar atención a la manera en que éstos se dispersan en la tropósfera por acción del viento. Es por ello que en la siguiente sección se establecen los conceptos básicos del fenómeno de transporte, principalmente para el material particulado.

I.1.3 DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN EL AIRE

La dispersión de contaminantes en la tropósfera se presenta bajo la acción de dos fenómenos físicos conocidos como difusión y advección (Santa Cruz, 2000).

La advección se refiere al arrastre del contaminante por acción del viento, mientras que la difusión analiza la forma en que ésto sucede.

La difusión molecular (o régimen laminar) se caracteriza por un movimiento ordenado del contaminante en la tropósfera, existiendo unas líneas de corriente y trayectorias bien definidas; mientras que en la difusión turbulenta (o régimen turbulento), el contaminante presenta un movimiento caótico, sin que exista una única trayectoria (Rivas, 2003).

Con el objeto de ejemplificar estos conceptos, se considera que un contaminante (compuesto por gases o material particulado) presenta difusión en una configuración (o espacio) bien definida bajo ciertas condiciones de frontera, entonces, para un régimen laminar, la velocidad promedio del contaminante es constante (figura I.8a., gráfica superior) ya que la velocidad instantánea (figura I.8b., gráfica superior) fluctúa a su alrededor para todo tiempo. Sin embargo, para un régimen turbulento, la velocidad promedio no es constante en el tiempo (figura I.8a., gráfica inferior) debido al comportamiento de la velocidad instantánea (figura I.8b., gráfica inferior).

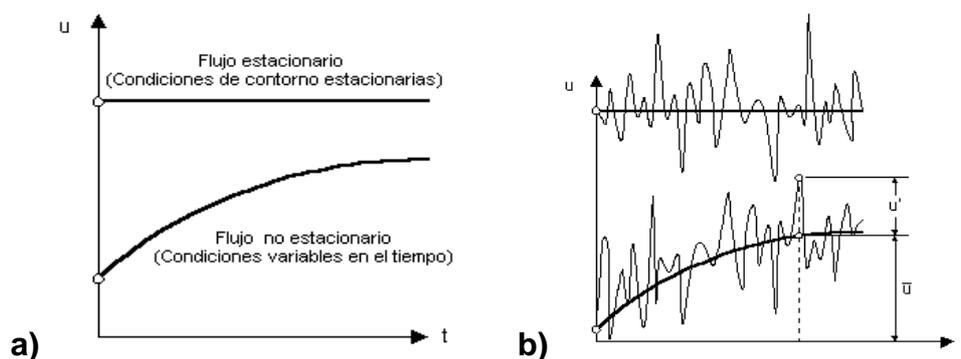


Figura I.8. Flujo laminar y turbulento (Rivas, 2003).

Dependiendo del tipo de estabilidad atmosférica, el aire puede presentar un régimen laminar o turbulento. Cuando se presenta el caso de una atmósfera inestable, la dispersión se produce por difusión turbulenta, mientras que en

condiciones altamente estables predomina el proceso de régimen laminar (Santa Cruz, 2000).

En este proyecto, la zona de estudio es una minera a cielo abierto de oro y plata, en la que se realizan procesos que emiten a la atmósfera material particulado de distintos tamaños. En la siguiente sección se estudian las características de una mina a cielo abierto y las actividades que en ésta se realizan.

I.2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE UNA MINA A CIELO ABIERTO

El Instituto Nacional de Ecología (INE), en un artículo titulado “Importancia de la minería en México” dice lo siguiente: *“la minería es una de las actividades económicas de mayor tradición en México. Ha estado presente en el desarrollo del país como un factor importante de modernización y avance al suministrar insumos a prácticamente todas las industrias, entre las que destacan las de la construcción, la metalúrgica, la siderúrgica, la química y la electrónica. Además, forma parte en la fabricación de artículos de uso cotidiano, que van desde lápices, relojes, joyas, televisores, computadoras, automóviles, camiones, la construcción de casas, edificios y carreteras, hasta la manufactura de una gran variedad de maquinaria y equipo”* (INE, 2007).

La minería es una industria extractiva de recursos naturales no renovables de alto riesgo debido a las evaluaciones preliminares para encontrar zonas de explotación económicamente viables; tiene un ciclo de vida variable que depende del capital con el que se cuenta; depende de una localización determinada en donde se encuentre el recurso mineral; existe una alta relación entre el producto de interés (mineral) y el desperdicio (estéril); y finalmente, hay un impacto ecológico ocasionado por la remoción de grandes cantidades de suelo provocado por la maquinaria que se ocupa para dicho propósito (Estudios Mineros del Perú S. A. C., s.f.)

Existen dos tipos de explotación minera: 1) La subterránea, se realiza por debajo del suelo y 2) A cielo abierto, llevada a cabo en la superficie (también conocida como “minería a tajo abierto”).

Este estudio de maestría está relacionado con el estudio del transporte de PM10 en una mina a cielo abierto y sus alrededores, por lo que a continuación se describen sus características principales y las actividades que en ésta se llevan a cabo.

El manual de minería realizado por “Estudios Mineros del Perú S. A C.”, define a la minería a cielo abierto como *“una explotación en superficie que extrae franjas horizontales, llamados bancos, en forma descendente a partir del banco que está en la superficie”*, también respecto a la cantidad de material pétreo a remover dice lo siguiente: *“este tipo de explotación es de gran volumen y se aplica en yacimientos masivos de gran tamaño, cerca de la superficie, puesto que a mayor profundidad aumentará la cantidad de material estéril a remover”*.



Figura I.9. Mina a cielo abierto conocida como “El Chino”, localizada en Silver City, New Mexico. Al fondo de la fotografía se pueden observar las franjas horizontales (bancos) extraídas (Guinther, 2003).

I.2.1 PRINCIPALES ACTIVIDADES LLEVADAS A CABO EN UNA MINA A CIELO ABIERTO

En una industria minera a cielo abierto, particularmente la que es objeto de estudio en este proyecto, se desarrollan diversas actividades para la extracción y procesamiento del material pétreo, tal y como se muestra en la figura 1.10:

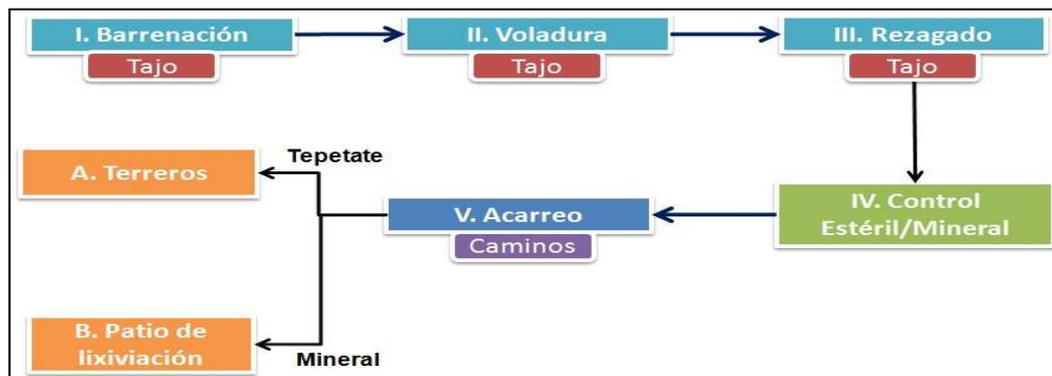


Figura 1.10. Diagrama de las actividades realizadas en una mina a cielo abierto de oro y plata.

En el proceso de barrenación abren agujeros de un tamaño específico en el suelo con el objeto de introducir los explosivos; la voladura es en esencia la acción de quebrar la superficie del suelo en donde se realizó la barrenación; el rezagado se refiere al levantamiento del material pétreo fracturado por la voladura; en el acarreo, el material pétreo es transportado en vehículos especiales; finalmente, el control del material estéril y del mineral es el proceso por el cual se coloca por un lado el mineral en el patio de lixiviación (en donde éste es procesado para separar el material que es económicamente de interés) y el material estéril o (tepetate) en los terreros.

Cada una de las actividades aquí descritas de manera general está compuesta a su vez de sub-actividades, cuya ubicación en la mina representa una zona potencial de emisión de material particulado (Huertas y col., 2009).

En las secciones siguientes se analizan los parámetros a considerar para el estudio del transporte del material particulado en una mina a cielo abierto.

I.3 TRANSPORTE DEL MATERIAL PARTICULADO

La cantidad de material particulado por actividad minera se cuantifica a través de un parámetro llamado “factor de emisión”, el cual permite la elaboración de un “inventario de emisiones”. En la siguiente sección se explica a detalle cada uno de los conceptos mencionados y su utilidad dentro de este proyecto.

I.3.1 FACTORES DE EMISIÓN E INVENTARIO DE EMISIONES

Una fuente de emisión es toda actividad, proceso u operación de tipo natural o antropogénico, susceptible de emitir contaminantes al aire (SGA, 2001).

De acuerdo a la SEMARNAT y al INE, las fuentes de emisión se agrupan en cuatro categorías principales (SEMARNAT, INE, 2005):

1. Fuentes puntuales o fijas.
2. Fuentes de área.
3. Fuentes de vehículos o automotores (o fuentes móviles).
4. Fuentes naturales.

Las fuentes puntuales o fijas son construcciones en donde se llevan a cabo actividades que emiten una gran cantidad de contaminantes a la atmósfera, como por ejemplo: refinerías, industrias cementeras, textiles, papeleras, etc.; las fuentes de área son edificaciones más pequeñas en donde hay una menor emisión de contaminantes, pero que en conjunto, emiten una gran cantidad de éstos por unidad de superficie; las fuentes móviles, como su nombre lo dice, son todos aquellos vehículos, como automóviles, camiones, trenes, motocicletas, etc.; finalmente, algunos ejemplos de fuentes naturales son los volcanes, los lugares donde hay incendios naturales, depósitos naturales de agua que al calentarse emiten vapor de agua, etc.

En una minera a cielo abierto se producen “emisiones fugitivas”, las cuales, de acuerdo al “Manual de Inventario de fuentes difusas” creado por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia se generan en lo que se conoce como “fuentes dispersas o fugitivas” y se definen como: *“Las fuentes*

*dispersas o fugitivas son aquellas en que los focos de emisión de una fuente fija se dispersan en un **área**, por razón del desplazamiento de la acción causante de la emisión” (K-2 Ingeniería, s.f.).*

La mayoría de las actividades que se llevan a cabo en una mina a cielo abierto, están formadas por una sucesión de fuentes fijas que en conjunto crean una fuente de área tal y como se muestra en la figura I.11:



Figura I.11. Zona de barrenación en una mina a cielo abierto de oro y plata (Minera San Xavier, s.f.). El recuadro en color rojo representa una fuente de superficie o área en donde se lleva a cabo dicha actividad.

Debido a la sucesión de fuentes fijas que en conjunto emiten contaminantes por unidad de superficie, las fuentes dispersas o fugitivas pueden ser estudiadas como fuentes de área.

El parámetro conocido como “factor de emisión”, permite cuantificar la cantidad de contaminantes emitidos por actividad minera (fuente de emisión). El Dr. Huertas y col., (2009) en su reporte llamado “Metodología unificada de inventario de emisiones para áreas de explotación minera a cielo abierto mencionan lo siguiente: *“A diferencia de las fuentes fijas y móviles, las emisiones fugitivas no se pueden medir en forma cotidiana. La práctica actual es estimar dichas emisiones haciendo uso de los factores de emisión”.*

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (US EPA por sus siglas en inglés), define un factor de emisión como *“una herramienta que es usada para estimar las emisiones de aire contaminado a la atmósfera”* (EPA, 1997). Por su parte, el INE y la SEMARNAT lo definen como *“una relación entre la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera y una unidad de actividad”* (SEMARNAT, INE, 2005).

Los factores de emisión son promedios de calidad aceptable y se asume que son representativos para largos periodos de tiempo (EPA, 1997). Estos se obtienen a partir de la ecuación siguiente de naturaleza empírica (Huertas y col., 2009):

$$E_f = \alpha S_a^a M_{pb}^b M_c^c \quad (\text{Ecuación I.2})$$

En esta expresión matemática

- E_f es el factor de emisión;
- S_a^a son las características propias de la actividad emisora;
- M_{pb}^b se refiere a las propiedades del material;
- M_c^c son las condiciones meteorológicas;
- Finalmente α , a , b , y c son constantes experimentales.

Para cuantificar la emisión del material particulado generada por las actividades mineras, se plantea la ecuación siguiente (Huertas y col., 2009):

$$E = AE_f(1-\eta) \quad (\text{Ecuación I.3})$$

En donde A es la intensidad de la actividad realizada y η es la eficiencia de la medida de control de emisión implementada. La EPA, considera que el parámetro η es igual a $\frac{E_R}{100}$, donde E_R es la “eficiencia de reducción global de emisiones”, y se divide entre cien para expresarlo en términos de un promedio (EPA, 1997).

Uno de los usos más importantes que se les da a los factores de emisión y a las emisiones cuantificadas es organizar la información generada, para la creación de un inventario de emisiones De acuerdo con la SEMARNAT, “*un inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos es un instrumento estratégico para la gestión de la calidad del aire. Un inventario, permite conocer las fuentes emisoras de contaminantes, así como el tipo y cantidad de contaminantes que emite cada una de ellas*” (SEMARNAT, INE, 2005).

Dentro de las actividades mencionadas en la figura I.10, las sub-actividades de la mina a cielo abierto que se tomaron en cuenta para elaborar el inventario de emisiones de PM10 la, son las siguientes (Gallegos, 2010):

1. Rezagado del mineral.
2. Carga del mineral yukeles.
3. Transporte de mineral.
4. Descarga del mineral a patios.
5. Acomodo de mineral para lixiviación.
6. Empuje de estériles.
7. Carga de estériles a camiones.
8. Transporte de estériles.
9. Descarga de estériles.
10. Voladura.
11. Erosión eólica en patios.
12. Tráfico de vehículos livianos.

En el apéndice B se exponen las expresiones matemáticas utilizadas para determinar los factores de emisión y las emisiones correspondientes a cada una de estas sub-actividades. En el apéndice C se muestran los valores obtenidos para los factores de emisión, así como el resultado del inventario de emisiones de PM10 de una mina a cielo abierto de oro y plata.

Nota: Una vez que ha quedado claro el concepto de sub-actividad minera, de ahora en adelante se utilizará indiscriminadamente la palabra “actividad”.

En el caso de ésta tesis de maestría se busca:

“Contar con los factores de emisión y con las emisiones de PM10 al aire de cada actividad desarrollada en la mina a cielo abierto estudiada, a fin de contar con datos de entrada al modelo de transporte de PM10 utilizados para calcular las concentraciones de PM10. Los datos de actividad de la mina corresponden al año 2009”.

I.3.2 MODELADO DEL TRANSPORTE DE MATERIAL PARTICULADO

“Un modelo es una representación que el pensamiento humano se da para representar una serie de fenómenos que se producen en la naturaleza” (Galarza, 1996).

De acuerdo a la “Guía para presentar un programa de monitoreo y gestión de la calidad del aire” realizado por el INE, los modelos pueden ser divididos en dos grupos principales (INE, 1994): 1) de diagnóstico (se basan en la descripción estadística de los datos de la calidad del aire) y 2) de pronóstico (utilizan los principios fundamentales de la fisicoquímica de los procesos ambientales).

Los prototipos que se usan para el estudio de un fenómeno de carácter natural o antropogénico pueden ser de dos tipos: físicos y matemáticos. Un modelo físico es una representación a escala de la realidad, el cual, por ejemplo, puede presentarse en una maqueta (Galarza, 1996), mientras que un modelo matemático busca interpretar la realidad mediante el uso de relaciones matemáticas simples o complejas.

El modelado de contaminantes atmosféricos sirve para diagnosticar o predecir cómo evolucionó o evoluciona en el tiempo y espacio el transporte y concentración de algún contaminante en un sitio determinado. Los modelos ocupados están diseñados para utilizarse en sistemas de cómputo que reúnan las características necesarias para realizar los cálculos matemáticos que se llevan a cabo durante la simulación y muestren resultados en el menor tiempo posible.



Figura I.12. Principales fases de un modelado (Kiely, 1999; Bustos, 2004).

Las fases del modelo consisten en lo siguiente:

- **Definir el problema:** Se explica en que consiste el problema y que es lo que se quiere llevar a cabo.
- **Construir o seleccionar el modelo:** Se decide entre el uso de un modelo ya existente y en la elaboración de uno nuevo en el que se tomen en cuenta las condiciones iniciales del caso de estudio.
- **Especificar los valores de los parámetros del modelo:** Se asignan los valores iniciales a los parámetros del modelo.
- **Hacer la simulación (o modelado):** El modelo construido o seleccionado realiza los cálculos necesarios para cuantificar los parámetros de salida.
- **Evaluar los resultados:** Mediante métodos estadísticos se analizan los resultados del modelo y se comparan con los valores medidos.

- **Validar:** Se define la confiabilidad del modelo, en base a la evaluación de los resultados.
- **Proponer un nuevo experimento:** Este punto también se conoce como análisis de sensibilidad (Bustos, 2004) y permite ajustar los parámetros del modelo, de tal forma que los resultados obtenidos se acerquen lo más posible a las mediciones.

I.3.2.1 Programas de cómputo para el modelado del transporte de PM10

En la actualidad existe una gran variedad de modelos para el estudio del transporte y dispersión de material particulado; su uso depende del tipo de fuente de emisión, variables meteorológicas y las condiciones topográficas del sitio de estudio, entre otros (como se observa en el apéndice D). Algunos consideran reacciones químicas, deposición húmeda o seca, etc., y son generalmente de tipo Gaussiano, Lagrangiano y Euleriano.

De acuerdo a la “Guía para la revisión de modelos de calidad del aire” (*Revision to the Guideline on Air Quality Models*), el modelo Gaussiano ISC3 es ampliamente recomendado por la EPA para el modelado de contaminantes atmosféricos (EPA, 2005). Sus características principales se muestran en la tabla siguiente:

Tabla I.3. Características principales del modelo ISC3 (Bustos, 2004).

Origen	US EPA y Lakes Environmental Software.
Aplicación	Fuentes puntuales, de área, lineal, volumen o complejos industriales.
Tipo de modelo	Gaussiano.
Contaminantes	Gases y partículas.
Terreno	Simple o complejo
Área	Urbano o rural

El modelo AERMOD View (Air Dispersion Modeling) que se utiliza en esta investigación fue diseñado por la U.S. EPA en cooperación con la empresa

canadiense Lakes Environmental Software. Sus características o atribuciones sobresalientes son las siguientes:

1. Mediante el uso de varios tipos de coordenadas, se puede localizar la zona de estudio y el tipo de fuente de emisión.
2. Permite seleccionar el tipo de contaminante (PM10, PST, etc.).
3. Se utilizan datos meteorológicos para realizar un análisis de diagnóstico.
4. Se basa en un “modelo Gaussiano para fuentes puntuales”, sin embargo, dependiendo del tipo de fuente de emisión, éste se puede adaptar al tipo de fuente que el usuario requiera.

Las mejoras con las que cuenta el modelo AERMOD View en comparación con las características del ISC3 son las siguientes (EPA, 2005):

- Mejor capacidad de aproximación para predecir concentraciones de contaminantes.
- El modelado sobre terrenos complejos o planos es mejor que en el ISC3, PRIME u otros modelos.

Además cuenta con nuevos o mejorados algoritmos para (Rivero, 2005):

- Tratamiento de fuentes elevadas y bajas.
- Perfiles verticales de viento, temperaturas y turbulencias.
- Tratamiento de receptores en todo tipo de terrenos.

I.3.2.2 Estudio de los parámetros meteorológicos a considerar

La meteorología, *(del griego meteoros (alto) y logos (tratado))*, “es el estudio de los fenómenos atmosféricos y de los mecanismos que producen el tiempo, orientado a su predicción. Los fenómenos atmosféricos o meteoros pueden ser: aéreos como el viento; acuosos, como la lluvia, la nieve y el granizo; luminosos como la aurora polar o el arcoíris; y eléctricos como el rayo” (Contreras, s.f.). En la presente investigación se utilizarán las variables meteorológicas de tipo aéreo.

Un parámetro meteorológico se define como *“aquella variable atmosférica o fenómeno (temperatura del aire, presión, viento, humedad, tormentas, nieblas, ciclones o anticiclones, etc.), que caracteriza el estado del tiempo en un lugar específico y en un tiempo dado”* (Contreras, s.f.).

Los parámetros meteorológicos que se utilizarán en este caso de estudio, son los siguientes: cobertura de las nubes, temperatura ambiente, humedad relativa, presión barométrica, dirección del viento, altura de las nubes, precipitación y radiación solar (Gallegos, 2010).

a) Cobertura de las nubes: El valor medio del cubrimiento de nubes se calcula a partir de las lecturas efectuadas en el hemisferio celeste, dividiéndolo previamente en ocho partes (Griffiths, 1985).

b) Temperatura ambiente: Se presenta cuando una parcela de aire está a la misma temperatura que sus alrededores y sus unidades son grados centígrados, Fahrenheit o Kelvin.

c) Humedad relativa: Compara la concentración actual de vapor de agua en el aire con la concentración de vapor de agua en la que el mismo aire está saturado (saturación de presión de vapor) ésta es adimensional y se presenta en porcentajes (%) (M. Morán y col., 1997).

d) Presión barométrica: La presión barométrica se calcula en base a la altura que alcanza el mercurio dentro de una columna de vidrio en base a la fuerza que ejerce la presión atmosférica sobre éste, generalmente su unidad es el milibar.

e) Dirección del viento: Por lo general se mide en grados ($^{\circ}$), minutos ($'$) y segundos ($''$), y el marco de referencia con respecto al cual se realizan estas mediciones es la rosa de vientos. La dirección del viento indica de dónde viene el viento (de dónde sopla).

f) Altura de las nubes: Se determina dependiendo del tipo de nube presente en la tropósfera; su clasificación viene dada por la “Organización Meteorológica Mundial”, y su unidad principal de medición es el metro.

g) Precipitación: Se produce por la caída directa en virtud de su peso, de gotas de agua o de cristales de hielo que se funden. Generalmente su medición se da en milímetros (Contreras, s.f).

h) Radiación solar: Se refiere a la energía solar que llega a la Tierra en forma de ondas electromagnéticas; se puede medir en Joules o Watts/m².

I.3.2.3 El transporte y difusión de contaminantes

Como se explicó anteriormente, la mayoría de las actividades llevadas a cabo en una mina a cielo abierto pueden ser estudiadas como “fuentes de área”, por lo tanto es necesario que las ecuaciones del modelo AERMOD View se ajusten a esta condición, afortunadamente el programa se adecúa a esta característica de manera automática.

Por otro lado, para conocer las limitaciones y ventajas de éste modelo, se necesita realizar una revisión y análisis de las principales expresiones matemáticas que maneja.

El AERMOD View permite conocer la concentración media de algún contaminante, ya sea gas o partícula en el sitio de estudio a partir de datos meteorológicos, topográficas, de las emisiones de dicho contaminante y del tipo de fuente. En la teoría se requiere manipular la “ecuación de difusión de un soluto a través de un fluido” (ecuación I.4) (Santa Cruz, 2000), para conocer dicha concentración:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\partial C}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla C = \nabla \cdot (k \nabla C) \quad (\text{Ecuación I.4})$$

C es la concentración del contaminante, t es el tiempo en el que se mide dicha concentración, \vec{u} es la velocidad del viento y k es el coeficiente de difusión. Otra manera de escribir dicha expresión matemática, es como la

“ecuación diferencial de balance de masa” (Galarza, 1996); sin embargo se ha elegido la “ecuación de un soluto a través de un fluido” por ser de carácter más general.

La ecuación 1.4 se deduce de la ecuación general de Navier-Stokes y posteriormente de su versión simplificada, conocida como la “ecuación de advección-difusión-reacción” (apéndice E).

Cuando se profundiza en el análisis de la concentración (C) de contaminantes en la atmósfera, se presentan dos parámetros, los cuales se observan en la ecuación:

$$C = C' + \bar{C} \quad (\text{Ecuación 1.5})$$

Esta relación matemática es conocida como ecuación de Reynolds, en donde C' representa la sumatoria de las fluctuaciones en los valores de la concentración de un contaminante para cierto intervalo de tiempo (ver régimen laminar en figura 7). En este caso se plantea la hipótesis de una difusión homogénea (flujo laminar) del contaminante, esto quiere decir que dichas perturbaciones son despreciables con respecto al tiempo tal y como se aprecia en la ecuación siguiente:

$$C' = \sum_i^n \frac{\partial C_i}{\partial t} = 0, \text{ donde } i=1,2,3,\dots \text{ fluctuaciones} \quad (\text{Ecuación 1.6})$$

Finalmente, en la ecuación de Reynolds, el único término “no nulo” es la concentración media de contaminante:

$$\bar{C} = \frac{1}{N} \sum_i^n C_i \quad (\text{Ecuación 1.7})$$

De manera análoga se puede realizar el mismo análisis para el caso de la velocidad con que es transportado el contaminante, por lo que también se trabajará con su velocidad media. Bajo estas condiciones y sustituyendo ambas ecuaciones de Reynolds en la ecuación 1.4 se tiene que:

$$\frac{d\bar{C}}{dt} = \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \bar{C} = \nabla \cdot (k \nabla \bar{C}) + R + S \quad (\text{Ecuación I.8})$$

La resolución de esta ecuación diferencial de segundo orden, depende de plantear si se desea estudiar gases o partículas y también de conocer las condiciones iniciales. Particularmente, en este caso de estudio es de interés conocer las concentraciones de PM10.

I.3.2.3.1 Modelo Gaussiano para el estudio de un gas emitido desde una fuente puntual

En el estudio de gases contaminantes emitidos desde una fuente puntual, las condiciones iniciales más simples sobre las cuales descansa la resolución de la ecuación I.4 son (Figura I.13):

1. El eje coordenado debe colocarse justo donde se dobla el penacho del contaminante por acción del viento.
2. El flujo del viento es estacionario y laminar, por lo que se desplaza en la dirección del eje x para todo tiempo.
3. El contaminante se dispersa de manera homogénea en las direcciones perpendiculares al viento.
4. No hay reacciones químicas.
5. Para la solución se tomarán la velocidad y concentración media del contaminante por lo explicado anteriormente respecto a las ecuaciones de Reynolds.

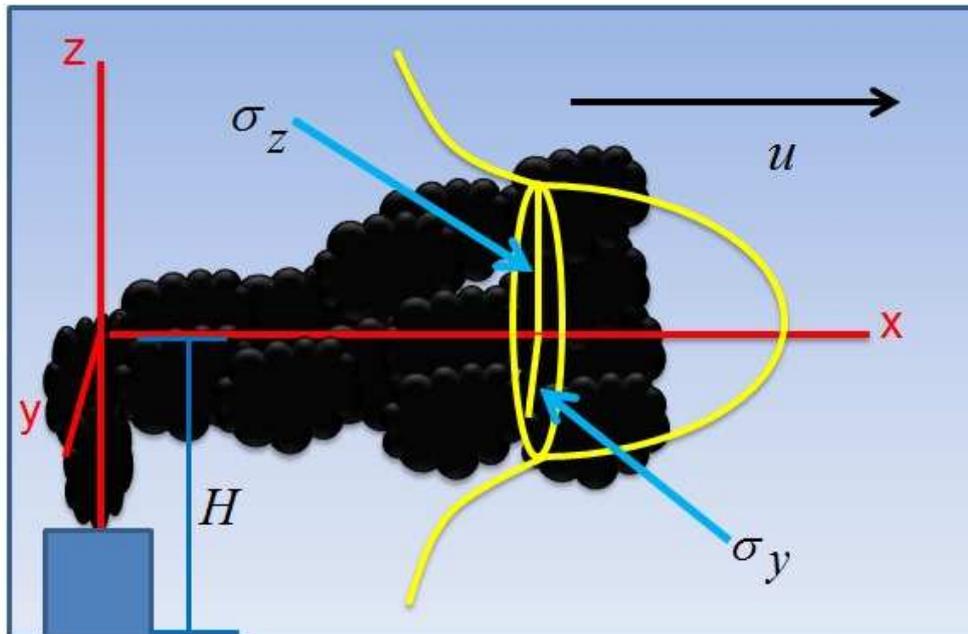


Figura I.13. Modelo Gaussiano de un gas emitido desde una fuente puntual.

En base al planteamiento anterior, la solución matemática es:

$$\bar{C}(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z\bar{u}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left[\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right] \quad (\text{Ecuación I.9})$$

\bar{C} es la concentración media del gas contaminante, Q es el gasto de contaminantes en la fuente, σ_y y σ_z son las varianzas de distribución de las concentraciones horizontal y vertical, \bar{u} es la velocidad media del viento supuesto horizontal y H es la altura efectiva de la emisión dada por la sobre elevación del penacho del contaminante más la altura de la fuente.

De izquierda a derecha, la primera y segunda exponencial son las dispersiones Gaussianas del contaminante en las direcciones y y z , respectivamente. Finalmente, cuando el gas hace contacto con la superficie, sufre un efecto de rebote o reflexión que lo hace regresar al aire que lo transporta, este fenómeno es expresado en la última exponencial de la ecuación I.9.

I.3.2.3.2 Modelo Gaussiano para el estudio de material particulado emitido desde una fuente de área

En este caso es necesario realizar algunas adecuaciones a la ecuación I.9, ya que muchas de las condiciones iniciales son distintas. La primera propiedad es suponer que una fuente de área está conformada de una sucesión de fuentes puntuales, donde la sumatoria de sus respectivas emisiones se concentra en una fuente virtual colocada fuera de la superficie a estudiar, tal y como se muestra en la figura I.14:

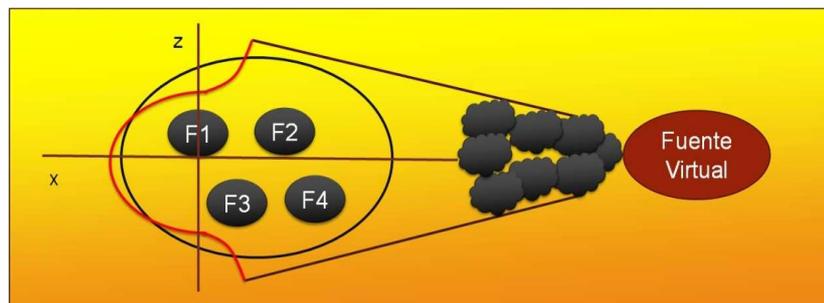


Figura I.14. Ejemplo de sucesión de fuentes puntuales que en conjunto forman una fuente de área y cuya fuente virtual emite la sumatoria del contaminante.

A diferencia de un gas, el material particulado tiende a depositarse en el suelo por acción de la gravedad, esto implica que no hay efecto de rebote y por lo tanto, la exponencial que correspondía a esta situación se desprecia (ver ecuación I.9). Finalmente, aplicando las condiciones mencionadas y que llevan al análisis de una fuente de área, se tiene que la integral con respecto a la superficie de emisión se expresa en la ecuación I.10.

$$\bar{C}(x, y, z) = \iint_{xy} \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z\bar{u}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right\} \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z - \left(h + x\left(\frac{w_p}{\bar{u}}\right)\right)}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} dx dy$$

(Ecuación I.10)

La altura efectiva H se escribe en términos de la ecuación de una recta, la cual permite conocer la concentración del contaminante a nivel del suelo, por lo

que $H = h - x \left(\frac{W_p}{\bar{u}} \right)$, donde W_p representa la velocidad de asentamiento de la partícula. Este fenómeno se entiende mejor en la siguiente figura:

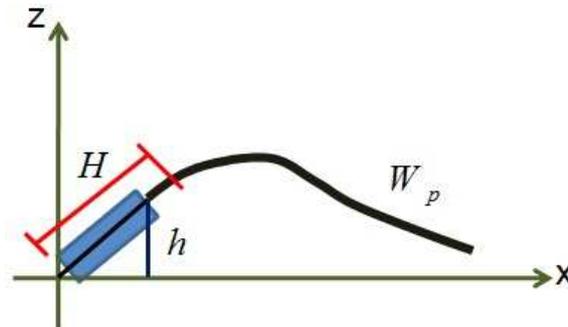


Figura I.15. Asentamiento de material particulado.

En el apéndice F se exponen los detalles matemáticos a la solución de dicha integral.

I.3.3 ANÁLISIS DEL FLUJO DE VIENTOS

El viento es el encargado de transportar los contaminantes en la tropósfera. En el estudio del movimiento de las masas de aire en una industria minera a cielo abierto, es importante tomar en cuenta las características del relieve, para ello se introducirá el concepto de “cuenca atmosférica”, el cual se explica en la siguiente sección.

I.3.3.1 Cuenca Atmosférica

En una mina a cielo abierto se puede presentar un relieve accidentado a causa de la morfología del sitio (la presencia de valles, colinas, etc.), además, las actividades de extracción de materiales pétreos y el depósitos de estériles van cambiando la topografía de dicho lugar provocando que el viento local circule en varias direcciones.

Magaña (s.f.) define cuenca atmosférica como “*un volumen de aire que está separado de otro por factores geográficos o meteorológicos*” (figura I.3),

menciona además conviene utilizar este concepto cuando los problemas de contaminación atmosférica se encuentran relacionados a condiciones ecológicas, meteorológicas y topográficas que son comunes en un sitio determinado.

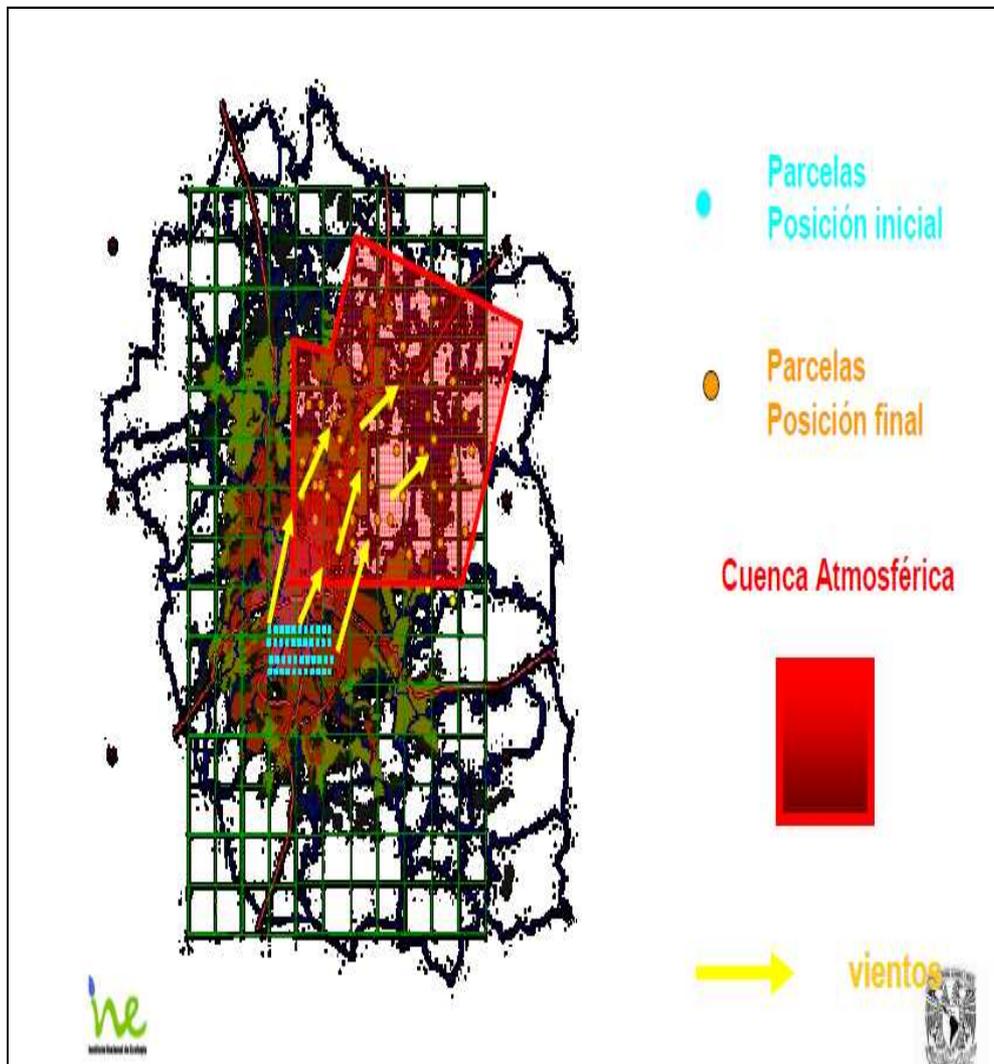


Figura I.16. Ejemplo de definición de una cuenca atmosférica (Magaña, s.f.).

En la figura I.16 se observa que las parcelas de aire parten de una posición inicial y posteriormente, en base al área de dispersión se define una cuenca atmosférica.

I.3.3.2 El modelo Lagrangiano HYSPLIT

El HYSPLIT (*HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory*) es un modelo creado inicialmente por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos (NOAA por sus siglas en inglés) y la Oficina de Meteorología de Australia, el cual sirve para analizar las trayectorias y concentraciones de las parcelas de aire y de varios tipos de contaminantes atmosféricos, dando a elegir inicialmente uno de los dos métodos de cálculo siguientes para realizar el modelado:

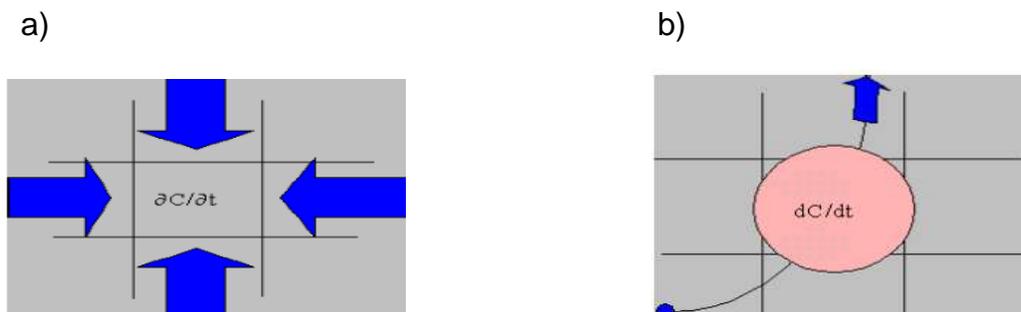


Figura I.17. a) Aproximación Euleriana; b) Aproximación Lagrangiana (Draxler, 2004).

Para la aproximación Euleriana (figura I.17a.), en cada celda de la malla se va sumando la concentración de las parcelas de aire o del contaminante que entra a cada celda, mientras que en la aproximación Lagrangiana (figura 1.17b.) se suman las partículas del contaminante o las parcelas de aire que contribuyen en la concentración total de “toda la malla”.

El modelado que se realizará en este proyecto de tesis es de tipo Lagrangiano, esto quiere decir matemáticamente que si por ejemplo se tiene una parcela de aire e inicialmente se monta sobre ésta un sistema de coordenadas, cuando dicha parcela se mueve hacia otro lugar, el marco de referencia se moverá con ésta, tal y como se muestra en la figura I.18:

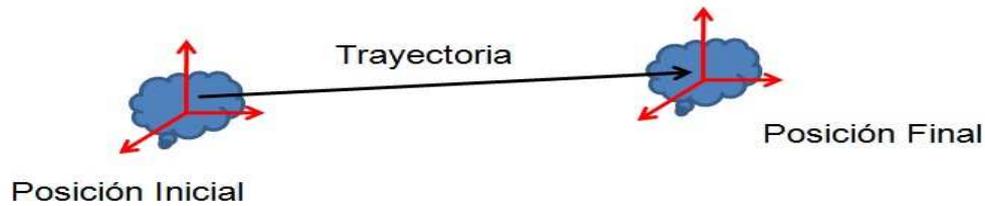


Figura I.18. Ejemplo de sistema Lagrangiano.

En el sistema Lagrangiano, el eje coordenado se mueve junto con la parcela por toda la malla, por lo que se suma cada una de las partículas que contribuyen en la concentración total del contaminante en toda la malla y no solo en cada celda como en el sistema Euleriano,

Al igual que en el AERMOD, el modelo HYSPLIT descansa sobre ecuaciones de advección y difusión. La diferencia radica en que para modelar las concentraciones de PM₁₀, en el primero se considera que la dispersión es de tipo Gaussiano; mientras que, en el segundo, para investigar la trayectoria de una parcela de aire, el modelo es Lagrangiano. En ambos se utilizan las condiciones meteorológicas que son características del sitio de estudio.

I.3.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE UTILIZAR LOS MODELOS HYSPLIT Y AERMOD VIEW

Las ventajas de utilizar el modelo HYSPLIT para la definición de trayectorias de viento en el sitio de estudio son las siguientes:

1. Se pueden utilizar los datos horarios de la estación meteorológica del sitio de estudio.
2. No hay intercambio de masas de aire con sus alrededores; es decir, las trayectorias de los vientos modelados solamente se ven influenciadas por los parámetros de entrada y no por otro tipo de variables
3. Al ser un modelo de tipo Lagrangiano se pueden realizar simulaciones de las trayectorias de vientos.

La desventaja más importante que presenta el modelo, es que se requiere dar a los datos meteorológicos el formato de otro software (previamente especificado por el HYSPLIT), antes de ser incorporados al programa.

Por otro lado, las ventajas más importantes de utilizar el AERMOD View son las siguientes:

1. Se pueden utilizar los datos horarios de la estación meteorológica del sitio de estudio.
2. Se puede incorporar la topografía del sitio de estudio.
3. El modelo de tipo Gaussiano entrega resultados las concentraciones del contaminante estudiado en poco tiempo.

La desventaja más importante de utilizar dicho modelo es que solamente se pueden realizar modelados de diagnóstico y no de pronóstico.

Al momento de construir el escenario sobre el cual se realizará el modelado del transporte y dispersión de las PM₁₀, es muy importante tomar en cuenta la topografía del sitio de estudio debido al constante cambio de uso de suelo que se presenta al realizar los procesos de extracción del material petreo.

En la metodología (tercer capítulo) se plantea una solución alterna al hecho de no poder incorporar la topografía al modelo HYSPLIT.

I.4 MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE.

Guzmán y Col, (s.f.) definen al monitoreo de la calidad del aire como: *“un muestreo sistemático y planeado para determinar la calidad del aire”*.

El monitoreo debe ser sistemático y ajustarse a una serie de pasos que lleven a la toma adecuada de la muestra requerida; y debe ser planeado ya que los dispositivos de medición han de colocarse en sitios estratégicos.

La “Guía para presentar un Programa de Monitoreo y Gestión de la Calidad del Aire” realizado por el INE (s.f.), señala como elementos importantes: *“conocer las características del sitio, área o región en donde se desea saber la calidad*

Estudio de la contaminación atmosférica por material particulado y su monitoreo

del aire, y definir perfectamente los objetivos que se persiguen con el monitoreo. Los criterios propuestos para la selección de sitios de monitoreo son:

1. Para fines de vigilancia el sitio deberá ser representativo del área estudiada, en el diseño general de la red de monitoreo. Los datos proporcionados por una estación en un área determinada reflejarán los niveles promedio de contaminación en la misma, tanto los que se generan como los que se impactan debido a los factores meteorológicos. Se establece como mínimo una estación de monitoreo en cada área representativa por actividad de uso de suelo, como por ejemplo: en una zona industrial, habitacional, comercial, etc., además de ubicar una estación en una zona relativamente limpia que sirva como blanco a efecto de comparación en relación a los niveles de calidad del aire.
2. La estación deberá ser instalada y operada con los mismos procedimientos a fin de que la información que proporcione sea comparada con la registrada en otras estaciones de la misma red. Para ello es necesario que los detalles de cada sitio se estandaricen al máximo, y deberán de tomarse en cuenta las siguientes recomendaciones: altura de la toma de muestra, frecuencia y periodo de monitoreo y características del equipo de muestreo.
3. Resulta importante además identificar la ubicación de las fuentes emisoras o rasgos topográficos, y de dirección del viento de la zona, además de contar con el inventario de emisiones, con el propósito de establecer la ubicación adecuada de los sitios de monitoreo.

En el caso de esta investigación sobre la contaminación por partículas a partir de las emisiones de una industria minera, se tomarán en cuenta las mediciones correspondientes año 2009 de dos estaciones de monitoreo de PM10 ubicadas en el sitio de estudio. Se consideran además las características topográficas del terreno y los parámetros meteorológicos locales.

La siguiente sección trata acerca de las normas y leyes mexicanas que regulan los niveles en la concentración de contaminantes en la atmósfera y que se encuentran contenidos en la Constitución Política de los Estados Unidos

Mexicanos y la Ley Ambiental del Estado de San Luis Potosí respectivamente, ya que la industria minera que es objeto de este estudio, se encuentra ubicada en dicho estado.

I.5 NORMAS Y LEYES PARA REGULAR LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS), la contaminación atmosférica causa alrededor dos millones de muertes prematuras al año (OMS, 2005).

En el sitio web de la OMS, en lo referente al material particulado, dice lo siguiente:

“La OMS estima que si la contaminación por partículas en suspensión (PM10), se reduce de 70 a 20 microgramos por metro cúbico, puede evitarse el 15% de las muertes relacionadas con la calidad del aire” (OMS, 2005).

En las últimas dos secciones de este capítulo, se discuten las normas y leyes nacionales y del estado de San Luis Potosí, que competen a la regulación en la concentración de contaminantes atmosféricos, especialmente de PM10.

I.5.1 NORMAS Y LEYES A NIVEL NACIONAL

A nivel nacional, las normas y leyes que competen al monitoreo y vigilancia de la calidad del aire, se derivan en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, específicamente en los apartados correspondientes a la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA).

En el capítulo 2 de la “Guía de elaboración y usos de inventarios de emisiones”, creada por la SEMARNAT y el INE, se realiza un compendio de las normas y leyes en materia de calidad del aire (SEMARNAT, INE, 2005).

Dentro del Título IV de la LGEEPA, los Artículos 109 Bis al 117, proporcionan el marco de trabajo jurídico general para prevenir y controlar la contaminación atmosférica. Los extractos más importantes de dichos artículos y que competen a esta investigación, se muestran a continuación:

En el cuarto y décimo apartado del artículo 111, correspondiente al control y reducción de la contaminación atmosférica, se establece que dos de las facultades que tendrá la Secretaría son:

- IV. Formular y aplicar programas para la reducción de emisión de contaminantes a la atmósfera, con base en la calidad del aire que se determine para cada área, zona o región del territorio nacional. Dichos programas deberán prever los objetivos que se pretende alcanzar; los plazos correspondientes y los mecanismos para su instrumentación;

- X. Definir niveles máximos permisibles de emisión de contaminantes a la atmósfera por fuentes, áreas, zonas o regiones, de tal manera que no se rebasen las capacidades de asimilación de las cuencas atmosféricas y se cumplan las normas oficiales mexicanas de calidad del aire;

Como entidad responsable de la política ambiental del país, en la SEMARNAT recaen las funciones principales para mejorar la calidad del aire y prevenir la contaminación de la atmósfera; ésta tiene además la responsabilidad de establecer normas de emisiones a nivel federal de acuerdo a la LGEEPA, Título IV, Artículo 111.

Aunque los estados pueden instrumentar normas más exigentes, las normas federales representan un criterio mínimo. Las NOMs establecen límites máximos permisibles – LMP -. Existen LMPs para:

- Emisiones de procesos de combustión en establecimientos industriales y de servicios;
- Emisiones de fuentes fijas de industrias específicas (p.ej., compuestos orgánicos volátiles [COVs] de la manufactura de automóviles y emisiones de partículas derivadas de procesos industriales en general y de plantas de fabricación de cemento, etc.); y

- Fuentes móviles (p.ej., opacidad del escape de vehículos diesel, emisiones de vehículos a gas natural y que usan otros combustibles alternos, etc.).

Además, la Secretaría de Salud (SS) ha establecido las normas de calidad del aire. En la tabla siguiente se muestran los valores normados para distintos contaminantes en México, los cuales fueron publicados en el Diario Oficial de la Federación el 26 de septiembre de 2005 y entraron en vigor a partir del 26 de noviembre del mismo año:

- ^a Diario oficial de la federación del 23 de diciembre de 1994.
- ^b Diario oficial de la federación del 30 de octubre de 2002.
- ^c Diario oficial de la federación del 26 de septiembre de 2005, entró en vigor a partir del 26 de noviembre de 2005.
- ^d La concentración promedio de ocho hora de ozono como contaminantes atmosférico en un sitio de monitoreo debe ser menor o igual a 0.080 ppm, tomado como el quinto máximo en un periodo de un año, calculado como se indica en la NOM.
- ^e Un sitio cumple con la norma para el promedio de 24 horas cuando el valor del percentil 98 calculado como se indica en la NOM es menor o igual al valor indicado.
- ^f Un sitio cumple con la norma anual cuando el promedio anual de los valores diarios calculados como se indica en la NOM es menor o igual al valor indicado.

Además de la SEMARNAT, otras dependencias relacionadas con aspectos diversos vinculados a la gestión de la calidad del aire son:

- La Secretaría de Comunicaciones y Transportes – SCT - ;
- La Secretaría de Energía – SENER – ;
- La Secretaría de Salud – SSA – ;
- La Secretaría del Trabajo y Previsión Social – STPS - ;

La Norma correspondiente a la regulación en los valores de las concentraciones de PM10 para periodos de 24 horas y un año es la NOM-025-SSA1-1993, la cual establece cantidades de 120 y 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para cada respectivo periodo de tiempo (tabla I.4).

Tabla I.4. Valores Normados de la calidad del aire en México (SEMARNAT, INE, 2005)

Contaminante	Valores límite			Normas Oficiales Mexicanas
	Exposición aguda		Exposición crónica	
	Concentración y tiempo promedio	Frecuencia máxima aceptable	(Para protección de la salud de la población susceptible)	
Monóxido de carbono (CO)	11 ppm (8 h) (12595 µg/m ³)	1 vez al año	-	NOM-021-SSA1-1993 ^a
Bióxido de azufre (SO ₂)	0.13 ppm (24 h) (341 µg/m ³)	1 vez al año	0.03 ppm (promedio aritmético anual)	NOM-022-SSA1-1993 ^a
Bióxido de nitrógeno (NO ₂)	0.21 ppm (1 h) (395 µg/m ³)	1 vez al año	-	NOM-023-SSA1-1993 ^a
Ozono (O ₃)	0.11 ppm (1 h) (216 µg/m ³)	No se permite	-	Modificación a la NOM-020-SSA1-1993 ^b
	0.08 ppm (8 h) ^d	4 veces al año	-	
Partículas suspendidas totales (PST)	210 µg/m ³ (24 h) ^e	2% de mediciones al año	-	
Partículas menores de 10 micrómetros (PM ₁₀)	120 µg/m ³ (24 h) ^e	2% de mediciones al año	50 µg/m ³ (promedio aritmético anual) ^f	Modificación a la NOM-025-SSA1-1993 ^c
Partículas menores de 2.5 micrómetros (PM _{2.5})	65 µg/m ³ (24 h) ^e	2% de mediciones al año	15 µg/m ³ (promedio aritmético anual) ^f	
Plomo (Pb)	-	-	1.5 mg/m ³ (promedio aritmético en 3 meses)	NOM-026-SSA1-1993 ^a

I.5.2 NORMAS Y LEYES CORRESPONDIENTES AL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ

Las normativas de competencia estatal en San Luis Potosí para prevenir y regular la contaminación al ambiente se derivan de la Ley Ambiental del Estado de San Luis Potosí, publicada el 13 y 15 de diciembre de 1999 y reformada el 19 de septiembre de 2006.

Esta ley dice textualmente en el título sexto (artículo 73) referente a la prevención y control de la contaminación ambiental, en dice textualmente lo siguiente:

Para la contaminación a la atmósfera, la SEGAM (Secretaría de Ecología y Gestión Ambiental) considerará los siguientes criterios:

- I. La calidad del aire debe ser satisfactoria en todos los asentamientos humanos y las zonas del Estado, y
- II. Las emisiones de contaminantes a la atmósfera, sean de fuentes artificiales o naturales, deben ser reducidas y controladas para asegurar una calidad del aire satisfactoria para el bienestar de la población y del ambiente.

Capítulo II. Presentación del caso de estudio y objetivos de esta investigación

En las secciones siguientes de este capítulo se describe el sitio donde se ubica la industria minera objeto de esta investigación.

Se plantean las ventajas y desventajas que se tienen al utilizar los modelos HYSPLIT y AERMOD View y finalmente se exponen los objetivos de esta investigación.

II.1 PLANTEAMIENTO HISTÓRICO

En el municipio de Cerro de San Pedro (figura II.1) se tienen registros de que fueron extraídas enormes cantidades de material pétreo, por ejemplo, 2.5 y 40 millones de onzas de oro y plata respectivamente desde 1595 y durante casi 400 años, así mismo, también se extrajeron plomo, cobre y zinc. Finalmente, la actividad minera culmina en el año de 1948 con el cierre de la mina subterránea Cia. Minera Asarco (Enciclopedia de los Municipios de México, 2005).

En el año de 1995 comienzan en el Cerro de San Pedro los trabajos de exploración por parte de la empresa minera San Xavier para determinar la existencia de un depósito mineral económicamente viable, y así, en el año de 1997 se obtiene la rentabilidad y viabilidad del proyecto. Posteriormente, en el 2004 se inicia la construcción de la industria minera a cielo abierto y comienzan los trabajos de explotación, los cuales han continuado hasta el 2011.



Figura II.1. Templo edificado en el Cerro de San Pedro en la segunda mitad del siglo XVIII (Enciclopedia de los Municipios de México, 2005).

II.2 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL CERRO DE SAN PEDRO Y SUS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS

La industria minera objeto de este estudio se encuentra ubicada en el centro del estado de San Luis Potosí, en el municipio del Cerro de San Pedro, (Figura II.2).

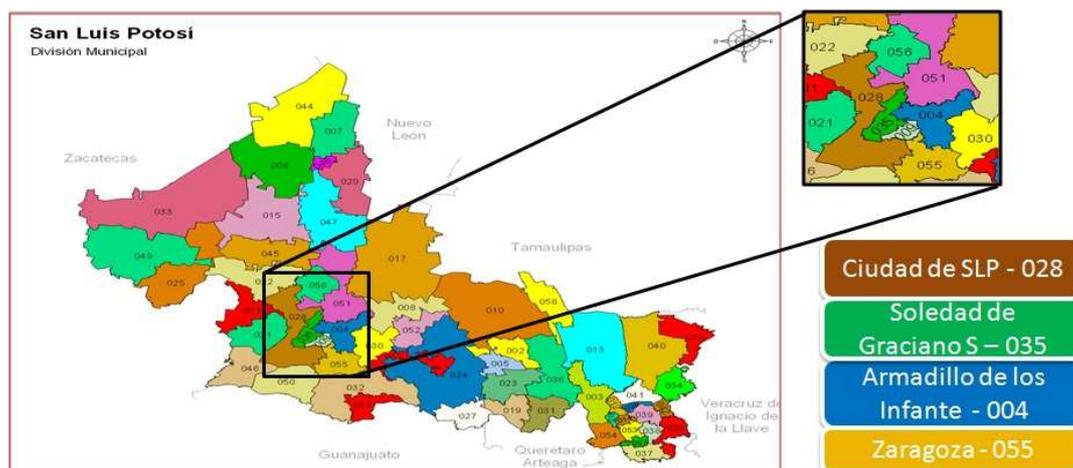


Figura II.2. Ubicación del Municipio del Cerro de San Pedro (INEGI, 2005; Mapa editado en Power Point, 2010).

El municipio de Cerro de San Pedro colinda con los municipio siguientes: al oeste con la ciudad de San Luis Potosí, al este con Armadillo de los Infante, al sur-oeste con Soledad de Graciano Sánchez y al sur con Zaragoza (figura II.2.); además cuenta con una superficie de 127.5 kilómetros cuadrados y 3,404 habitantes, siendo sus coordenadas geográficas: 100°48' de longitud oeste y 22°13' de latitud norte, con una altitud aproximada de 2,040 metros sobre el nivel del mar.

El sitio de estudio se encuentra ubicado en una zona montañosa, donde el clima característico es principalmente semi-seco y los tipos de rocas son sedimentarias y volcánicas. La temperatura media anual es de 16.8 °C y su precipitación pluvial anual es de 304.5 mm. Su flora está compuesta principalmente de matorral micrófilo, matorral espinoso, nopales y crasirosulizal; además habitan especies como el coyote, gato montés, liebre, conejo y algunos tipos de aves y reptiles (Enciclopedia de los Municipios de México, 2005).

II.3 ESPECIFICACIONES DE LA INDUSTRIA MINERA QUE ES OBJETO DE ESTUDIO

La tabla II.1 muestra las zonas en que se divide la mina estudiada, así como las actividades que se desarrollan en cada una de ellas, y que producen emisiones de PM10.

Tabla II.1. Actividades que generan emisiones de PM10 clasificadas de acuerdo a la zona minera a la que pertenecen (Gallegos Martínez, 2010).

Zona minera	Actividad
Terreros	Descarga de estéril Empuje de estéril Erosión eólica
Tajo	Rezagado de mineral Carga de mineral Empuje de estéril Voladura Erosión eólica
Patios de lixiviación	Descarga del mineral Acomodo del mineral Erosión eólica
Caminos	Transporte del mineral Transporte de estéril Tráfico de vehículos ligeros

La figura II.3 muestra las cuatro zonas en donde se llevan a cabo las actividades mineras.



Figura II.3. Zonas de la mina a estudiar (Imagen editada en Google Earth, 2010)

La mina a cielo abierto cuenta con dos estaciones meteorológicas, una ubicada al norte (MSX-CSP-01) y cuyos datos son representativos de las zonas del tajo, terreros y municipio del Cerro de San Pedro; y otra ubicada al sur (MSX-CSP-02), donde los datos son representativos del área de proceso (patio de lixiviación) y poblado de la Zapatilla (figura II.4).



Figura II.4 La minera a cielo abierto cuenta con dos estaciones meteorológicas (Imagen editada en Google Earth, 2010).

En las figuras II.3 y II.4 se observa que la zona de estudio cuenta con una gran cantidad de accidentes topográficos (valles, colinas, etc.). Debido a esta condición, la diferencia de alturas entre las dos estaciones meteorológicas de la mina, es de aproximadamente 300 metros. Estas dos características sugieren que el transporte de los vientos y por ende de las PM₁₀ en la zona norte pueda ser distinto al de la zona sur, ya que en el sitio minero que es objeto de estudio, las trayectorias de las masas de aire se rigen por propiedades meteorológicas y topográficas

Con el objeto de tomar en cuenta las características topográficas del sitio de estudio, se adquirió una base de datos del sitio de estudio en el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), actualizados al año 2007:

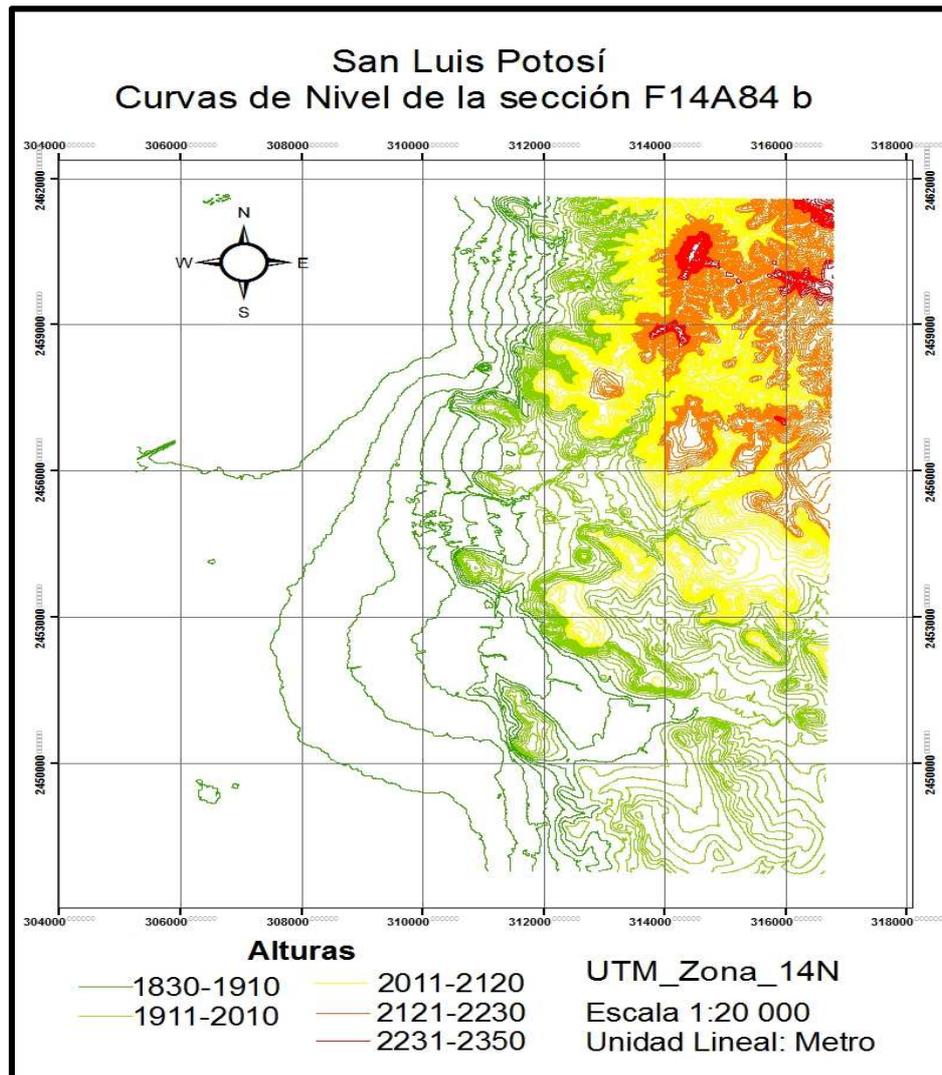


Figura II.5. Curvas de nivel editadas en ArcGIS (INEGI, 2007).

Las zonas de mayor altura con respecto al nivel del mar, corresponden a las curvas de nivel en color rojo (con un máximo de 2,350 m), mientras que las de menor altitud están en color verde (la elevación mínima es de 1830 m) (figura II.5).

II.3.1 ESTACIONES DE MONITOREO PARA EL ESTUDIO DE MATERIAL PARTICULADO

A fin de dar seguimiento a las concentraciones de partículas en el aire, la empresa minera estudiada ha colocado en los municipios de Cerro de San Pedro, Soledad de Graciano Sánchez y San Luis Potosí, estaciones de monitoreo atmosférico (tabla II.2 y figura II.6).

Tabla II.2. Descripción de las estaciones de monitoreo.

Estación de monitoreo	Marca	Modelo	Ubicación	Parámetros medidos
EMCA-01	Andersen	GBM-2000H	Cerro de San Pedro	PST, Pb, As, Hg y Mn
EMCA-02	Wedding & Associates	W&A	La Zapatilla	PM10, Pb, As, Hg y Mn
EMCA-03	BGI	PQ100	Portezuelo	PM10
EMCA-04	BGI	PQ100	Soledad de Graciano S.	PM10
EMCA-05	BGI	PQ100	Granjas de La Florida	PM10



Figura II.6. Ubicación de estaciones de monitoreo de material particulado (imagen editada en Google Earth, 2010).

Además de las estaciones mencionadas, a partir del año de 2011 se colocó en el municipio de Cerro de San Pedro una estación de monitoreo portátil de PM10 (Minivol Portable Air Sample, la cual pertenece a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí) y este equipo recoge aire a una velocidad de 5 litros por minuto y colecta distintos tipos de material particulado (PST, PM10 y PM2.5) y de gases no reactivos (CO y NO_x).

La separación del material particulado por tamaños se lleva a cabo a través de su impactación en ductos especiales del diámetro correspondiente, al pasar el flujo de aire a través de filtros de 4.7 cm de diámetro y de un tamaño correspondiente al de la partícula que se desea atrapar. Los filtros se pesan previamente y la concentración de partículas se determina mediante la diferencia de las masas del filtro inicial y final y se expresa en microgramos sobre metro cúbico (Pollution Online, 2011).

El mecanismo de recolección de la estación ubicada en la Zapatilla se conoce como “separación ciclónica”, ya que para descomponer por tamaños el material particulado, se controla la velocidad y el ángulo con que se introducen las partículas al sistema de recolección de partículas y una vez estando dentro, se manipula la dirección del flujo de éstas, para finalmente recolectar las PM10 en el filtro correspondiente (Skeco, 2004).

Para conocer la concentración de PM10 se pesa el filtro antes y después de recolectar la muestra, y de su diferencia se conoce el peso de dicho material particulado. Así mismo, se debe conocer también el volumen de aire que entra al filtro durante el tiempo de la toma de la muestra (Skeco, 2004).

Para conocer la composición de las PM10 recolectadas en el filtro de la estación de monitoreo de la Zapatilla se llevó a cabo un análisis gravimétrico, el cual consiste en determinar la cantidad proporcionada de un elemento en una muestra, eliminando todas las sustancias que interfieren y convirtiendo el constituyente o componente deseado, en un compuesto de composición definida, que sea susceptible de pesarse.

En esta investigación únicamente es necesario analizar las concentraciones de PM10 que se obtuvieron en la estación de monitoreo de la Zapatilla, ya que dicha información servirá para evaluar y validar los resultados obtenidos en esta investigación (Capítulo IV).

II.4 OBJETIVOS DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

El objetivo de la investigación de esta tesis de maestría es:

“Proponer y aplicar una metodología para determinar la ubicación de estaciones de monitoreo de material particulado menor a 10 micrómetros (PM10), en una mina a cielo abierto”.

Los objetivos particulares son los siguientes:

- 1. Identificar las trayectorias y direcciones de los vientos dominantes mediante el uso de los modelos HYSPLIT y Rammet View respectivamente.**
- 2. Calcular los promedios de las concentraciones de PM10 en el área de estudio, mediante el modelo AERMOD View.**
- 3. Proponer y aplicar una metodología para delimitar la zona de estudio en base a los resultados generados por los modelos.**
- 4. Proponer y aplicar una metodología para la ubicación de estaciones de monitoreo de PM10 en una mina a cielo abierto.**

Anteriormente, en el sitio de estudio que es objeto de este trabajo de maestría se construyó el inventario de emisiones del año de 2009 mediante el cálculo de los factores de emisión y emisiones de PM10 generados por las actividades mineras que ahí se llevan a cabo. Además de que se modeló del transporte y dispersión de dicho material particulado mediante el uso de los modelos ISC3 y AERMOD View (Gallegos, 2010).

En este proyecto se mantiene la misma línea de investigación con el fin de utilizar el inventario de emisiones generado, para continuar con el modelado de las concentraciones de PM10 y analizar los patrones de vientos con el fin de generar una propuesta de ubicación de estaciones de monitoreo para dicho material particulado.

Capítulo III. Metodología

La metodología que se presenta a continuación está dividida en tres etapas:

1. El modelado de los patrones de vientos y del transporte de PM10 mediante los modelos HYSPLIT, Rammet View y AERMOD View,
2. La delimitación de la zona (o zonas) de estudio en base a los resultados arrojados por los modelos utilizados,
3. La ubicación de estaciones de monitoreo de PM10 en una mina a cielo abierto.

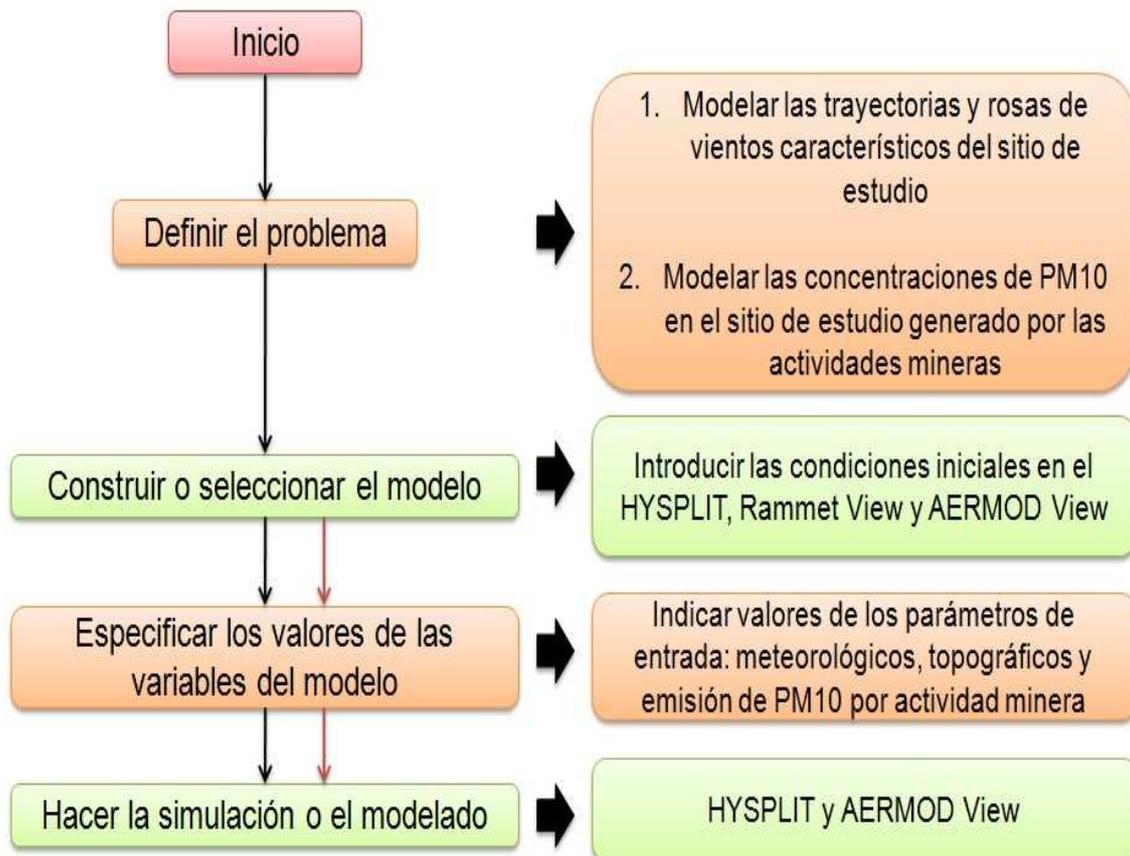


Figura III.1. Diagrama de flujo de los modelados que se realizan en esta investigación

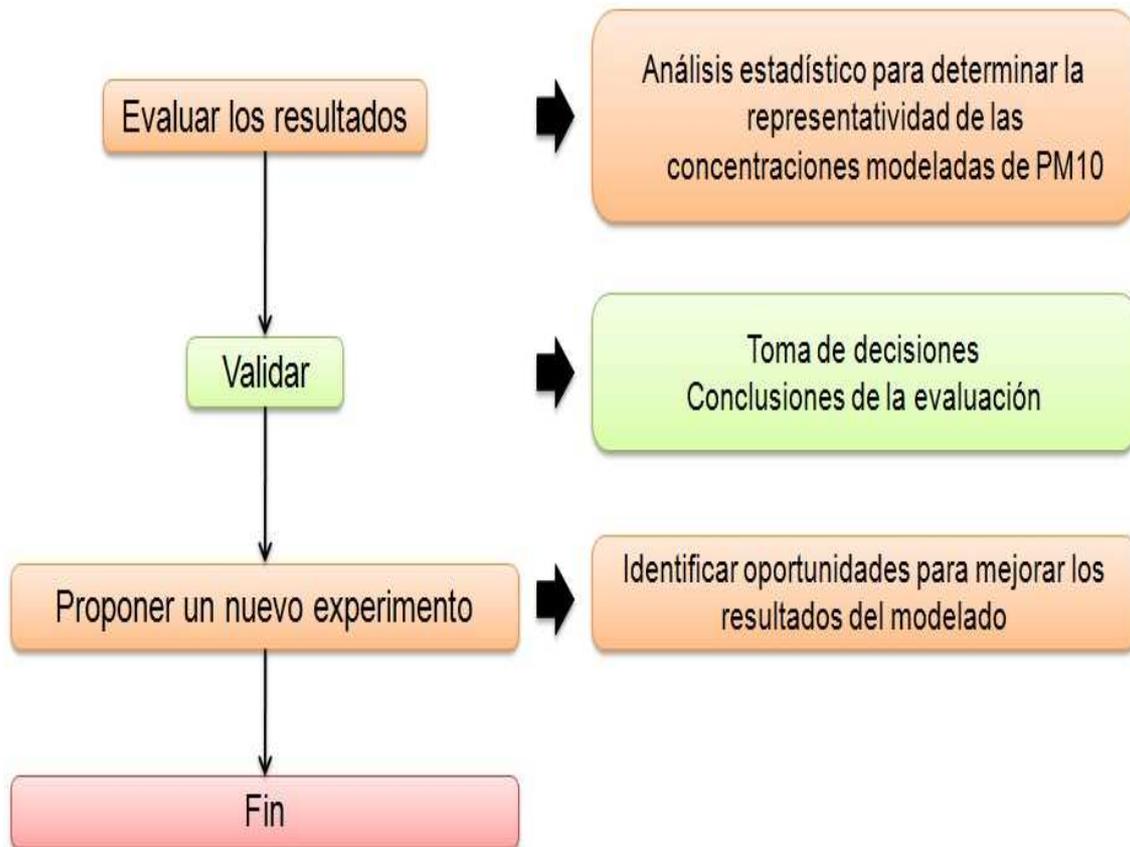


Figura III.2. Diagrama de flujo de la metodología para evaluar y validar los resultados y proponer mejoras al proceso

III.1 MODELADO DE LOS PATRONES DE VIENTOS Y DEL TRANSPORTE DE PM10

III.1.1 TRAYECTORIAS Y ROSAS DE VIENTOS

Este apartado se sujeta a varios pasos de la metodología mostrada en el cuadro III.1, de tal manera que comenzando por el segundo punto, se establece que es necesario construir o seleccionar el modelo que permitirá estudiar los patrones de viento, y para ello se deben indicar las condiciones iniciales del caso de estudio en el Rammet View y HYSPLIT.

En este proyecto, se planea construir dicho modelo utilizando como base cada uno de los programas computacionales mencionados, donde las características iniciales son básicamente, la topografía del lugar y la ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas.

Los modelos seleccionados para el estudio de las trayectorias de vientos y de la altura de la capa de mezcla en el sitio de estudio fueron el HYSPLIT y el Rammet View.

En el HYSPLIT no se puede introducir directamente la topografía del sitio, por lo que, una solución indirecta es modelar los patrones de vientos para distintas alturas, tal y como se hizo en otros estudios reportados en la literatura. (CONAMA10, 2010).

La ubicación de las estaciones meteorológicas en el sitio de estudio se puede georeferenciar tanto en el Rammet View como en el HYSPLIT. Esta información es importante, ya que permite conocer el marco de referencia desde el cual se miden las direcciones y velocidades de vientos que afectarán en la dispersión del material particulado.

Los datos de entrada a los modelos AERMOD View, Rammet View y HYSPLIT se muestran en la tabla III.1:

Tabla III.1 Variables meteorológicas de entrada a los modelos AERMOD View, Rammet View y HYSPLIT.

Parámetro / Modelo	AERMOD View	Rammet View	HYSPLIT
Año, mes, día, hora y minuto	x	x	x
Temperatura ambiente (°C)	x	x	
Humedad relativa (%)	x	x	
Presión barométrica (mb)	x	x	
Dirección del viento (grados)	x	x	x
Velocidad del viento (m/s)	x	x	x
Precipitación (mm)	x	x	
Radiación solar (W/m ²)	x	x	
Altura de la capa de mezcla			x
Estabilidad atmosférica			x

El modelo Rammet View calcula las estabildades atmosféricas (de acuerdo a la clasificación de Pasquill-Guifford) que se ocupan en el HYSPLIT.

En el modelo HYSPLIT se obtendrán las trayectorias que sigue una partícula de aire a diferentes alturas bajo la influencia de los vientos dominantes, en un determinado periodo de tiempo.

En el modelo Rammet View, las variables de salida son de tres tipos de histogramas:

- 1) Una rosa de vientos en donde se especifica la frecuencia (en porcentajes) con la que soplaron los vientos en un determinado rango o intervalo de velocidades, con su respectiva orientación (en grados),
- 2) Una gráfica en la que se muestran las distintas frecuencias con las que se presentó cada rango de velocidades y
- 3) La periodicidad con que se presentaron las estabilidades atmosféricas de acuerdo a la clasificación de Pasquill-Guifford.

A partir de los datos de las estaciones meteorológicas en el sitio de estudio para el año 2009 se realizarán las simulaciones para identificar los patrones de viento. Se modelarán:

1. Las rosas de vientos para cada (modelo Rammet View).
2. Algunas de las trayectorias de los vientos dominantes a diferentes alturas y para días específicos de cada mes (modelo HYSPLIT).

Las rosas de vientos indicarán de dónde vienen los vientos dominantes, mientras que el análisis de sus trayectorias de vientos definirá hacia dónde se podría dispersar el material particulado.

Las simulaciones en el Rammet View y el HYSPLIT de los patrones de vientos, servirán para clasificarlos en aquellos periodos de tiempo en los cuáles presenten orientaciones similares.

III.1.2 TRANSPORTE DE PM10

El modelo AERMOD View se correrá para modelar los dos siguientes puntos:

1. El promedio diario y anual de las concentraciones de PM10 en el sitio de estudio.

2. El promedio para cada periodo de tiempo de las concentraciones de PM10 en que fueron clasificados los patrones de vientos.

El primer punto permitirá delimitar las zonas de estudio de la calidad del aire en el norte y sur de la mina en base a los valores establecidos en la NOM-025SSA1-1993^c (SEMARNAT, INE, 2005), mientras que con el segundo punto se podrá analizar si existe alguna relación entre las curvas de isoconcentración modeladas en el AERMOD View y las trayectorias de vientos simuladas en el HYSPLIT.

Las condiciones iniciales para llevar a cabo el modelado del transporte de PM10, están dadas por los siguientes parámetros de entrada al modelo: la topografía del sitio de estudio, la ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas y la implementación de una malla receptora.

La topografía define las características físicas del terreno sobre las cuáles se dispersa el material particulado. Para simular el relieve en el modelo AERMOD View se requiere de: 1) las curvas de nivel y 2) las alturas respectivas a las que hay que proyectar las curvas de nivel para generar una imagen tridimensional del lugar.

El sitio de estudio se divide en una malla de coordenadas polares. Para considerar la topografía del terreno, a cada nodo de la malla se le asigna su altitud correspondiente.

Para reproducir de la manera más real posible la estructura verdadera de las superficies de emisión, éstas serán procesadas en el modelo como fuentes poligonales de área, es decir, fuentes de área con formas irregulares (Thé, 2006).

Los datos de entrada al modelo son: 1) los parámetros meteorológicos medidos en las estaciones ubicadas al Norte y Sur de la mina (velocidad y dirección del viento, temperatura ambiente, presión atmosférica, etc.), 2) los datos de las fuentes de emisoras: coordenadas geográficas, superficie de emisión, cantidad de PM10 emitida por unidad de tiempo, etc. (Apéndice C) (Gallegos, 2010).

El modelo AERMOD View se corre para periodos de 24 horas, estacionales (primavera, verano, otoño e invierno) y de un año (2009).

A partir de los datos de la estación meteorológica del norte de y de las emisiones del terrero, tajo y camino principal se llevan a cabo las primeras simulaciones. A partir de los datos de la estación meteorológica del sur del sitio y de las fuentes de emisión: camino principal y patio de lixiviación se realizan los modelados de concentración de PM10 para los sitios de estudio propuestos.

Las concentraciones calculadas a través del modelo AERMOD View se expresan en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. A partir de las concentraciones en cada nodo, el modelo interpola los valores y traza curvas de isoconcentración. De acuerdo con las coordenadas de cada nodo, los resultados se sobreponen sobre un mapa del sitio de estudio, permitiendo observar la distribución espacial de la concentración de PM10.

III.1.2.1 Evaluación del modelo AERMOD View

Para evaluar la representatividad del modelo en cuestión se aplicaron métodos estadísticos con el objeto de comparar las concentraciones de PM10 calculadas por el AERMOD View con las medidas por las estaciones de monitoreo de PM10 ubicadas en el poblado de la Zapatilla y en el poblado del municipio de Cerro de San Pedro.

Los análisis estadísticos llevados a cabo fueron (Apéndice G):

1. Desviación estándar con respecto a la media calculada. Para conocer que tan dispersos están los datos de las concentraciones diarias con relación a su respectiva media.
2. Coeficiente de correlación de Pearson. Para saber si existe una relación lineal entre los dos grupos de datos.

III.2 METODOLOGÍA PARA LA DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El procedimiento para delimitar la zona de estudio de la calidad del aire de acuerdo con la propuesta elaborada por Guzmán y Col., se basa en la identificación de los vientos dominantes y en las concentraciones máximas de los contaminantes estudiados. Finalmente, se traza un polígono que delimita la superficie con concentraciones elevadas que representan un peligro para la salud de las personas que viven en dichas zonas.

En esta investigación de tesis de maestría se ha decidido modificar dicha metodología debido a que las características topográficas de ambos sitios es muy distinta. Esta modificación básicamente se basó en la incorporación de las curvas de nivel que representan las características del relieve presentes en el sitio de estudio.

Una vez modeladas las concentraciones de PM₁₀ para los periodos de 24 horas y un año, se identificarán aquellas curvas de isoconcentración que sobrepasan los valores establecidos por la NOM-025 (SEMARNAT, INE, 2005) para ambos periodos de tiempo y se delimitarán por polígonos.

III.3 METODOLOGÍA PARA PROPUESTA DE UBICACIÓN DE ESTACIONES DE MONITOREO PARA PM₁₀

La propuesta para posicionar las estaciones de monitoreo de PM₁₀ se basa en el análisis de las curvas de isoconcentración modeladas para los periodos de tiempo de 24 horas, estacionales y un año en que se rebasa la NOM-025SSA1-1993^c.

Los lugares sugeridos para la instalación de las estaciones corresponden a las superficies dentro del polígono que están dentro o próximas de una zona habitacional.

Capítulo IV. Modelado de los patrones de vientos y del transporte de PM10

IV.1 BASES DE DATOS METEOROLÓGICOS PARA LOS MODELOS HYSPLIT Y RAMMET VIEW

Las estaciones meteorológicas ubicadas en el sitio de estudio (la MSX-CSP-01 ubicada al norte y la MSX-CSP-02 ubicada al sur) tienen las coordenadas geográficas indicadas en la tabla IV.1. Dada la diferencia de altitudes entre ambas estaciones y que el modelo HYSPLIT no puede considerar las variaciones topográficas para definir las trayectorias de los vientos, se decidió aplicar el modelo para las dos alturas respectivas.

Tabla IV.1. Georeferencia de cada estación meteorológica en la industria minera.

Estación	Latitud (grados decimales)	Longitud (grados decimales)	Altitud (msnm)
MSX-CSP-01	22.224012° N	100.805040° O	2225
MSX-CSP-02	22.187558° N	100.825203° O	1915

El modelo HYSPLIT traza las trayectorias de vientos en base a puntos con la misma presión (isobaras); así que se espera identificar posibles diferencias en las trayectorias de vientos para cada una de las altitudes de la tabla IV.1.

Como condición inicial, para simular las rosas de vientos las estaciones meteorológicas se georeferenciaron en el Rammet View (tabla IV.1).

Los datos meteorológicos horarios utilizados por los modelos HYSPLIT, Rammet View y AERMOD View (Tabla III.1) se obtuvieron de las estaciones MSX-CSP-01 y MSX-CSO-02, ubicadas al norte y al sur del área de estudio (Gallegos, 2010).

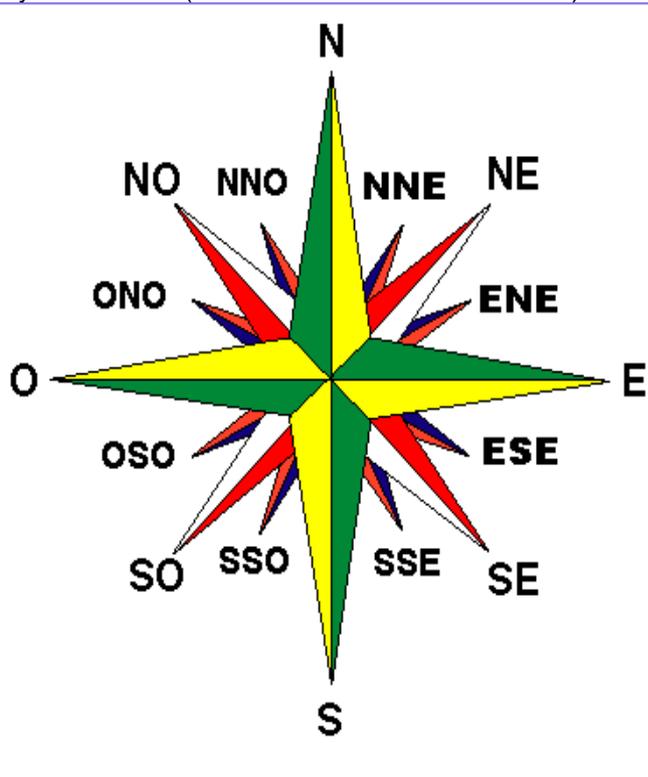
En el programa Excel 2007, se elaboraron dos bases de datos, donde cada una corresponde a su respectiva estación meteorológica e incluye los parámetros meteorológicos mostrados en la tabla III.1 para el Rammet View. Este modelo modifica el formato importado de Excel para procesar la información con un nuevo formato conocido como .SAM.

Para el cuarto paso de la metodología (figura III.1), se debe llevar a cabo el modelado de las rosas de vientos y sus trayectorias en el Rammet View y HYSPLIT respectivamente.

Al introducir los datos de velocidad y dirección del viento al modelo Rammet View éste los clasifica en base a rangos de velocidades de vientos y en intervalos de direcciones de vientos de 22.5°. La tabla IV.2 muestra la notación de las direcciones que utiliza dicho modelo.

Tabla IV.2. Rosa de los vientos y su notación (www.diccionario-nautico.com.ar).

1	NNE	Norte Noreste	22.50°
2	NE	Noreste	45.00°
3	ENE	Este Noreste	67.50°
4	E	Este	90.00°
5	ESE	Este Sudeste	112.50°
6	SE	Sudeste	135.00°
7	SSE	Sur Sudeste	157.00°
8	S	Sur	180.00°
9	SSO	Sur Sudoestes	202.50°
10	SO	Sudoeste	225.00°
11	OSO	Oeste Sudoeste	247.50°
12	O	Oeste	270.00°
13	ONO	Oeste Noroeste	292.50°
14	NO	Noroeste	315.00°
15	NNO	Norte Noroeste	337.50°
16	N	Norte	360.00°



IV.2 MODELADO DE TRAYECTORIAS Y ROSAS DE VIENTOS EN LA PARTE NORTE DEL SITIO DE ESTUDIO

Dada la diferencia de altitudes entre la parte norte del sitio de estudio (2,225 m.s.n.m) y la sur (1,915 m.s.n.m) se propone dividir el sitio en: a) “Zona norte” constituida por las fuentes Terrero, Tajo y caminos, y en donde se ubica la estación meteorológica MSX-CSP-01 y b) “Zona sur constituida por los caminos y el patio de lixiviación, y en donde se ubica la estación meteorológica MSX-CSP-02 (figura II.3).

Se asumirá que los datos de la estación MSX-CSP-01 son representativos de los parámetros meteorológicos que se presentan en la parte norte de la mina; mientras que los datos de la estación MSX-CSP-02 son representativos de los parámetros meteorológicos que se presentan en la zona sur.

Para modelar las trayectorias y rosas de vientos en la zona norte de la mina, se utilizaron los datos meteorológicos de la estación MSX-CSP-01 (tabla IV.1).

Primavera 2009 (marzo – mayo)

En la figura IV.1 se muestra la rosa de vientos calculada a partir de los datos de velocidad y dirección del viento de la estación meteorológica ubicada al Norte del sitio de estudio.

Los resultados del modelo HYSPLIT muestran las trayectorias hacia donde se pudieron haber dirigido los vientos en el sitio de estudio (ONO y NO) y por ende, haber arrastrado al material particulado (PM10) emitido al aire por las fuentes de área de la industria minera estudiada. Las trayectorias de los vientos se simularon en intervalos de tiempo de 12 horas.

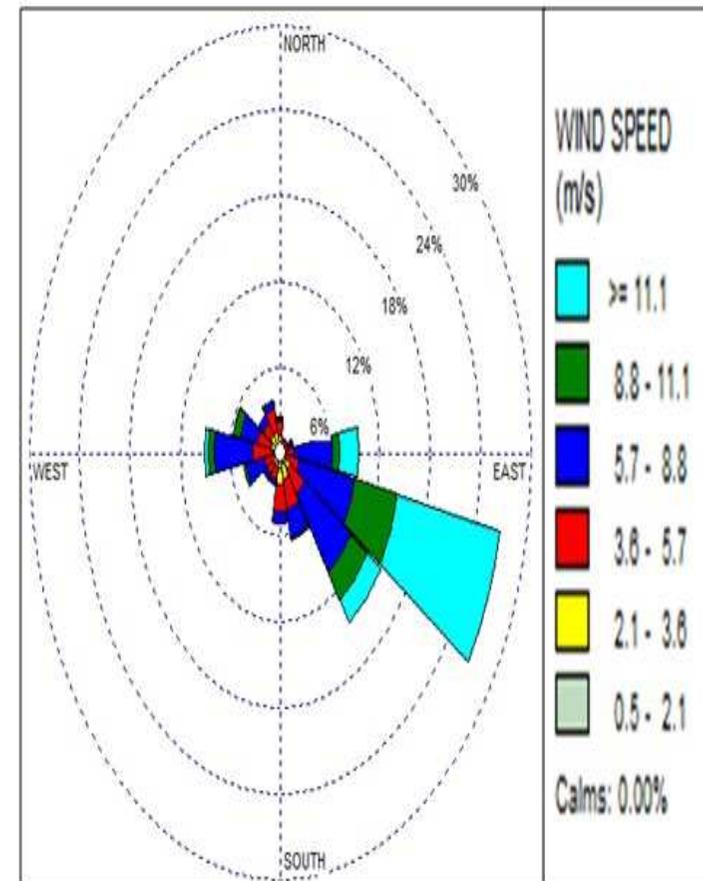
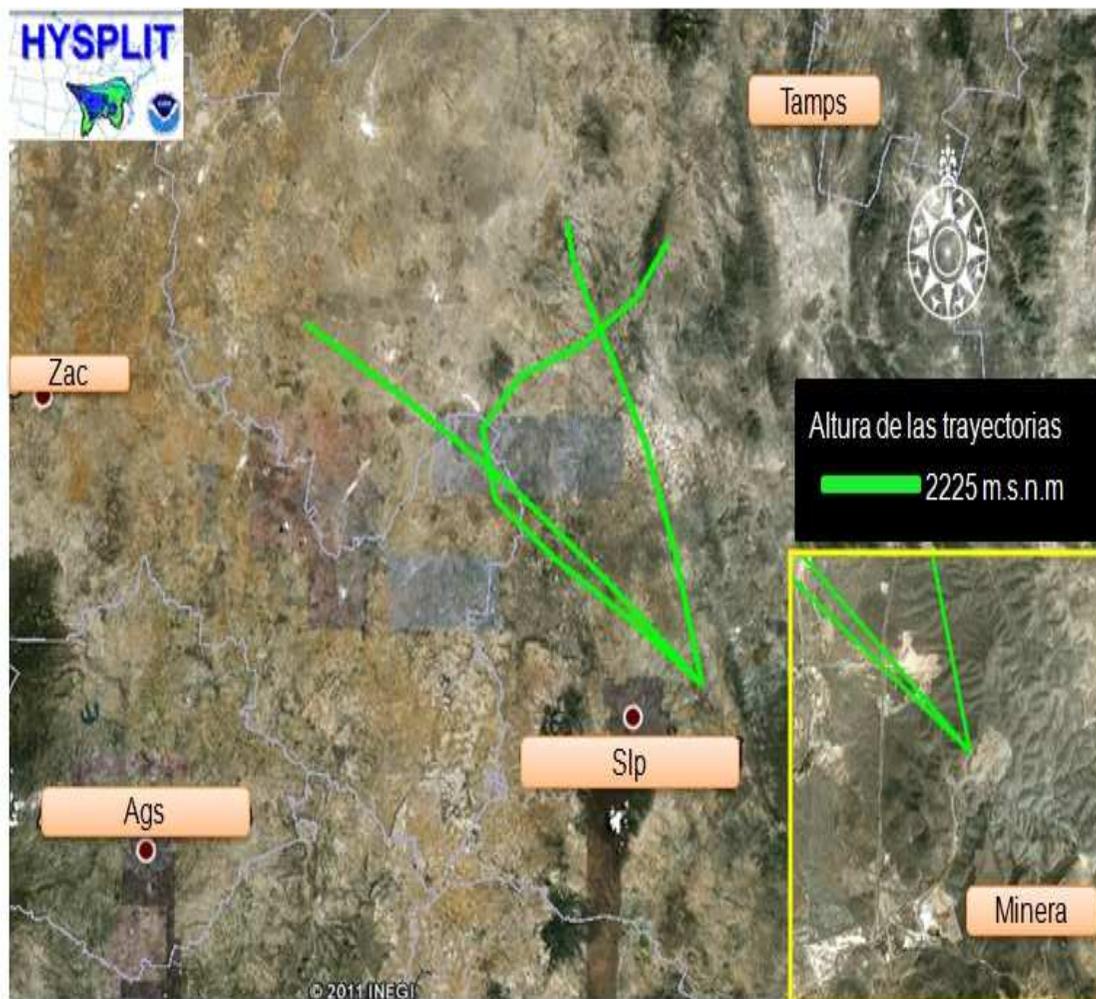


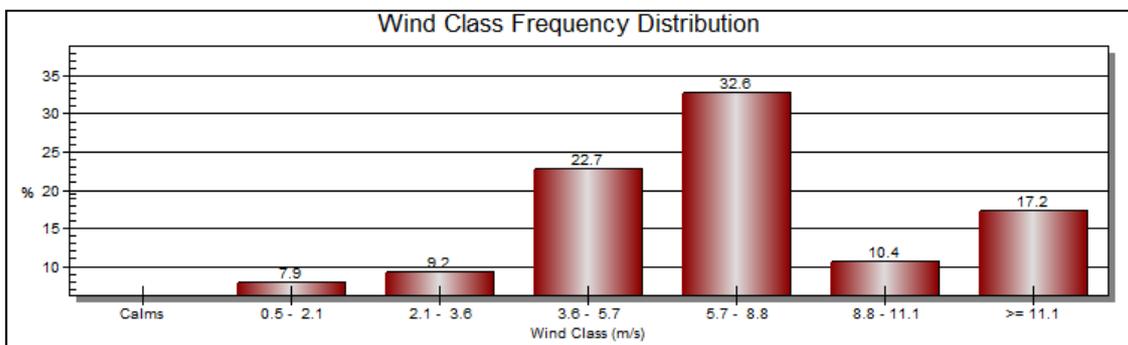
Figura IV.1. Modelado de las trayectorias de los vientos en el sitio de estudio y representación de la rosa de vientos para el periodo de primavera del 2009 (Rammet View y HYSPLIT).

La distribución mostrada indica que los vientos dominantes en el sitio de estudio vinieron con una frecuencia mayor del ESE, SE y E, con velocidades máximas superiores a los 11 m/s y mínimas de 0.5 m/s, arrastrando a las PM10 hacia el NO y NNO.

En el modelo Rammet View se obtuvo también la figura IV.2.a, donde se observa que los rangos de velocidades dominantes fueron los de 5.7 a 8.8 m/s y de 3.6 a 5.7 m/s con frecuencias del 30% y del 22.7%, respectivamente.

En la figura IV.2.b se indican las frecuencias con que se presentaron las estabilidades atmosféricas para el periodo de primavera del año 2009, según la clasificación propuesta por Pasquill-Guifford (tabla I.2). El tipo de estabilidad atmosférica que se presentó con mayor frecuencia en el sitio de estudio correspondió a la “atmósfera neutra” (D) con una frecuencia del 61.7%. Este tipo de atmósfera es determinado parcialmente por los rangos de velocidades de viento más frecuentes en el sitio de estudio.

a)



b)

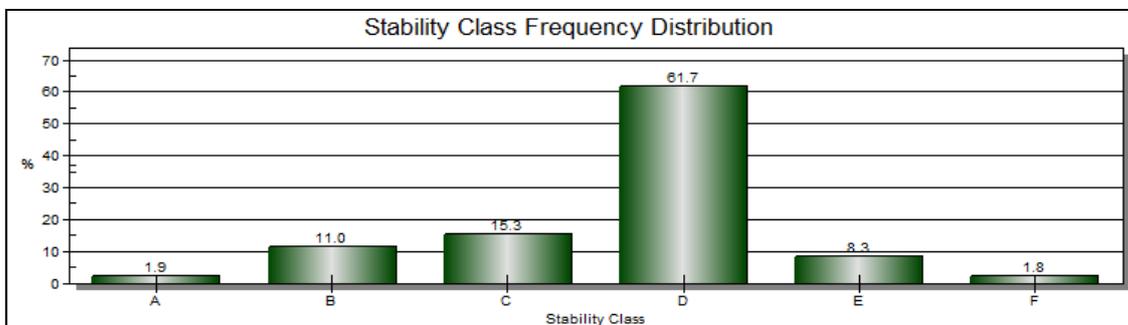


Figura IV.2. Distribución de frecuencias a) de las velocidades de los vientos y b) de las estabilidades atmosféricas en la primavera de 2009 (Rammet View).

Verano 2009 (junio – agosto)

Los resultados del modelo HYSPLIT muestran las trayectorias hacia donde se pudieron haber dirigido los vientos en el sitio de estudio (OSO y SO) y por ende, haber arrastrado al material particulado (PM10) emitido al aire por las fuentes de área de la industria minera estudiada. Las trayectorias de los vientos se simularon en intervalos de tiempo de 12 horas (figura IV.3).

La distribución mostrada indica que los vientos dominantes en el sitio de estudio vinieron con una frecuencia mayor del ENE, NE y E, con velocidades máximas superiores a los 11 m/s y mínimas de 0.5 m/s, arrastrando a las PM10 hacia el SO y OSO.

En el modelo Rammet View se obtuvo también la figura IV.4.a, donde se observa que los rangos de velocidades dominantes fueron los de 5.7 a 8.8 m/s y de 3.6 a 5.7 m/s con frecuencias del 36.2% y del 15.2%, respectivamente.

En la figura IV.4.b se indican las frecuencias con que se presentaron las estabilidades atmosféricas para el periodo de verano del año 2009, según la clasificación propuesta por Pasquill-Guifford (tabla I.2). El tipo de estabilidad atmosférica que se presentó con mayor frecuencia en el sitio de estudio correspondió a la “atmósfera neutra” (D) con una frecuencia del 71.7%. Este tipo de atmósfera es determinado parcialmente por los rangos de velocidades de viento más frecuentes en el sitio de estudio.

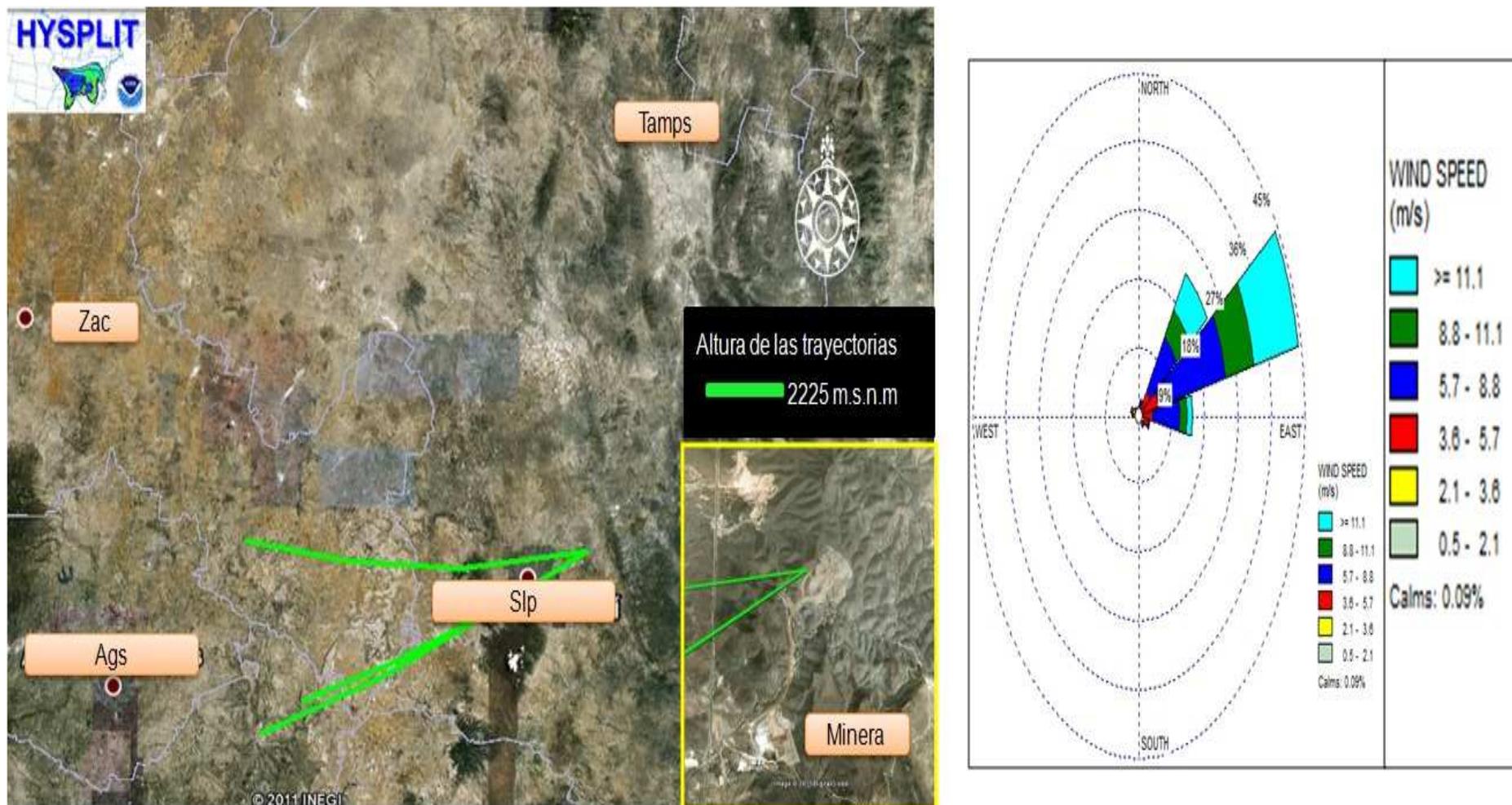
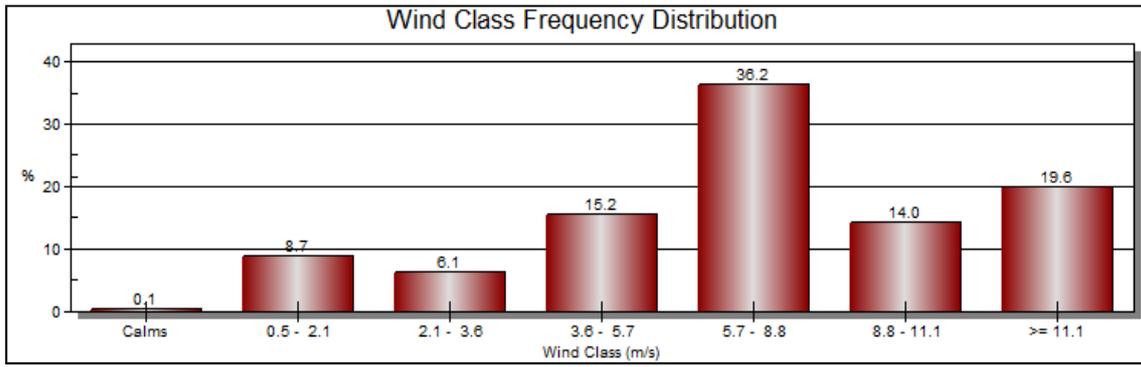


Figura IV.3. Modelado de las trayectorias de los vientos en el sitio de estudio y representación de la rosa de vientos para el periodo de verano del 2009 (Rammet View y HYSPLIT).

Modelado de los patrones de vientos y del transporte de PM10

a)



b)

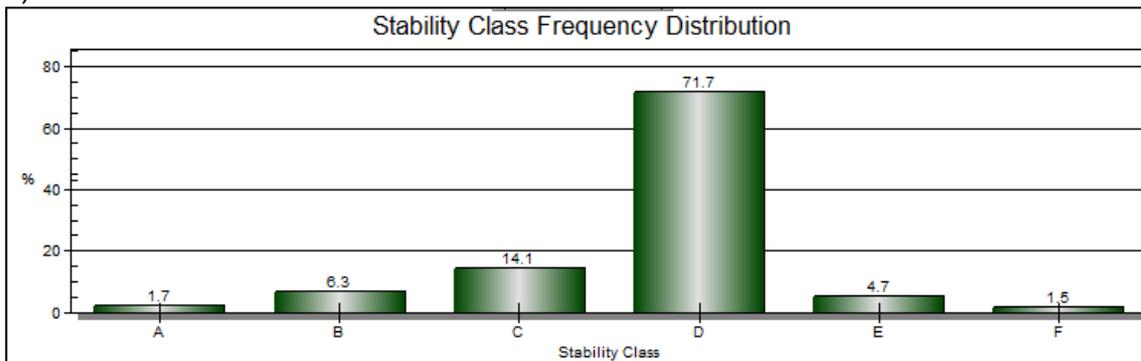


Figura IV.4. Distribución de frecuencias a) de las velocidades de los vientos y b) de las estabildades atmosféricas en el verano de 2009 (Rammet View).

Otoño 2009 (septiembre - noviembre)

Los resultados del modelo HYSPLIT muestran las trayectorias hacia donde se pudieron haber dirigido los vientos en el sitio de estudio (OSO y SO) y por ende, haber arrastrado al material particulado (PM10) emitido al aire por las fuentes de área de la industria minera estudiada. Las trayectorias de los vientos se simularon en intervalos de tiempo de 12 horas (figuraIV.5). La orientación de los vientos dominantes en otoño fue similar a la de los vientos de verano.

La distribución mostrada indica que los vientos dominantes en el sitio de estudio vinieron con una frecuencia mayor del ENE y NE, con velocidades máximas superiores a los 11 m/s y mínimas de 0.5 m/s, arrastrando a las PM10 hacia el SO y OSO.

En el modelo Rammet View se obtuvo también la figura IV.6.a, donde se observa que los rangos de velocidades dominantes fueron los de 5.7 a 8.8 m/s y de 3.6 a 5.7 m/s con frecuencias del 39% y del 22%, respectivamente.

En la figura IV.6.b se indican las frecuencias con que se presentaron las estabildades atmosféricas para el periodo de otoño del año 2009, según la clasificación propuesta por Pasquill-Guifford (tabla I.2). El tipo de estabilidad atmosférica que se presentó con mayor frecuencia en el sitio de estudio correspondió a la “atmósfera neutra” (D) con una frecuencia del 66.6%. Este tipo de atmósfera es determinado parcialmente por los rangos de velocidades de viento más frecuentes en el sitio de estudio.

Invierno 2009 (diciembre - febrero)

En el periodo invierno, los vientos dominantes vinieron principalmente del ESE y SE, y se observó que dichas orientaciones son similares a las de primavera. Las trayectorias modeladas en el HYSPLIT indican que el material particulado emitido por las fuentes de área de la industria minera estudiada pudo haber sido conducido principalmente hacia el NO y NNO (figura IV.7).

En el modelo Rammet View se obtuvo también la figura IV.8.a, donde se observa que los rangos de velocidades dominantes fueron los de 5.7 a 8.8 m/s y de 3.6 a 5.7 m/s con frecuencias del 35% y del 20.6%, respectivamente.

En la figura IV.8.b se indican las frecuencias con que se presentaron las estabildades atmosféricas para el periodo de invierno del año 2009, según la clasificación propuesta por Pasquill-Guifford (tabla I.2). El tipo de estabilidad atmosférica que se presentó con mayor frecuencia en el sitio de estudio correspondió a la “atmósfera neutra” (D) con una frecuencia del 61.9%. Este tipo de atmósfera es determinado parcialmente por los rangos de velocidades de viento más frecuentes en el sitio de estudio.

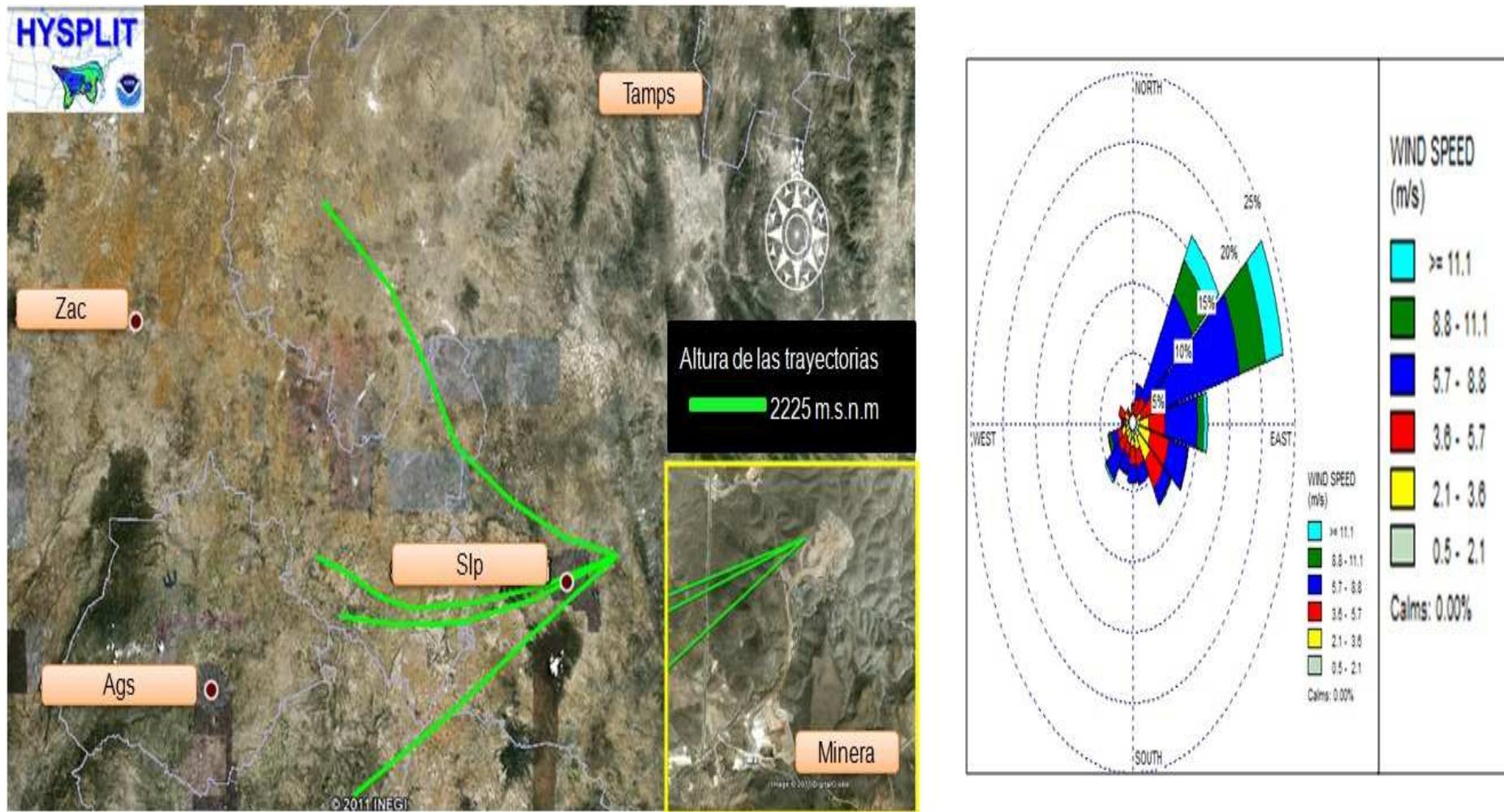
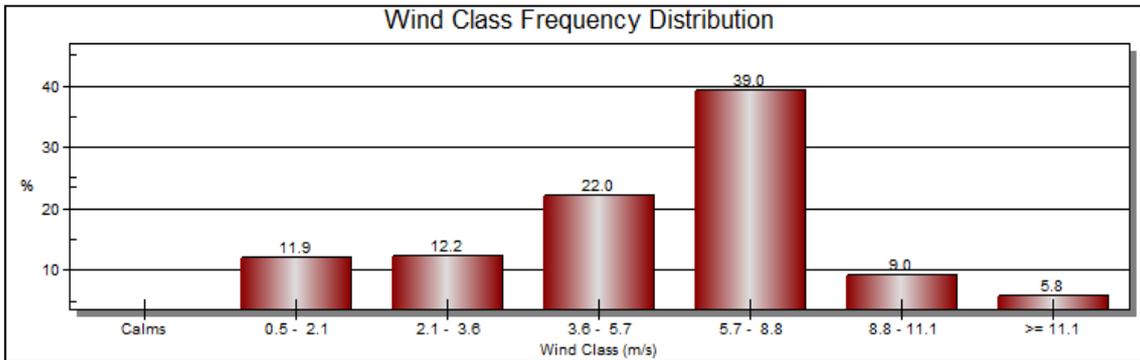


Figura IV.5. Modelado de las trayectorias de los vientos en el sitio de estudio y representación de la rosa de vientos para el periodo de otoño de 2009 (Rammet View y HYSPLIT).

a)



b)

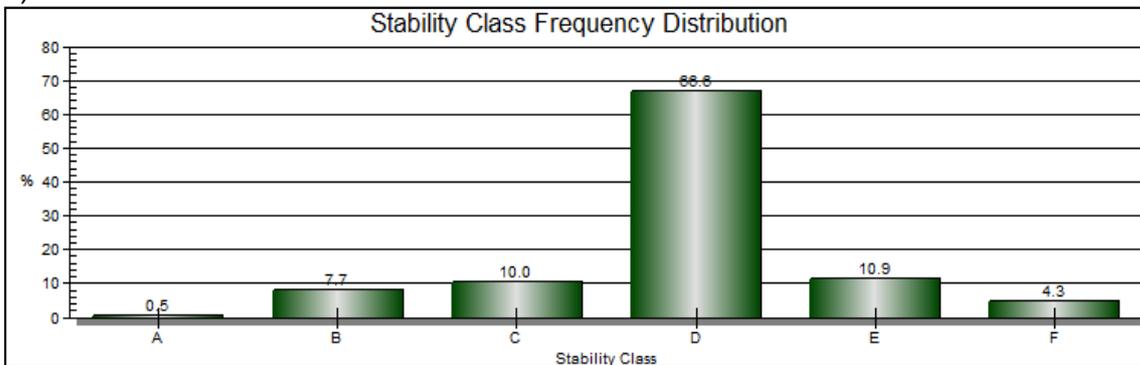


Figura IV.6. Distribución de frecuencias a) de las velocidades de los vientos y b) de las estabildades atmosféricas en el otoño de 2009 (Rammet View).

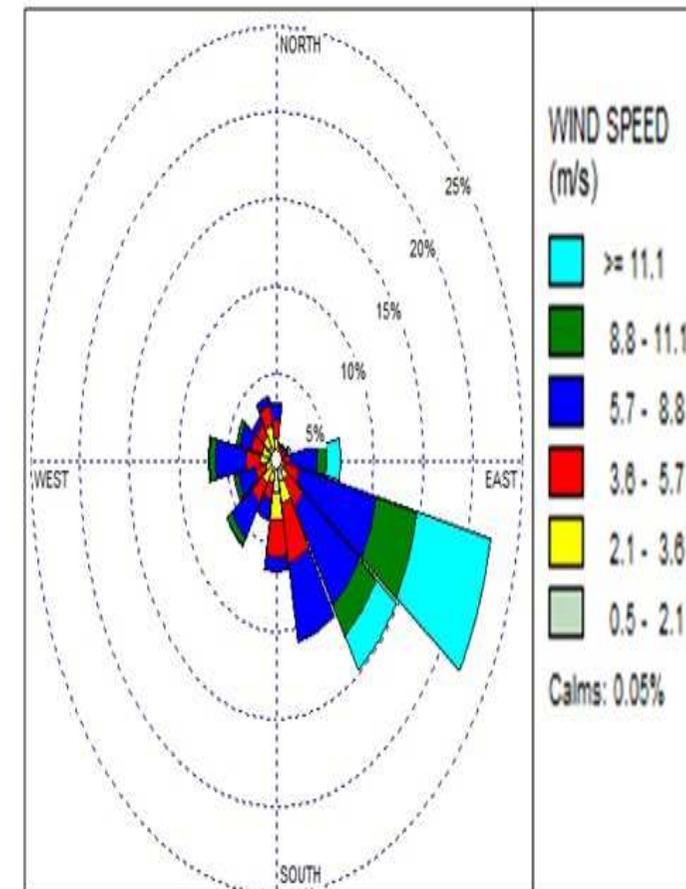
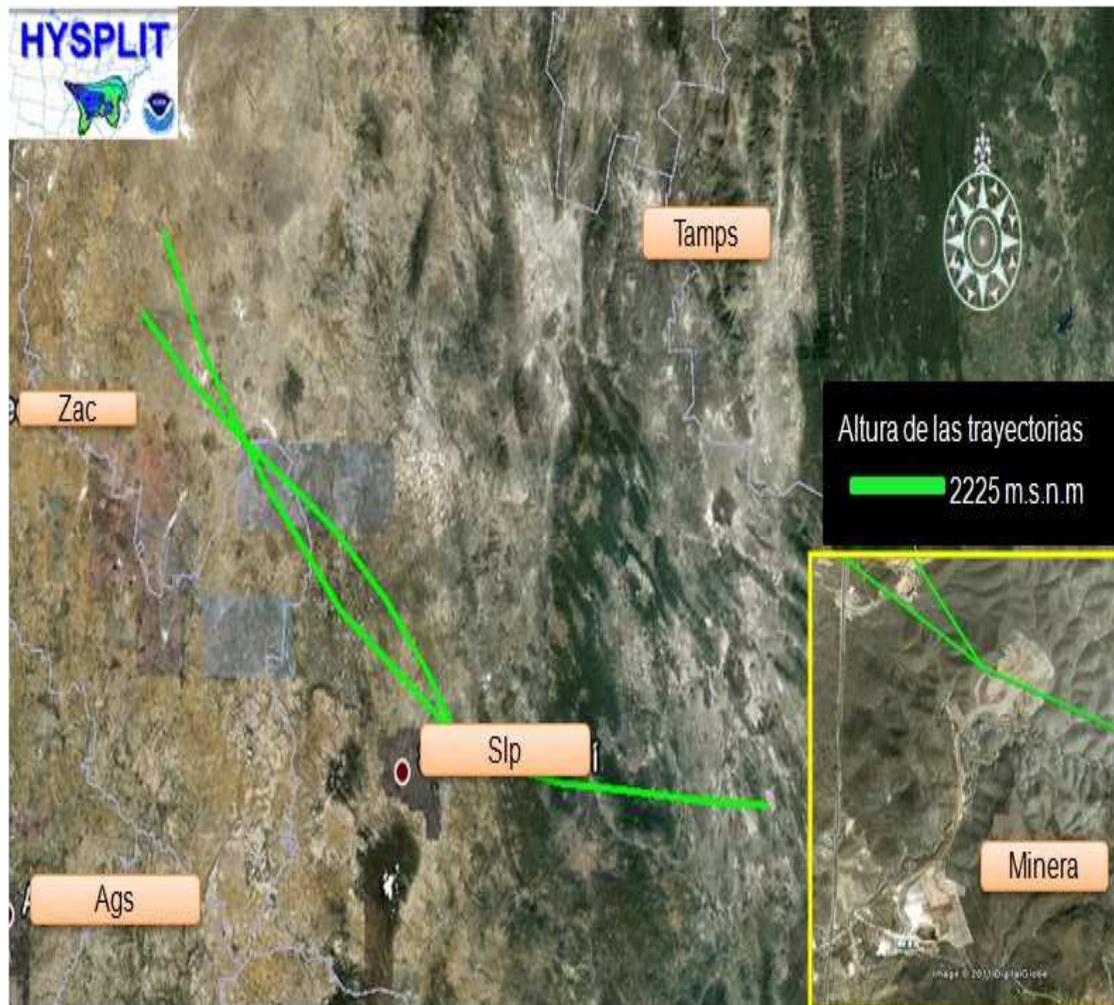
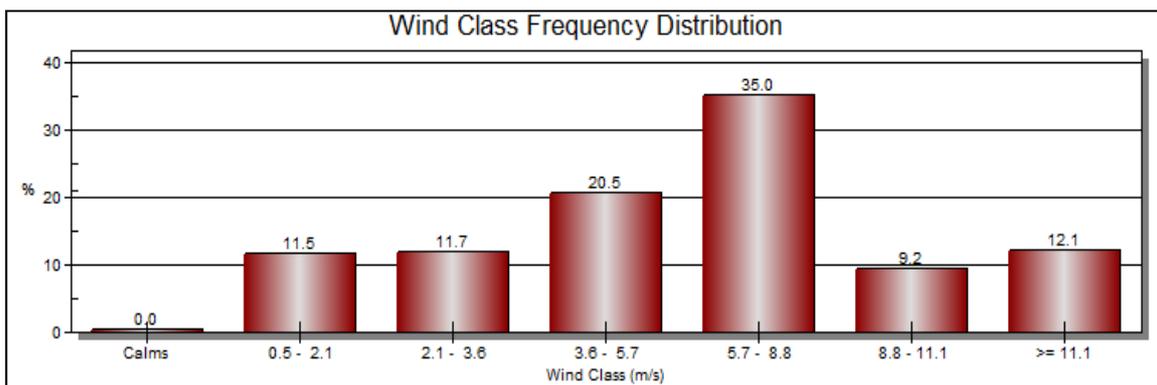


Figura IV.7. Modelado de las trayectorias de los vientos en el sitio de estudio y representación de la rosa de vientos para el periodo de invierno de 2009 (Rammet View y HYSPLIT).

a)



b)

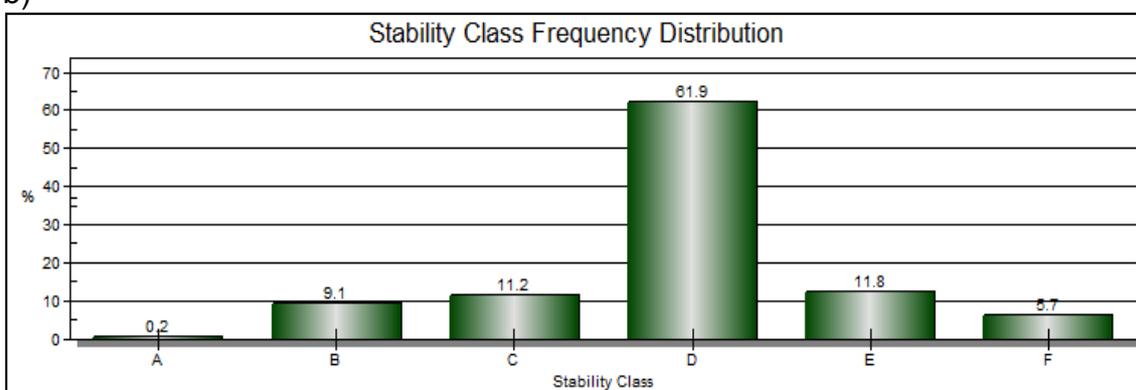


Figura IV.8. Distribución de frecuencias a) de las velocidades de los vientos y b) de las estabildades atmosféricas en el invierno de 2009 (Rammet View).

IV.3 BASE DE DATOS DE PM10 PARA EL MODELO AERMOD VIEW

Los datos de entrada al modelo AERMOD View corresponden a las coordenadas geográficas del sitio, la topografía del lugar, la ubicación de los nodos de la malla receptora en donde el modelo calcula las concentraciones de PM10, y la georeferencia o ubicación de las fuentes de emisión. Al modelo se introducen también la fecha de los datos, los datos de emisión de las fuentes y los datos meteorológicos.

La topografía del sitio se incorporó al modelo AERMOD View, proyectando las curvas de nivel (figura II.5) a su altura correspondiente para obtener una imagen tridimensional del lugar, tal y como se muestra en la figura IV.9.

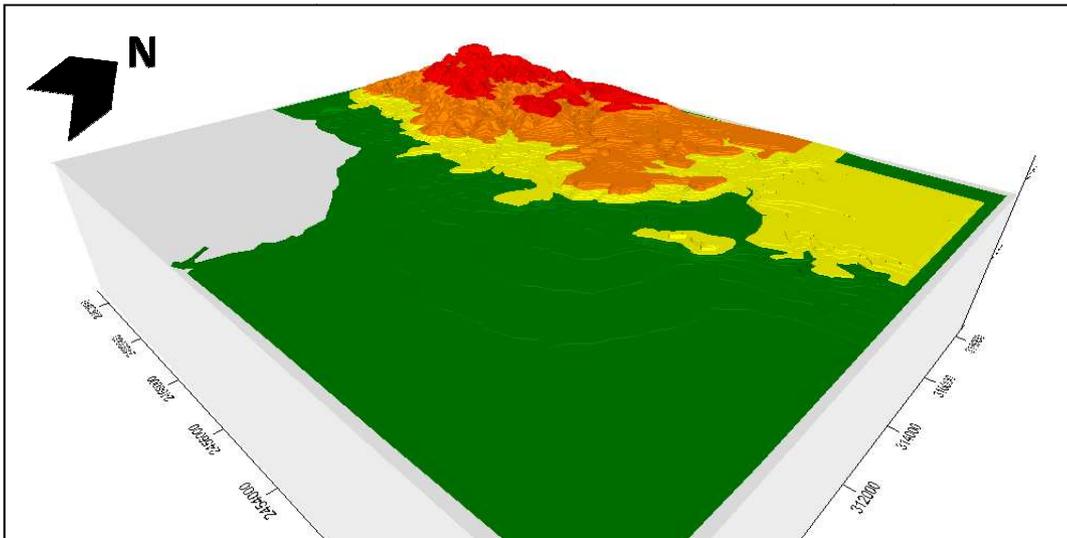


Figura IV.9. Imagen tridimensional del sitio de estudio modelada en el AERMOD View 6.5.0.

En la figura IV.10 se muestra el modelado de la topografía del sitio por el AERMOD View con el fin de ubicar las fuentes de área estudiadas que emiten PM10 y los poblados del Cerro de San Pedro y de la Zapatilla, vecinos de la mina.

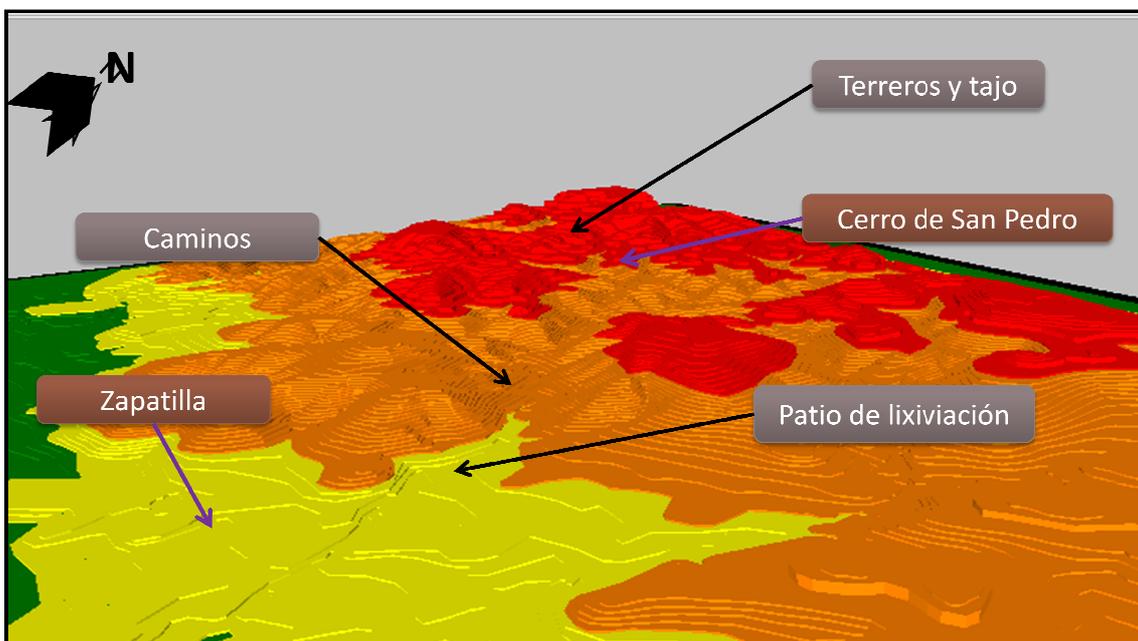


Figura IV.10. Modelado de la topografía del sitio de estudio realizado en el AERMOD View 6.5.0.

A fin de calcular las concentraciones de PM10 en diferentes puntos del sitio de estudio, éste se dividió en celdas, haciendo una “malla polar”, la cual consta de siete círculos concéntricos, según se muestra en la figura IV.11.

La distancia que hay de cada círculo concéntrico con respecto al centro es de 300, 500, 977, 1,954, 2,930, 3,907 y 4,884 metros respectivamente.

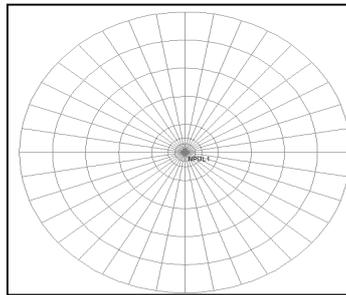


Figura IV.11. Malla en la que se dividió el sitio de estudio para calcular las concentraciones de PM10 a partir del modelo AERMOD View. A cada nodo se le asocia su altitud correspondiente.

A cada nodo de la malla se le asignó su respectiva altura en base a las curvas de nivel del sitio (figura II.5). En la figura IV.12 se muestran la altura de cada nodo de la malla y el campo de alturas clasificado por colores:

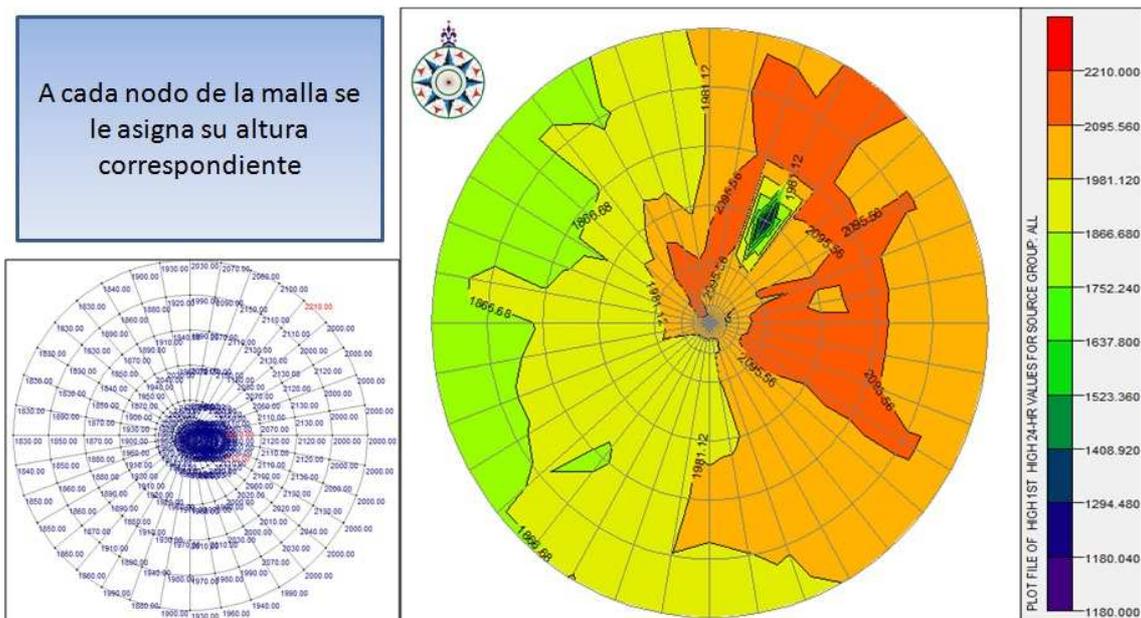


Figura IV.12. Simulación de las alturas asignadas a cada nodo de la malla receptora realizado en el AERMOD View 6.5.0.

Par identificar las fuentes de área emisoras de PM10 en donde se llevan a cabo las actividades mineras, se utilizó un mapa proporcionado por la empresa minera, en el que se muestran las distintas zonas de la mina y cuyas áreas correspondientes se muestra en la tabla IV.3.

Tabla IV.3. Superficie que ocupan las zonas de interés en la industria minera a cielo abierto.

Lugar	Superficie que ocupa (m ²)
Tajo	630,000
Terreros	1,455,100
Caminos	162,600
Patios de lixiviación, oficinas y planta	1,227,100

Debido a que las actividades mineras, especialmente en la zona del tajo y terreros, cambian constantemente su morfología, se decidió considerar la sumatoria total de las emisiones generadas por las actividades que se llevan a cabo en cada una de las fuentes mencionadas en la tabla IV.3.

La ubicación geográfica de las dos estaciones meteorológicas ubicadas en el sitio (MSX-CSP-01 y MSX-CSP-02) se incorpora al AERMOD View, de la misma forma a como se hizo en el modelo Rammet View (tabla IV.1).

Los datos de entrada al modelo al modelo AERMOD View para calcular las concentraciones de PM10 en el sitio de estudio corresponden a: 1) Las emisiones totales de PM10 de cada fuente de área estudiada de la mina (tabla IV.3), 2) Los valores de los parámetros meteorológicos de las estaciones MSX-CSP-01 y MSX-CSP-02, 3) Las coordenadas del sitio de estudio y de los nodos de la malla en los que el modelo calculará la concentración de PM10 y 4) Los datos del día o de los días para los cuales el modelo realizará los cálculos de las concentraciones de PM10.

Los datos de emisión de PM10 por parte de las fuentes estudiadas se presentan en el apéndice C. Estos datos fueron tomados de la investigación desarrollada por Gallegos (2010) en el mismo sitio de estudio. Las bases de datos meteorológicas utilizadas en el modelo AERMOD View corresponden a las utilizadas en el modelo Rammet View según se indicó en la tabla III.1.

IV.4 MODELADO DE LAS CONCENTRACIONES DE PM10 EN LA ZONA NORTE DEL SITIO

En este proyecto se realizan dos tipos de modelados:

- I. Los promedios diarios y anuales de las concentraciones de PM10.
- II. Las concentraciones promedio de PM10 para las cuatro estaciones del año.

Los cálculos diarios y anuales se llevan a cabo debido a que la Norma Oficial Mexicana impone valores límites de las concentraciones de PM10 para un día y un año respectivamente (tabla I.4). Los cálculos por estación del año se realizan con el fin de identificar el comportamiento de la contaminación por PM10 en función con la variación estacional de los patrones de viento en la zona de estudio.

IV.4.1 MODELADO DEL PROMEDIO DIARIO DE LAS CONCENTRACIONES DE PM10 EN TAJO-TERREROS-CAMINOS

La figura IV.13 muestra los intervalos de las curvas de isoconcentración promedio diarios modeladas por el AERMOD View. De acuerdo con el modelo, las concentraciones máximas de PM10 se presentarían en las superficies ocupadas por las fuentes de los caminos y Tajo, así como en sus áreas vecinas. El área de los caminos podría alcanzar los $900 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que en el tajo podrían llegar a los $700 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Las posibles causas por las cuales se localizarían las mayores concentraciones de PM10 en estas zonas, es en primer lugar las emisiones importantes de PM10 que se producen en estas fuentes producto del movimiento de materiales por maquinaria pesada, además del transporte del material pétreo por medio de camiones cuyo ir y venir levanta polvos del suelo en cantidades significativas. Desde el punto de vista físico, el tajo presenta un sumidero en el que se favorece la aglomeración del material particulado; mientras que en el caso de los caminos, éstos se encuentran rodeados por accidentes topográficos de

mayor altitud que limitan la dispersión de las partículas hacia superficies vecinas.

De acuerdo con los cálculos del modelo, en el poblado del municipio de Cerro de San Pedro podrían observarse concentraciones diarias que superarían los $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$, superando la NOM-025-SSA1-1993^c, que sugiere como valor máximo en 24 horas, de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Para calcular las concentraciones de PM10 en el camino principal de la mina mediante el modelo AERMOD View se utilizó la emisión de PM10 correspondiente (apéndice C) y los parámetros meteorológicos correspondientes a la estación MSX-CSP-01 ubicada al Norte de la mina.

IV.4.2 MODELADO DEL PROMEDIO ANUAL DE LAS CONCENTRACIONES DE PM10 EN TAJO-TERREROS-CAMINOS

La figura IV.14 muestra los intervalos de las curvas de isoconcentración promedio anuales modeladas por el AERMOD View. De acuerdo con el modelo, las concentraciones máximas anuales de PM10 se presentarían en la superficie ocupada por el tajo, así como en sus áreas vecinas; en esta zona, las concentraciones anuales de PM10 podrían rebasar los $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Las razones por las cuales se localizarían las concentraciones anuales de PM10 más altas en la zona del tajo, son las emisiones elevadas de partículas que se generan por las actividades de voladura, rezagado, y de más movimiento de materiales pétreos que se dan en ese sitio. La topografía del sitio del tajo (sumidero) limita también la dispersión de partículas, favoreciendo su acumulación próxima al sitio de emisión.

De acuerdo con los resultados del modelo en el poblado del municipio del Cerro de San Pedro podrían presentarse concentraciones anuales de PM10 que alcanzarían los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, superando el valor sugerido por la NOM-025-SSA1-1993^c de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

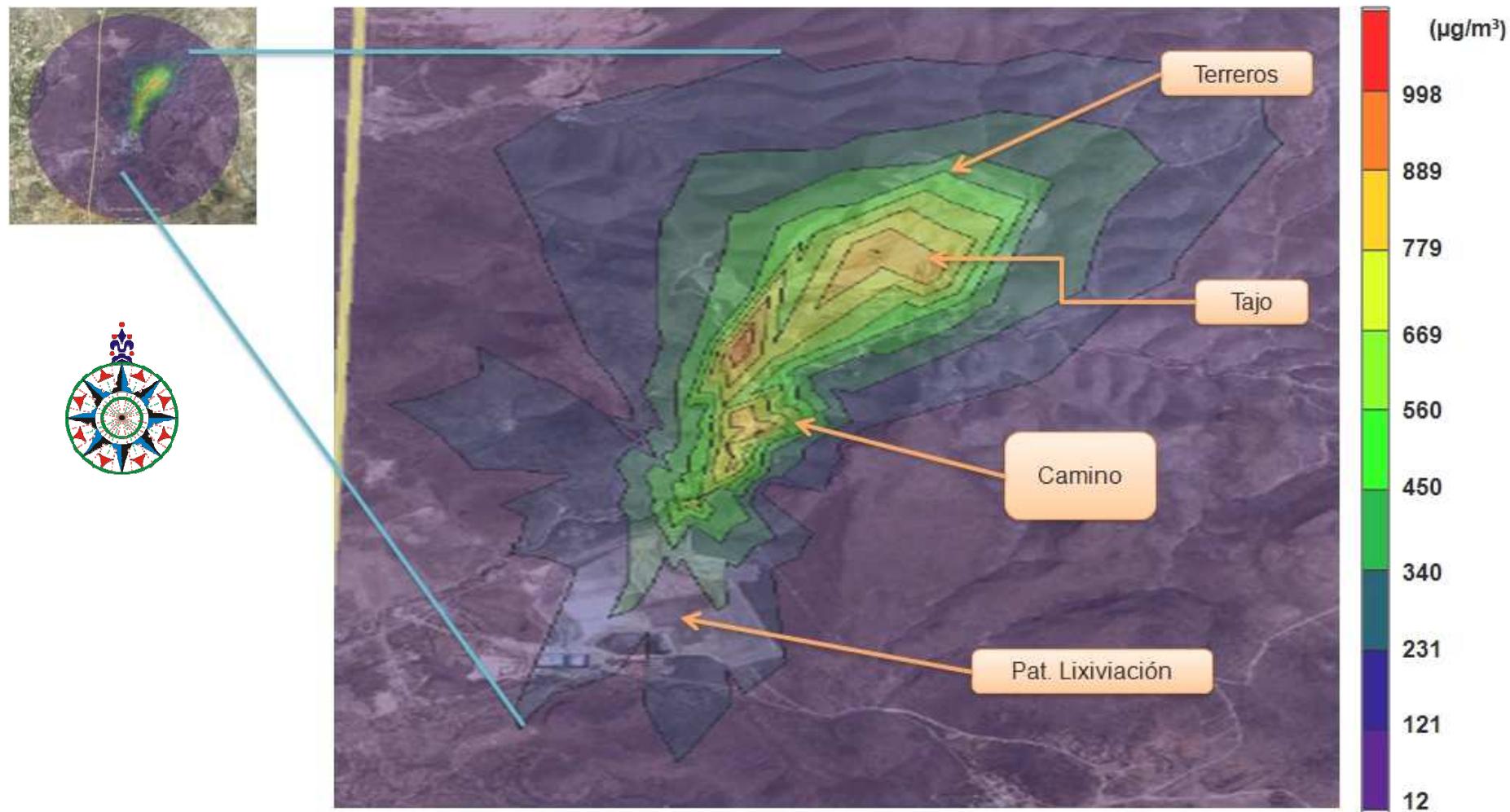


Figura IV.13. Modelado del transporte de PM10 en las zonas del tajo, terreros y caminos para un periodo de 24 horas realizado en el AERMOD View 6.5.0.

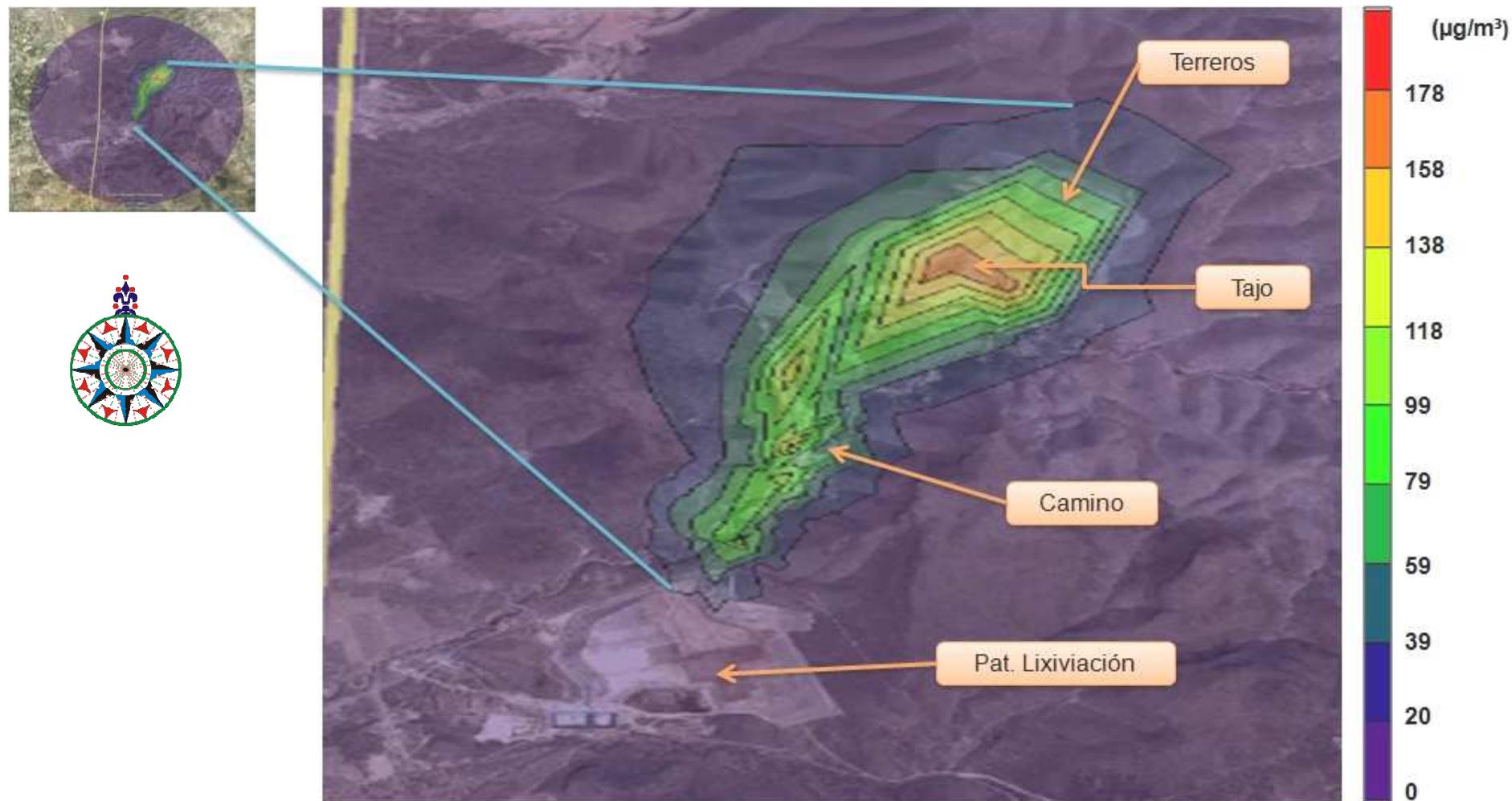


Figura IV.14. Modelado del transporte de PM10 en las zonas del tajo, terreros y caminos para un periodo de un año realizado en el AERMOD View 6.5.0.

IV.5 MODELADO DE ROSAS DE VIENTOS EN LA PARTE SUR DEL SITIO DE ESTUDIO

En el caso particular de la parte sur de la mina, no fue posible utilizar el modelo HYSPLIT para calcular las trayectorias de los vientos a partir de los datos de la estación meteorológica MSX-CSP-02.

A partir de los datos horarios de esta estación para el año 2009 se calcularon las rosas de vientos para las estaciones del año de primavera, verano, otoño e invierno (figura IV.15).

Ya que en todos los casos los vientos dominantes soplaron del E, ENE y ESE y con velocidades iguales o inferiores a los 2.1 m/s. De acuerdo con las rosas de vientos, las partículas de PM10 emitidas en la parte sur de la mina por los patios de lixiviación debieran ser transportadas principalmente hacia el oeste de esta fuente.

Primavera 2009 (marzo – mayo)

En el modelo Rammet View se obtuvo también la figura IV.16.a en que los rangos de velocidades dominantes para el periodo de primavera fueron los de 0.5 a 2.1 m/s y de 3.6 a 5.7 m/s con frecuencias del 36.3% y del 25% respectivamente.

En la figura IV.16.b se indican las frecuencias con que se presentaron las estabildades atmosféricas en el sur del sitio de estudio, según la clasificación propuesta por Pasquill-Guifford. El tipo de estabilidad atmosférica dominante correspondió a la atmósfera neutra (D) con una frecuencia del 26.6%.

Dadas las bajas velocidades del viento, las otras estabildades atmosféricas con una frecuencia importante fueron los tipos E y F (moderadamente estable y estable).

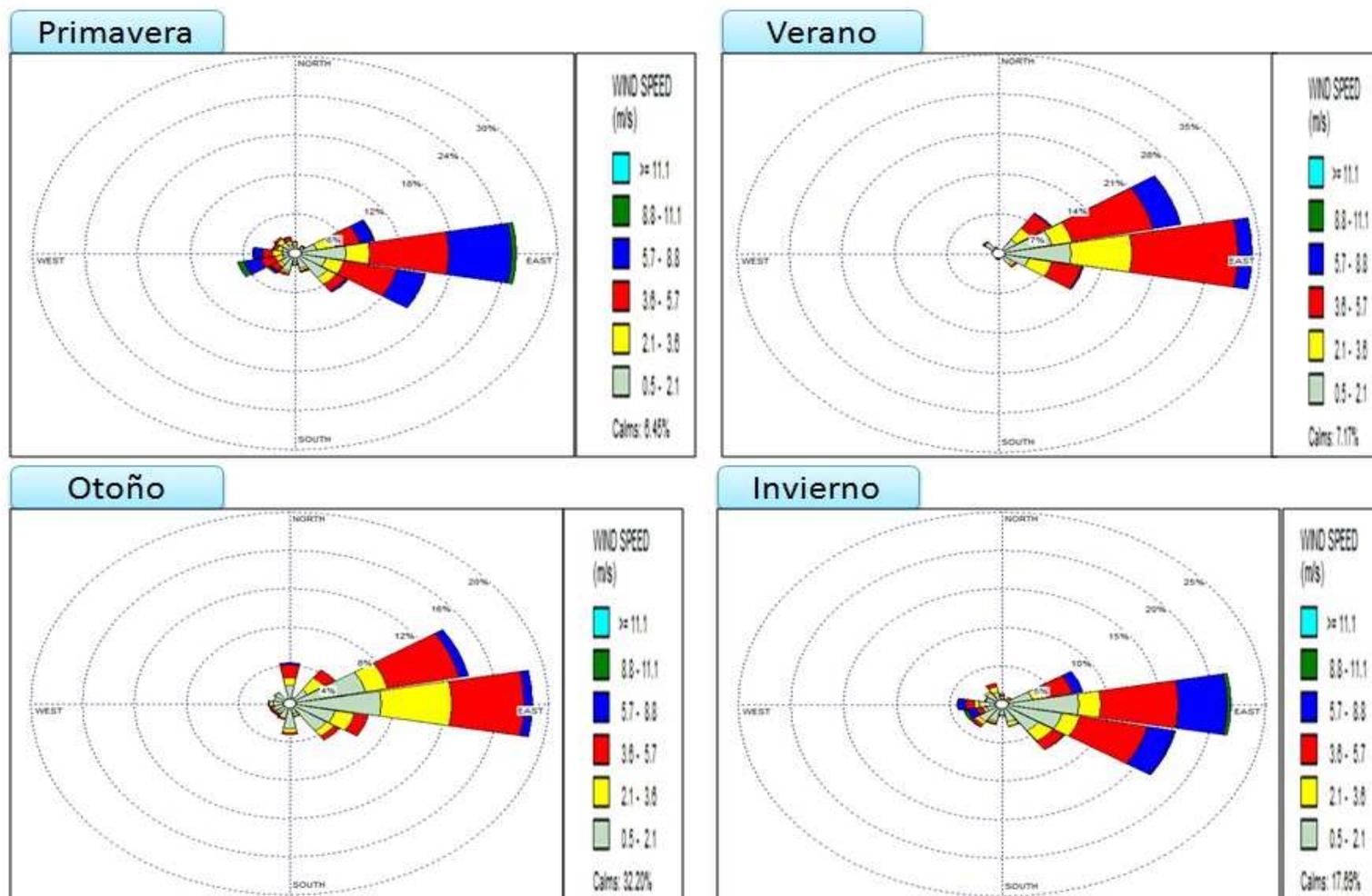


Figura IV.15. Rosas de vientos por estación del año de 2009 que se calcularon para la zona sur de la industria minera.

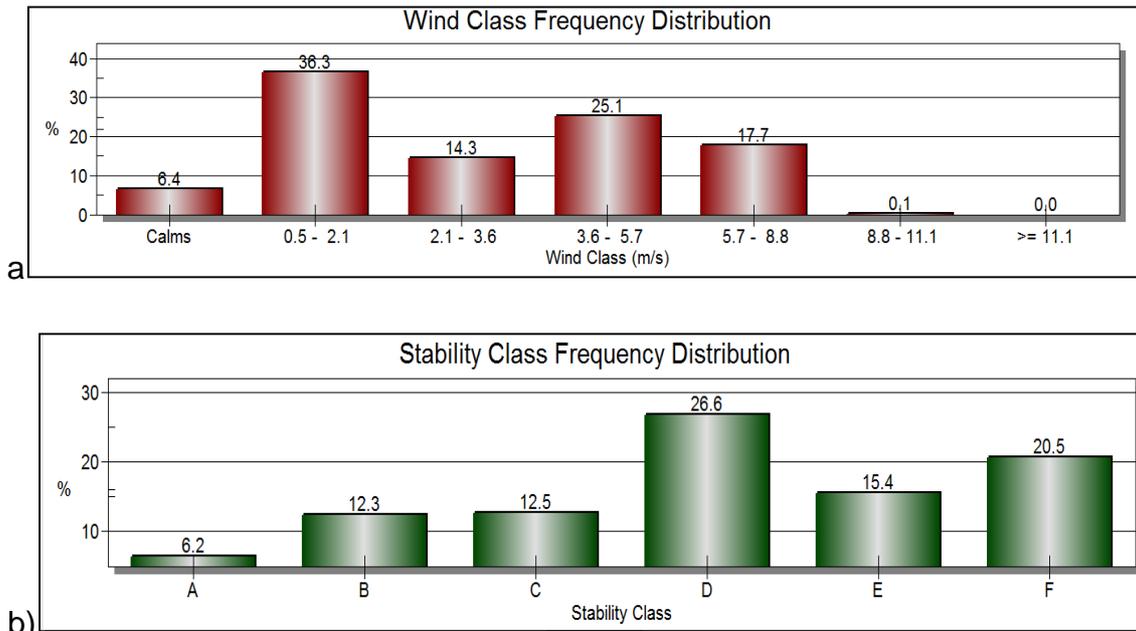


Figura IV.16. Distribución de frecuencias a) de las velocidades de los vientos y b) de las estabilidades atmosféricas en primavera de 2009 (Rammet View).

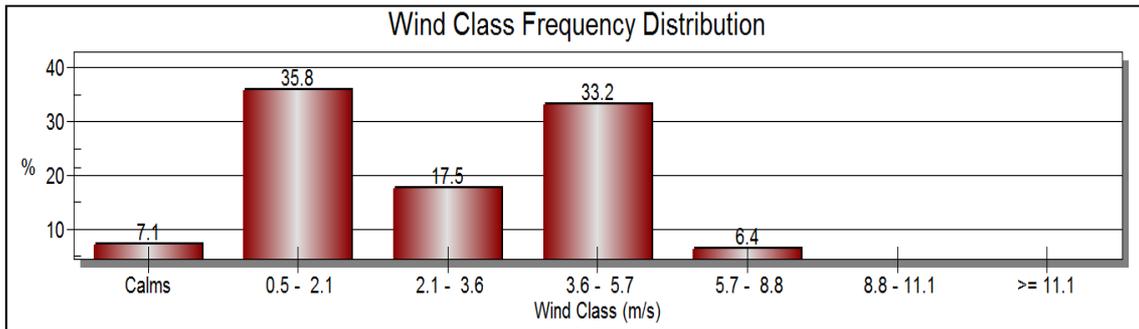
Verano 2009 (junio - agosto)

En el modelo Rammet View se obtuvo también la figura IV.17.a en que los rangos de velocidades dominantes para el periodo de verano fueron los de 0.5 a 2.1 m/s y de 3.6 a 5.7 m/s con frecuencias del 35.8% y del 33.2% respectivamente.

En la figura IV.17.b se representa la gráfica de la distribución de las frecuencias de la estabilidad atmosférica calculada por el modelo Rammet View para el periodo de verano de 2009. El tipo de estabilidad atmosférica dominante correspondió a una atmósfera tipo neutra (D), con una frecuencia del 24.1%.

Dadas las bajas velocidades del viento, otras estabilidades atmosférica con una frecuencia importante fueron los tipos E y F (moderadamente estable y estable)

a)



b)

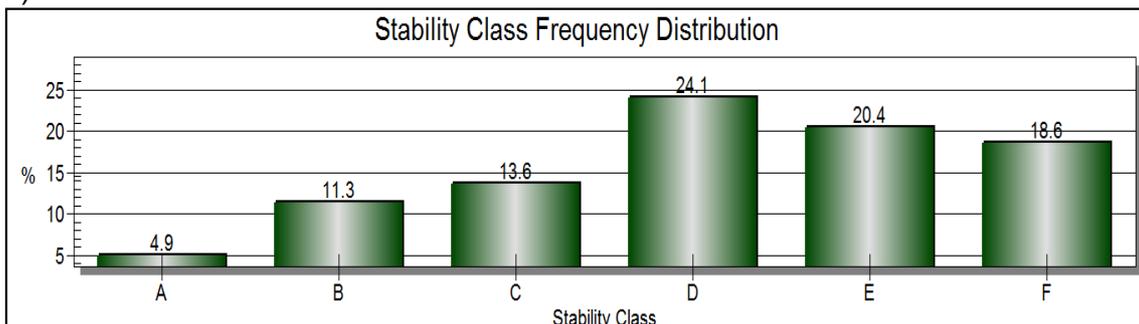


Figura IV.17. Distribución de frecuencias a) de las velocidades de los vientos y b) de las estabilidades atmosféricas en verano de 2009 (Rammet View).

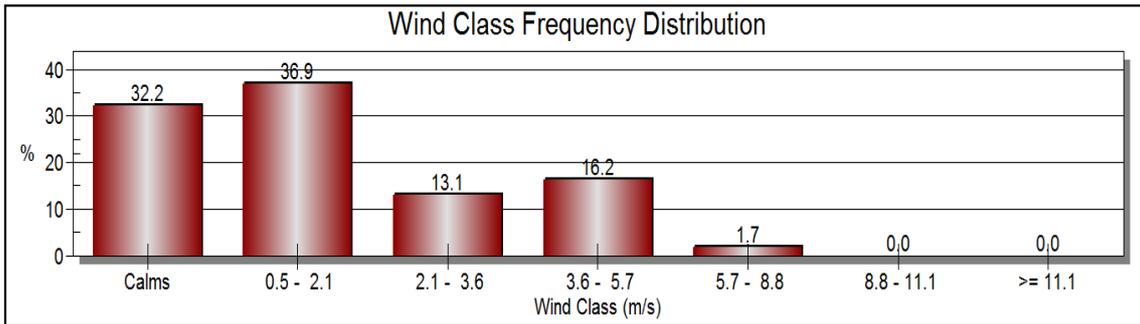
Otoño 2009 (septiembre – noviembre)

En el modelo Rammet View se obtuvo también la figura IV.18.a en que los rangos de velocidades dominantes para el periodo de primavera fueron los de 0.5 a 2.1 m/s y de 3.6 a 5.7 m/s con frecuencias del 36.9% y del 16.2% respectivamente. Los vientos con velocidades inferiores a 0.5 m/s se presentaron con una frecuencia del 32.2%.

En la figura IV.18.b se indican las frecuencias con que se presentaron las estabilidades atmosféricas en el sur del sitio de estudio, según la clasificación propuesta por Pasquill-Guifford. El tipo de estabilidad atmosférica dominante correspondió a la atmósfera estable (F) con una frecuencia del 18.3%.

Dadas las bajas velocidades del viento, las otras estabilidades atmosféricas con una frecuencia importante fueron los tipos D y E (neutra y moderadamente estable).

a)



b)

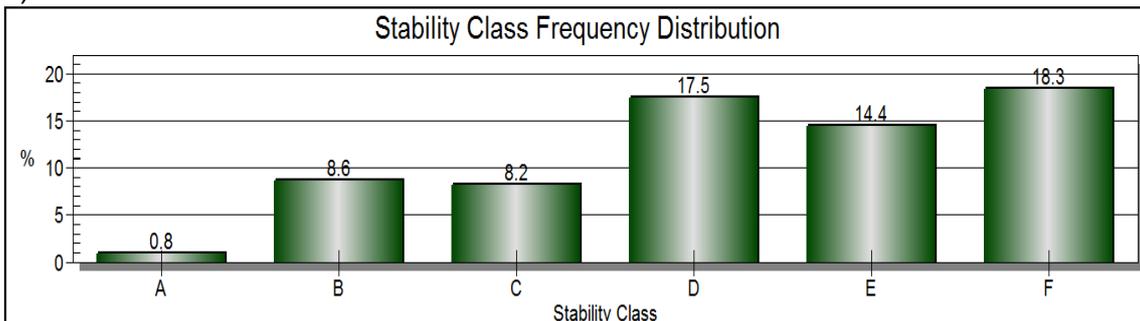


Figura IV.18. Distribución de frecuencias a) de las velocidades de los vientos y b) de las estabildades atmosféricas en otoño de 2009 (Rammet View).

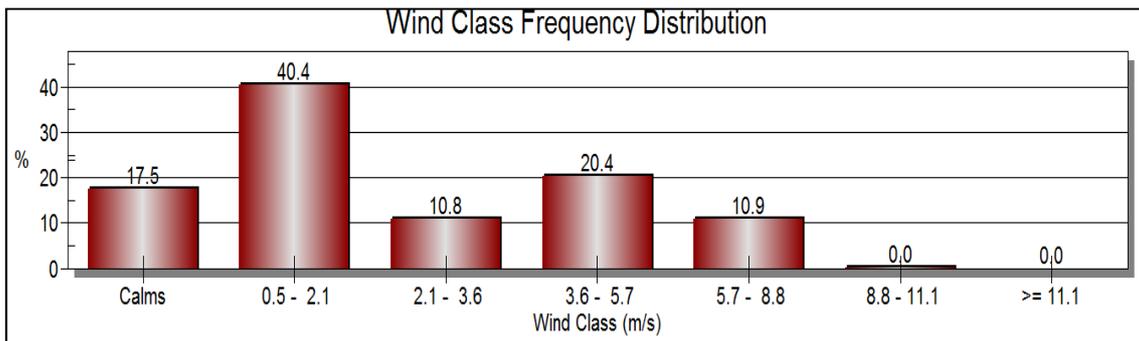
Invierno 2009 (diciembre – febrero)

En el modelo Rammet View se obtuvo también la figura IV.19.a en que los rangos de velocidades dominantes para el periodo de primavera fueron los de 0.5 a 2.1 m/s y de 3.6 a 5.7 m/s con frecuencias del 40.4% y del 20.4% respectivamente.

En la figura IV.19.b se indican las frecuencias con que se presentaron las estabildades atmosféricas en el sur del sitio de estudio, según la clasificación propuesta por Pasquill-Guifford. El tipo de estabilidad atmosférica dominante correspondió a la atmósfera estable (F) con una frecuencia del 24.5%.

Dadas las bajas velocidades del viento, las otras estabildades atmosféricas con una frecuencia importante fueron los tipos D y E (neutra y moderadamente estable).

a)



b)

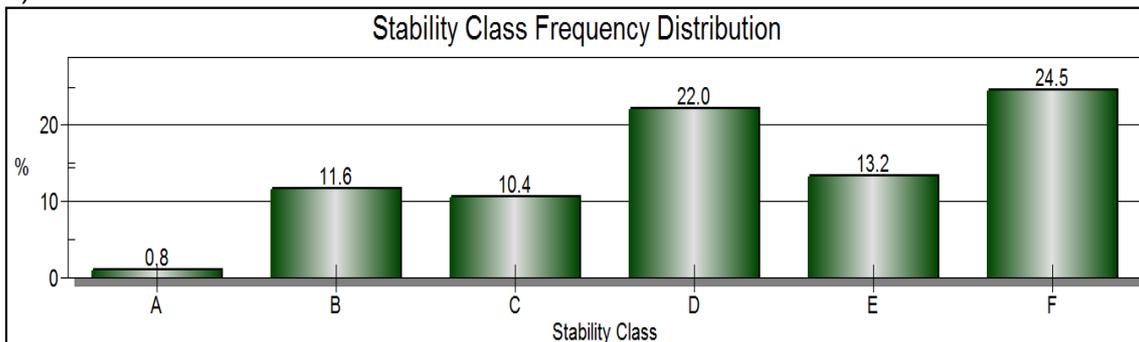


Figura IV.19. Distribución de frecuencias a) de las velocidades de los vientos y b) de las estabildades atmosféricas en invierno de 2009 (Rammet View).

IV.6 MODELADO DE LAS CONCENTRACIONES DE PM10 EN LA ZONA SUR DEL SITIO

En este proyecto se realizan dos tipos de modelados:

- I. Los promedios diarios y anuales de las concentraciones de PM10.
- II. Las concentraciones promedio de PM10 para las cuatro estaciones del año.

Los cálculos diarios y anuales se llevan a cabo debido a que la Norma Oficial Mexicana impone valores límites de las concentraciones de PM10 para un día y un año respectivamente (tabla I.4). Los cálculos por estación del año se realizan con el fin de identificar el comportamiento de la contaminación por PM10 en función con la variación estacional de los patrones de viento en la zona de estudio.

IV.6.1 MODELADO DEL PROMEDIO DIARIO DE LAS CONCENTRACIONES DE PM10 EN PATIO DE LIXIVIACIÓN-CAMINOS

La figura IV.20 muestra los intervalos de las curvas de isoconcentración promedio diarios modeladas por el AERMOD View. De acuerdo con el modelo, las concentraciones máximas de PM10 se presentarían en la superficie ocupada por el camino principal, así como en sus áreas vecinas. Su área podría alcanzar los 2500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Las posibles causas por las cuales se localizarían las mayores concentraciones de PM10 en el camino principal es porque éste se encuentra rodeado por accidentes topográficos de mayor altitud que limitan la dispersión de las partículas hacia superficies vecinas.

De acuerdo con los cálculos del modelo, en el poblado de la Zapatilla podrían observarse concentraciones diarias que superarían los 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, superando la NOM-025-SSA1-1993^c, que sugiere como valor máximo en 24 horas, de 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Para calcular las concentraciones de PM10 en el camino principal de la mina mediante el modelo AERMOD View se utilizó la emisión de PM10 correspondiente (apéndice C) y los parámetros meteorológicos correspondientes a la estación MSX-CSP-01 ubicada al Norte de la mina.

IV.6.2 MODELADO DEL PROMEDIO ANUAL DE LAS CONCENTRACIONES DE PM10 EN PATIO DE LIXIVIACIÓN-CAMINOS

La figura IV.21 muestra los intervalos de las curvas de isoconcentración promedio anuales modeladas por el AERMOD View. De acuerdo con el modelo, las concentraciones máximas anuales de PM10 se presentarían en la superficie ocupada por el camino principal, así como en sus áreas vecinas; en esta zona, las concentraciones anuales de PM10 podrían rebasar los 900 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Las razones por las cuales se localizarían las concentraciones anuales de PM10 más altas en la zona del camino principal, son las emisiones elevadas de partículas que se generan por la actividad de acarreo a lo largo del camino. La topografía del sitio limita también la dispersión de partículas, ya que al encontrarse el camino rodeado por accidentes topográficos de mayor altitud se limita la dispersión de las partículas hacia superficies vecinas favoreciendo su acumulación próxima al sitio de emisión.

De acuerdo con los resultados del modelo, en el poblado de la Zapatilla podrían presentarse concentraciones anuales de PM10 que alcanzarían los 160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, superando el valor sugerido por la NOM-025-SSA1-1993^c de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

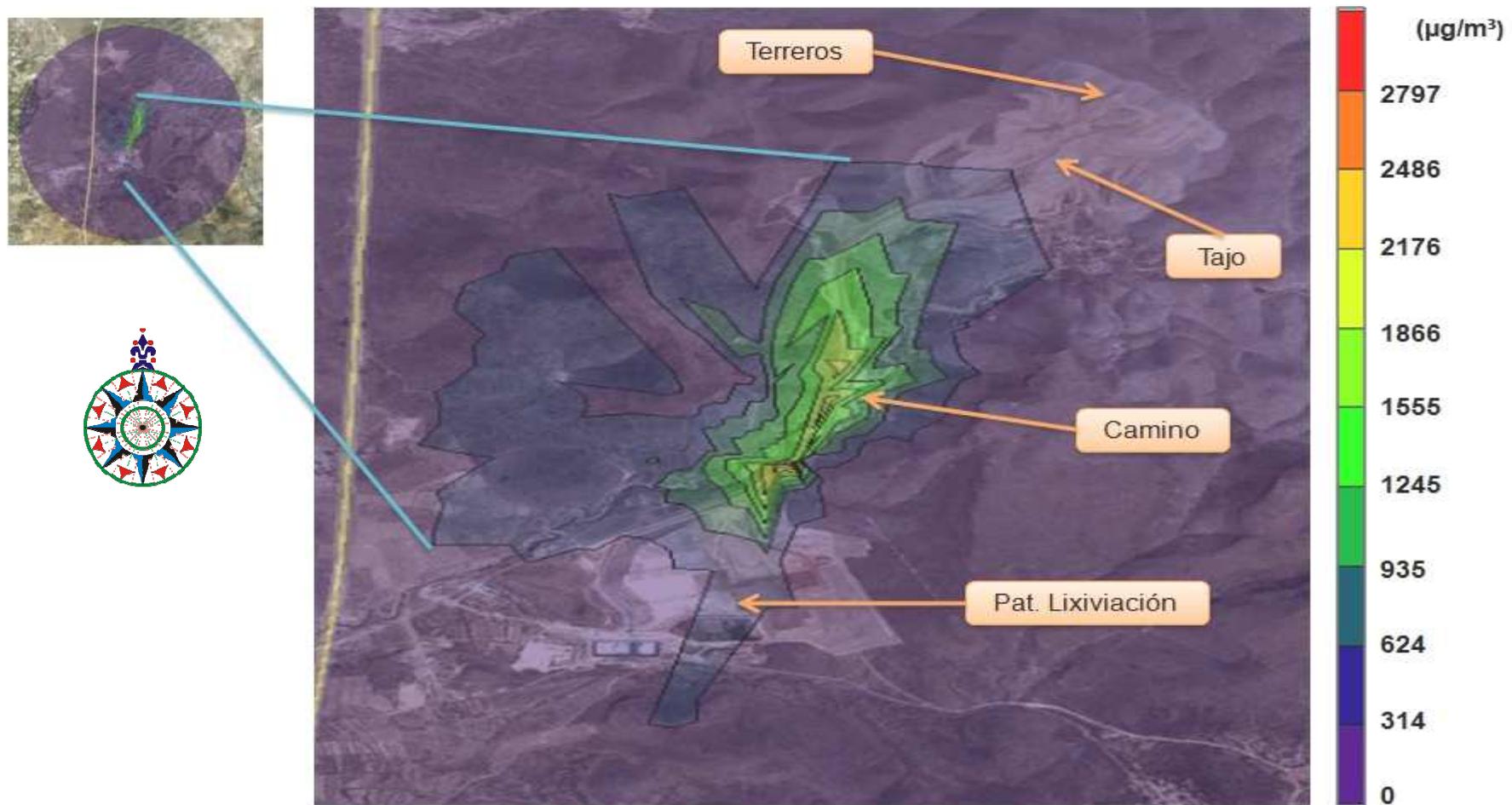


Figura IV.20. Modelado del transporte de PM10 en el patio de lixiviación-caminos para un periodo de 24 horas (realizado en el AERMOD View 6.5.0).

La máxima concentración para el periodo de un año (figura IV.20), sería de $977 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y la mínima prácticamente nula.

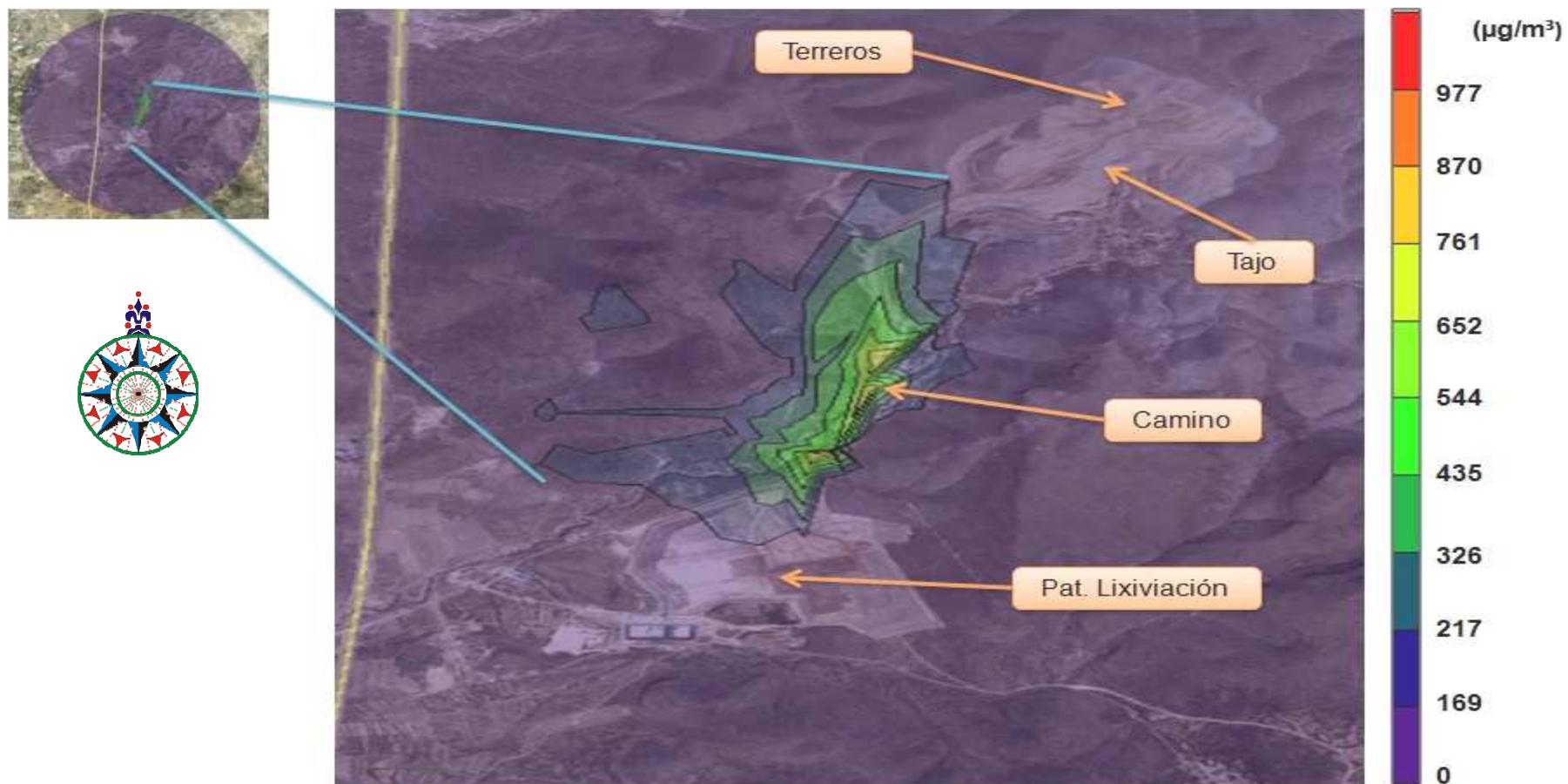


Figura IV.21. Modelado del transporte de PM10 en el patio de lixiviación-caminos para un periodo de un año (realizado en el AERMOD View 6.5.0).

IV.7 EVALUACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO AERMOD VIEW

Los promedios de las concentraciones de PM10 obtenidos mediante el modelo AERMOD View en las zonas del tajo-terreros y patio de lixiviación fueron evaluados y validados haciendo una serie de comparaciones estadísticas con las concentraciones obtenidas a través de las estaciones de monitoreo ubicadas en el municipio del Cerro de San Pedro y el poblado de la Zapatilla respectivamente.

Los métodos estadísticos utilizados para evaluar (cuadro III.2) los resultados obtenidos en el modelo fueron:

- 1) Desviación estándar con respecto a la media calculada para cada grupo de datos.
- 2) Coeficiente de correlación de Pearson e 3) Intervalo de confianza para los datos correspondientes a la estación de monitoreo de la Zapatilla (sección III.1.2.1).

IV.7.1 ZONA NORTE DE LA INDUSTRIA MINERA

En la tabla IV.4 se muestran las concentraciones promedio diarias de PM10 calculadas por el AERMOD View y las obtenidas a partir de las mediciones de la estación de monitoreo ubicada al norte de la mina.

A los datos mostrados en dicha tabla se les calculó su media y su desviación estandar, obteniéndose los resultados mostrados en la tabla IV.5.

Tabla IV.4. Concentraciones promedio diarias de PM10 calculadas en el modelo AERMOD View $C_{PM10 (Mod)}$ y calculadas a partir de las mediciones hechas en la estación de monitoreo $C_{PM10 (Med)}$, ubicada al norte de la industria minera.

Fecha de medición	$C_{PM10 (Mod)} (\mu g/m^3)$	$C_{PM10 (Med)} (\mu g/m^3)$
6/01/2011	15	74
18/01/2011	17	31
24/01/2011	24	97
17/02/2011	0.3	15
23/02/2011	9	32
19/03/2011	0.3	43
31/03/2011	38	76
6/04/2011	378	128
12/04/2011	11	79
18/04/2011	249	26
30/04/2009	55	4

La concentración media de PM10 calculada a partir de los resultados del modelo AERMOD View (tabla IV.5) sobreestima un 140% la concentración obtenida a partir de los datos de la estación de monitoreo.

Tabla IV.5.. Concentraciones medias de PM10 y desviación estandar de las concentraciones modeladas y medidas en la parte norte del sitio de estudio.

	$C_{PM10 (Mod)} (\mu g/m^3)$	$C_{PM10 (Med)} (\mu g/m^3)$
Media	72	51
Desviación estandar	123	39

Los valores obtenidos de la desviación estandar indican que las concentraciones promedio diarias de PM10 calculadas a partir del modelo AERMOD View se alejan más de su media que las concentraciones de PM10 calculadas a partir de las mediciones de la estación de monitoreo del poblado del municipio de Cerro de San Pedro.

Por otro lado, el análisis del coeficiente de correlación de Pearson tuvo un valor de $r = 0.4$, lo que indica que la correlación lineal entre los dos grupos de datos es débil.

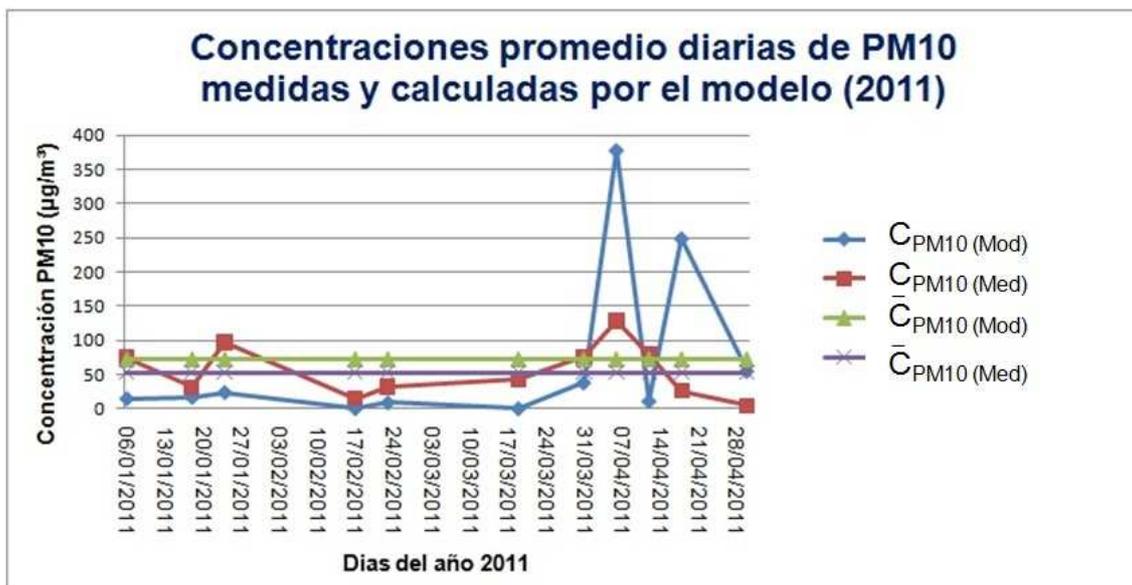


Figura IV.22. Comparación entre las concentraciones de PM10 medidas por la estación de monitoreo del poblado del municipio de Cerro de San Pedro y las concentraciones de PM10 calculadas por el modelo AERMOD View para el año 2011.

IV.7.2 ZONA SUR DE LA INDUSTRIA MINERA

En la tabla IV.6 se muestran las concentraciones promedio diarias de PM10 calculadas por el AERMOD View y las obtenidas a partir de las mediciones de la estación de monitoreo ubicada al sur de la mina.

Tabla IV.6.a. Concentraciones promedio diarias de PM10 calculadas en el modelo AERMOD View $C_{PM10 (Mod)}$ y calculadas a partir de las mediciones hechas en la estación de monitoreo $C_{PM10 (Med)}$, ubicada al sur de la industria minera.

Fecha de medición	$C_{PM10 (Mod)} (\mu\text{g}/\text{m}^3)$	$C_{PM10 (Med)} (\mu\text{g}/\text{m}^3)$
04/01/2009	53	25
10/01/2009	102	35
16/01/2009	0.2	15
22/01/2009	34	22
28/01/2009	141	18
03/02/2009	10	31
09/02/2009	31	33
15/02/2009	50	15
21/02/2009	2	17
27/02/2009	59	17
05/03/2009	38	21
11/03/2009	35	35
17/03/2009	1	16
23/03/2009	5	25
29/03/2009	82	35
04/04/2009	3	27
10/04/2009	14	25
16/04/2009	76	32
22/04/2009	56	26
28/04/2009	29	41
04/05/2009	2	14
10/05/2009	9	21
16/05/2009	19	26
22/05/2009	7	33
28/05/2009	32	26
03/06/2009	18	16
09/06/2009	39	22
15/06/2009	2	12
21/06/2009	14	0
27/06/2009	49	12
03/07/2009	7	10
09/07/2009	36	21

Tabla IV.6.b. Concentraciones promedio diarias de PM10 calculadas en el modelo AERMOD View $C_{PM10 (Mod)}$ y calculadas a partir de las mediciones hechas en la estación de monitoreo $C_{PM10 (Med)}$, ubicada al sur de la industria minera.

Fecha de medición	$C_{PM10 (Mod)} (\mu g/m^3)$	$C_{PM10 (Med)} (\mu g/m^3)$
15/07/2009	27	26
21/07/2009	43	13
27/07/2009	59	0
02/08/2009	12	17
08/08/2009	4	23
14/08/2009	65	16
20/08/2009	23	15
26/08/2009	29	9
01/09/2009	6	8
07/09/2009	31	15
13/09/2009	115	16
19/09/2009	7	6
25/09/2009	38	20
01/10/2009	38	21
07/10/2009	24	10
13/10/2009	0	18
19/10/2009	63	9
25/10/2009	35	12
31/10/2009	9	0
06/11/2009	57	12
12/11/2009	77	14
18/11/2009	25	23
24/11/2009	105	10
30/11/2009	36	15
06/12/2009	0	5
12/12/2009	0	18
18/12/2009	0	15
24/12/2009	0	14
30/12/2009	0	20

A los datos de la tabla IV.6 se les calculó su media y su desviación estándar, obteniéndose los resultados siguientes (Tabla IV.7).

La concentración media diaria de PM10 calculada a partir de los resultados del modelo AERMOD View es 80% más elevada que la concentración medida de la estación de monitoreo.

Tabla IV.7. Concentraciones medias de PM10 y desviación estandar de las concentraciones modeladas y medidas en la parte sur del sitio de estudio.

	$C_{PM10} (Mod) (\mu g/m^3)$	$C_{PM10} (Med) (\mu g/m^3)$
Media	33	18
Desviación estándar	31	8

Los valores obtenidos de la desviación estándar indican que las concentraciones promedio diarias de PM10 calculadas a partir de los resultados del modelo AERMOD View se alejan más de su media que las concentraciones de PM10 calculadas a partir de las mediciones de la estación de monitoreo de la Zapatilla.

Por otro lado, el análisis del coeficiente de correlación de Pearson tuvo un valor de $r = 0.085$, lo que indica que la correlación lineal entre los dos grupos de datos es muy débil.

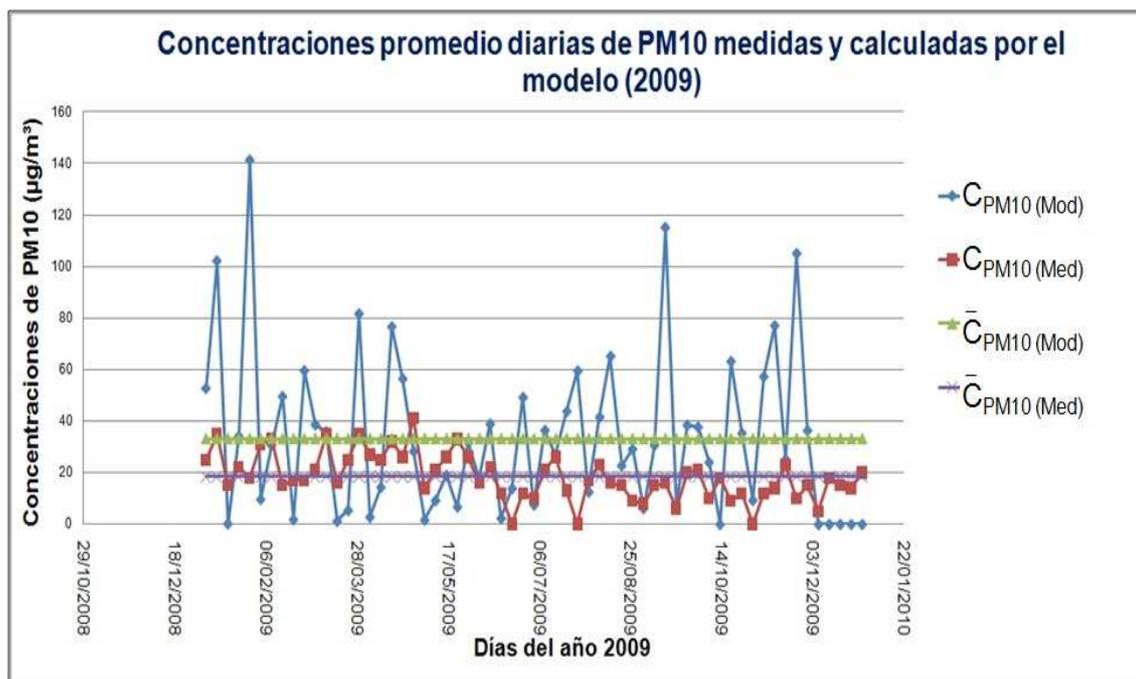


Figura IV.23. Comparación entre las concentraciones de PM10 medidas por la estación de monitoreo de la Zapatilla y las concentraciones de PM10 calculadas por el modelo AERMOD View para el año 2009.

IV.8 MODELADO DE LAS CONCENTRACIONES DE PM10 POR ESTACIÓN DEL AÑO

En las siguientes dos secciones se muestran los resultados de las curvas de isoconcentración modeladas en el AERMOD View para los periodos de primavera, verano, otoño e invierno.

En cada una de las figuras que corresponden a dichas simulaciones se resalta la información referente a las máximas concentraciones de PM10 que fueron obtenidas y cuyo rango de valores rebasó el límite anual permitido ($50\mu\text{g}/\text{m}^3$) por la norma mencionada previamente.

Así como se mencionó en el segundo y cuarto capítulo, es importante tomar en cuenta que el modelo con que se simuló el transporte y dispersión de las PM10 cuenta con varias limitantes, las cuáles no permiten obtener resultados 100% veraces del comportamiento del material particulado, sin embargo, a pesar de ello, el uso del modelo AERMOD View en este estudio proporcionó resultados que dieron una idea bastante amplia del comportamiento que tuvo el material particulado en los vientos que recorrieron la industria minera el año de 2009.

IV.8.1 MODELADO DEL TRANSPORTE DE PM10 EN LA ZONA NORTE Y CAMINOS DE LA MINA POR ESTACIÓN DEL AÑO

De acuerdo a los resultados obtenidos, en la figura IV.24.a se observa que la máxima concentración obtenida para el periodo de primavera sería de $141.4\mu\text{g}/\text{m}^3$. La curva de isoconcentración que está dentro del poblado del municipio de Cerro de San Pedro (puntos en color morado claro) es la de color azul, cuyo rango de valores iría de los $15.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ a los $31.5\mu\text{g}/\text{m}^3$, sin embargo a orillas del poblado, una de las curvas de isoconcentración en tonos verdes tendría un rango de valores que va de los 47.2 a los $63\mu\text{g}/\text{m}^3$.

En la estación de verano (figura IV.24.b), se observa que la máxima concentración de PM10 equibaldría a $138.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ y al igual que en primavera, una de las curvas de isoconcentración en tonos verdes pasaría a orillas del

municipio del Cerro de San Pedro y su rango de valores iría de los $46.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta $61.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En otoño (figura IV.25.a) la máxima concentración obtenida fue de $220.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que el rango de valores de la curva de isoconcentración en tonos verdes que pasaría en los límites del poblado de San Pedro iría de 49.2 a $73.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En la figura IV.25.b se observa que para la estación de invierno, la concentración máxima de PM10 equivaldría a $213.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que la curva de isoconcentración en tonos verdes que pasa a orillas del municipio del Cerro de San Pedro es aquella que tendría un rango de valores de los 47.6 a los $71.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Observe que en las cuatro estaciones del año, aquellas concentraciones de PM10 que rebasarían el promedio aritmético anual establecido por la Norma Oficial Mexicana ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$), serían aquellas con los tonos en verde.

En la figura IV.26 se puede apreciar la influencia de las trayectorias del viento determinadas por el modelo HYSPLIT en relación con el arrastre que tienen los vientos de las partículas de PM10. Se observó que las curvas de isoconcentración presentan sesgos hacia O, ONO, OSO, determinados por los vientos dominantes del E, ENE y ESE respectivamente.

IV.8.2 MODELADO DEL TRANSPORTE DE PM10 EN LA ZONA SUR Y CAMINOS DE LA MINA POR ESTACIÓN DEL AÑO

En las siguientes cuatro figuras se muestran los modelados del transporte de PM10 obtenidos en el patio de lixiviación y caminos de la industria minera, donde al igual que para la zona norte, se da especial énfasis a las zonas de máxima concentración y también a las curvas de isoconcentración que de acuerdo a las simulaciones realizadas, rebasarían el límite anual establecido por la Norma Oficial Mexicana (NOM-025-SSA1-1993^o) a orillas o dentro del poblado de la Zapatilla.

En el periodo de primavera (figura IV.27.a) se observa que la máxima concentración obtenida sería de $786 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que el rango de valores de la curvas de isoconcentración más cercana o dentro del poblado de la Zapatilla iría de 0 a $87 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y que corresponde a las de color morado.

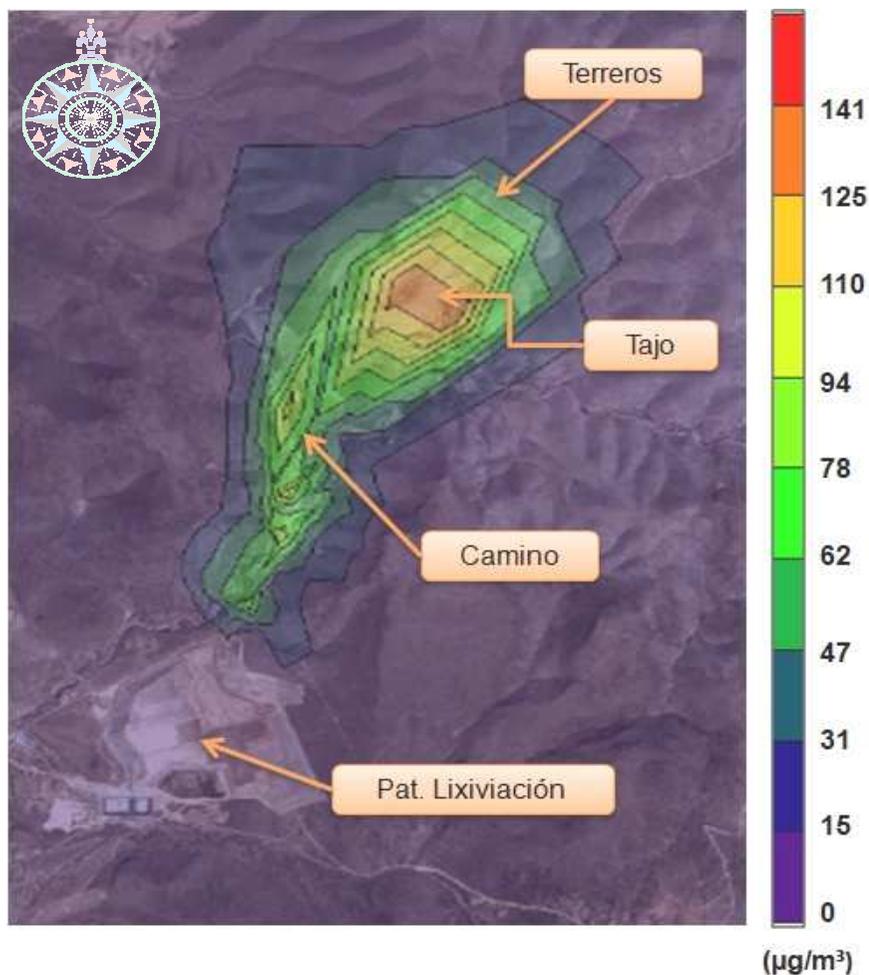
En el verano de 2009 (figura IV.27.b), la máxima concentración obtenida sería de $835 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que al igual que en primavera, la curva de isoconcentración que está dentro o en los alrededores del poblado de la Zapatilla es la de color morado, cuyo rango de valores iría de 0 a $93 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En la figura IV.28.a se observa que en la estación de otoño, la concentración máxima equibaldría a $1231 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que de acuerdo a los resultados obtenidos, la curva de isoconcentración en color morado tendría un rango que iría de 0 a $137 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

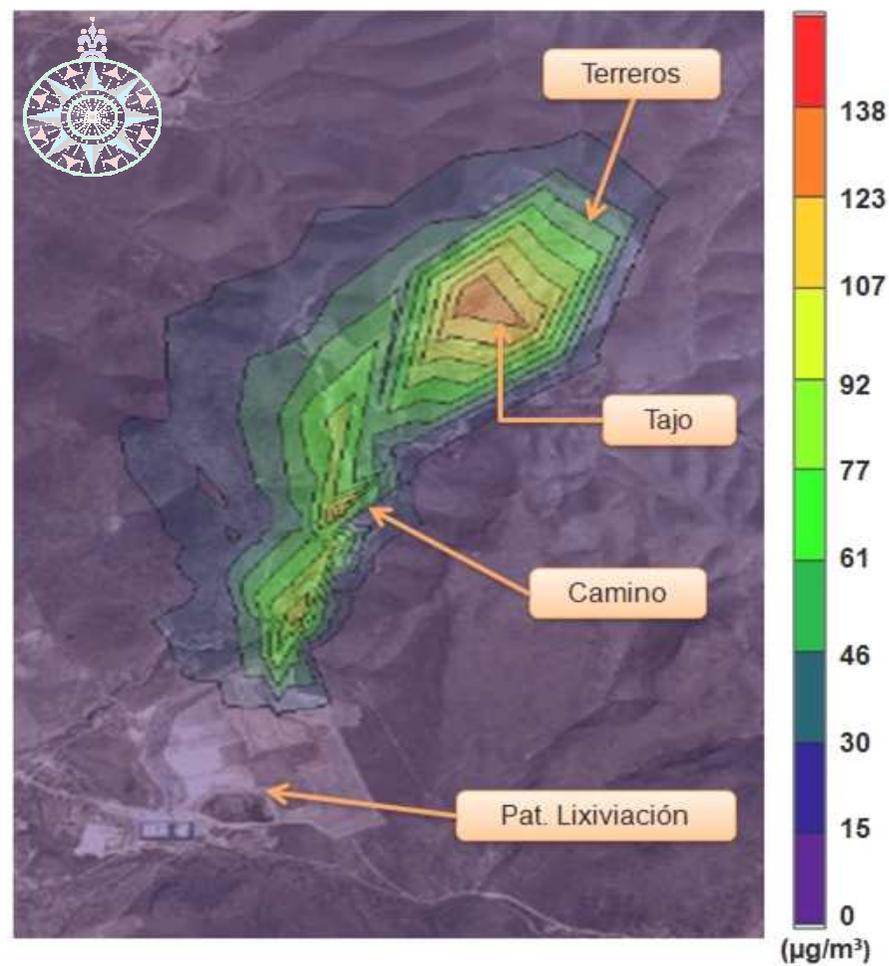
En invierno de 2009 (figura IV.28.b), la máxima concentración obtenida sería de $1160 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que la curvas de isoconcentración morada tendría un rango de valores de 0 a $129 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En los modelados correspondientes a la zona sur y caminos de la mina llevados a cabo en el AERMOD View (figuras VI.5 a VI.8) las máximas concentraciones se localizarían en el camino principal debido a que al encontrarse éste rodeado por accidentes topográficos de mayor altitud se limita la dispersión de las partículas hacia superficies vecinas favoreciendo su acumulación próxima al sitio de emisión.

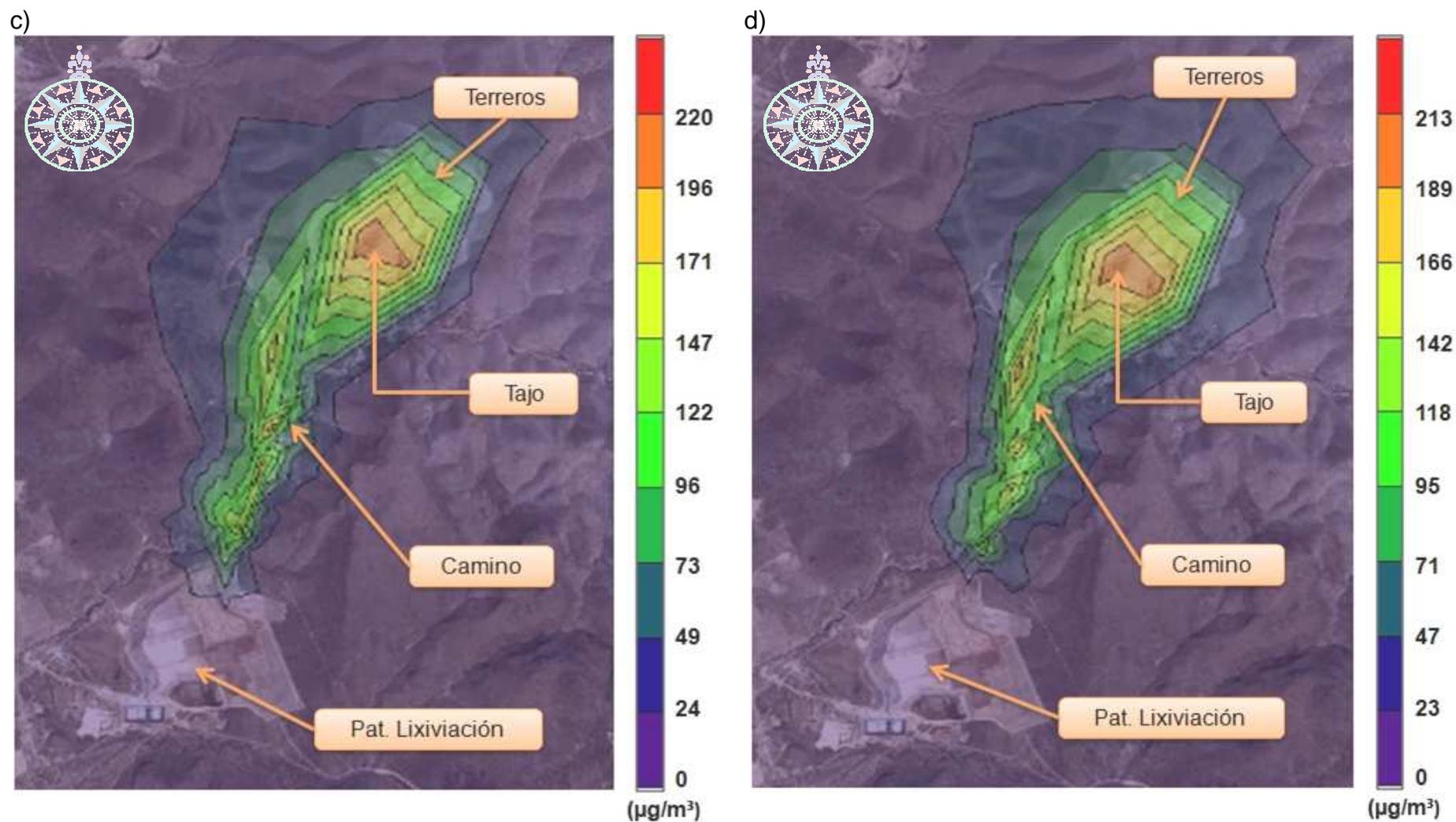
a)



b)



Figuras IV.24.a y IV.24.b. Curvas de isoconcentración en la zona norte del sitio de estudio y caminos de la industria minera, para los estaciones de a) primavera (izquierda) y b) verano (derecha), respectivamente (Modelo AERMOD View 6.5.0).



Figuras IV.25.a y IV.25.b. Curvas de isoconcentración en la zona norte del sitio de estudio y caminos de la industria minera, para los estaciones de c) otoño (izquierda) e d) invierno (derecha), respectivamente (Modelo AERMOD View 6.5.0).

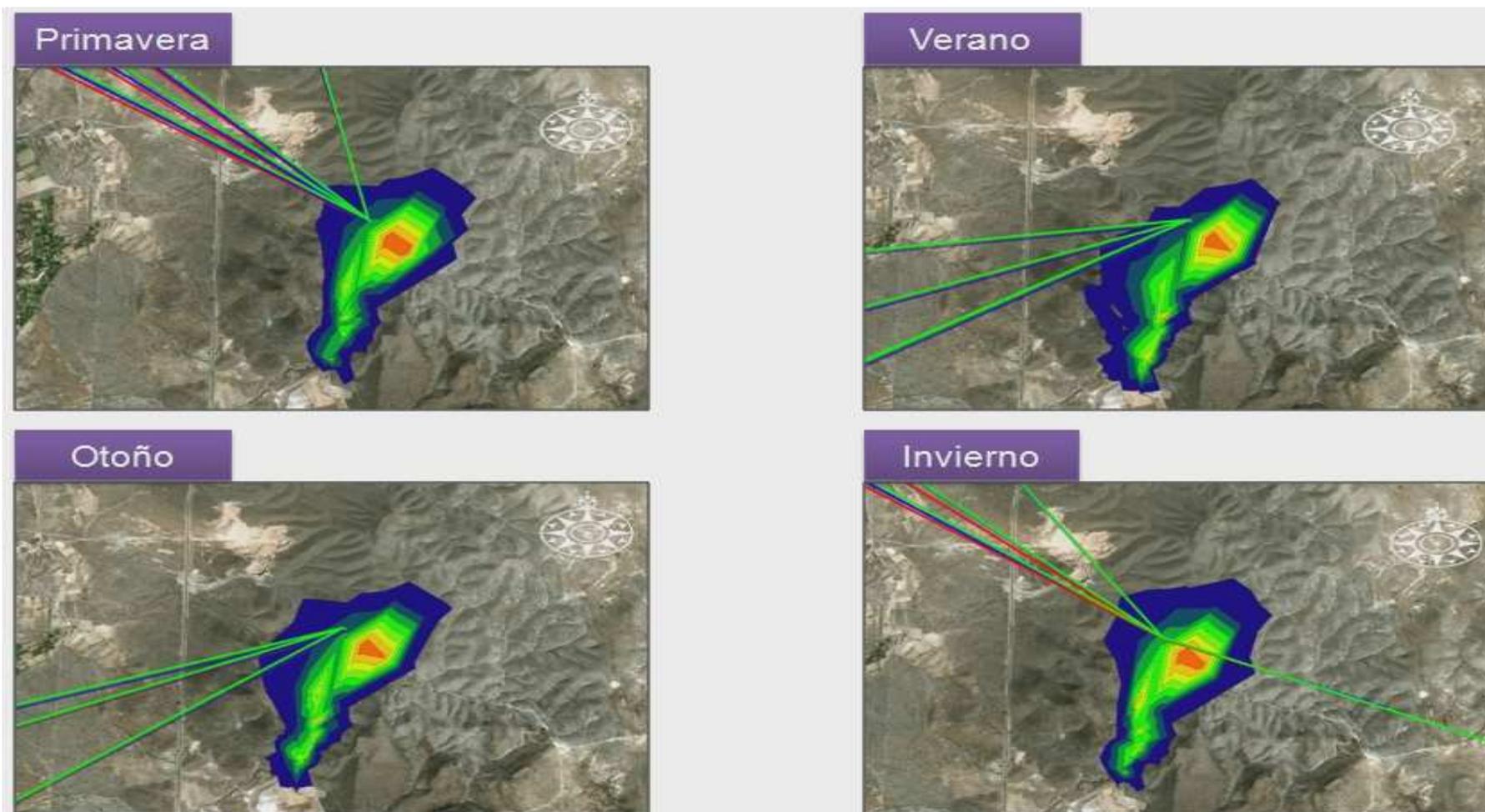


Figura IV.26 Ejemplos de cómo influyen las trayectorias de vientos modeladas en el HYSPLIT sobre el transporte de las PM10 modelado en el AERMOD View para cada una de las estaciones del año al norte y caminos de la industria minera.

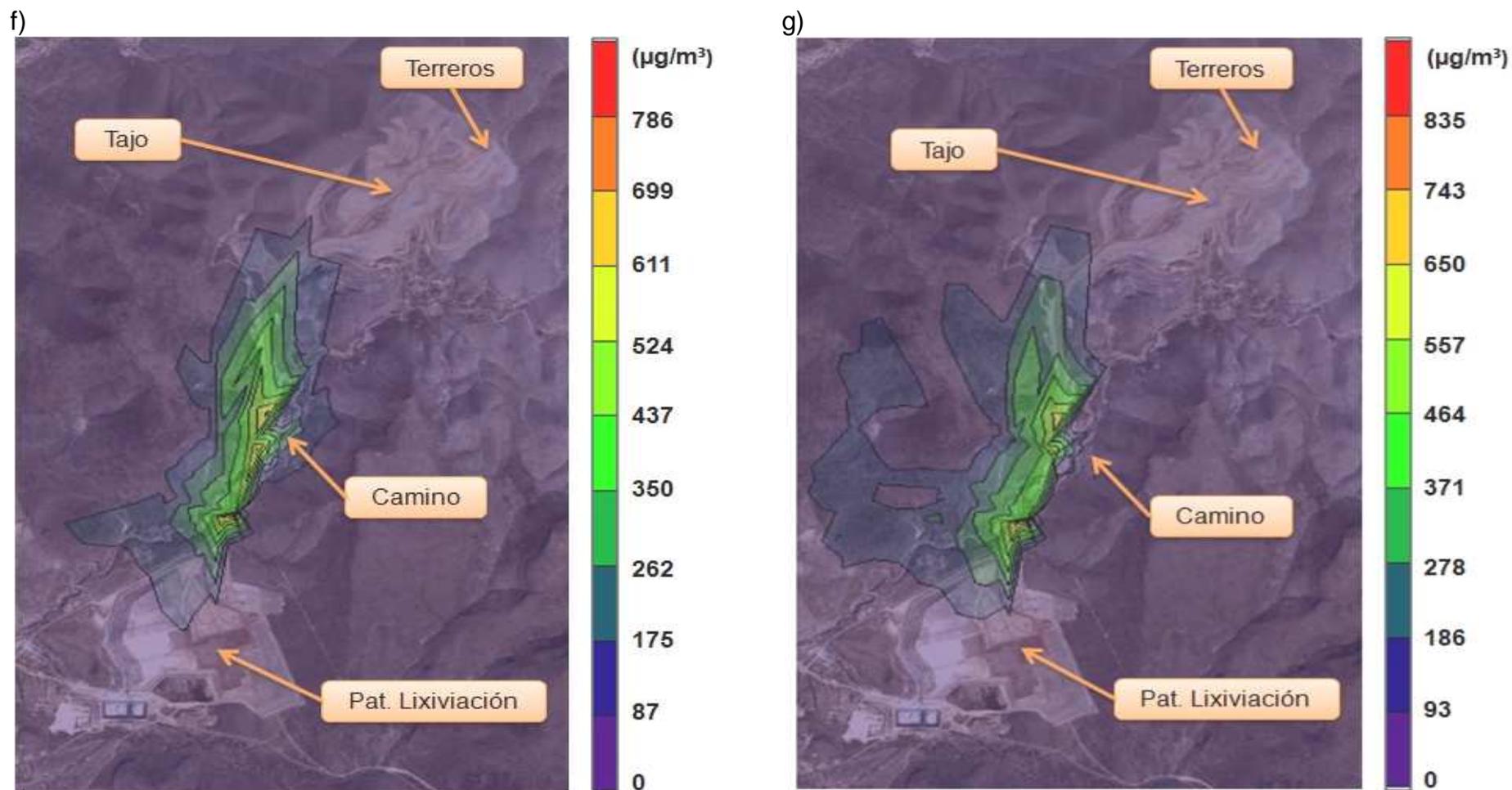


Figura IV.27.a y IV.27.b

Curvas de isoconcentración en la zona sur del sitio de estudio y caminos de la industria minera, para los estaciones de primavera (izquierda) y verano (derecha), respectivamente (Modelo AERMOD View 6.5.0)

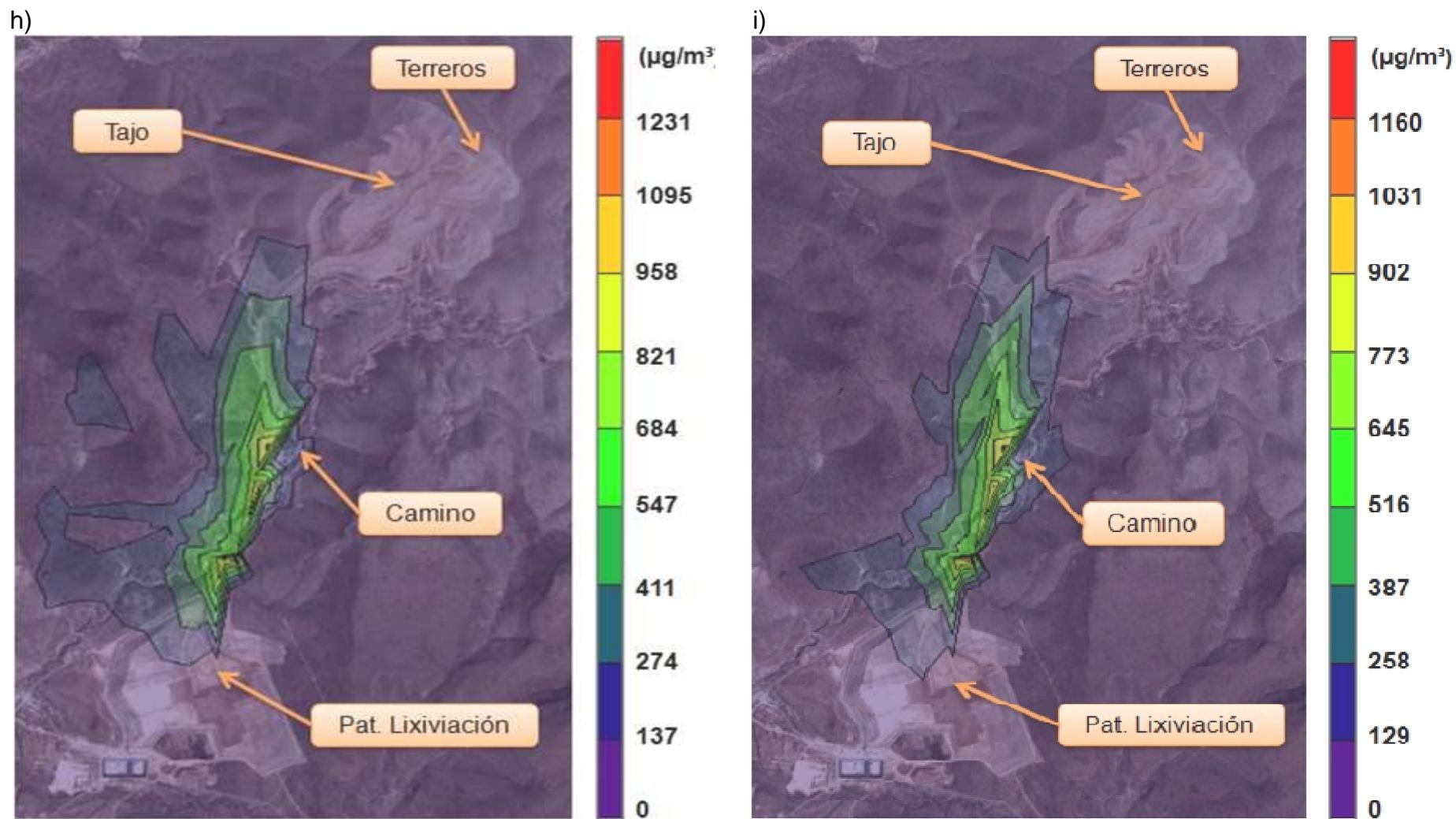


Figura VI.28.a y 4.28.b Curvas de isoconcentración en la zona sur del sitio de estudio y caminos de la industria minera, para los estaciones de otoño (izquierda) e invierno (derecha), respectivamente (Modelo AERMOD View 6.5.0)

IV.9 EVALUACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO AERMOD VIEW PARA LAS CUATRO ESTACIONES DEL AÑO 2009

En la metodología correspondiente al modelado del transporte de PM10 (sección III.1.2) se indicó que las concentraciones de dicho material particulado serían analizadas para los periodos de tiempo en que fueron estudiados los patrones de vientos, es por ello que también se aplicaron los métodos estadísticos propuestos para evaluar el modelo con respecto a cada estación del año (sección III.1.2.1).

En esta sección se comparan las concentraciones diarias medidas por la estación de PM10 de la Zapatilla con las concentraciones promedio diarias calculadas a partir del modelo AERMOD View en ese mismo punto: los parámetros estadísticos se aplican para cada una de las estaciones del año (primavera, verano, otoño e invierno)

En la tabla IV.8 se muestran las medias y desviaciones estándar de las concentraciones medidas (estación de monitoreo) y calculadas (AERMOD View) al sur de la industria minera, para cada una de las estaciones del año.

Tabla IV.8. Medias y desviaciones estándar para cada estación del año de la estación de monitoreo y el modelo AERMOD View respectivamente.

	Primavera		Verano		Otoño		Invierno	
	C _{PM10} (Med)	C _{PM10} (Mod)						
Media	27	27	14	31	13	42	20	47
Desv. Estandar	7	26	7	19	6	34	8	70

Los resultados presentados en la tabla IV.8 indican que de manera general, las concentraciones medias diarias modeladas para los periodos de primavera, verano, otoño e invierno son más grandes que las concentraciones obtenidas a partir de las mediciones de la estación de monitoreo ubicada en el poblado de la Zapatilla, hasta por un factor de 3.2.

Por otra parte, se observa que las desviaciones estándar obtenidas a partir de los datos del modelo para cada estación del año tuvieron valores más altos en

comparación con las calculadas a partir de los datos de la estación de monitoreo. Esto se debe en gran medida a que las concentraciones modeladas máximas y mínimas fueron de mayor o menor magnitud que las medidas por la estación de monitoreo del poblado de la Zapatilla tal y como se muestra en las figuras IV.29, IV.30, IV.31, IV.32.

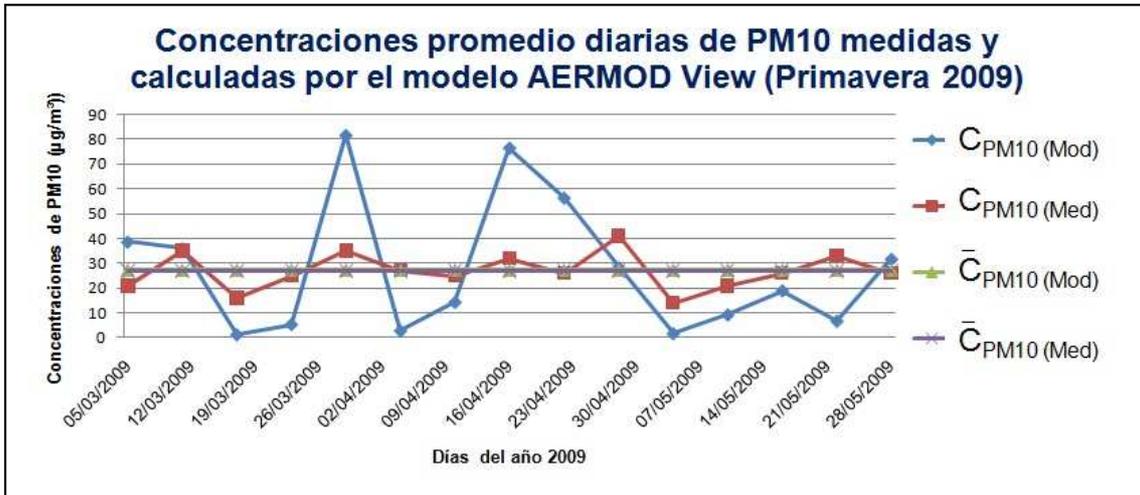


Figura IV.29. Comparación entre las concentraciones de PM10 medidas por la estación de monitoreo de la Zapatilla y las calculadas por el modelo AERMOD View para la primavera de 2009.

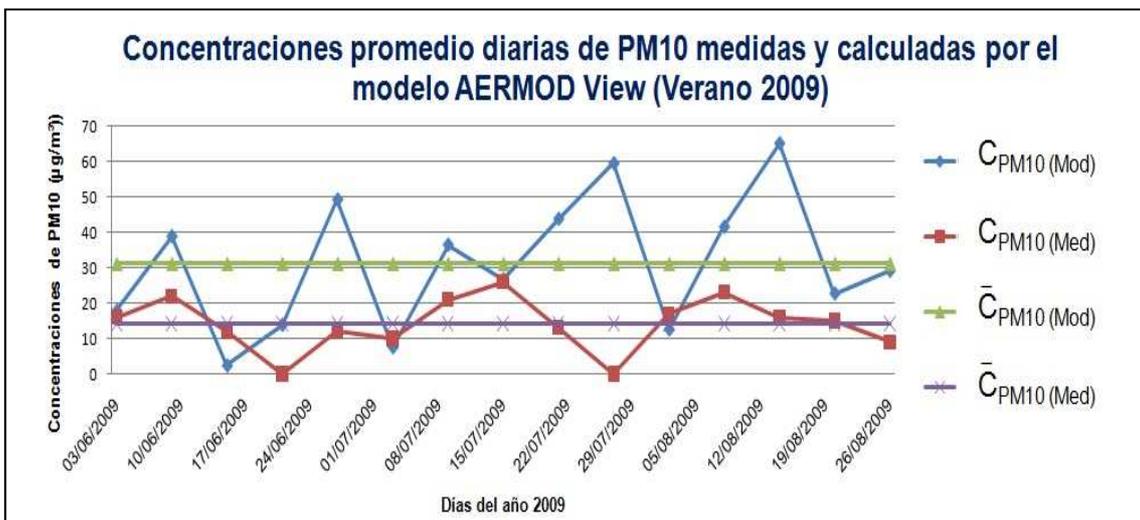


Figura IV.30. Comparación entre las concentraciones de PM10 medidas por la estación de monitoreo de la Zapatilla y las calculadas por el modelo AERMOD View para el verano de 2009.

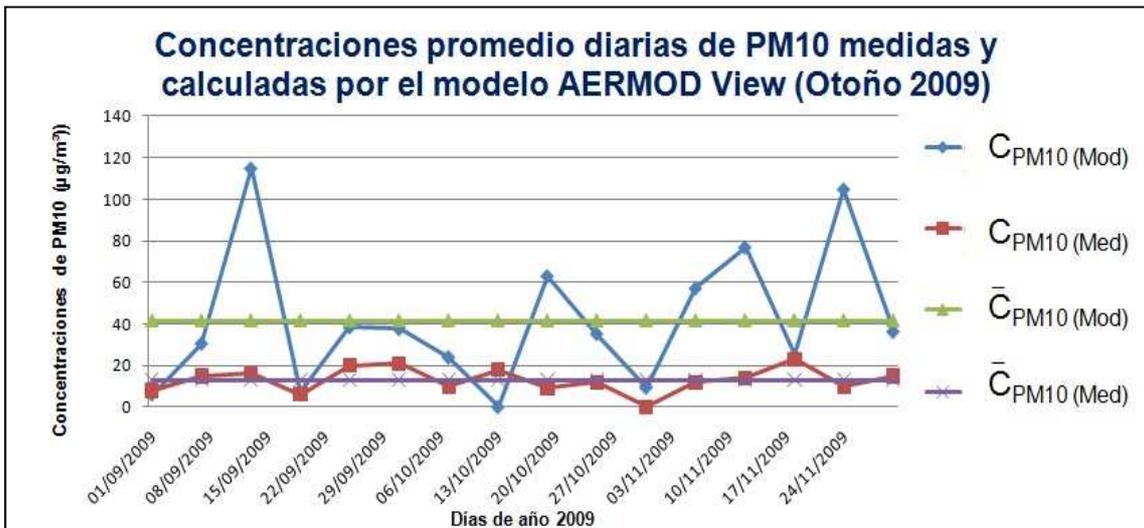


Figura IV.31. Comparación entre las concentraciones de PM10 medidas por la estación de monitoreo de la Zapatilla y las calculadas por el modelo AERMOD View para el otoño de 2009.

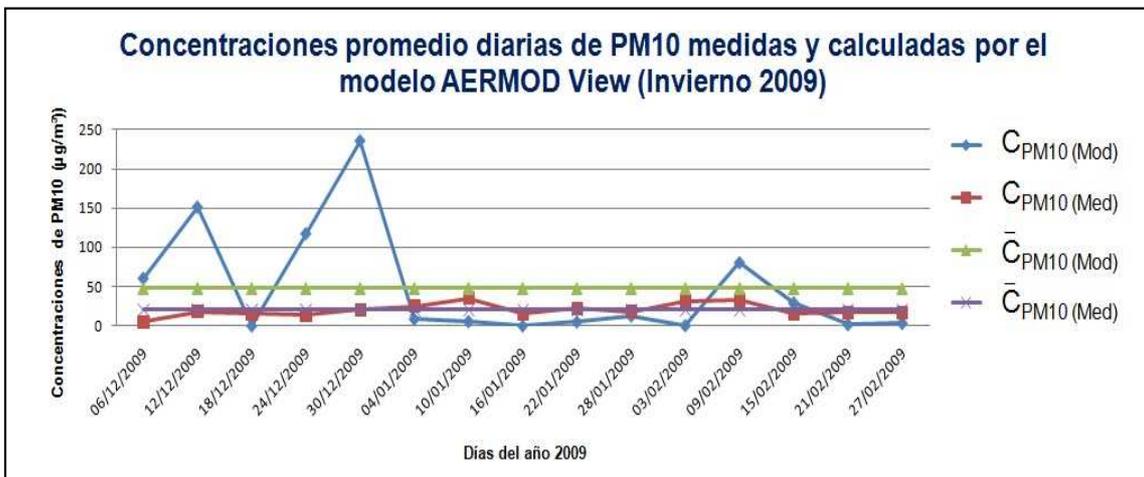


Figura IV.32. Comparación entre las concentraciones de PM10 medidas por la estación de monitoreo de la Zapatilla y las calculadas en el modelo AERMOD View para el invierno de 2009.

Por otro lado, al calcular el coeficiente de correlación de Pearson para cada una de las estaciones del año, se observó que la relación lineal entre las concentraciones medidas y calculadas es débil (tabla VI.2).

Tabla IV.9. Coeficientes de correlación de Pearson por estación del año – zona sur.

Correlación de Pearson	0.364	-0.100	-0.219	0.318
-------------------------------	-------	--------	--------	-------

Capítulo V. Ubicación de estaciones de monitoreo de PM10 en una mina a cielo abierto

El análisis del transporte de material particulado se llevó a cabo de manera independiente tanto en la zona Norte como en la Sur de la industria minera, debido a que las diferencias de altitudes y de formas topográficas producen un comportamiento distinto de los vientos tanto al Norte como al Sur del sitio de estudio, según se comprobó en el capítulo IV de ésta tesis.

La dispersión de las partículas de PM10 en la zona de estudio se vio influenciada por la topografía, por lo que el modelado de las concentraciones de PM10 se realizó en la zona norte utilizando los datos de la estación meteorológica norte (MSX-CSP-01), mientras que la simulación en la parte sur se realizó utilizando los datos de la estación meteorológica ubicada al Sur (MSX-CSP-02) (Capítulo IV).

Para identificar aquellas concentraciones que tuvieron niveles por encima del valor límite diario y anual que establece la NOM-025-SSA1-1993 (tabla I.4), se reconocieron en los modelados (Cap. IV), las que sobrepasaban o se encontraban cerca de dichas cantidades con el objeto de delimitar las zonas de estudio de la calidad del aire en esos periodos de tiempo.

En la delimitación de los sitios de estudio, tanto al norte como al sur de la mina, se tomaron en cuenta los resultados de las concentraciones de PM10 obtenidas para el camino principal debido a que es donde hubo más emisiones de dicho material particulado (apéndice C).

La delimitación de la zona en donde se podría ubicar una estación de monitoreo atmosférico de PM10 fue definida como aquella en la que, según los

resultados del modelo, se podrían observar concentraciones de PM10 superiores a las indicadas en la NOM-025-SSA1-1993, tanto para promedios diarios (en 24 h) como en promedios anuales.

V.1 ÁREA PROPUESTA PARA LA UBICACIÓN DE UNA ESTACIÓN DE MONITOREO DE PM10 EN LA ZONA NORTE

A partir del modelado realizado en el párrafo IV.4.1 (figura IV.13) y con la ayuda de un SIG se seleccionaron las curvas de isoconcentración dentro de las cuales las concentraciones de PM10 podrían rebasar los $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ indicados en la NOM-025-SSA1-1993 para un periodo de 24 horas.

Dentro de estas superficies se encontrarían las áreas en donde se ubican las fuentes de terreros, tajo y caminos, así como, así como las áreas vecinas de éstas, en las que se ubica el poblado de Cerro de San Pedro (figura V.1).



Figura V.1. Área en la que, de acuerdo con los resultados del modelo, la concentración calculada de PM10 para un periodo de 24 h podría rebasar la NOM-025-SSA1-1993 al norte, sur y caminos de la industria minera.

De acuerdo con el modelado efectuado en el párrafo IV.4.2 (figura IV.14) y con la ayuda de un SIG, se seleccionó la curva de isoconcentración dentro de la cual las concentraciones de PM10 podrían rebasar los 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ señalados en la NOM-025-SSA1-1993, para un periodo de un año.

La superficie delimitada comprendería las fuentes de terreros, tajo y camino principal, así como las áreas vecinas de éstas, en la que se ubica el poblado del Cerro de San Pedro (Figura V.2).



Figura V.2. Área en la que, de acuerdo con los resultados del modelo, la concentración calculada de PM10 para el periodo de un año, podría rebasar la NOM-025-SSA1-1993 al norte y caminos de la industria minera.

V.2 ÁREA PROPUESTA PARA LA UBICACIÓN DE UNA ESTACIÓN DE MONITOREO DE PM10 EN LA ZONA SUR

De manera similar en el caso de la Zona Sur, se seleccionaron las curvas de isoconcentración de PM10 modeladas, dentro de las cuales las concentraciones de PM10 podrían rebasar los 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ marcados en la NOM-025-SSA1-1993 para un periodo de 24 horas. Dentro de esta superficie se encontrarían las áreas en donde se ubican las fuentes de caminos y del patio de lixiviación, así como las áreas vecinas de éstas, en la que se encuentra el poblado de la Zapatilla (Figura V.3).

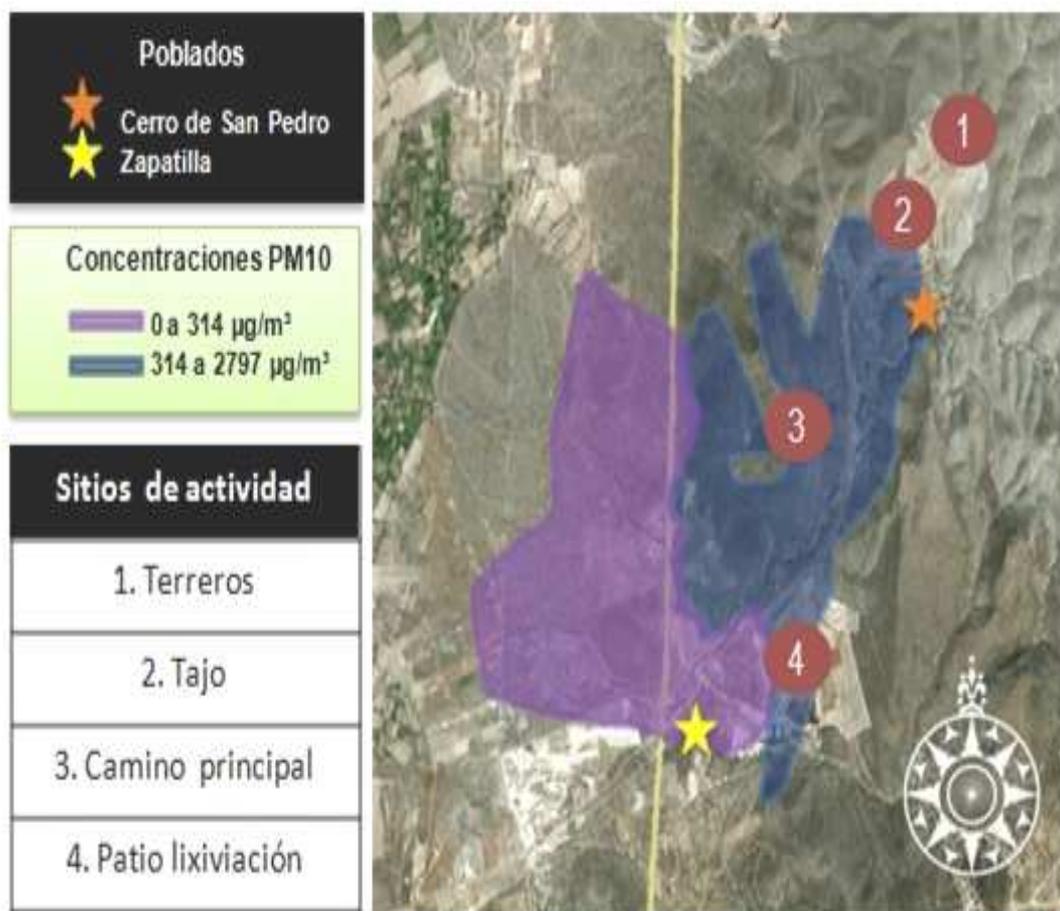


Figura V.3. Área en la que, de acuerdo con los resultados del modelo, la concentración calculada de PM10 para un periodo de 24 h podría rebasar la NOM-025-SSA1-1993 al sur y caminos de la industria minera.



Figura V.4. Área en la que, de acuerdo con los resultados del modelo, la concentración calculada de PM10 para el periodo de un año, podría rebasar la NOM-025-SSA1-1993 al sur y caminos de la industria minera.

De acuerdo con el modelado efectuado en el párrafo IV.6.2 (figura IV.21) y con la ayuda de un SIG, se seleccionó la curva de isoconcentración dentro de la cual las concentraciones de PM10 podrían rebasar los $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ señalados en la NOM-025-SSA1-1993, para un periodo de un año.

La superficie delimitada comprendería las fuentes de camino principal y patio de lixiviación así como las áreas vecinas de éstas, en la que se ubica el poblado de la Zapatilla (Figura V.4).

La meta que se buscó alcanzar en este capítulo fue proponer la ubicación de estaciones de monitoreo de PM10 en sitios en donde, de acuerdo con los resultados del modelo, se rebasarían los límites de las concentraciones establecidas en la NOM-025-SSA1-1993^c (tabla I.IV) y que estuviesen cerca o dentro de poblados aledaños a la industria minera estudiada.

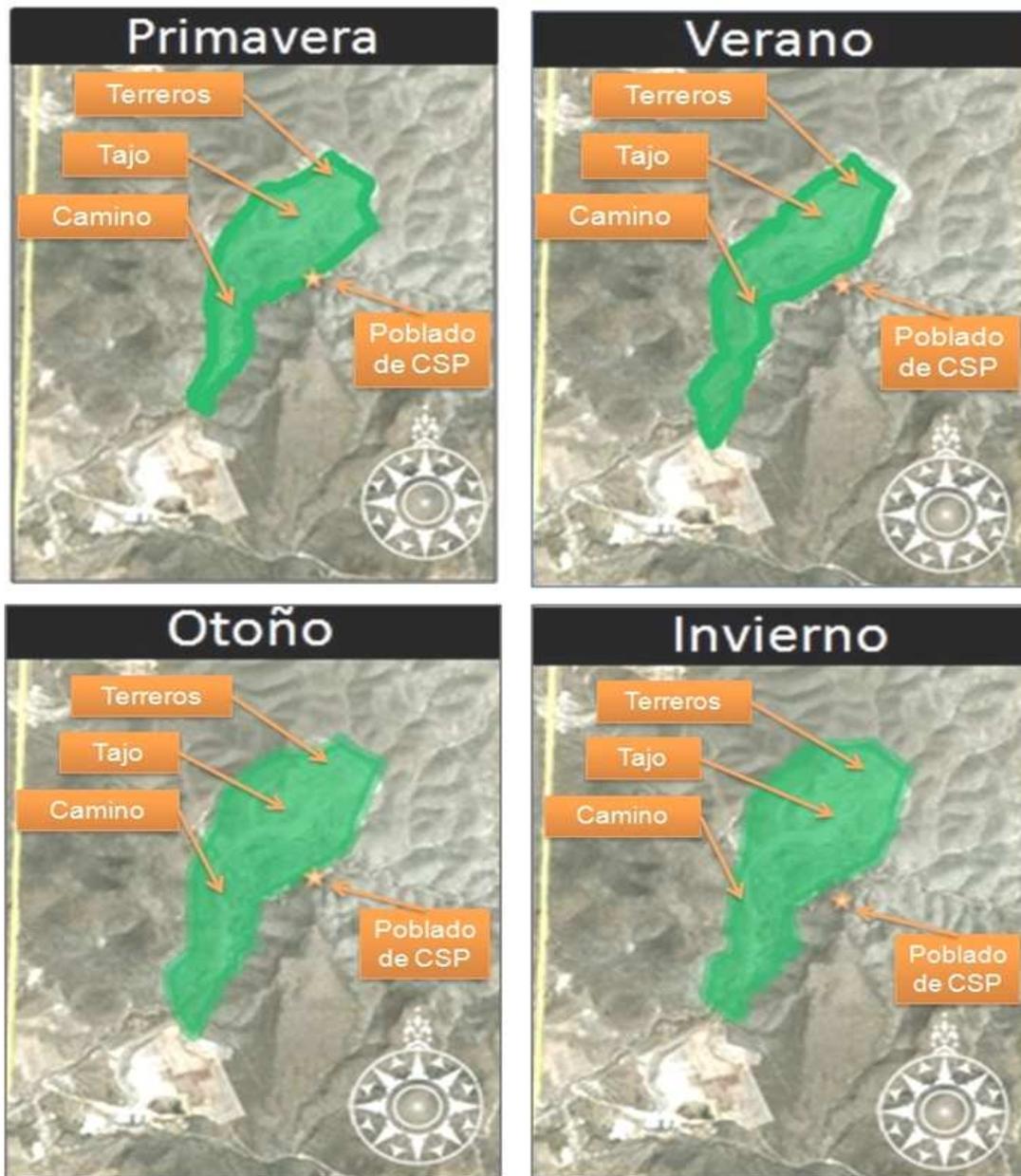
Es importante señalar que en la LGEEPA no existe regulación de las concentraciones de PM10 para cada estación del año, por lo que a manera de

ejemplo se ha decidido utilizar el nivel permitido para el periodo de un año establecido en la Norma Oficial Mexicana (NOM-025-SSA1-1993).

V.3 ZONAS DE ESTUDIO DE LA CALIDAD DEL AIRE POR ESTACIÓN DEL AÑO

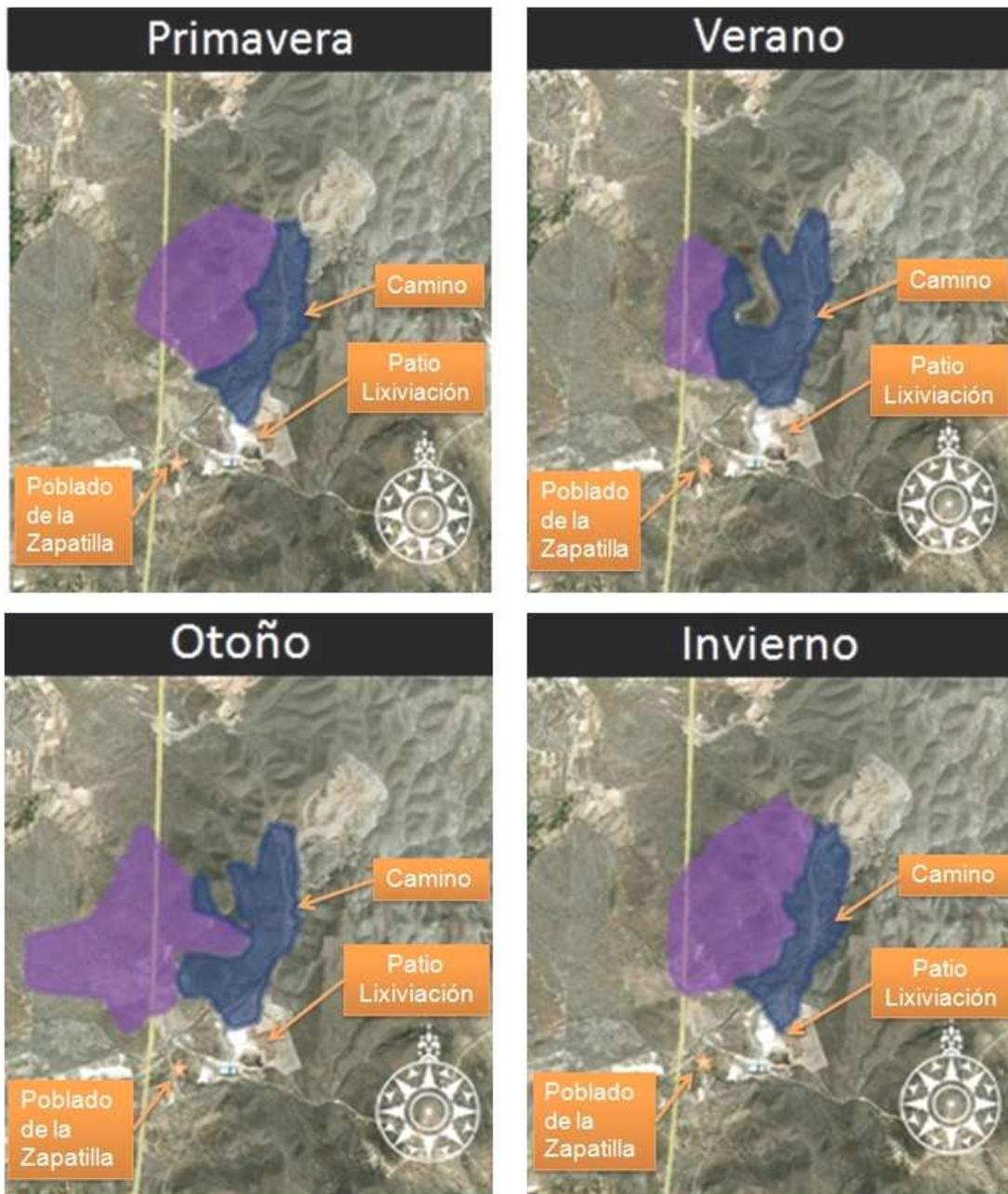
Según el modelado realizado en el capítulo IV (figuras IV.24.a, IV.24.b, IV.24.c, y IV.24.d) con la ayuda de un SIG se seleccionó la curva de isoconcentración dentro de la cual las concentraciones de PM10 podrían rebasar los 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ indicados en la NOM-025-SSA1-1993 (para un periodo de un año). De acuerdo con éstas figuras, dentro de estas cuatro superficies se encontrarían las áreas donde se ubican las fuentes de tajo, terreros y caminos, así como las áreas vecinas de éstas, en la que se ubica el poblado del Cerro de San Pedro (Figura V.5).

De igual manera, a partir de los resultados del modelado efectuado en el párrafo IV.5.2 (figuras IV.24.f, IV.24.g, IV.24.h, y IV.24.i) con la ayuda de un SIG, se seleccionaron aquellas concentraciones de PM10 que podrían rebasar los 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La superficie delimitada comprendería las fuentes del camino principal y el patio de lixiviación, así como las superficies vecinas a éstas. En el poblado de la Zapatilla los niveles de PM10 estarían dentro de la norma (Figura V.6).



Estaciones del año	Rango de valores ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Primavera	47 a 141
Verano	46 a 138
Otoño	49 a 220
Invierno	47 a 236

Figura V.5. Áreas de influencia en donde se rebasaría el límite de las concentraciones de PM10 para las cuatro estaciones del año 2009 al norte y caminos de la industria minera.



Estaciones del año	Rango de valores ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Primavera	49 a 786
Verano	51 a 835
Otoño	50 a 1231
Invierno	49 a 1160

Figura V.6 Áreas de influencia en donde se rebasaría el límite de las concentraciones de PM10 para las cuatro estaciones del año 2009 al sur y caminos de la industria minera.

V.4 PUNTOS DE UBICACIÓN – ESTACIONES DE MONITOREO DE PM10

En base a los resultados obtenidos por el modelo AERMOD View para la zona norte del sitio de estudio y caminos de la industria minera (véase sección II.4), las áreas en las que se observarían concentraciones de PM10 que estarían por encima del límite diario de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (NOM-025-SSA1-1993^c), se concentrarían en las proximidades de las fuentes de Terrero, Tajo y Caminos, así como en la parte oeste próxima al poblado de Cerro de San Pedro.

Por lo que se refiere a las áreas en las que se observarían concentraciones de PM10 que estarían por encima del límite anual de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ indicado en la misma NOM, tanto para el periodo de un año como en alguna estación de primavera, verano, otoño o invierno se encuentran también en las proximidades de las fuentes del Terreros, Tajo y Caminos. De acuerdo con los resultados del modelo, en ninguno de los poblados de Cerro de San Pedro o la Zapatilla se rebasaría la norma para periodos estacionales o de un año.

El análisis de estos resultados sugiere que se proponga colocar dos estaciones de monitoreo de PM10: 1) una en la parte norte del sitio de estudio y al oeste del poblado de Cerro de San Pedro y otra 2) en un punto intermedio entre el poblado de C. de San Pedro y el camino principal de la mina, de esta manera se mantendrían vigiladas las concentraciones de PM10 generadas por las emisiones de las fuentes de Terrero y Tajo (en la primera estación) y de la fuente de caminos (en la segunda estación).

De acuerdo con los resultados del modelado, la estación de monitoreo de PM10 del poblado de la Zapatilla está bien ubicado ya que registraría las posibles concentraciones de PM10 elevadas que pudieran presentarse en el periodo de un día.



Figura V.7. Propuesta de ubicación de estaciones de monitoreo de PM10 en la zona norte del sitio de estudio de la industria minera a cielo abierto. La estación EM_ZAP_01 ubicada en el poblado de la Zapatilla continuará operando en el sitio que está instalada.

En las siguientes tablas se presentan los promedios de las concentraciones de PM10 que fueron calculadas en el modelo AERMOD View justo en los puntos donde se están proponiendo las ubicaciones de las estaciones de monitoreo tanto al norte como al sur de la industria minera.

Tabla V.1. Promedios de las concentraciones de PM10 en los puntos donde se está proponiendo la ubicación de estaciones de monitoreo al norte y sur de la industria minera.

Periodo de tiempo	C _{PM10} en EM_CSP_01 (µg/m ³)	C _{PM10} en EM_CSP_02 (µg/m ³)	C _{PM10} en EM_CSP_03 (µg/m ³)
24 horas	440	203	136
1 año	45	11	31
Primavera	37	12	19
Verano	24	4	29
Otoño	42	10	48
Invierno	60	18	33

Los valores de las concentraciones que se encuentran en color rojo son aquellos que estarían por encima de lo que establece la NOM-025-SSA1-1993 para los periodos de 24 horas y un año respectivamente, sin olvidar que para las estaciones del año se está tomando como referencia el segundo valor límite.

Capítulo VI. Conclusiones y recomendaciones

En este proyecto de investigación se realizó un estudio para modelar la contaminación atmosférica generada por las emisiones de PM10 al aire, debido a las actividades de una industria minera a cielo abierto, y en base a los resultados obtenidos se generó una propuesta de ubicación de estaciones de monitoreo para dicho material particulado.

La metodología consistió en los elementos siguientes:

1. El modelado de los patrones de vientos (trayectorias) y del transporte de PM10, mediante los programas HYSPLIT y AERMOD View, respectivamente. A través del modelo Rammet View se analizaron los datos de vientos y se elaboraron las rosas de vientos.
2. La delimitación de la zona (o zonas) de estudio de la calidad del aire, en base a las concentraciones de PM10 obtenidas con el modelo AERMOD View. Las concentraciones modeladas se compararon con los valores límite establecidos por la NOM-025-SSA1-1993.
3. La ubicación de estaciones de monitoreo de PM10 en una mina a cielo abierto en base a la identificación de las fuentes de mayor emisión de PM10, su cercanía con asentamientos humanos y las curvas de isoconcentración con valores superiores a lo establecido por la NOM-025-SSA1-1993.

La diferencia de alturas que hay entre el área de tajo-terreros (ubicado al norte de la mina) y el patio de lixiviación (localizado al sur de ésta), es de aproximadamente 300 m. Dicha situación, aunada a la presencia de accidentes en el relieve de la mina (colinas, valles, etc.), sugirió la división del sitio de estudio en dos áreas (la norte y la sur) a fin de estudiar el comportamiento de los patrones de vientos y el transporte y dispersión de las PM10.

Los análisis de los datos de las estaciones meteorológicas ubicadas al norte y al sur del sitio de estudio indicaron lo siguiente:

1. En la zona norte, en primavera e invierno, los vientos soplaron principalmente del SE y ESE; mientras que en verano y otoño, lo hicieron del NE y ENE. En la zona sur, los vientos dominantes vinieron principalmente del E, y en menor medida del ENE y ESE.
2. Los vientos del norte que se presentaron con mayor frecuencia tuvieron velocidades promedio horarias de entre 5.7 y 8.8 m/s; mientras que los de la zona sur, de entre 0.5 y 2.1 m/s.

La estabilidad atmosférica predominante tanto al norte como al sur de la mina fue neutra; sin embargo, en la zona sur también se presentaron de manera importante situaciones atmosféricas estables.

Los parámetros de entrada en el AERMOD View fueron los siguientes:

1. Las curvas de nivel del sitio de estudio (para modelar la topografía de la zona minera)
2. Los parámetros meteorológicos característicos obtenidos a partir de las dos estaciones localizadas al norte y sur de la mina.
3. Las emisiones de PM10 generadas por las fuentes de emisión de la mina.
4. La división del estudio en una malla receptora polar con un radio de 4.8 km (el modelo calculó las concentraciones de PM10 en cada nodo).
5. Datos de las fuentes de emisión para recrear las superficies generadoras de material particulado.

El modelado de las curvas de isoconcentración de PM10 para el sitio de estudio se llevó en periodos de tiempo de 24 horas, un año y primavera, verano, otoño e invierno.

De acuerdo con los resultados del modelo AERMOD View, las superficies que presentan concentraciones de PM10 más elevadas coinciden con las zonas de mayor turbulencia del aire en el sitio de estudio.

- a) En la zona del tajo-terreros-caminos, las concentraciones modeladas máximas de PM10 se obtuvieron en las superficies de mayor actividad (tajo

y camino principal) alcanzando los $998 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $198 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los periodos de 24 horas y un año, respectivamente.

- b) Las concentraciones máximas obtenidas en la zona sur (patio de lixiviación-caminos) en periodos de 24 horas y 1 año, fueron de $2,797 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y de $977 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y se ubicarían en el área del camino principal.

En la evaluación del modelo que se llevó a cabo al norte y sur de la mina utilizando grupos de muestras estadísticamente pequeñas (<30 al norte) y estadísticamente grandes (>30 al sur) respectivamente, se obtuvieron los siguientes resultados:

- a) Al norte de la mina se encontró que la concentración media de PM10 calculada a partir de los resultados del modelo AERMOD View sobreestima un 140% la concentración obtenida a partir de los datos de la estación de monitoreo.
- b) La evaluación del modelo AERMOD View para el periodo de un año, únicamente se llevó a cabo al sur de la mina, en donde se calcularon las medias anuales con cada grupo de datos (del modelo y de la estación). Se observó que la concentración promedio de PM10 calculada a partir del modelo era 1.8 veces mayor que la medida por la estación de monitoreo.
- c) La evaluación del modelo por estación del año también se llevó a cabo solamente al sur de la industria minera. En cada periodo estacional se encontró que las concentraciones medias calculadas de PM10 por el modelo AERMOD View sobreestimaron en un 300% las concentraciones medidas por la estación de monitoreo en verano, otoño e invierno; Para el periodo de primavera, la concentración promedio de PM10 calculada por el modelo es representativa de la medida por el muestreador ($27 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

De acuerdo con los resultados del modelo, las concentraciones de PM10 en el Municipio del Cerro de San Pedro, podrían rebasar los $231 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el periodo de 24 horas y los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para un año; mientras que en el poblado de la Zapatilla se podrían alcanzar concentraciones de PM10 de $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el periodo de 24 horas y de $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el periodo de un año.

La propuesta de ubicación de estaciones de monitoreo de PM10, se realizó a partir de la identificación de las áreas del sitio de estudio que, de acuerdo con el modelo, podrían rebasar las concentraciones de PM10 indicadas en la NOM-025-SSA1-1993.

Los sitios sugeridos para la colocación de las estaciones de monitoreo de PM10 fueron los siguientes:

1. Estación EM_CSP_01 al NO del municipio del Cerro de San Pedro (en dirección al tajo).
2. Estación EM_CSP_02 al SO del municipio del Cerro de San Pedro (en dirección al camino principal).
3. Estación EM_CSP_03 al E del poblado de la Zapatilla (en dirección al patio de lixiviación).

El modelado de las concentraciones de PM10 en los sitios en donde se propuso ubicar las estaciones de monitoreo, arrojó resultados que rebasaron los valores establecidos por la NOM-025-SSA1-1993 para los periodos de tiempo siguientes:

Tabla VI.1. Concentraciones cercanas o superiores a lo establecido por la NOM-025-SSA1-1993.

Estación	24 horas	Un año	Invierno
EM_CSP_01	440 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
EM_CSP_02	203 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Se desprecia	Debajo de norma anual
EM_CSP_03	Debajo de norma	Se desprecia	Debajo de norma anual

Los resultados de investigación de este trabajo de investigación podrían mejorarse si se dispusiera de inventario de emisiones de PM10 más preciso, que considere variaciones de actividad mensuales o diarias.

Debido a que los cálculos de la altura de la capa de mezcla se hicieron a partir de los datos de dos estaciones meteorológicas y que la topografía y altitud del sitio son muy variables, sería deseable contar con datos meteorológicos en otros puntos del área de estudio, a fin de definir con precisión el

comportamiento de la altura de la capa de mezcla y su influencia en el transporte de PM10.

El uso de modelado más flexible que permita incorporar la variable topográfica, tanto en la definición de trayectorias de viento como en la simulación del transporte de contaminantes, redundará en la obtención de concentraciones de PM10 más representativas de las mediciones en el sitio de estudio.

Apéndice A. Determinación del gradiente de temperatura por desplazamiento adiabático vertical

Considere una parcela de aire con una masa m , la cual es atraída hacia la tierra a causa de la fuerza gravitacional terrestre con la aceleración g . Entonces partiendo de la segunda ley de Newton y considerando solo que el movimiento es vertical se tiene que:

$$F = ma = mg \quad \text{(Ecuación A.1)}$$

Para escribir dicha ecuación de la presión (p) que la parcela ejerce sobre el aire del ambiente, la ecuación A.1 se divide entre el área A , que es la superficie sobre la cuál actúa dicha presión, por lo que:

$$\frac{F}{A} = \frac{ma}{A} = \frac{mg}{A} = p \quad \text{(Ecuación A.2)}$$

La ecuación de densidad es $\rho = \frac{m}{V}$, tal que despejando a la masa: $m = \rho V$ y considerando esta última expresión junto con el hecho de que el volumen $V = Az$ (donde z es la componente vertical de desplazamiento de la parcela de aire) se sustituyen adecuadamente en la ecuación (A.2) para escribir a la presión en términos de la densidad, tal que:

$$p = \rho gz \quad \text{(Ecuación A.3)}$$

Si se considera que la parcela de aire desciende a partir de $z=0$, entonces reescribiendo la ecuación A.3 se tiene que:

$$p = \rho g(-z) \quad \text{(Ecuación A.4)}$$

Para conocer cómo va cambiando la presión con respecto a la altura de manera continua, se deriva la ecuación A.4 con respecto de z :

$$\frac{d}{dz}[p = -\rho g z] \Rightarrow \frac{dp}{dz} = -\frac{d}{dz}(\rho g z).$$

Se sabe que la aceleración gravitacional g es constante para cualquier altura z ; y si además se toma a la densidad ρ como constante para toda altura, entonces:

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g \quad \text{(Ecuación A.5)}$$

De la ecuación A.5 y por las hipótesis que se han hecho previamente, se observa que la presión que ejerce la parcela sobre sus alrededores y viceversa con respecto a la altura, es constante. Esto quiere decir que la parcela se encuentra en un sistema en equilibrio dinámico con sus alrededores.

La primera ley de la termodinámica establece que la energía interna (U) de la parcela es igual al cambio de calor (dQ) de la misma, más el trabajo mecánico ($W = -pdV$) que realiza sobre sus alrededores o viceversa, entonces:

$$dU = dQ + W = dQ - pdV \quad \text{(Ecuación A.6)}$$

A volumen constante $pdV = 0 = W$, esto quiere decir que la energía interna, en términos del calor específico (C_v) se escribe de la siguiente forma:

$$dU = dQ = d(nC_v T) = nC_v dT \quad \text{(a)}$$

Y si por otro lado se considera que el sistema está a presión constante, entonces en términos del calor específico (C_p) se tiene que:

$$dQ = nC_p dT \quad (b)$$

Sustituyendo (a) y (b) en la ecuación A.6 considerando que la parcela de aire pertenece a un gas ideal ($n=1$) y escribiéndola en términos del índice adiabático $\gamma = C_p / C_v$ se llega a la siguiente expresión:

$$dT = \gamma dT - \frac{P}{C_v} dV \quad (\text{Ecuación A.7})$$

La ecuación de estado de un gas ideal es $PV = nRT = RT$, de tal forma que despejando el volumen para sustituirlo en la ecuación A.7 y tener una integral en términos de la presión y temperatura se tiene que:

$$\frac{1}{\gamma} \frac{dT}{T} = \frac{(\gamma-1)}{\gamma} \frac{dp}{p} \Rightarrow \frac{1}{\gamma} \int \frac{dT}{T} = \frac{(\gamma-1)}{\gamma} \int \frac{dp}{p}$$

Por lo que integrando dicha expresión, la ecuación de estado queda:

$$T = C(P)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

Finalmente, derivando la ecuación de estado respecto de la altura vertical z y sustituyendo la ecuación A.5, junto con la ecuación de gas ideal en términos de la densidad se llega a que:

$$\frac{dT}{dz} = -\left(\frac{g}{R}\right)\left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right) \quad (\text{Ecuación A.8})$$

En este punto es importante aclarar que la ecuación 8 expresa un gradiente de temperatura vertical, en términos de la aceleración gravitacional g , la constante de gas ideal R y el índice adiabático γ .

Para el aire $\gamma=1.41$; $R=159.6 \frac{m^2}{s^2 \text{ } ^\circ R}$ y $g=9.81 \frac{m}{s^2}$ (Santa Cruz, 2000). Por lo que

sustituyendo estos valores en la ecuación (8) y considerando que el gradiente de temperatura vertical está dentro de un proceso adiabático, tenemos que:

$$\left(\frac{dT}{dz}\right)_{ad} = -1.8 \times 10^{-2} \frac{^\circ F}{m} = 9.8 \times 10^{-3} \frac{^\circ C}{m}$$

Este desarrollo matemático corresponde al caso de una parcela de aire donde ésta se encuentra en un proceso adiabático cuyo comportamiento es expresado a través del gradiente de temperatura vertical que se acaba de deducir:

Definiendo al gradiente de temperatura del ambiente como aquel que depende de la temperatura que se mide alrededor de la parcela de aire y comparándolo con el gradiente adiabático de temperatura que acaba de ser deducido matematicamente, se tienen los tres siguientes casos:

$$\left(\frac{dT}{dz}\right)_{amb} < \left(\frac{dT}{dz}\right)_{ad} \Rightarrow \text{atmósfera inestable}$$

$$\left(\frac{dT}{dz}\right)_{amb} = \left(\frac{dT}{dz}\right)_{ad} \Rightarrow \text{atmósfera neutra}$$

$$\left(\frac{dT}{dz}\right)_{amb} > \left(\frac{dT}{dz}\right)_{ad} \Rightarrow \text{atmósfera estable}$$

(Ecuación A.9)

Apéndice B. Factores de emisión de PM10

Factores de emisión de PM10 correspondiente a una minera a cielo abierto (Huertas y col., 2009):

Operación	Actividad	Factor de Emisión	Unidades
Manejo de mineral	Rezagado de mineral en mantos	$0.75 \times 8.44 \times \left[\frac{(s)^{1.5}}{(M)^{1.4}} \right]$	kg PM10/ (h*bulldozer)
	Carga de mineral a camión	$0.75 \times \frac{0.0596}{(M)^{0.9}}$	kg PM10/ton
	Transporte de mineral de mina a patios	$0.423 \left[\left(\frac{s}{12} \right)^{0.9} \left(\frac{W}{3} \right)^{0.45} \right] \left(\frac{30-p}{30} \right) \left(1 - \frac{CE}{100} \right)$	kg PM10/VKT
	Descarga de mineral en patios de lixiviación	$0.00056 \times \left[\frac{(U/2.2)^{1.3}}{(M/2)^{1.4}} \right]$	kg PM10/ ton
	Acomodo de de mineral en patios de lixiviación	$0.75 \times 8.44 \times \left[\frac{(s)^{1.5}}{(M)^{1.4}} \right]$	kg PM10/ (h*bulldozer)
Manejo de estéril	Rezagado de estériles en zona de carga	$0.75 \times 0.45 \times \left[\frac{(s)^{1.5}}{(M)^{1.4}} \right]$	kg PM10/h
	Carga de estéril a camiones	$0.00056 \times \left[\frac{(U/2.2)^{1.3}}{(M/2)^{1.4}} \right]$	kg PM10/ ton
	Transporte de estériles en camión	$0.423 \left[\left(\frac{s}{12} \right)^{0.9} \left(\frac{W}{3} \right)^{0.45} \right] \left(\frac{30-p}{30} \right) \left(1 - \frac{CE}{100} \right)$	kg PM10/ VKT
	Descarga de estériles	$0.00056 \times \left[\frac{(U/2.2)^{1.3}}{(M/2)^{1.4}} \right]$	kg PM10/ ton
	Empuje de estériles en zona de descarga	$0.75 \times 0.45 \times \left[\frac{(s)^{1.5}}{(M)^{1.4}} \right]$	kg PM10/h
Otras operaciones	Erosión eólica en patios de lixiviación	$9.5E-5 \times \left[\left(\frac{s}{1.5} \right) \times (b) \times \left(\frac{c}{235} \right) \times \left(\frac{e}{15} \right) \right]$	kg PM10/ (m ² *periodo)
	Erosión eólica en áreas de minado	$9.5E-5 \times \left[\left(\frac{s}{1.5} \right) \times (b) \times \left(\frac{c}{235} \right) \times \left(\frac{e}{15} \right) \right]$	kg PM10/ (m ² *periodo)
	Erosión eólica en terreros	$9.5E-5 \times \left[\left(\frac{s}{1.5} \right) \times (b) \times \left(\frac{c}{235} \right) \times \left(\frac{e}{15} \right) \right]$	kg PM10/ (m ² * periodo)
	Tránsito de vehículos livianos	$\left(\frac{0.507 \times (s/12) \times (S/30)^{0.2}}{(M/0.5)^{0.5}} - 1.325E-4 \right) \left(\frac{30-p}{30} \right) \left(1 - \frac{CE}{100} \right)$	kg PM10/ VKT
Voladura	Voladura de mineral y estéril	$0.52 \times 0.00022 \times (A)^{1.5}$	kg PM10/ voladura

Tabla B.1. Fórmulas de los factores de emisión utilizados en el cálculo de las emisiones generadas por las actividades realizadas en una industria minera a cielo abierto (EPA, 2006; Gallegos, 2010).

En la tabla 1B (Gallegos, 2010), la notación utilizada significa lo siguiente:

- S:** Contenido de finos (pasa malla 200) del material manejado o de la superficie de las vías (%).
- M:** Contenido de humedad del material manejado (%).
- d:** Altura media de descarga.
- W:** Peso promedio de los vehículos (toneladas).
- P:** Número de días en el mes con mínimo 0.254 mm de lluvia.
- CE:** Eficiencia de control de polvo en vías no pavimentadas (%).
- A:** Área horizontal de las voladuras con profundidad menor a 21 m.
- U:** Velocidad del viento (m/s).
- S:** Velocidad promedio del vehículo (km/h)
- PM10:** Partículas menores de 10 micras.
- VKT:** Kilómetros viajados por un vehículo (km).
- b:** Días de almacenamiento o exposición del material.
- c:** Días secos en el año.
- e:** Porcentaje de tiempo con viento > 5.33 m/s.

Apéndice C. Emisiones de PM10 para cada fase de operación

En un principio, el inventario de emisiones de PM10 utilizado en este proyecto (Gallegos, 2010), fue dividido en cuatro fases de operación (apéndice B), por lo que a continuación se muestran dichas emisiones para cada actividad minera acomodada en su respectiva fase:

Operación	Actividad	Factor de emisión	Valor	Unidades	Emisión	Unidades
Manejo de mineral	Rezagado del mineral en mantos	Factor de emisión para empuje del mineral	6.78	kg PM10/h*bulldozer	5,210	kg PM10/periodo
	Carga del mineral a camión	Factor de emisión para carga de mineral	0.024	kg PM10/ton	15,334	kg PM10/periodo
	Transporte del mineral de mina a patios de lixiviación	Factor unitario de emisión vehículo vacío	0.25	kg PM10/VKT	11,769	kg PM10/periodo
		Factor unitario de emisión vehículo lleno	0.35	kg PM10/VKT	16,473	kg PM10/periodo
	Descarga del mineral a patios de lixiviación	Factor de emisión para descarga de mineral	0.003	kg PM10/ton	1,614	kg PM10/periodo
	Acomodo de mineral para lixiviación	Factor de emisión para empuje de mineral	7	kg PM10/h*bulldozer	2,605	kg PM10/periodo
Emisiones totales por manejo de mineral					53,006	kg PM10/periodo

Tabla C.1. Factores de emisión y emisiones de PM10 calculadas para las actividades correspondientes a la operación de manejo de mineral (Gallegos, 2010).

Apéndice C

Operación	Actividad	Factor de emisión	Valor	Unidades	Emisión	Unidades
Manejo de estéril	Empuje de estériles en zona de carga	Factor de emisión para empuje de estériles	0.362	kg PM10/h*bulldozer	278	kg PM10/periodo
	Carga de estériles a camiones	Factor de emisión para carga de material estéril	0.003	kg PM10/ton	3,992	kg PM10/periodo
	Transporte de estériles	Factor unitario de emisión vehículo vacío	0.245	kg PM10/VKT	3,165	kg PM10/periodo
		Factor unitario de emisión vehículo lleno	0.345	kg PM10/VKT	4,430	kg PM10/periodo
	Descarga de estériles	Factor de emisión para descarga de material estéril	0.003	kg PM10/ton	3,992	kg PM10/periodo
	Empuje de estériles en zona de descarga	Factor de emisión para empuje de estériles	0.362	kg PM10/h*bulldozer	278	kg PM10/periodo
Emisiones totales por manejo de estéril					16,135	kg PM10/periodo

Tabla C.2. Factores de emisión y emisiones de PM10 para las actividades correspondientes a la operación de manejo de estéril (Gallegos, 2010).

Operación	Actividad	Factor de emisión	Valor	Unidades	Emisión	Unidades
Otras operaciones	Erosión eólica en patios	Factor de emisión asociado a la erosión eólica	0.0061	kg PM10/(m ² *periodo)	146	kg PM10/periodo
	Erosión eólica en tajo	Factor de emisión asociado a la erosión eólica	0.0061	kg PM10/(m ² *periodo)	4,111	kg PM10/periodo
	Erosión eólica en terreros	Factor de emisión asociado a la erosión eólica	0.0215	kg PM10/(m ² *periodo)	3,436	kg PM10/periodo
	Tráfico de vehículos livianos	Factor de emisión por vehículos livianos	0.0463	kg PM10/VKT	233	kg PM10/} periodo
Emisiones totales por manejo de mineral					7,926	kg PM10/periodo

Tabla C.3. Factores de emisión y emisiones de PM10 calculadas para las actividades correspondientes a otras operaciones (Gallegos, 2010).

Operación	Actividad	Factor de emisión	Valor	Unidades	Emisión	Unidades
Voladura	Voladura (mineral y estéril)	Factor de emisión asociado a la voladura	40.45	kg PM10/voladura	1,982	kg PM10/periodo
Emisiones totales por manejo de mineral					1,982	kg PM10/periodo

Tabla C.4. Factor de emisión y emisión de PM10 correspondiente a la operación de voladura de mineral y material estéril (Gallegos, 2010).

Finalmente, las actividades que se muestran en cada parte del inventario de emisiones, se pueden agrupar en una sola tabla en la que son divididas para cada zona (fuente) de la mina (Gallegos, 2010).

Fuente	Actividad	Emisión por actividad (kg PM10/periodo)	Emisión por fuente (kg PM10/periodo)	Contribución (%)
Terreros	Descarga de estéril	3,992	7,706	9%
	Empuje de estéril	278		
	Erosión eólica	3,436		
Tajo	Rezagado de mineral	5,210	30,907	39%
	Carga de mineral	15,334		
	Empuje de estéril	278		
	Carga de estéril	3,992		
	Voladura	1,982		
	Erosión eólica	4,111		
Patios de lixiviación	Descarga del mineral	1,614	4,365	6%
	Acomodo del mineral	2,605		
	Erosión eólica	146		
Caminos	Transporte del mineral	28,243	36,071	46%
	Transporte del estéril	7,595		
	Tráfico de vehículos ligeros	233		
			79,049	100%

Tabla C.5. Emisiones de PM10 de las actividades mineras (Gallegos, 2010).

Apéndice D. Modelos utilizados para el estudio del transporte de contaminantes atmosféricos

En las tablas siguientes extraídas de la tesis para obtener el grado de Master en Gestión y Planificación Ambiental titulada, “Aplicación de modelos de dispersión atmosférica en la evaluación de impacto ambiental: análisis del proceso” (Bustos, 2004), se presenta un compendio de modelos que pueden ser utilizados para analizar varios tipos de contaminantes en la atmósfera.

En dichas tablas, la información se divide en: 1) nombre del modelo, 2) origen, 3) aplicación, 3) tipo, 4) contaminantes, 5) escala geográfica, 6) escala temporal, 7) transformaciones químicas, 8) clasificación de estabilidad, 9) meteorología, 10) elevación del penacho, 11) terreno, 12) uso de suelo y 13) referencia.

Nombre	Bouyant Line Point Source Model , BLP	CALINE 3	CALPUFF	Complex Terrain Dispersion Model Plus Algorithms por Instable Situations (CTDMPLUS)
Origen	US EPA	US EPA	US EPA	US EPA
Aplicación	Fuentes puntuales y lineales en Plantas de reducción de aluminio y otras fuentes industriales	Fuentes lineales derivadas del trafico vehicular en calles y carreteras	Fuentes puntuales, área, línea o volumen	Fuentes puntuales
Tipo	Penacho gaussiano	Penacho gaussiano	Puff no estacionario	Penacho gaussiano
Contaminantes	Contaminantes primarios. No maneja depositación ni deposición de contaminantes	Contaminantes primarios. No maneja depositación ni deposición de contaminantes	Contaminantes primarios, sustancias peligrosas, amoniaco y otras contaminantes pasivos.	Contaminantes primarios no reactivos
Escala Geográfica	<50 km	<50 km	50 km a varios cientos de km	<50 km
Escala temporal	1 hora, 1 Año	1 a 24 horas	1 hora a un año	1 hora a un año
Transformaciones Químicas	Considera decaimiento lineal. Tasa de decaimiento debe ser proporcionada por el usuario	No consideradas	Considera parametrizaciones para SO ₂ , SO ₄ , NO, NO ₂ , HNO ₃ , NO ₃ y aerosoles orgánicos. Considera deposición seca y húmeda.	No consideradas
Clasificación de Estabilidad	Formulas de Turner (1969)	Formulas de Turner (1969)	Pasquill-Gifford (rural) y McElroy-Pooler (urbana)	Parametrización de la capa límite
Meteorología	Horaria	Horaria	Completa y tridimensional utilizando CALMET	Horaria
Elevación del penacho	Formulas de Shulman and Scire (1980)	No consideradas	Formulas de Shulman and Scire (1980), Briggs (1974, 1975)	Formulas de Briggs (1984)
Terreno	Simple	Simple	Simple y complejo	Complejo
Uso del suelo	Rural	Urbana o rural	Urbana y Rural	Urbana y Rural
Referencia	Schulman y Scire, 1980	Benson, 1979	Scire et al., 2000.	Perry et al., 1989, 1990

Tabla D.1a. Modelos computacionales (Bustos, 2004).

Nombre	Emissions and Dispersion Modeling System, EDMS 3.1	Industrial Source Complex Model, ISC3	Offshore and Coastal Dispersion Model (OCD)	IFDM
Origen	US EPA	US EPA	US EPA	VITO Mol, Belgium
Aplicación	Contaminantes asociados a aeropuertos civiles y militares	Fuentes puntuales, área, línea o volumen, asociadas a complejos industriales	Puentes puntuales, línea o área en costeras	Fuentes puntuales
Tipo	Penacho gaussiano	Penacho gaussiano	Penacho Gaussiano	Penacho Gaussiano
Contaminantes	Contaminantes primarios no reactivos	Contaminantes primarios y emisiones continuas de contaminantes tóxicos o residuos peligrosos. Considera deposición y deposición seca.	Contaminantes primarios. No maneja deposición ni deposición de contaminantes	Contaminantes primarios.
Escala Geográfica	<50 km	<50 km	<50 km	<50 km
Escala temporal	1 hora a 1 año	1 hora a 1 año	1 hora	1 hora a 1 año
Transformaciones Químicas	No consideradas	Considera decaimiento lineal. Tasa de decaimiento debe ser proporcionada por el usuario	Considera decaimiento lineal. Tasa de decaimiento debe ser proporcionada por el usuario	No disponible. Se asume no están consideradas.
Clasificación de Estabilidad	Pasquill-Gifford	Formulas de Turner , y Pasquill-Gifford	Pasquill-Gifford	Bultynk-Malet
Meteorología	Horaria	Horaria	Horaria	Horaria
Elevación del penacho	Formulas de Briggs	Formulas de Briggs	Formulas de Briggs	Formulas de Briggs
Terreno	Simple	Simple o complejo	Complejo	No disponible. Se asume como simple
Uso del suelo	Urbana o rural	Urbana o rural	No disponible	No disponible. Se asume como rural
Referencia	Benson Paul, 1979; Federal Aviation Administration, 1997.	US EPA, 1995	DiCristofaro, D.C. and Hanna, S. R., 1989	R. Cosemans, J. Kretzschmar and G. Maes, 1992

Tabla D.1b. Modelos computacionales (Bustos, 2004).

Nombre	PLUIMPLUS	AUSTAL 86	OML	UK-ADMS
Origen	Staatsvitgeverij, 's Gravenhage, Nederland	TA-LUFT, Germany	National Environmental Research Institute, Denmark	CERC and UK Meteorological Office, United Kingdom
Aplicación	Emisiones de Chimeneas	Emisiones de Chimeneas	Emisiones de Chimeneas	Emisiones de Chimeneas
Tipo	Penacho gaussiano	Penacho gaussiano	Penacho Gaussiano	Penacho Gaussiano
Contaminantes	Contaminantes primarios no reactivos	Contaminantes primarios no reactivos	Contaminantes primarios no reactivos	Contaminantes primarios no reactivos
Escala Geográfica	<50 km	<50 km	<50 km	<50 km
Escala temporal	1 hora a 1 año	1 año	1 hora a 1 año	1 hora a 1 año
Transformaciones Químicas	No consideradas	No consideradas	No consideradas	No disponible. Se asume no están consideradas.
Clasificación de Estabilidad	KNMI-system, surface roughness	TA-LUFT classes (4)	Parametrización de la capa límite	Parametrización de la capa límite
Meteorología	Distribución de frecuencias	Distribución de frecuencias	Horaria	Horaria
Elevación del penacho	Formulas de Briggs	Formulas de Briggs	Formulas de Briggs	Ecuaciones basadas en el flujo de masa y calor
Terreno	No disponible	No disponible	No disponible	No disponible.
Uso del suelo	No disponible	No disponible	No disponible	No disponible.
Referencia	Kleine Commissie Modellen, 1978	TA-LUFT, 1988	P. Løfstrøm and H.R. Olesen, 1988	Carruthers et al., 1992

Tabla D.1c. Modelos computacionales (Bustos, 2004).

Apéndice E. Deducción de la ecuación de difusión de un soluto a través de un fluido

Como se mencionó en el primer capítulo, la ecuación de difusión de un soluto a través de un fluido (ESF), se deduce partiendo de la ecuación de Navier-Stokes, la cual se escribe de la siguiente forma:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \right) = -\nabla p + \eta \nabla^2 \vec{v} + \left(\zeta + \frac{1}{3} \eta \right) \nabla (\nabla \cdot \vec{v}) + \rho \vec{f} \quad (\text{Ecuación E.1})$$

En esta expresión, \vec{v} representa el campo vectorial de la velocidad del fluido, p es el campo escalar de presiones, ρ la densidad, η y ζ son la viscosidad cortante y volumétrica del fluido respectivamente, donde como menciona la Dra. Rosa María Velasco Belmont en su libro titulado “Introducción a la Hidrodinámica Clásica”, éstas “*son funciones de la temperatura y la presión del estado de equilibrio alrededor del cual se está trabajando*” (Velasco, 2005), finalmente, \vec{f} es la fuerza volumétrica.

Para deducir la ESF hay que obtener la “ecuación de advección-difusión-reacción en su forma reducida tomando en cuenta varias condiciones, en donde la primera es considerar que el flujo es incompresible, esto matemáticamente quiere decir que $\nabla \cdot \vec{v} = 0$, por lo que la ecuación de Navier-Stokes se simplifica quedando como sigue:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \right) = -\nabla p + \eta \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{f} \quad (\text{Ecuación E.2})$$

Por otro lado, si se considera que el fluido es turbulento, las componentes de la velocidad se pueden escribir utilizando las ecuaciones de Reynolds tal y como se presentan a continuación:

$$\vec{v} = (u, v, w) \Rightarrow \begin{aligned} u &= \bar{u} + u' \\ v &= \bar{v} + v' \\ w &= \bar{w} + w' \end{aligned} \quad (\text{Ecuación E.3})$$

En estas expresiones, la variable del lado izquierdo del signo de igual es la velocidad instantánea mientras que del lado derecho los parámetros con la raya arriba son las velocidades medias y los términos con tilde que se están sumando, son la parte fluctuante de cada componente de la velocidad.

En la tesis de doctorado titulada “Análisis y caracterización de la capa superficial Atmosférica”, escrita en la Universidad de Barcelona por Pablo Buenestado Caballero, dice que *“los medios más simples de los niveles de fluctuación son las varianzas y las desviaciones estándar....aún más importantes en el estudio de la turbulencia, son las covarianzas....las covarianzas son promedios de los productos de dos variables fluctuantes y dependen de las correlaciones entre las variables involucradas”* En este caso, un ejemplo de covarianzas es: $\overline{u'w'}$ (Buenestado Caballero, 2003).

En la misma tesis de doctorado se menciona que una manera de mostrar la relación entre las covarianzas y los flujos turbulentos, es considerando una componente de la velocidad con una concentración c (masa por unida de volumen) (Buenestado Caballero, 2003).

Por ejemplo, en la dirección horizontal, el flujo en cualquier instante es cu , por lo que el flujo medio es \overline{cu} . Tal que utilizando esta idea para reescribir las ecuaciones de Reynolds, se tiene que:

$$\begin{aligned}\overline{cu} &= CU + \overline{c'u'} \\ \overline{cv} &= CV + \overline{c'v'} \\ \overline{cw} &= CW + \overline{c'w'}\end{aligned}\quad (\text{Ecuación E.4})$$

La segunda hipótesis a plantear, es considerar que el fluido es pasivamente transportado (Tarela, Perone, 2005), por lo que las covarianzas de las variables de turbulencia se pueden desprestigiar ya que no hay fluctuaciones en el fluido, de tal forma que en las ecuaciones de Reynolds (ecuación A.4), el flujo medio es igual al producto de la concentración media por la velocidad media para cada componente.

La tercera hipótesis, es que al ser el flujo incompresible, no hay variación en la presión que ejerce éste sobre sus alrededores en cualquier dirección del sistema de coordenadas, por lo que se puede suponer constante, de tal forma que $\nabla p = 0$.

La cuarta hipótesis a tomar en cuenta, es que no hay cambios en el volumen del fluido, por lo que la fuerza volumétrica indicada en la ecuación de Navier-Stokes, también es nula.

Todas estas hipótesis planteadas, aunado al hecho de sustituir las ecuaciones de Reynolds tal y como se plantea en la segunda hipótesis, llevan a obtener la ecuación de advección-difusión-reacción, la cual se escribe de la siguiente forma:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla C = \nabla \cdot \left(\left(\frac{\eta + \eta_t}{\rho} \right) \nabla C \right) + R + S \quad (\text{Ecuación E.5})$$

Donde C representa la concentración media del fluido, \vec{v} es el campo vectorial de velocidades, η y η_t son las viscosidades molecular del aire y de torbellino respectivamente (Perone y col., 2005), R es la tasa de reacción y S es la fuente o sumidero del fluido.

Finalmente, para obtener la ecuación de difusión de un soluto a través de un fluido hay que plantear dos cuestiones. La primera es que la viscosidad de torbellino depende de agentes externos, los cuáles no serán considerados en

este caso, y segundo, la viscosidad puede ser vista simplemente como una difusión de velocidad, por lo que la ESF queda:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla C) + R + S \quad (\text{Ecuación E.6})$$

En esta última expresión, la difusión de velocidad está escrita en términos de un coeficiente de difusión k .

Apéndice F. Obtención de las ecuaciones de tipo Gaussiano para el estudio del transporte de gases y material particulado

En el estudio del transporte de contaminantes en la atmósfera, es común utilizar modelos de tipo Gaussiano para obtener sus concentraciones en los alrededores de la fuente de emisión. Es por ello que en este apéndice se obtendrán dos modelos de este tipo: uno para el estudio de gases emitidos desde fuentes puntuales y otro para el material particulado originado en fuentes de área.

a) **Modelo Gaussiano para el estudio de la concentración de un gas emitido desde una fuente puntual**

Para obtener el modelo Gaussiano con el cual se estudia el transporte y concentración de gases, se parte de la ecuación de difusión de un soluto a través de fluido (ESF), la cual fue obtenida en el apéndice anterior y se escribe de la siguiente manera:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\partial C}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla C = \nabla \cdot (k \nabla C) + R + S \quad (\text{Ecuación F.1})$$

Las condiciones iniciales sobre las cuáles descansa la solución más simple que se va a plantear son: 1) considerar que el gas es emitido de manera continua desde una fuente puntual donde, 2) el campo de velocidad se desplaza solo en

la dirección horizontal y además, 3) considerar que el contaminante es dispersado en forma de una campana Gaussiana. Todo esto se plasma en la siguiente figura:

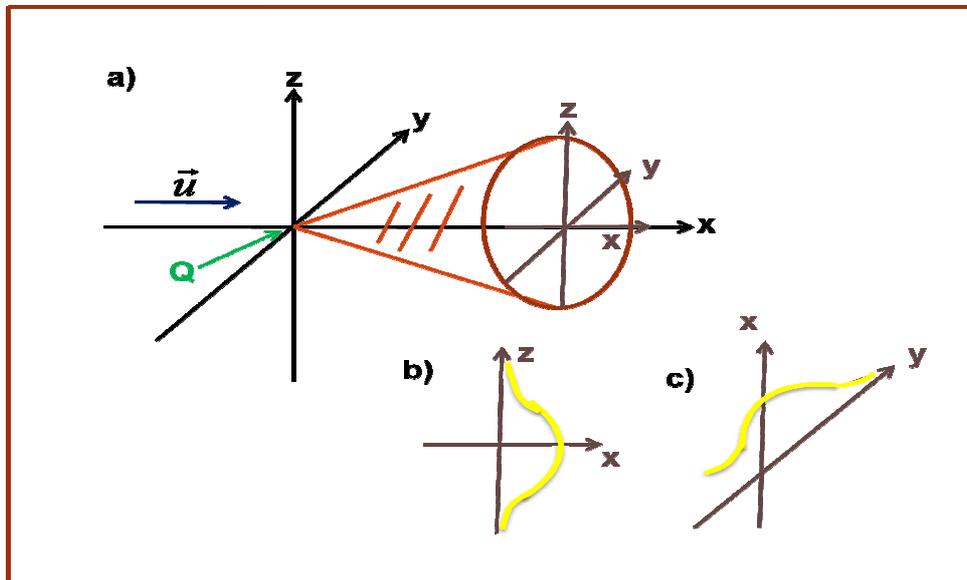


Figura F.1. a) El gas contaminante se dispersa de manera continua desde una fuente puntual donde la velocidad del viento se desplaza horizontalmente; b) y c) La dispersión es de tipo Gaussiano (Santos, 2000).

Otra condición, es el uso de las ecuaciones de Reynolds planteadas en el primer capítulo y en el apéndice E (ecuación E.3), ya que a través de ellas se explica el hecho de que no se consideran para este caso fenómenos de turbulencia, esto quiere decir que:

$$C = \bar{C}, u = \bar{u}, v = \bar{v} \text{ y } w = \bar{w} \quad (\text{Ecuación F.2})$$

El flujo del contaminante es estacionario, esto significa que es el mismo para todo tiempo, lo cual se refleja en la siguiente expresión:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = 0 \quad (\text{Ecuación F.3})$$

Como el campo de velocidad del viento se desplaza únicamente en una sola dirección, entonces:

Deducción de las ecuaciones de tipo Gaussiano para el estudio del transporte de gases y material particulado

$$\bar{v} \cdot \nabla C = \bar{u} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \quad (\text{Ecuación F.4})$$

Esta derivada de la concentración del contaminante con respecto al eje horizontal multiplicada por su velocidad en esa misma dirección es conocida con el nombre de “término convectivo” porque determina la dirección hacia la cual se desplaza el gas contaminante.

Aplicando las dos condiciones planteadas a la ESF se tiene:

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} = \nabla \cdot (k \nabla \bar{C}) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \right) \quad (\text{Ecuación F.5})$$

Para resolver esta ecuación diferencial, se propone el método de separación de variables, donde:

$$\bar{C}(x, y, z) = \bar{C}_x \bar{C}_y \bar{C}_z \quad (\text{Ecuación F.6})$$

Los subíndices colocados en cada una de las variables indican que solo dependen de x , y o z respectivamente.

Una vez que se sustituye esta igualdad en la ecuación anterior, para resolverla adecuadamente, hay que considerar que el gas se dispersa de manera homogénea en las direcciones perpendiculares a la velocidad del viento, esto se ve reflejado en los coeficientes de difusión de la siguiente forma $k_y = k_z$.

También hay que tomar en cuenta que el acarreo del contaminante $k_x \frac{\partial \bar{C}}{\partial x}$, es despreciable con respecto al término convectivo $\bar{u} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x}$, por lo que se puede tomar como nulo al momento de resolver la ecuación.

Al resolver la ESF bajo las condiciones planteadas, se obtienen soluciones para \bar{C}_x , \bar{C}_y y \bar{C}_z respectivamente, por lo que sustituyéndolas en la ecuación F.6 se tiene que:

$$\bar{C}(x, y, z) = \frac{Q}{4\pi kx} \exp\left[-\frac{\bar{u}}{4x} \left(\frac{y^2}{k_y} + \frac{z^2}{k_z}\right)\right] \quad (\text{Ecuación F.7})$$

Como se mencionó anteriormente, la dispersión del gas contaminante es homogénea o isotópica en las direcciones verticales al desplazamiento del viento, por lo que los coeficientes de difusión también se pueden expresar como $k = (k_y k_z)^{1/2}$, ya que $k_y = k_z$.

Los coeficientes de difusión están directamente relacionados con las desviaciones estándar σ_y y σ_z a través de las siguientes expresiones matemáticas:

$$\sigma_y^2 = \frac{2k_y x}{u}; \quad \sigma_z^2 = \frac{2k_z x}{u} \quad (\text{Ecuación F.8})$$

Finalmente, haciendo las sustituciones correspondientes en la ecuación F.7, se obtiene la ecuación Gaussiana con la que se puede conocer la concentración de un gas contaminante emitido desde una fuente puntual:

$$\bar{C}(x, y, z) = \frac{Q}{4\pi \bar{u} \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2}\right)\right] \quad (\text{Ecuación F.9})$$

Usualmente, cuando se estudia el caso para una fuente puntual, se toma en cuenta que ésta se encuentra a una cierta altura con respecto al piso (por ejemplo una chimenea), además de que debido a las diferencias de presión y temperatura que tiene con respecto al ambiente, éste sale en línea recta (penacho) antes de ser doblado por acción del viento. Todas estas

consideraciones se muestran en la figura 10 del primer capítulo así como la ecuación que explica dicha situación.

b) Modelo Gaussiano para el estudio de la concentración de material particulado emitido desde una fuente de área

Partiendo de la solución para un gas contaminante que es emitido desde una fuente puntual (ecuación F.9) se puede deducir la forma de la ecuación correspondiente para el estudio de las concentraciones de material particulado generado en una fuente de área., tal que la integral a resolver para llegar a dicha expresión (ecuación I.10) se escribe nuevamente a continuación:

$$\bar{C}(x, y, z) = \iint_{xy} \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z\bar{u}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right\} \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z - \left(h + x\left(\frac{W_p}{\bar{u}}\right)\right)}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} dydx$$

(Ecuación F.10)

La integral tiene que resolverse con respecto al plano sobre el cual descansa la superficie en donde se encuentra la fuente de área, es decir, el plano xy .

La resolución que se presenta a continuación para dicha integral, tiene que ver con su caso más simple, es decir, donde la velocidad de asentamiento de la partícula W_p , es constante, tal que no depende de las coordenadas de integración.

Por otro lado, hay que recordar que la velocidad del flujo en la dirección horizontal, no depende de cómo se dispersa éste en sus direcciones ortogonales, por lo que los parámetros de integración son independientes uno con respecto del otro. Esto da la oportunidad a reescribir la integral de la siguiente forma:

$$\bar{C}(x, y, z) = a \int \exp\left(-\frac{y^2}{b}\right) dy \int \exp\left[-\frac{1}{c} \left(z - \left(h + x \frac{W_p}{u}\right)\right)^2\right] dx$$

(Ecuación F.11)

Donde $a = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z}$, $b = 2\sigma_y^2$ y $c = 2\sigma_z^2$.

Uno de los métodos para resolver la integral, y que será ocupado en este apéndice, es comparándola con la función de densidad de probabilidad de distribución normal, $f(x)$, la cual es simétrica y su media está justo en el origen de un sistema de coordenadas cartesiano. Se expresa de la siguiente forma:

$$f(r) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}r^2\right) dr = 1$$

(Ecuación F.12)

Como podrá observar, el truco matemático consiste en escribir cada una de las integrales de la ecuación F.11 de la misma forma que la función de densidad de probabilidad, y para ello hay que proponer dos cambios de variables respectivamente.

- Para y el cambio de variable es $\frac{y}{\sqrt{b}} = \frac{1}{\sqrt{2}}l$, entonces $y = \sqrt{\frac{b}{2}}l$, tal que

derivando $dy = \sqrt{\frac{b}{2}}dl$.

- Para x el cambio de variable es $\left[\frac{z - \left(h + x \left(\frac{W_p}{u} \right) \right)}{\sqrt{c}} \right] = \frac{s}{\sqrt{2}}$, entonces

despejando se tiene $x = \frac{u}{W_p} \left[\sqrt{\frac{c}{2}} s - (z - h) \right]$ tal que derivando

$$dx = d \frac{\bar{u}}{W_p} \sqrt{\frac{c}{2}} ds.$$

Al sustituir adecuadamente el cambio de variable junto con sus respectivas derivadas, se llega a la siguiente expresión matemática:

$$\bar{C}(x, y, z) = \left[\sqrt{\pi} \sqrt{b} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} l^2\right) dl \right] \left[\frac{\bar{u}}{W_p} \sqrt{\pi} \sqrt{c} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} s^2\right) ds \right]$$

(Ecuación F.13)

Finalmente, la solución de dicha integral, la cual lleva a conocer la concentración de material particulado emitido desde una fuente de área es:

$$\bar{C}(x, y, z) = 2\pi \frac{\bar{u}}{W_p} \sigma_y \sigma_z \quad \text{(Ecuación F.14)}$$

Apéndice G. Métodos estadísticos utilizados para evaluar los resultados del modelo AERMOD View

Los métodos estadísticos propuestos para evaluar las concentraciones de PM10 obtenidas con el modelo AERMOD View (Cap. III, sección III.1.2.1) fueron los siguientes:

1. Desviación estándar con respecto a la media calculada para cada grupo de datos.
2. Coeficiente de correlación de Pearson.
3. Intervalo de confianza

La desviación estándar sirve para investigar que tan dispersos están los datos de su media, y para ello se utiliza la siguiente expresión matemática:

$$S_q = \sqrt{\frac{\sum_i (q_i - \bar{q})^2}{N - 1}} \quad (\text{Ecuación G.1})$$

Como se puede observar, cada uno de los datos utilizados (q_i) se resta con la media (\bar{q}) para identificar que tan desplazados están con respecto a esta.

El coeficiente de correlación de Pearson sirve para investigar que tan fuerte es la relación lineal entre dos grupos de datos. La expresión matemática utilizada es la siguiente:

$$r = \frac{1}{n-1} \left(\left(\frac{x-\bar{x}}{s_x} \right) \left(\frac{y-\bar{y}}{s_y} \right) \right) \quad (\text{Ecuación G.2})$$

En la ecuación G.2, s_x y s_y son las desviaciones estándar para dos grupos de datos distintos., mientras que la n representa el total de datos que están siendo analizados.

Si $r=1$ entonces la correlación lineal es perfecta, pero mientras más se vaya alejando de dicho valor entonces ésta se va volviendo más débil, lo que implica que los datos pueden estar relacionados de otra manera.

Bibliografía

1. **Bustos Salas**, “Aplicación de modelos de dispersión atmosférica en la evaluación de impacto ambiental: análisis del proceso”. Tesis para optar el grado de Magister en Gestión y Planificación Ambiental. Departamento de Posgrado y Postítulo. Universidad de Chile, (2004).
2. **Buenestado Caballero**, “Análisis y caracterización de la capa superficial atmosférica”. Universidad Autónoma de Barcelona, (2003).
3. **CEPIS**, “Conceptos básicos sobre meteorología de la contaminación del aire”. Traducción al español del curso: “Basic Air Pollution Meteorology Course” del Instituto de Capacitación de la Contaminación del Aire (APTI) de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S. EPA). Sitio web: <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsci/e/fulltext/meteoro/cepis.html>, (s.f.).
4. **Contreras Servín**, “Apuntes para la materia de Climatología”. Coordinación para la Innovación y la Aplicación de la Ciencia y la Tecnología. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, (s.f.).
5. **CONAMA10**, Congreso Nacional del Medio Ambiente. España. Web: <http://www.conama10.es/web/index.php>, (2010).
6. **Estudios Mineros del Perú S. A. C.**, “Manual de Minería”. Lima, Perú; Web: http://ingenierosdeminas.org/biblioteca_digital/libros/Manual_Mineria.pdf, (s.f.).
7. **EPA**, “Procedures for preparing emission factors documents”. Office of Air Quality Planning and Standards. Office of Air and Radiation. U.S. Environmental Protection Agency. Research Triangle Park. NC 27711. EPA-454/R-95-015 REVISED, (1997).

8. **EPA**, "Revision to the Guideline on Air Quality Models; Adoption of a preferred general purpose (Flat and Complex Terrain) Dispersion Model and other revisions; Final Rule". 40 CFR. Part 5, (2005).
9. **Enciclopedia de los Municipios de México**, "Cerro de San Pedro". Estado de San Luis Potosí. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. Gobierno del estado de San Luis Potosí, (2005).
10. **Esquivel E.**, "Análisis de la precipitación histórica de la zona norte de México". Instituto Nacional de Ecología (INE). Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), (s.f.).
11. **EPA**, Revision of Emission Factors for AP-42. Chapter 13: Miscellaneous Source. Section 13.2.2: Aggregate Handling and Storage Piles (Fugitive Dust Sources): Office of Air Quality and Standards. <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/index.html>. [Online] November, (2006).
12. **Gallegos Martínez**, "Inventario de emisiones de partículas y modelado de su transporte a partir de fuentes de área de una industria minera". Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, (2010).
13. **Ávila Galarza**, "Modelación del transporte y difusión de los contaminantes atmosféricos". Notas de clase. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, (1996).
14. **Gobierno de Chile**, "Informe de seguimiento. Plan de descontaminación de María Elena. Año 2002". Comisión Nacional del Medio Ambiente. II Región de Antofagasta, (2003).
15. **Thad Godish**, "Air Quality". Fourth edition. Lewis Publishers- A CRC Press Company. Boca Raton London New York Washington, D.C, (2005).
16. **Guinther**, Chini Open-pit copper mine near Silver C. Silver City, New Mexico. Photographed June 20, (2003).

17. **Guzmán Carranza, Aguirre Saldivar**, “Aplicación de la metodología para el diseño de una red automática de monitoreo atmosférico”. Sección de Ingeniería Ambiental. División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México, (s.f.).
18. **Griffiths J. F.**, “Climatología Aplicada”. Primera edición en español. PUBLICACIONES CULTURAL S.A. de C.V. México, (1985).
19. **Huertas, Camacho**, “Metodología unificada de inventario de emisiones para áreas de explotación minera a cielo abierto”. Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz-CIMA. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Toluca, México, (2009).
20. **INE**, “Industria Minera. Importancia de la minería en México” Instituto Nacional de ecología. Sitio web: http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/16/parte3_12.html, (2007).
21. **INE**, “Guía para presentar un Programa de Monitoreo y Gestión de la Calidad del Aire”. Dirección de Administración de la Calidad del Aire. Instituto Nacional de Ecología, (1994).
22. **INEGI**, “Estado de San Luis Potosí, Cerro de San Pedro”. Web: www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/sanluispotosi/municipios/24009a.htm, (2005).
23. **INEGI**, “Carta topográfica F14A84 b”. Cerro de San Pedro. Escala: 1:20 000. Época 2007 – 2015, (2007).
24. **K-2 Ingeniería Ltda.**, “Manual de Inventario de Fuentes Difusas”. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Colombia, (s.f.).
25. **Kiely, Gerard**, “Ingeniería Ambiental. Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión”. Madrid. Mc. Graw-Hill, (1999).

26. **López L.**, “Cambio Climático y Calentamiento Global”. Ciencia, evidencias, consecuencias y propuestas para enfrentarlos. Contribución de las actividades humanas al cambio climático. La urgencia de enfriar el sobre calentamiento global”. Editorial Trillas. México, (2009).
27. **M. Moran, D. Moran.**, “Meteorology. The Atmosphere and the Science of Weather”. Fifth edition. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ 07458, (1997).
28. **Moragues A.**, “Clasificación de estabilidad. Capaz de Mezcla”. Web: www.egrupos.net/cgi-bin/eGruposDMime.cgi?K9U7J9W7U7xumopxCVPPRlydnuqzmyCUVWVCvthCnoqdy-qlhhyCVWkfb7, (s.f.).
29. **Moreton, Janet & Falla.**, “Analysis of Airborne Pollutants in Working Atmospheres: The Welding and Surface Coatings Industries”. The Chemical Society, (1980).
30. **Magaña V.**, “Identificación de cuencas atmosféricas en México”. Grupo de meteorología Tropical. Centro de Ciencias de la Atmósfera. Universidad Nacional Autónoma de México. Dirección General de Investigación sobre la Contaminación, (s.f.).
31. **Olivas A.**, “Evaluación de partículas suspendidas y su impacto en salud de las vías respiratorias de la población escolar localizada en la zona suroeste de ciudad Juárez, Chihuahua”. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Ambiental y Ecosistemas. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Chihuahua, (2002).
32. **OMS**, Organización Mundial de la Salud. Calidad del aire y salud. Web: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/index.html>, (2005).
33. **Tarela, Perone.**, “Evaluación de impactos de emisiones gaseosas difusas mediante modelado matemático”. Departamento de Computación. Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires, (2005).

34. **Rivas Nieto**, “Regímenes de flujo laminar y turbulento”. FAQ Mecánica de Fluidos. Escuela Superior de Ingenieros – Universidad de Navarra. Campus Tecnológico de la Universidad de Navarra (TECNUN). Navarra, España; <http://www.tecnun.es/asignaturas/Fluidos1/WEBMF/Mecanica%20de%20Fluidos%20I/FAQMFI/FAQ12.html>, (2003).
35. **T. Carbonell, C. Garea, D. Rivero**, “Comparación preliminar del sistema de modelos AERMOD e ISCST3”. CUBAENERGÍA. La Habana, Cuba, (2005).
36. **Santa Cruz**, “Difusión de Contaminantes Gaseosos en la Atmósfera”. Facultad Regional Rosario – Departamento de Ingeniería Química. Cátedra: Área de Informática Aplicada a la Ingeniería de Procesos. Universidad Tecnológica Nacional. Rosario. Argentina, (2000).
37. **SEMARNAT, INE**, “Guía de elaboración y usos de inventarios de emisiones”. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Instituto Nacional de Ecología (INE). México, (2005).
38. **SGA**, “NORMA DE EMISIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS PRODUCIDOS POR FUENTES FIJAS”, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Santo Domingo, República Dominicana, (2001).
39. **Skeco**, “Monitoreo de la calidad del aire y meteorología”. 35^{avo} Monitoreo de calidad del aire. Bodega de concentrado de cobre PVSA. Para Puerto Ventana S.A, (2004).
40. **L. Thé**, “AERMOD. Air Dispersion Modeling Workshop. Course Notes”. Lakes Environmental. Addlink. Software Científico. web: www.ingenieria-ambientales.es, (2006).
41. **Velasco B.**, “Introducción a la Hidrodinámica Clásica”. Sección de Obras de Ciencia y Tecnología. Fondo de Cultura Económica. México, (2005).