



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA
Y LA AGRICULTURA**

CARRERA DE INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE INGENIERA EN BIOTECNOLOGÍA**

AUTOR: RAQUEL ALEXANDRA MERINO POZO

**TEMA: EVALUACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE LOS
CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS CO, SO₂ Y NO_x
PRODUCTO DEL DESARROLLO DE ACTIVIDADES
INDUSTRIALES DEL CANTÓN RUMIÑAHUI PROVINCIA DE
PICHINCHA**

DIRECTORA: QUIM. ERIKA MURGUEITIO MG.

CODIRECTOR: ING.-MAT. PEDRO ROMERO

SANGOLQUÍ, OCTUBRE 2014

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por la señorita RAQUEL ALEXANDRA MERINO POZO como requerimiento parcial a la obtención del título de INGENIERA EN BIOTECNOLOGÍA.

Sangolquí, Octubre de 2014

Quím. Erika Murgueitio Mg.

DIRECTOR

Ing.–Mat. Pedro Romero Saker

CODIRECTOR

REVISADO POR:

Dra. María Augusta Chávez

DIRECTORA DE LA CARRERA

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, Raquel Alexandra Merino Pozo

Declaro que:

El proyecto de grado denominado: “EVALUACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS CO, SO₂ Y NO_x PRODUCTO DEL DESARROLLO DE ACTIVIDADES DEL CANTÓN RUMIÑAHUI PROVINCIA DE PICHINCHA” ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las que constan al pie de las página correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración me responsabilizo de su contenido, veracidad y alcance científico.

Sangolquí, Octubre 2014

Raquel Alexandra Merino Pozo

AUTORIZACIÓN

Yo, Raquel Alexandra Merino Pozo

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, la publicación en la biblioteca virtual de la Institución del trabajo “EVALUACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS CO, SO₂ Y NO_x PRODUCTO DEL DESARROLLO DE ACTIVIDADES INDUSTRIALES DEL CANTÓN RUMIÑAHUI PROVINCIA DE PICHINCHA”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, Octubre 2014

Raquel Alexandra Merino Pozo

DEDICATORIA

*“He aquí te ordeno que te esfuerces y seas valiente;
no tengas temor ni desánimo, porque Adonáí tu Elohim
estará contigo dondequiera que vayas”*

Josué 1:9

Este trabajo lo dedico a todas las personas que directa o indirectamente estuvieron involucrados en mi formación profesional, especialmente a mi familia quienes fueron testigos de estos años de satisfacción, así como de las derrotas que solo sirvieron para fortalecer mi carácter y enseñarme a no darme por vencida.

Con amor Raquel Alexandra Merino Pozo

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Dios por darme la vida y las herramientas necesarias para cumplir toda meta que me proponga. Por bendecir a mi familia y a mí, y darme la sabiduría e inteligencia para decidir y ser cada día mejor.

A mi madre, Isabel Pozo quien fue mi principal amiga durante este viaje y que supo aconsejarme y ser mi hombro incondicional en las pruebas duras, así como en las alegrías. Le quiero mucho y espero que este orgullosa de mí.

A mi padre Ricardo Merino, que con su ejemplo me enseñó a ser trabajadora y responsable en lo que hago. Por ser mi mayor cuestionador en mis decisiones, pero por también apoyar lo que hago. Le quiero mucho.

A mi hermano Andrés, por ser mi ejemplo e inspiración para seguir adelante y que a pesar de los obstáculos, uno no debe darse por vencido. Gracias por demostrarme que nada ni nadie puede derrotarte y tu valentía diaria.

A mi directora de tesis Quím. Erika Murgueitio Mg. y codirector de tesis Ing.-Mat. Pedro Romero por darme la oportunidad de desarrollar y culminar este maravilloso tema de investigación, así como por su paciencia, enseñanza y guía.

A la Dirección de Protección Ambiental del Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Rumiñahui, por ayudarme con información sobre las emisiones industriales de fuentes fijas del cantón, que fueron fundamentales para el desarrollo de esta tesis.

Y a todos los compañeros, amigos y profesores que fueron parte de mi formación académica.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN.....	i
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	i
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vi
LISTADO DE TABLAS	ix
LISTADO DE FIGURAS.....	xii
LISTADO DE ANEXOS	xviii
RESUMEN	xxi
ABSTRACT	xxii
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Formulación del problema	1
1.2. Justificación del problema.....	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo General.....	3
1.3.2. Objetivos específicos	3
1.4. Marco teórico	3
1.4.1. Atmósfera.....	3
1.4.2. Clasificación de los contaminantes.....	6
1.4.3. Fuentes de contaminación.....	7
1.4.4. Contaminación atmosférica	7
1.4.5. Ciclo de la contaminación atmosférica.....	8
1.4.6. Control de la contaminación atmosférica	9
1.4.7. Principales alteraciones atmosféricas producidas por contaminantes de origen antropogénico	10
1.4.8. Contaminantes atmosféricos: características	11
1.4.9. Efectos de la contaminación atmosférica sobre la vida en la superficie terrestre.....	11
1.4.10. Dispersión del penacho a la atmósfera	14
1.4.11. Dispersión de contaminantes	17
1.4.12. Meteorología de la contaminación del aire.....	17

1.4.13.	Influencias topográficas.....	26
1.4.14.	Modelos de dispersión, características.....	32
1.4.15.	Modelo gaussiano	35
1.4.16.	Instrumentos meteorológicos.....	47
1.4.17.	Instrumentos informáticos	49
1.4.18.	Normas ambientales.....	57
1.5.	Hipótesis	59
CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS		60
2.1.	Participantes	60
2.1.1.	Instituciones	60
2.1.2.	Responsables del proyecto.....	60
2.1.3.	Colaboradores científicos	60
2.2.	Zona de estudio	60
2.2.1.	Recolección de datos históricos.....	60
2.3.	Duración del proyecto.....	60
2.4.	Metodología	61
2.4.1.	Datos meteorológicos	61
2.4.2.	Datos de emisiones industriales históricos de fuentes fijas del cantón Rumiñahui.....	62
2.4.3.	Datos geográficos de la zona	65
2.4.4.	Procesamiento de datos meteorológicos.....	67
2.4.5.	Procesamiento de los datos de emisiones contaminantes de fuentes fijas industriales.....	70
CAPÍTULO 3: RESULTADOS		72
3.1.	Recolección de información meteorológica del cantón Rumiñahui	72
3.2.	Estimación de la dirección de dispersión de los contaminantes atmosféricos: rosa de los vientos con los datos meteorológicos	75
3.3.	Estimación de las concentraciones de la dispersión de los gases contaminantes CO, SO ₂ y NO _x producto de las emisiones de empresas N°1, N°2 y N°3 del cantón Rumiñahui.	86
3.3.1.	Procesamiento con Screen View.....	86
3.3.2.	Procesamiento con AERMOD.....	116
CAPÍTULO 4: DISCUSIÓN.....		123
4.1.	Información meteorológica recogida del cantón Rumiñahui: rosa de los vientos de los años 2006-2008, 2010-2011	123

4.2.	Estimación de las concentraciones de la dispersión de los gases contaminantes CO, SO ₂ y NO _x producto de las emisiones de las empresas N°1, N°2 y N°3 del cantón Rumiñahui...	124
4.2.1.	Procesamiento con Screen View de las emisiones de fuentes fijas de los años 2006, 2010-2013	125
4.2.2.	Procesamiento con AERMOD de los datos de emisiones de fuentes fijas del año 2006	126
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES		128
CAPÍTULO 6: RECOMENDACIONES		129
CAPÍTULO 7: BIBLIOGRAFÍA.....		130
ANEXOS.....		135

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1.1: Composición media del aire seco entre los primeros 80-100 km de altura. Fuente: (Geocities, 2009)	5
Tabla 1.2: Gas predominante de la atmósfera a diferentes altitudes. Fuente: (Geocities, 2009)	5
Tabla 1.3: Efectos del CO en diferentes concentraciones en la atmósfera. Fuente: (Orozco, Pérez, González, Rodríguez & Alfayate, 2003).....	12
Tabla 1.4: Efectos de la contaminación ambiental producidos por los NOx. Fuente: (Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio ambiente del gobierno de España, 2012).....	13
Tabla 1.5: Efectos de los óxidos de azufre en la salud. Fuente: (Orozco <i>et al.</i> , 2003)	13
Tabla 1.6: Efectos de la contaminación ambiental por material particulado en la salud. Fuente: (ICV, 2007)	14
Tabla 1.7: Clasificación y tipos de modelos de dispersión. Fuente: (Peralta, 2007).....	35
Tabla 1.8: Exponentes del perfil del viento. Fuente: (Peralta, 2006).....	39
Tabla 1.9: Clasificación de Estabilidad Atmosférica. Fuente: (Espert & López, 2004)	42
Tabla 1.10: Cálculo de σ_y para zona urbana. Fuente: (Pal, 1999)	43
Tabla 1.11: Cálculo de σ_y para zona rural. Fuente: (Pal, 1999)	43
Tabla 1.12: Cálculo de σ_z para zona urbana. Fuente: (Pal, 1999).....	43
Tabla 1.13: Cálculo de σ_z para zona rural. Fuente: (Pal, 1999).....	44
Tabla 1.14: Límites máximos permisibles de calidad del aire ambiente. Fuente: (Ministerio del Ambiente Ecuador, 2003)	58
Tabla 1.15: Concentraciones de contaminantes comunes que definen los niveles de alerta, de alarma y de emergencia en la calidad de aire. Fuente: (Ministerio de Ambiente Ecuador, 2003).....	59
Tabla 2.1: Caracterizaciones de la empresa N°1 del año 2006. Fuente: (Tabla de resultados del laboratorio A, 2006).....	63
Tabla 2.2: Caracterizaciones de la empresa N°1 desde 2010-2013.	

Fuente: (DPAGADMR)	63
Tabla 2.3: Caracterizaciones de la empresa N°2 del 2006. Fuente: (Tabla de resultados de laboratorio B, 2006)	64
Tabla 2.4: Caracterizaciones de la empresa N°2 desde 2010-2013. Fuente:(DPAGADMR).....	64
Tabla 2.5: Caracterizaciones de la empresa N°3 del 2006. Fuente: (Tabla de resultados de laboratorio C, 2006)	64
Tabla 2.6: Caracterizaciones de la empresa N° desde 2011-2013. Fuente: (DPAGADMR).....	65
Tabla 3.1: Resultados de los parámetros medidos en las rosas de los vientos de los años 2006-2008, 2010-2011.	81
Tabla 3.2: Concentración promedio de las emisiones de fuentes fijas de la empresa N°1.	87
Tabla 3.3: Concentración promedio de las emisiones de fuentes fijas de la empresa N°2.	87
Tabla 3.4: Concentración promedio de las emisiones de fuentes fijas de la empresa N°3.	87
Tabla 3.5: Concentración de la dispersión del contaminante CO de la empresa N°1	89
Tabla 3.6: Concentración de la dispersión del contaminante NOx de la empresa N°1.....	91
Tabla 3.7: Concentración de la dispersión del contaminante SO ₂ de la empresa N°1.....	93
Tabla 3.8: Concentración de la dispersión del contaminante CO de la empresa N°2.....	95
Tabla 3.9: Concentración de la dispersión del contaminante NOx de la empresa N°2.....	97
Tabla 3.10: Concentración de la dispersión del contaminante SO ₂ de la empresa N°2.....	99
Tabla 3.11: Concentración de la dispersión del contaminante CO de la empresa N°3.....	101
Tabla 3.12: Concentración de la dispersión del contaminante NOx de la empresa N°3.	103
Tabla 3.13: Concentración de la dispersión del contaminante SO ₂ de la empresa N°3.....	105
Tabla 3.14: Concentración media de las dispersiones de todas las	

muestras medidas de CO de la empresa N°1.	107
Tabla 3.15: Concentración media de las dispersiones de todas las muestras medidas de NOx de la empresa N°1.	108
Tabla 3.16: Concentración media de las dispersiones de todas las muestras medidas de SO ₂ de la empresa N°1.	109
Tabla 3.17: Concentración media de las dispersiones de todas las muestras medidas de CO de la empresa N°2.	110
Tabla 3.18: Concentración media de las dispersiones de todas las muestras medidas de NOx de la empresa N°2.	111
Tabla 3.19: Concentración media de las dispersiones de todas las muestras medidas de SO ₂ de la empresa N°2.	112
Tabla 3.20: Concentración media de las dispersiones de todas las muestras medidas de CO de la empresa N°3.	113
Tabla 3.21: Concentración media de las dispersiones de todas las muestras medidas de NOx de la empresa N°3.	114
Tabla 3.22: Concentración media de las dispersiones de todas las muestras medidas de SO ₂ de la empresa N°3.	115

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.1: Ciclo de la contaminación atmosférica. Fuente: (Espert & López, 2004)	9
Figura 1.2: Espectros de radiación solar (onda corta) y terrestre (onda larga). Fuente: (UCAR, 2012).....	19
Figura 1.3: Áreas de presión alta y baja. Fuente: (Davis & Masten, 2005).....	20
Figura 1.4: La fuerza de Coriolis. Fuente: (Davis & Masten, 2005)	20
Figura 1.5: Turbulencia térmica (superior) y turbulencia mecánica (inferior). Fuente: (OMS, 2000).....	22
Figura 1.6: Gradiente vertical adiabático seco. Fuente: (Davis & Masten, 2005)	23
Figura 1.7: Gradiente vertical adiabático húmedo. Fuente: (OMS, 2000).....	24
Figura 1.8: Desarrollo de una inversión por radiación. Fuente: (Gilbert & Wendell, 2008).....	25
Figura 1.9: Inversión por subsidencia. Fuente: (OMS, 2000)	26
Figura 1.10: Inversión de temperaturas. Fuente: (Gilbert & Wendell, 2008)...	26
Figura 1.11: Terreno plano. Fuente: (OMS, 2000)	27
Figura 1.12: Ejemplos de la variación del viento según la altura sobre superficies con diferentes rasgos topográficos (las figuras son porcentajes de los vientos de gradiente). Fuente: (Turner, 1970)	27
Figura 1.13: Flujo de viento sobre y alrededor de las montañas. Fuente: (OMS, 2000)	28
Figura 1.14: Turbulencia térmica en el valle (el aire se eleva cuando la tierra se ilumina). Fuente: (OMS, 2000)	29
Figura 1.15: Circulación de la brisa de tierra y mar. Fuente: (Bóveda, 2010) .	30
Figura 1.16: Efecto de la brisa de un cuerpo de agua sobre la dispersión de la pluma. Fuente: (Davis & Masten, 2005).....	31
Figura 1.17: Turbulencia térmica y mecánica de las ciudades. Fuente: (OMS, 2000)	32
Figura 1.18: Esquema operacional de los modelos de dispersión y su integración al proceso de toma de decisiones. Fuente: (Gallardo, 2003).....	33

Figura 1.19: Esquema del modelo de caja. Fuente: (Ulriksen, 2005).....	34
Figura 1.20: Descripción gráfica de la modelación gaussiana de la pluma de contaminación de fuentes fijas. Fuente: (OMS, 2000).....	36
Figura 1.21: Geometría básica y sistema de coordenadas de la ecuación gaussiana de la pluma. Fuente: (Ulriksen, 2005).....	38
Figura 1.22: Tasas de decaimiento atmosférico y estabilidad. Fuente: (Henry & Heinke, 1999)	40
Figura 1.23: Descripción de columnas para una selección de regímenes de estabilidad atmosférica. Fuente: (Henry & Heinke, 1999).....	41
Figura 1.24: Coeficientes de dispersión horizontal y vertical. Fuente: (Turner, 1970)	44
Figura 1.25: Elevación de la pluma. Fuente: (OMS, 2000)	45
Figura 1.26: Anemómetro. Fuente: (OMS, 2000)	47
Figura 1.27: Paleta de viento. Fuente: (OMS, 2000).....	48
Figura 1.28: Rosa de los vientos, frecuencia por direcciones. Fuente: (Termoesmeraldas, 2009).....	49
Figura 1.29: Diagrama de flujo de algoritmos del software Screen3. Fuente: (U.S. Environmental Protection Ambiental).....	55
Figura 1.30: Diagrama de flujo de algoritmos del software AERMOD. Fuente: (Lakes Environmental. 2013).....	56
Figura 2.1: Localización de la estación meteorológica del Valle de los Chillos. Fuente: (Google Earth, 2013)	61
Figura 2.2: Datos meteorológicos históricos recolectados del año 2006. Fuente: (Secretaría de Ambiente, 2012).....	62
Figura 2.3: Ubicación de las empresas de estudio. Fuente: (Google Earth, 2013).....	66
Figura 2.4: Procesamiento de la ubicación de las empresas mediante el software AERMOD.....	67
Figura 2.5: Visualización de la interfaz de WRPLOT View con datos procesados del año 2006.....	68
Figura 2.6: Visualización de la pantalla AERMET con datos procesados del año 2007.	69
Figura 2.7: Visualización de las ubicaciones de las estaciones que proveyeron los datos meteorológicos de tipo hourly surface y upper air	70
Figura 2.8: Visualización de la pantalla de Screen View con datos de	

fuentes fijas de la empresa N°1 para el contaminante SO ₂ , del año 2010	71
Figura 3.1: Datos meteorológicos clasificados en Excel del año 2006.	72
Figura 3.2: Datos meteorológicos del año 2007 preprocesados en Excel.....	73
Figura 3.3: Datos meteorológicos del año 2008 preprocesados en Excel.....	74
Figura 3.4: Datos meteorológicos del año 2010 preprocesados en Exce.....	74
Figura 3.5: Datos meteorológicos del año 2011 preprocesados en Excel.....	75
Figura 3.6: Informe de la rosa de los vientos del año 2006.....	76
Figura 3.7: Informe de la rosa de los vientos del año 2007.....	77
Figura 3.8: Informe de la rosa de los vientos del año 2008.....	78
Figura 3.9: Informe de la rosa de los vientos del año 2010.....	79
Figura 3.10: Informe de la rosa de los vientos del año 2011.....	80
Figura 3.11: Visualización de la rosa de los vientos en Google Earth, del año 2006.....	78
Figura 3.12: Visualización de la rosa de los vientos del año 2007 en Google Earth.	83
Figura 3.13: Visualización de la rosa de los vientos en Google Earth, del año 2008.....	84
Figura 3.14: Visualización de la rosa de los vientos en Google Earth, del año 2010.....	85
Figura 3.15: Visualización de la rosa de los vientos que indica desde donde se dirige en Google Earth, del año 2010.	86
Figura 3.16: Concentración de la dispersión del contaminante CO de la empresa N°1 de los años 2006, 2010-2013 en función de la distancia, vs. la norma límite del TULSMA de calidad de aire.....	90
Figura 3.17: Concentración de la dispersión del contaminante NO _x de la empresa N°1 de los años 2006, 2010-2013 en función de la distancia, vs. la norma límite del TULSMA de calidad de aire.....	92
Figura 3.18: Concentración de la dispersión del contaminante SO ₂ de la empresa N°1 de los años 2006, 2010-2013 en función de	

la distancia, vs. la norma límite del TULSMA de calidad de aire.....	94
Figura 3.19: Concentración de la dispersión del contaminante CO de la empresa N°2 de los años 2006, 2010-2013 en función de la distancia, vs. la norma límite del TULSMA de calidad de aire.....	96
Figura 3.20: Concentración de la dispersión del contaminante NO _x de la empresa N°2 de los años 2006, 2010-2013 en función de la distancia, vs. la norma límite del TULSMA de calidad de aire.....	98
Figura 3.21: Concentración de la dispersión del contaminante SO ₂ de la empresa N° 2 de los años 2006, 2010-2013 en función de la distancia, vs. la norma límite del TULSMA de calidad de aire.....	96
Figura 3.22: Concentración de la dispersión del contaminante CO de la empresa N°3 de los años 2006, 2011-2013 en función de la distancia, vs. la norma límite del TULSMA de calidad de aire.....	102
Figura 3.23: Concentración de la dispersión del contaminante NO _x de la empresa N° 3 de los años 2006, 2011-2013 en función de la distancia, vs. la norma límite del TULSMA de calidad de aire.....	104
Figura 3.24: Concentración de la dispersión del contaminante SO ₂ de la empresa N° 3 de los años 2006, 2011-2013 en función de la distancia, vs. la norma límite del TULSMA de calidad de aire.....	105
Figura 3.25: Comparación entre las concentraciones medias de la dispersión del contaminante CO de la empresa N°1 de los años 2006, 2010-2013 y la norma límite del TULSMA sobre calidad de aire.....	108
Figura 3.26: Comparación entre las concentraciones medias de la dispersión del contaminante NO _x de la empresa N°1 de los años 2006, 2010-2013 y la norma límite del TULSMA sobre calidad de aire.....	109
Figura 3.27: Comparación entre las concentraciones medias de la dispersión del contaminante SO ₂ de la empresa N°1 de los años 2006,	

2010-2013 y la norma límite del TULSMA sobre calidad de aire.....	110
Figura 3.28: Comparación entre las concentraciones medias de la dispersión del contaminante CO de la empresa N°2 de los años 2006, 2010-2013 y la norma límite del TULSMA sobre calidad de aire.....	111
Figura 3.29: Comparación entre las concentraciones medias de la dispersión del contaminante NOx de la empresa N°2 de los años 2006, 2010-2013 y la norma límite del TULSMA de calidad de aire.....	112
Figura 3.30: Comparación entre las concentraciones medias de la dispersión del contaminante SO ₂ de la empresa N°2 de los años 2006, 2010-2013 y la norma límite del TULSMA de calidad de aire.....	113
Figura 3.31: Comparación entre las concentraciones media de la dispersión del contaminante CO de la empresa N°3 de los años 2006, 2011-2013 y la norma límite del TULSMA de calidad de aire.....	114
Figura 3.32: Comparación entre las concentraciones media de la dispersión del contaminante NOx de la empresa N°3 de los años 2006, 2011-2013 y la norma límite del TULSMA de calidad de aire.....	115
Figura 3.33: Comparación entre las concentraciones media de la dispersión del contaminante SO ₂ de la empresa N°3 de los años 2006, 2011-2013 y la norma límite del TULSMA de calidad de aire.....	116
Figura 3.34: Resultado de la simulación con el software AERMOD de la dispersión del contaminante CO, producto de las emisiones de las tres empresas en estudio del año 2006, utilizando como punto cartesiano a la empresa N°1.....	117
Figura 3.35: Resultado de la simulación con el software AERMOD de la dispersión del contaminante CO, producto de las emisiones de las tres empresas en estudio del año 2006, utilizando como punto cartesiano a la empresa N° 3.....	118
Figura 3.36: Resultado de la simulación con el software AERMOD de la dispersión del contaminante NOx, producto de las	

- emisiones de las tres empresas en estudio del año 2006,
utilizando como punto cartesiano a la empresa N° 1..... 119
- Figura 3.37:** Resultado de la simulación con el software AERMOD de
la dispersión del contaminante NO_x, producto de las emisiones
de las tres empresas en estudio del año 2006, utilizando
como punto cartesiano a la empresa N° 3..... 120
- Figura 3.38:** Resultado de la simulación con el software AERMOD
de la dispersión del contaminante SO₂, producto de las
emisiones de las tres empresas en estudio del año 2006,
utilizando como punto cartesiano a la empresa N° 1..... 121
- Figura 3.39:** Resultado de la simulación con el software AERMOD de
la dispersión del contaminante SO₂, producto de las emisiones
de las tres empresas en estudio del año 2006, utilizando
como punto cartesiano a la empresa N° 3..... 122

LISTADO DE ANEXOS

Anexo A: Carta emitida por la por la Dirección de Protección Ambiental del Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Rumiñahui (DPAGADMR).....	135
Anexo B: Data meteorológica de los años 2006-2008, 2010-2011	136
Anexo B.1: Parte de la base de datos de la data meteorológica del año 2006.....	136
Anexo B.2: Parte de la base de datos de la data meteorológica del año 2007.....	138
Anexo B.3: Parte de la base de datos de la data meteorológica del año 2008.....	140
Anexo B.4: Parte de la base de datos de la data meteorológica del año 2010.....	142
Anexo B.5: Parte de la base de datos de la data meteorológica del año 2011.....	142
Anexo C: Gráficas de frecuencia emitidas por WRPLOT View para la rosa de los vientos de los datos meteorológicos	145
Anexo C.1: Gráfica de la distribución de frecuencia de las clases de vientos producidos en el año 2006.....	146
Anexo C.2: Gráfica de la distribución de frecuencia de las clases de vientos producidos en el año 2007	147
Anexo C.3: Gráfica de la distribución de frecuencia de las clases de vientos producidos en el año 2008	148
Anexo C.4: Gráfica de la distribución de frecuencia de las clases de vientos producidos en el año 2010.....	149
Anexo C.5: Gráfica de la distribución de frecuencia de las clases de vientos producidos en el año 2011	150
Anexo D: Archivos de salida del procesamiento con Screen View de datos emisiones promedios de los años 2006, 2010 y 2011de las empresas N°1, N°2 y N°3	150
Anexo D.1: Archivos de salida del procesamiento de emisión de CO promedio de la empresa N°1 del año 2006	150
Anexo D.2: Archivos de salida del procesamiento de emisión de CO promedio de la empresa N°1 del año 2011	153
Anexo D.3: Archivos de salida del procesamiento de emisión de NOx promedio de la empresa N°1 del año 2006	155
Anexo D.4: Archivos de salida del procesamiento de emisión de NOx promedio de la empresa N°1 del año 2011	158

Anexo D.5: Archivos de salida del procesamiento de emisión de SO ₂ promedio de la empresa N°1 del año 2006	161
Anexo D.6: Archivos de salida del procesamiento de emisión de SO ₂ promedio de la empresa N°1 del año 2011	163
Anexo D.7: Archivos de salida del procesamiento de emisión de CO promedio de la empresa N°2 del año 2006	166
Anexo D.8: Archivos de salida del procesamiento de emisión de CO promedio de la empresa N°2 del año 2011	168
Anexo D.9: Archivos de salida del procesamiento de emisión de NO _x promedio de la empresa N°2 del año 2006	171
Anexo D.10: Archivos de salida del procesamiento de emisión de NO _x promedio de la empresa N°2 del año 2011.....	173
Anexo D.11: Archivos de salida del procesamiento de emisión de SO ₂ promedio de la empresa N°2 del año 2006.....	176
Anexo D.12: Archivos de salida del procesamiento de emisión de SO ₂ promedio de la empresa N°2 del año 2011.....	178
Anexo D.13: Archivos de salida del procesamiento de emisión de CO promedio de la empresa N°3 del año 2006.....	181
Anexo D.14: Archivos de salida del procesamiento de emisión de CO promedio de la empresa N°3 del año 2011	183
Anexo D.15: Archivos de salida del procesamiento de emisión de NO _x promedio de la empresa N°3 del año 2006.....	186
Anexo D.16: Archivos de salida del procesamiento de emisión de NO _x promedio de la empresa N°3 del año 2011.....	188
Anexo D.17: Archivos de salida del procesamiento de emisión de SO ₂ promedio de la empresa N°3 del año 2006.....	191
Anexo D.18: Archivos de salida del procesamiento de emisión de SO ₂ promedio de la empresa N°3 del año 2011.....	193
Anexo E: Bases de datos de procesamiento de cada toma de repetición de las emisiones de fuentes fijas CO, NO _x y SO ₂ de las empresas N°1, N°2 y N°3 con Screen View	196
Anexo E.1: Tabla del procesamiento de mediciones de CO de la empresa N°1..	197
Anexo E.2: Tabla del procesamiento de mediciones de NO _x de la empresa N°1	198
Anexo E.3: Tabla del procesamiento de mediciones de SO ₂ de la empresa N°1.	199
Anexo E.4: Tabla del procesamiento de mediciones de CO de la empresa N°2..	200
Anexo E.5: Tabla del procesamiento de mediciones de NO _x de la empresa N°2	201

Anexo E.6: Tabla del procesamiento de mediciones de SO ₂ de la empresa N°2.	202
Anexo E.7: Tabla del procesamiento de mediciones de CO de la empresa N°3.	203
Anexo E.8: Tabla del procesamiento de mediciones de NO _x de la empresa N°3	204
Anexo E.9: Tabla del procesamiento de mediciones de SO ₂ de la empresa N°3.	205
Anexo F: Reporte de resultados por el procesamiento de datos de contaminantes CO, NO _x y SO ₂ de emisiones de fuente fija del año 2006 de las empresas N°1, N°2 y N°3	206
Anexo F.1: Reporte de resultados por el procesamiento de datos de contaminante CO, de emisiones de fuentes fijas del año 2006, de las empresas N°1, N°2 y N°3	206
Anexo F.2: Reporte de resultados por el procesamiento de datos de contaminante NO _x , de emisiones de fuentes fijas del año 2006, de las empresas N°1, N°2 y N°3	207
Anexo F.3: Reporte de resultados por el procesamiento de datos de contaminante SO ₂ , de emisiones de fuentes fijas del año 2006, de las tres empresas, como punto cartesiano a la empresa N°1	208

RESUMEN

El proceso de combustión de toda actividad industrial genera gases, partículas en suspensión, cenizas, entre otras sustancias que son arrojadas directamente a la atmósfera, y en la mayoría de los casos sin una disertación apropiada para su emisión. El presente trabajo describe la simulación de la dispersión de contaminantes en la atmósfera, utilizando el paquete AERMOD y, el software Screen View; y para la elaboración de la rosa de los vientos el software WRPLOT View, siendo todos recomendados por la U.S. Environmental Protection Agency (EPA) como herramientas para el análisis de la concentración de contaminantes producto de la actividad industrial de tres empresas, en el aire ambiente del cantón Rumiñahui. Los datos obtenidos se compararon con las normas límites sobre calidad de aire, del Texto Unificado Legislación Secundaria Medio Ambiente (TULSMA). Las rosas de los vientos de los años 2006-2008, 2010-2011 tuvieron un rango de velocidad promedio de viento entre los 0.5 a 2.17 m/s; mientras que la velocidad máxima se mantuvo entre los 5.7-8.8 m/s, a excepción del año 2008 que fue de 8.8-11.1 m/s. Las direcciones del viento predominantes fueron hacia el sur-suroeste y noroeste-norte (SSE y NWN), a excepción del año 2008 que se dirigió al SE. La estimación de la dispersión de las emisiones de fuentes fijas CO, SO₂ y NO_x de las empresas N°1, N°2 y N°3, de los años 2006, 2010-2013, con el software Screen View y del año 2006 con AERMOD, mostraron que la concentración de CO de la empresa N°1 del año 2013 y la de los contaminantes NO_x y SO₂ de las tres empresas en todos los años de estudio, sobrepasaron el límite permisible del TULSMA para calidad de aire. Realizar monitoreos periódicos al año de las emisiones de fuentes fijas de las empresas del cantón Rumiñahui, e implementar un programa de monitoreo de la calidad del aire de la zona, será de utilidad para informar a la población y a las industrias sobre el impacto que producen los contaminantes en el aire ambiente.

PALABRAS CLAVES: EVALUACIÓN, DISPERSIÓN, CONTAMINANTES, ATMOSFÉRICOS, INDUSTRIALES

ABSTRACT

The combustion process of all industrial activity generates gases, particulate matter, ash, and other substances that are thrown directly into the atmosphere, and in most cases without proper dissertation for issue. The present work describes the simulation of pollutant dispersion in the atmosphere, using AERMOD and Screen View software; and to the elaboration of the wind rose using WRPLOT View software, recommended by U.S. Environmental Protection Agency (EPA) as tools for analyzing the concentration of pollutants in industrial activity product of three industries in the ambient air of the canton Rumiñahui. The data obtained were compared with the limits of air quality standards, Unified Text of Secondary Environmental Legislation (TULSMA). The wind roses for the years 2006-2008, 2010-2011 ranged from average wind speed between 0.5 to 2.17 m / s; while the maximum speed was maintained between 5.7-8.8 m / s, with the exception of 2008 which was 8.8-11.1 m / s. The prevailing wind directions were south-southwest and northwest-north (SSE and NWN), except for 2008 which was addressed to SE. The estimation of the dispersion of emissions from stationary sources CO, SO₂ and NO_x of industries No. 1, No. 2 and No. 3, of the years 2006, 2010-2013 with the Screen View software and of the year 2006 using AERMOD, showed that the CO concentration of industry No. 1 of year 2013 and the NO_x and SO₂ pollutants from the three industries in all years of study, exceeded the permissible limit of TULSMA for air quality. Perform periodic monitoring per year, emissions from stationary sources Rumiñahui canton industries, and implement a program to monitor air quality in the area, will be useful to inform the public and industry about the impact that pollutants in ambient air.

KEYWORDS: EVALUATION, DISPERSION, POLLUTANTS, ATMOSPHERIC, INDUSTRIAL

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Formulación del problema

El control periódico sobre la calidad de aire, se ha convertido en una prioridad durante los últimos años, debido al constante aumento de la contaminación ambiental producto principalmente del patio automotriz y el sector industrial. Conjuntamente, la salud de los seres humanos está en riesgo por las altas concentraciones de gases atmosféricos, agravando otro problema importante de la contaminación en las décadas, el efecto invernadero.

Aproximadamente dos millones de muertes al año, se relacionan con los efectos de la contaminación del aire por gases como el dióxido de carbono, y son los causantes de millones de enfermedades anuales de tipo respiratorio alrededor del mundo (OMS, 2005).

La gestión de la calidad de aire es un tema de prioridad en el Ecuador, debido a que se encuentra normado bajo focos legales, orgánicos y ordinarios, como se ve ejemplarizado en la constitución, el plan nacional del buen vivir y el TULSMA; en los que se habla sobre el derecho de la población a vivir en un ambiente saludable, y se considera como una prioridad del Estado ecuatoriano, tomar las medidas necesarias para lograr el equilibrio ambiental y la salud de la población.

El mayor porcentaje de industrias de la región costa se concentran en la provincia del Guayas, mientras que para la región sierra se encuentran en la provincia de Pichincha, concentrándose en el cantón Quito. A pesar de los datos sobre la producción y de las áreas industriales que más se han desarrollado en el Ecuador; aún no se cuenta con datos oficiales sobre los niveles de contaminación producidos, (FLACSO *et al.*, 2008).

Este proyecto será de utilidad para el enriquecimiento del sistema de gestión ambiental continuo del Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Rumiñahui (GADMR), tiene como deber la preservación de la calidad del aire, agua, suelo y la biodiversidad que se encuentran dentro del territorio, así como la potestad de emitir ordenanzas y límites permisibles que estén a favor de las necesidades

ambientales del cantón. Este estudio también se considera un proyecto precursor en el ámbito académico, ya que en la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, no se ha realizado una evaluación de la dispersión de los contaminantes dentro de un límite territorial.

1.2. Justificación del problema

Antes del año 2007, el GADMR, no realizaba un control de las emisiones de gases de fuentes fijas industriales, que eran monitoreados por laboratorios privados hasta ese momento. A partir del año 2010 el municipio pasó hacerse cargo de los monitoreos hasta el término de su acreditación en el año 2013, con un periodo de inspección de dos veces al año. Aunque existen algunos estudios de impacto ambiental y de áreas vulnerables para el desarrollo de actividades industriales, no existe hasta el momento un estudio o control periódico de parámetros meteorológicos, topográficos, o niveles de concentración y transporte de contaminantes en la atmósfera de la zona, la cual es información determinante para conocer la calidad del aire ambiente de la zona, que está normado por el TULSMA, y la cual rige en el ámbito ambiental al cantón.

Dentro de este contexto el presente proyecto plantea por primera vez, evaluar la dispersión de los gases contaminantes monóxido de carbono, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno, dispersos en el aire ambiente producto de la actividad industrial de tres empresas presentes en el cantón Rumiñahui, para los años 2006, 2010-2013; que se representan mediante mapas de curvas de iso-concentración por contaminante, así como gráficas de dispersión. Se elaboró las rosas de los vientos con información meteorológica recogida de los años 2006-2008, 2010-2011, para el análisis de la dispersión de los contaminantes en el aire ambiente. Este estudio servirá de plataforma para estudios futuros sobre la calidad del aire ambiente no solo del cantón, sino en otras zonas del país.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la dispersión de los contaminantes atmosféricos CO, SO₂ y NO_x, producto del desarrollo de actividades industriales del cantón Rumiñahui provincia de Pichincha.

1.3.2. Objetivos específicos

Recolectar información meteorológica del cantón Rumiñahui.

Estimar las concentraciones de la dispersión de los gases contaminantes CO, SO₂ y NO_x producto de las emisiones de empresas del cantón Rumiñahui.

Estimar la dirección de dispersión de los contaminantes atmosféricos, mediante la elaboración de la rosa de los vientos con los datos meteorológicos del cantón Rumiñahui.

1.4. Marco teórico

1.4.1. Atmósfera

Según la Calvo (2007), la atmósfera es la envoltura de gases que se forma por la desgasificación que sufrió el planeta durante su proceso de enfriamiento desde las primeras etapas de su formación, así como por gases y polvo emitidos por los volcanes y fuentes antropogénicas, mediante la quema de combustibles fósiles y la deforestación.

1.4.1.1. Estructura

Según Calvo (2007), está dividida de acuerdo a diferencias de temperaturas, en las siguientes capas que se enlistan de acuerdo a su posición desde abajo hacia arriba:

- a) Tropósfera: capa de una altura media de 12 km, con una variación de grosor entre los 9 km sobre los polos y los 18 km sobre el ecuador. Contiene casi todos los componentes y el vapor de agua de la atmósfera. Su temperatura media es de unos 15 °C, debido al calor emitido por la superficie terrestre, la cual desciende unos 6,5 °C cada km, hasta llegar a los -70 °C en el límite

superior. Los primeros 500 metros se denominan capa sucia, por su polvo en suspensión producto de la contaminación, los desiertos y los volcanes. Este polvo actúa como núcleos de condensación que facilitan el paso del vapor de agua atmosférico a agua líquida. Diferencias de presión y temperatura forman flujos convectivos de aire, verticales y horizontales, produciendo los conocidos fenómenos meteorológicos como precipitaciones, viento y nubes.

- b) Estratósfera: en esta capa de una altura de 50 km, y una temperatura que asciende hasta los 0 °C. Genera la mayor parte del ozono atmosférico que se concentra entre los 15 y 30 km de altura, y se conoce como zona capa de ozono u ozonósfera, por lo que actúa como pantalla protectora frente a los perjudiciales rayos ultravioleta. Dentro de esta capa hay movimientos horizontales de aire, pero no verticales como sucede en la troposfera.
- c) Mesósfera: capa que se extiende a partir de la estratosfera hasta los 80 km de altura, con una temperatura que disminuye hasta los -140 °C en su límite superior llamado mesopausa.
- d) Termósfera o ionósfera: capa que se encuentra entre unos 600 a 800 km de altura, y temperatura que va ascendiendo en altura al absorber las radiaciones de alta energía, pudiendo alcanzar más de 1000 °C. Aquí las moléculas presentes están ionizadas por la absorción de las radiaciones solares de alta energía como rayos gamma, rayos X y parte de la radiación ultravioleta, lo que produce que el nitrógeno y el oxígeno pierdan electrones que originan campos eléctricos, quedando ionizados con carga +.
- e) Exósfera: capa que parte desde los 600 a 800 km de altura, y puede llegar hasta 10.000 km. Presenta una bajísima densidad de gases hasta llegar a ser similar a la del espacio exterior (casi vacío) con lo que el cielo se oscurece, debido a que no hay prácticamente materia que absorba la luz. Esta baja densidad no ha permitido medir su temperatura promedio, además que imposibilita su variación.

1.4.1.2. Composición química

Según Herrero & Fernández (2012), la atmósfera está mayoritariamente formada por nitrógeno, oxígeno, argón, vapor de agua y dióxido de carbono. Los

restantes componentes se encuentran en partes por millón, como por ejemplo el neón, criptón, xenón, metano, etc., la tabla 1.1, nos indica cada una de las concentraciones de estos componentes en la atmósfera. Entre sus funciones, tiene el de mantener el balance de la radiación solar que ingresa y sale de la tierra, actuar como filtro protector y regular la variación del albedo (reflejo de la radiación por la superficie terrestre), efecto invernadero y la circulación general del aire.

Tabla 1.1: Composición media del aire seco entre los primeros 80-100 km de altura.

Componentes	Porcentaje
Nitrógeno (N ₂)	78,083%
Oxígeno (O ₂)	20,945%
Argón (Ar)	0,934%
Dióxido de carbono (CO ₂)	0,035%
Otros: neón (Ne), helio (He), criptón (Kr), hidrógeno (H ₂), xenón (Xe), metano (CH ₄), ozono (O ₃), óxidos de nitrógeno (NO _x)	0,003%
Vapor de agua	1-4%

Fuente: (Geocities, 2009)

En la tabla 1.2 se describe el gas que predomina en la atmósfera según se va aumentando la altura

Tabla 1.2: Gas predominante de la atmósfera a diferentes altitudes.

Gas predominante	Altitud
Capa de Nitrógeno molecular (N ₂)	Entre 100 y 200 Km.
Capa de Oxígeno atómico (O)	Entre 200 y 1000 Km.
Capa de Helio (He)	Entre 1000 y 35000 Km.
Capa de Hidrógeno atómico (H)	A partir de 3500 Km

Fuente: (Geocities, 2009)

1.4.1.3. Propiedades físicas

Según Herrero & Fernández (2012), entre las diferentes propiedades físicas que presenta la atmósfera, tenemos:

- a) Presión atmosférica: es la definición para el peso ejercido por la masa del aire que se encuentra en los primeros kilómetros de la atmósfera, sobre la superficie de la tierra. Está presión va disminuyendo a medida de que la altura aumente.

- b) Temperatura: la temperatura máxima en la superficie terrestre es de 15°C, debido al calor que emite la propia tierra hacia la atmósfera. La temperatura disminuye con el aumento de la altitud. Se disminuye aproximadamente 6.5 °C, cada kilómetro que se asciende.

1.4.2. Clasificación de los contaminantes

1.4.2.1. De acuerdo su naturaleza

Según Bermúdez (2010), los contaminantes se clasifican de acuerdo a su naturaleza en:

- a) Químicos: este tipo de contaminantes pueden sufrir transformaciones químicas, alterando su naturaleza, lo que les clasifica en:
- i. *Primarios*: Se emiten directamente a la atmósfera y representan el 90% de la contaminación, entre los más perjudiciales están el monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, partículas e hidrocarburos.
 - ii. *Secundarios*: Son las especies que se forman en la atmósfera por interacciones entre los contaminantes primarios, componentes naturales de la atmósfera y radiaciones.
- b) Biológicos: según el Centro de sanidad ambiental (1999), se considera como un contaminante ambiental, a los organismos o restos de estos, que pueden afectar la calidad del aire. Entre los más comunes encontramos a las bacterias, virus, los mohos, ácaros del polvo, polen, etc.
- c) Físicos: según García (2010), se considera contaminantes físicos, a aquellos factores del ambiente natural en el ámbito laboral, que acontecen de forma modificada por el proceso laboral y pueden traer daños en la salud humana.

1.4.2.2. De acuerdo a su degradación:

También se pueden clasificar según Bermúdez (2010) en:

- a) Contaminantes no degradables: los cuales no se pueden descomponer por procesos naturales.
- b) Contaminantes de degradación lenta o persistente: que permanecen hasta cientos de años en el ambiente sin descomponerse.

- c) Contaminantes biodegradables: se descomponen en compuestos químicos más simples, por la acción de microorganismos.

1.4.3. Fuentes de contaminación

Según Orellana (2009), las principales fuentes de contaminación atmosférica, pueden ser las emisiones naturales y las emisiones antropogénicas.

- a) Fuentes naturales: son las emisiones productos de procesos naturales como las erupciones volcánicas, que representa una fuente natural concentrada y localizada de gases y partículas que varían de un lugar a otro, con las condiciones estacionales, geológicas, meteorológicas y tipo vegetación.
- b) Fuentes antropogénicas: este tipo de contaminación es causada por las actividades humanas, como son, el transporte, combustión y procesos industriales. Se puede clasificar a estas fuentes en:
- i. *Fuentes móviles*: como son las emisiones del parque automotor utilizados en el transporte.
 - ii. *Fuentes fijas*: ubicadas en un punto determinado. También conocidas como foco de combustión estacionario.

1.4.4. Contaminación atmosférica

Existen varias definiciones de contaminación atmosférica de las cuales se cita:

Wark & Warner (1992) define a la contaminación como la presencia en la atmósfera exterior de uno o más contaminantes o sus combinaciones, en cantidades tales y con tal duración que sean o puedan afectar la vida humana, de animales, de plantas o de la propiedad, que interfiera el goce de la vida, la propiedad o el ejercicio de las actividades.

Ministerio del Ambiente Ecuador (2003) define a la contaminación como la presencia de sustancias en la atmósfera, que resultan de actividades humanas o de procesos naturales, presentes en concentración suficiente, por un tiempo suficiente y bajo circunstancias tales que interfieren con el confort, la salud o el bienestar de los seres humanos o del ambiente.

Según Ross (1974), la contaminación del aire se ha definido de muchas maneras, pero de forma general, se trata de la adición a nuestra atmósfera de cualquier material que tenga un efecto perjudicial en los seres vivos. Ya sea que la introducción haya sido de forma natural o no, pueden cambiar de forma significativa la composición de la atmósfera o puede disminuir la cantidad de oxígeno. Existen muchas clases de contaminantes que no solo pueden afectar el contenido de oxígeno en el aire, sino que al ser inhalados puede llegar a ser tan nocivos para la salud.

1.4.5. Ciclo de la contaminación atmosférica

Según Espert & López (2004), el proceso de contaminación atmosférica se inicia con la emisión de los productos (gases) que se generan durante el proceso de combustión a nivel industrial, estos son lanzados verticalmente hacia arriba por la chimenea, denominada fuente para los modelos de dispersión (figura 1.1), los gases se distribuyen por la atmósfera según un proceso de dispersión que principalmente depende de dos tipos de factores:

- a) Específicos del contaminante: velocidad de salida, temperatura, forma, tamaño, entre otros.
- b) Meteorológicos: velocidad del viento, gradiente de temperatura del aire, turbulencias atmosféricas, entre otros. El ciclo completo de la contaminación atmosférica debida a la actividad humana pasa por una serie de fases desde su producción hasta su eliminación, las cuales son descritos en la figura 1.1 de la siguiente manera:
 - i. *Producción de contaminantes*: incluye todo tipo de fuentes de contaminación. Tales como procesos industriales, combustiones, transporte automovilístico, actividades domésticas, entre otras.
 - ii. *Captación y depuración de gases contaminantes*: incluye tanto los sistemas de captación de gases y su transporte por tuberías como los sistemas de depuración de partículas y de contaminantes químicos. En esta fase se consigue una limpieza parcial de los gases que van a ser emitidos a la atmósfera.
- c) Emisión de gases contaminados a la atmósfera: {os gases emitidos de la fase anterior son emitidos a la atmósfera por medio de chimeneas o tubos de

- escape. Estos gases arrastran una cierta contaminación ya que la eficiencia de los sistemas de depuración prácticamente nunca es del 100%.
- d) Transporte y dispersión de contaminantes en la atmósfera: la contaminación emitida a la atmósfera es transportada por el viento y dispersada por efecto del movimiento turbulento del aire, a la vez que puede sufrir transformaciones físicas o químicas. Esta es una fase de dilución del contaminante en el medio al que se lo ha vertido.
 - e) Recepción de contaminantes a nivel del suelo: los contaminantes dispersados alcanzan el suelo, afectando a los ciclos biológicos terrestres. En esta fase se produce una concentración de inmisión, la cual se debe mantener por debajo del límite máximo legislado.
 - f) Eliminación de contaminantes atmosféricos: el destino final de los contaminantes atmosféricos es su eliminación por métodos naturales, entre los cuales se puede mencionar las reacciones químicas, absorción por océanos y plantas, sedimentación y absorción por nubes y lluvia.

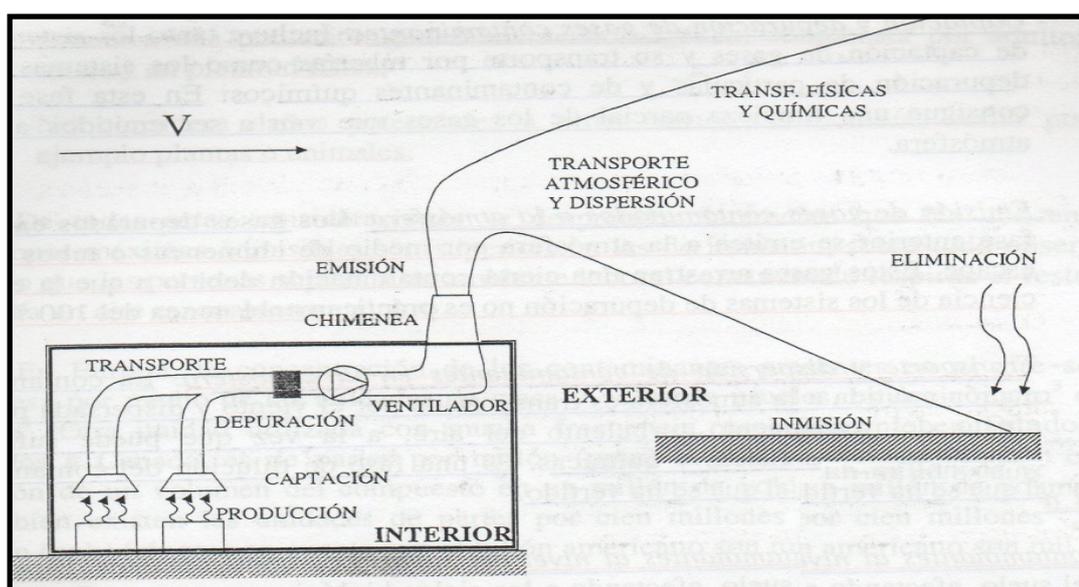


Figura 1.1: Ciclo de la contaminación atmosférica

Fuente: (Espert & López, 2004)

1.4.6. Control de la contaminación atmosférica

Según Spiegel & Maystre (2000), mantener un control del proceso de contaminación, nos permite estar seguros que las concentraciones de contaminantes

atmosféricos en exceso, no sobrepasen los límites permisibles y causen efectos en los receptores sensibles como las plantas, animales o seres abióticos. El control se define en cuatro etapas:

- a) Definición de las emisiones: determinar los contaminantes potencialmente nocivos que se liberan a través de la chimenea.
- b) Identificación de los receptores: enlistar a todos los sujetos vulnerables a las emisiones que se han determinado.
- c) Determinación de los niveles de exposición aceptables: este nivel está relacionado con la exposición máxima para los receptores más sensibles, y si esta exposición puede ser a largo o corto plazo.
- d) Selección de los controles: se establece de qué forma se controlará que los niveles de emisiones, no sobrepasen los límites.

1.4.7. Principales alteraciones atmosféricas producidas por contaminantes de origen antropogénico

Según Espert & López (2004), menciona que la creciente emisión de contaminantes a la atmósfera ha dado origen a varias alteraciones atmosféricas que generan consecuencias a medio o largo plazo muy difíciles de prever. Estas alteraciones se pueden resumir de la siguiente manera:

- a) Efecto invernadero: se denomina efecto invernadero al incremento de la temperatura media de la tierra y la atmósfera por efecto de las mayores concentraciones de CO₂ en la atmósfera.
- b) Smog fotoquímico: se origina principalmente en la atmósfera urbana al reaccionar entre si los óxidos de nitrógeno, los hidrocarburos y el oxígeno en presencia de la radiación ultravioleta de los rayos del sol, posee una coloración café-rojiza.
- c) Acidificación del medio ambiente: se origina como consecuencia del retorno a la superficie de la tierra, en forma de ácidos, de los óxidos de azufre y nitrógeno descargados a la atmósfera. Esta acidificación se puede producir como deposición seca o húmeda (lluvia ácida).
- d) Rotura de la capa de ozono: definida como la previsible disminución de la capa de ozono de la estratósfera como consecuencia de la descarga de

determinadas sustancias a la atmósfera, tales como óxidos de nitrógeno y clorofluorocarbonos.

1.4.8. Contaminantes atmosféricos: características

Según Orozco, Pérez, González, Rodríguez & Alfayate (2003), los contaminantes atmosféricos, sus características y fuentes de origen se detallan a continuación:

- a) Monóxido de carbono (CO): es un gas incoloro, inodoro e insípido, su densidad es del 96.5% del aire, es poco soluble en agua, es el contaminante más abundante, en términos de masa y ampliamente distribuido. Más del 90% proviene de fuentes antropogénicas, por la combustión incompleta de combustibles fósiles.
- b) Óxidos de nitrógeno (NO_x): según Orozco *et al.* (2003), dentro de este término se incluye a todos los posibles óxidos que puede formar el nitrógeno. En la atmósfera únicamente se detectan: N₂O, NO y NO₂, ya que el resto son inestables. También tiene su origen en fuentes antropogénicas, en lugares donde se produzcan reacciones de combustión a altas temperaturas, utilizando al nitrógeno como comburente por estar presente en el aire.
- c) Óxidos de azufre (SO_x): según Davis & Masten (2005), esta pueden ser tanto primarios como secundarios, abarca los términos SO₂, SO₃ y SO₄²⁻. El dióxido de azufre es el contaminante en mayor proporción que es emitido a la atmósfera, acompañado por una proporción de trióxido de azufre, que al reaccionar con la humedad, se convierte en ácido sulfúrico. Más del 50% de las emisiones totales de SO₂ corresponden a emisiones naturales que emiten océanos y volcanes en forma directa y de producto de emisiones antropogénicas, tenemos la combustión de carburantes.

1.4.9. Efectos de la contaminación atmosférica sobre la vida en la superficie terrestre

Según Ballester, Tenías & Pérez, S. (1999), los principales efectos a corto plazo de la contaminación atmosférica sobre la salud, se relacionan con problemas respiratorias y cardiovasculares, que a su vez conducen a una gran cantidad de muertes tempranas a nivel mundial. Los resultados de diferentes estudios realizados

en cientos de ciudades, demuestran que a pesar de que los contaminantes emitidos a la atmósfera se encuentran bajo los límites de las normas de calidad del aire, existen una gran cantidad de problemas de salud producto de la contaminación.

1.4.9.1. Monóxido de carbono (CO)

Según Orozco *et al.* (2003), el principal efecto del monóxido de carbono se genera en la hemoglobina de la sangre, en la tabla 1.3 se puede observar los efectos que causa a diferentes concentraciones en el aire ambiente.

Tabla 1.3: Efectos del CO en diferentes concentraciones en la atmósfera.

Concentración de CO en el aire ambiental (mg/Nm ³)	Concentración equilibrio de COHb en sangre (%)	Efectos
<4	<1	No hay efecto aparente
4 – 12	1 - 2	Alguna evidencia de efectos sobre la conducta
12 – 35	2 - 5	Efectos en el sistema nervioso central. Efectos en el discernimiento de los intervalos de tiempo, agudeza visual, discernimiento de la luminosidad y algunas otras funciones psicomotoras.
35 – 74	5 – 10	Alteraciones cardíacas y pulmonares
74 – 625	10 - 80	Dolores de cabeza, fatiga, somnolencia, coma, fallos respiratorios, muerte.

Fuente: (Orozco, Pérez, Gonzales, Rodríguez & Alfayate, 2003)

1.4.9.2. Óxidos de nitrógeno (NO_x):

Según Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio ambiente del gobierno de España (2012), la toxicidad de los NO_x en sí mismo no es elevada, aunque NO₂ puede aumentar en concentración respecto a la norma ambiental, especialmente en lugares cerrados. En la tabla 1.4 se puede observar un resumen de los efectos generados por los óxidos de nitrógeno.

Tabla 1.4: Efectos de la contaminación ambiental producidos por los NOx.

Efectos ambientales	Efectos en la salud
Lluvia ácida, en presencia de ácido nítrico, en el país no existen consecuencias graves.	Irritaciones oculares y nasales. Problemas respiratorios.
Smog fotoquímico troposférico o seco.	Edemas pulmonares.
Contribución de NOx emitidos directamente a la atmósfera a la destrucción de la capa de ozono.	Caso extremo, muerte a concentraciones de 100 ppm de NO ₂ .

Fuente: (Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio ambiente del gobierno de España, 2012)

1.4.9.3. Óxidos de azufre:

Según Orozco *et al.* (2003), indica que el azufre es conocido como un contaminante capaz de causar daño severo a la salud de las personas, especialmente a grupos vulnerables como son los ancianos, infantes y asmáticos, de acuerdo a la concentración y exposición a este contaminante, como se puede observar en la tabla 1.5.

Tabla 1.5: Efectos de los óxidos de azufre en la salud.

Exposiciones	Efectos
Media anual de 100 mg/m ³	Genera un aumento de los síntomas de enfermedades respiratorias.
Media diaria de 500 mg/m ³ por parte de la población	Genera un exceso de mortalidad.
Entre 500 mg/m ³ y 250 mg/m ³	Genera un aumento de enfermedades respiratorias agudas.

Fuente: (Orozco *et al.*, 2003)

1.4.9.4. Partículas sólidas o líquidas (PM)

Según U.S. Environmental Protection Agency (2013), las partículas arrastradas por el aire pueden ser químicamente inertes o activas, producto de las brumas, humos y polvo en suspensión. En la atmósfera las partículas son una mezcla de sólidos microscópicos y gotitas líquidas de sustancias orgánicas e inorgánicas suspendidas

en el aire. Se clasifican en función de su diámetro aerodinámico en PM₁₀ (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 10 micras) o PM_{2,5} (diámetro aerodinámico inferior a 2,5 micras); en la tabla 1.6 se puede observar los diferentes efectos de las partículas sobre materiales, salud y plantas.

Tabla 1.6: Efectos de la contaminación ambiental por material particulado en la salud.

Tamaño de la partícula	Capacidad de penetración pulmonar
≥50 micras	No pueden inhalarse
10-50 micras	Retención en nariz y garganta
≤ 5 micras	Penetran hasta el alvéolo pulmonar

Fuente: (ICV, 2007)

1.4.10. Dispersión del penacho a la atmósfera

Se dan por la liberación de emisiones desde fuentes puntuales como las chimeneas. Su función es descargar los contaminantes a suficiente altura desde la superficie terrestre para que se dispersen en la atmósfera antes de llegar al suelo. Si bien todas son iguales, las chimeneas más altas dispersan mejor los contaminantes que las más pequeñas debido a que la pluma tiene que viajar a través de una capa atmosférica más profunda antes de llegar al nivel del suelo, (OMS, 2000).

1.4.10.1. Tipos de fuentes de emisión del penacho

Los tipos de fuentes de emisión de contaminantes del aire son generalmente caracterizados como fuentes de:

- Punto de origen
- Línea
- Área
- Volumen

a) **Punto de origen:** es una fuente única e identificable de emisiones de contaminantes atmosféricos, emiten contaminantes de forma continua. Se

caracterizan por ser elevados o a nivel del suelo, como las emisiones producto de la combustión de gases del horno de una chimenea.

- b) Fuente de línea: es una fuente unidimensional de emisiones de contaminantes atmosféricos, constituidas por calles y avenidas. Por ejemplo las emisiones de la circulación de vehículos en una carretera.
- c) Fuentes de área: es una fuente de dos dimensiones de contaminantes atmosféricos. Por ejemplo las emisiones de un incendio forestal, un vertedero o los vapores de un gran derrame de líquido volátil, (Bravo & Sosa, 2006).
- d) Fuente de volumen: fuente de tres dimensiones difusas de contaminantes del aire, donde la tercera dimensión es la altura. Ejemplo de fuentes volumétricas tenemos las emisiones fugitivas de gases de tuberías dentro de las instalaciones industriales como refinerías de petróleo y petroquímicas, (U.S. Environmental Protection Agency, 1995)

1.4.10.2. Evolución del penacho

Según Espert & López (2004), para analizar la evolución del penacho, se realiza bajo el supuesto de que la fuente emisora es de tipo puntual y la emisión se efectúa dentro de la baja atmósfera. Tres son las fases a considerar en la evolución del penacho.

- a) Primera fase: el penacho es prácticamente vertical, ya que inicialmente posee un movimiento ascendente debido a que:
 - i. La velocidad de salida de los gases por la boca de la chimenea es superior a la velocidad horizontal del viento.
 - ii. El efecto de flotación que actúa sobre el penacho cuando la temperatura de salida de los gases es mayor que la del aire exterior.

En su movimiento ascendente, el penacho va mezclándose con el aire ambiente, por lo que se enfría y va perdiendo su impulso ascensional. El final de esta fase vendrá marcado, consecuentemente, cuando las velocidades y temperaturas del penacho alcanzan valores similares a los del aire exterior.

- b) Segunda fase: al perder buena parte de su impulso ascensional, el penacho es dominado por el viento y se va curvando progresivamente hasta volverse prácticamente horizontal. Concluye esta fase cuando la emisión del penacho alcanza una densidad y una cantidad de movimiento semejantes a las del aire atmosférico que lo circula.
- c) Tercera fase: el penacho no tiene movimiento propio, es arrastrado con la velocidad del viento, su dispersión depende de las características turbulentas del flujo de aire que lo transporta. Los remolinos turbulentos van mezclando los contaminantes con el aire limpio, de manera que la sección recta del penacho irá aumentando y la concentración dentro del mismo irá disminuyendo a distancias crecientes del foco emisor.

1.4.10.3. Parámetros que condicionan la evolución del penacho

Según Turmo & Cuscó (2004), los parámetros se los puede clasificar de acuerdo a:

- a) Parámetros físicos: los parámetros físicos que caracterizan el comportamiento de los efluentes a la salida de la chimenea son los siguientes:
- Diámetro de salida de la chimenea D_s ,
 - velocidad de salida V_s ,
 - velocidad del viento a nivel de la boca de salida de la chimenea U , y
 - diferencia de densidad existente entre el efluente expulsado y el aire atmosférico ($\Delta \rho = \rho_a - \rho_s$).

Cada uno de estos parámetros influencia en la altura efectiva de emisión (ΔH), se detalla a continuación:

- ΔH crece con V_s/U ; para valores de $V_s/U < 1.5$ los efluentes pueden ser aspirados por la estela que se induce a sotavento de la chimenea y $\Delta H \rightarrow 0$ aparece en paralelo el fenómeno “down wash”
- A medida que $\Delta \rho / \rho_a$ crece, aparece un empuje térmico ascensional que provoca una variación en el mismo sentido de ΔH
- La sobre-elevación ΔH crece con el parámetro D_s/H_s

- b) Parámetros meteorológicos: la mayor parte de los problemas de dispersión de los gases contaminantes emitidos se sitúan en la capa límite atmosférica, cuyo espesor es del orden de 1000 metros (tropósfera). Dentro de esta capa se distingue, en las proximidades de la superficie terrestre, una zona de algunas decenas de metros de espesor, llamada capa límite superficial, de la que nacen todos los mecanismos de base que van a dar a la capa límite atmosférica una estructura determinada. Dos son los parámetros que la caracterizan:
- Gradiente vertical de velocidad
 - Gradiente vertical de temperatura

Estos parámetros se encuentran relacionados a la turbulencia atmosférica, el primero de ellos cuantifica, en cierto modo, la turbulencia mecánica, en tanto que el segundo lo hace con la térmica.

1.4.11. Dispersión de contaminantes

Según Faraldos (2012), proceso de determinación en la forma que se dispersan los contaminantes, los cuales pueden ser de las siguientes formas:

- a) Emisión: es la cantidad de contaminante expuesto desde cualquier fuente en un período de tiempo determinado.
- b) Inmisión: es la cantidad de contaminante transportado por la atmósfera, que llega al receptor.

1.4.12. Meteorología de la contaminación del aire

De acuerdo a Ahrens (1993), la atmósfera es el medio en el que se liberan los contaminantes, el transporte y la dispersión de estas descargas depende en gran medida de parámetros meteorológicos. La meteorología se usa para predecir el impacto ambiental de una nueva fuente de contaminación del aire y para determinar el efecto de las modificaciones de las fuentes existentes en la calidad del aire. Para realizar actividades relativas a la planificación de la calidad del aire es imprescindible comprender la meteorología de la contaminación del aire y su influencia en la dispersión de las sustancias contaminantes.

1.4.12.1. Conceptos de meteorología

A continuación se mencionan los fenómenos meteorológicos necesarios para el presente estudio.

a) Radiación

i. *Radiación solar*

Según Henry & Heinke (1999), el sol como estrella, emite radiación que varía muy poco, por lo que tiende a ser estable. A esto se lo conoce como *constante solar* y refiere a toda la radiación que llega a la parte superior de la atmósfera. De forma general la radiación solar real que llega a la superficie de la tierra es menor a la constante solar real, debido a que se debilita mientras viajan a través de la atmósfera. Esta energía se transfiere en forma de ondas electromagnéticas. La longitud de onda es de aproximadamente de 500 nm entre un intervalo entre 200-5000 nm, siendo mucho menor por la emitida por la superficie de la tierra. Es por ésta razón que se conoce como *radiación de onda corta* a la radiación solar.

ii. *Radiación terrestre*

Al mantener la tierra una temperatura prácticamente constante, la cual es mucho menor a la del sol, este envía nuevamente la radiación que llega al espacio en forma *radiación de ondas largas*, con una intensidad máxima de 10000 nm y que varían entre los 4000 y 50000 nm. (Inzunza, 2003); las longitudes de las radiaciones de onda corta y la larga se esquematizan en la figura 1.2.

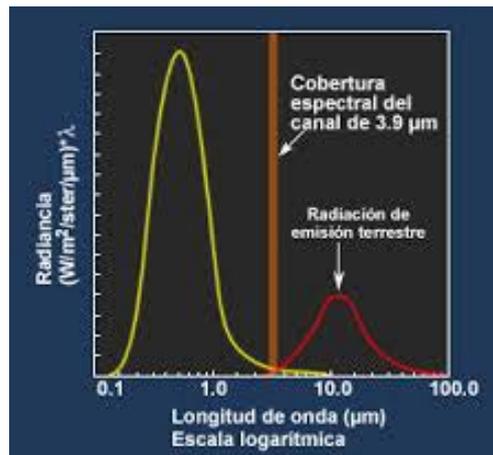


Figura 1.2: Espectros de radiación solar (onda corta) y terrestre (onda larga).

Fuente: (UCAR, 2012)

b) Presión atmosférica

Según Davis & Masten (2005), la presión atmosférica depende del peso del aire de la capa superior. Es causada por moléculas de aire (por ejemplo, oxígeno o nitrógeno) que chocan tanto entre sí como con otros objetos y rebotan, en un determinado volumen y la velocidad a la que se desplazan. La atmósfera ejerce mayor presión en la superficie terrestre, y disminuye al aumentar la altura. El viento se mueve de zonas de mayor presión hacia las menores. En la figura 1.3 se indica las áreas de presión alta y baja en forma de isobaras, las cuales son gráficas de líneas elípticas de presión constante, que en este caso está representado en un eje bidimensional. El gráfico a) representa un sistema de alta presión, que presenta en el centro la máxima presión (102.8 kPa) como H, mientras que el gráfico inferior es la representación de un corte transversal. El gráfico b) en cambio representa un sistema de baja presión, con las mismas características del gráfico a).

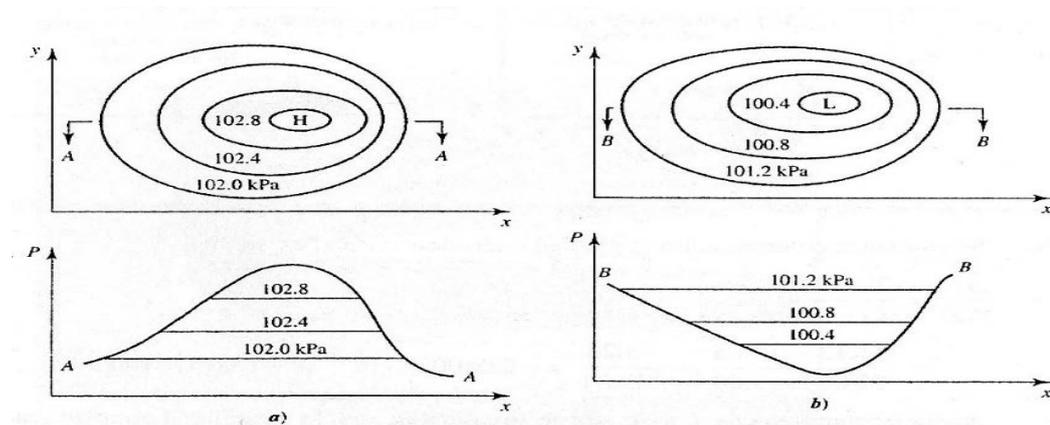


Figura 1.3: Áreas de presión alta y baja.

Fuente: (Davis & Masten, 2005)

c) Fuerza de Coriolis:

Conocida también como *fuerza deflectora de la rotación de la tierra*, como el viento se mueve desde las zonas de mayor a menor presión, está fuerza provocada por la rotación del planeta se mueve en ángulo recto a la dirección del viento y es proporcional a la velocidad del mismo (Henry & Heinke, 1999). La figura 1.4 a) nos indica la dirección del viento si no se produjera movimiento de la tierra, mientras 1.4 b) nos indica la dirección del viento en el hemisferio norte, la cual se dirige a la derecha de ésta.

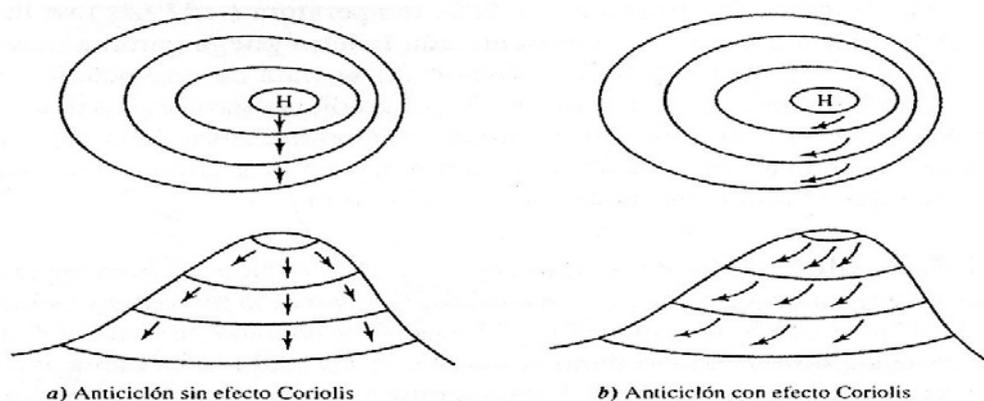


Figura 1.4: La fuerza de Coriolis.

Fuente: (Davis & Masten, 2005)

d) Nubosidad

Formación de gotitas de agua que se aglutinan alrededor de núcleos higroscópicos (ceniza volcánica, partículas de combustión o rayos ultravioleta), producto de un exceso de humedad de una porción de aire, que al ascender va aumentando su temperatura y cede su vapor de agua, hasta que sobrepasan el punto de saturación. El diámetro de las gotitas de agua que forman las nubes van desde los 0.006-0.127 mm (Aguilar, 2004).

e) Insolación solar

Es la cantidad de radiación solar total que incide sobre la superficie en una hora. Depende de la latitud, altitud, relieve y nubosidad. En la práctica se utiliza estos valores para poder establecer las clases de estabilidad

Los tipos de insolación son:

- i. *Insolación fuerte*: se trata de un día de verano despejado con el sol en lo alto (60° sobre el horizonte).
- ii. *Insolación moderada*: es un día de verano nublado, con el sol en una posición horizontal entre los $35-60^\circ$.
- iii. *Insolación débil*: es un día de verano nublado al atardecer, con el sol en una posición horizontal entre los $15-35^\circ$ sobre el horizonte, (OMS, 2000).

f) Turbulencia térmica

El calentamiento de la superficie de la tierra produce un calentamiento también del viento que produce una corriente de densidad de abajo hacia arriba, mientras que en la noche al estar el suelo frío y estar en contacto con el aire que se encuentra aún caliente, provoca el efecto contrario que en el día, (Davis & Masten, 2005).

g) Turbulencia mecánica

Es causada por las fluctuaciones aleatorias de la velocidad del viento, con respecto a la velocidad promedio, al fluir sobre objetos de tamaños y formas

diferentes (figura 1.5). La velocidad aumenta desde cero de la superficie hasta llegar a la gradiente de presión, (Davis & Masten, 2005).

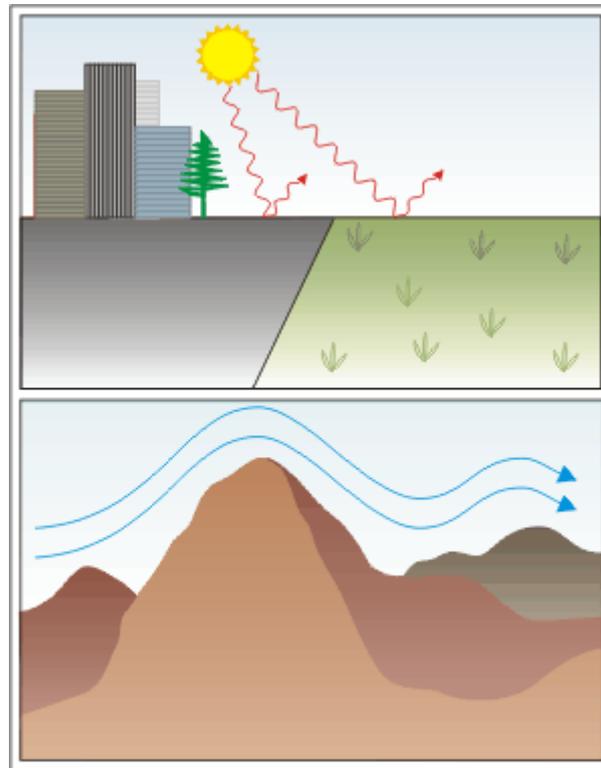


Figura 1.5: Turbulencia térmica (superior) y turbulencia mecánica (inferior).

Fuente: (OMS, 2000)

h) Velocidad del viento

Determina la concentración de contaminantes en la pluma, afectando la altura de la elevación de la pluma después de ser emitida. A medida que la velocidad del viento aumenta se produce la dilución de la pluma de contaminación y el efecto de que su ascensión disminuya, aumentando su concentración al ras del suelo (De Nevers, 1998)

i) Dirección del viento

Se define como el rumbo del viento que moverá a la pluma de contaminante a través del terreno local, se mide en grados en la dirección de las agujas del reloj a partir del norte verdadero (Gilbert & Wendell, 2008).

j) Gradiente vertical de temperatura

Se define como el gradiente en el que la temperatura del aire cambia con la altura. El verdadero gradiente vertical de temperatura de la atmósfera es aproximadamente de 6 a 7 °C por km (en la troposfera) pero varía mucho según el lugar y la hora del día. Una disminución de temperatura con la altura se define como un gradiente vertical negativo y un aumento de temperatura con la altura como uno positivo (OMS, 2000).

- i. *Gradiente adiabático seco*: en el proceso adiabático, la compresión da lugar al calentamiento, y la expansión al enfriamiento. La rapidez en la disminución de la temperatura al aumentar la altura, se conoce como el gradiente adiabático seco, el cual tiene un valor aproximado de $-1.00\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 100\text{ m}^{-1}$. En la figura 1.6 la gradiente adiabático seco se representa con una línea punteada, mientras que el gradiente térmico ambiental o temperatura de la atmósfera con una línea continua

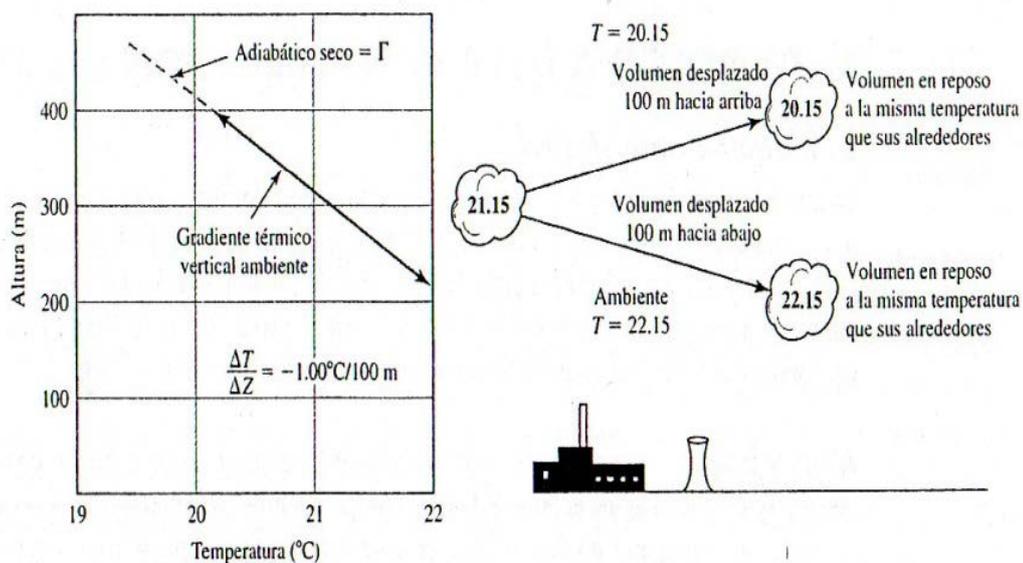


Figura 1.6: Gradiente vertical adiabático seco.

Fuente: (Davis & Masten, 2005)

- ii. *Gradiente vertical adiabático húmedo*: al elevarse, una porción de aire seco que contiene vapor de agua seguirá enfriándose en el gradiente vertical adiabático seco hasta que alcance su temperatura de condensación o punto de rocío. La figura 1.7 ilustra este nuevo gradiente, conocido como *gradiente vertical adiabático húmedo*. En la mitad de la troposfera, se estima un gradiente aproximado de 6 a 7 °C/1.000 m. (OMS, 2000).

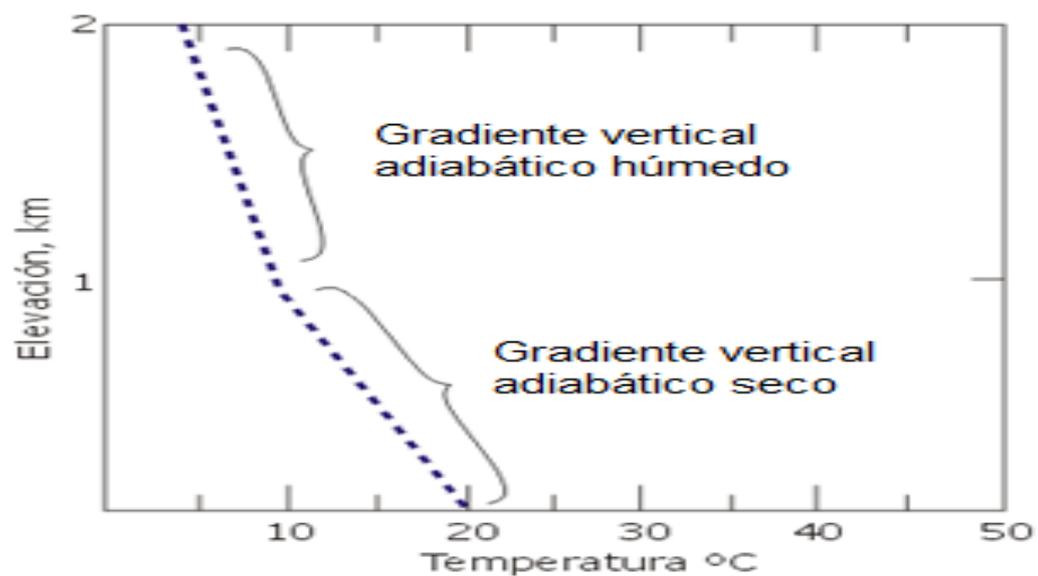


Figura 1.7: Gradiente vertical adiabático húmedo.

Fuente: (OMS, 2000)

k) Inversión

Se produce cuando la temperatura del aire aumenta con la altura, y está confinada a una capa relativamente superficial. Esto produce que una masa de aire muy estable y que la pluma de contaminación quede atrapada entre estas capas. (Gilbert & Wendell, 2008). Existen dos tipos de inversión principales que se deben a diversas interacciones atmosféricas y presentan diferentes períodos de duración, mismos que describen a continuación:

- i. *Inversión por radiación*: fenómeno característico de las noches despejadas, cuando el enfriamiento de la superficie terrestre ocurre

mucho más rápido que en una noche nublada, ya que irradia más fácilmente energía. La capa de aire que está en contacto con la superficie terrestre a su vez también sufre un enfriamiento, en la figura 1.8 se puede observar el desarrollo de una inversión por radiación. La capa de aire que se encuentra sobre la superficie de la tierra al encontrarse mucho más frío que el aire que se encuentra encima de ella, provoca la inversión, (Gilbert & Wendell, 2008).

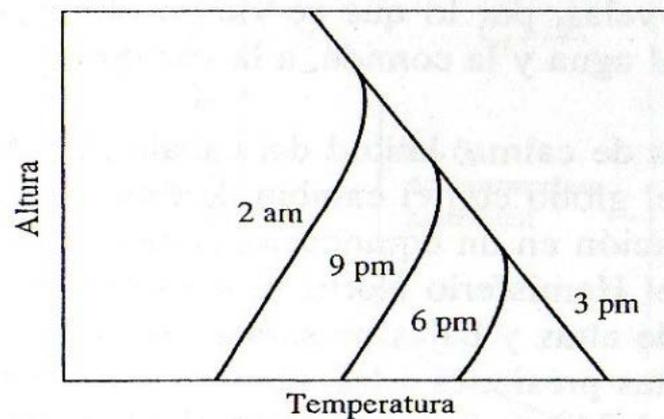


Figura 1.8: Desarrollo de una inversión por radiación.

Fuente: (Gilbert & Wendell, 2008)

- ii. *Inversión por subsidencia:* la inversión por subsidencia (ver figura 1.9) generalmente está asociada con los anticiclones (sistemas de alta presión) y son de larga duración. Se debe recordar que el aire de un anticiclón desciende y fluye hacia afuera con una rotación que sigue la dirección de las agujas del reloj. A medida que el aire desciende, la mayor presión existente en altitudes menores lo comprime y calienta en el gradiente vertical adiabático seco (OMS, 2000). En la figura 1.10 nos muestra un ejemplo en la cual al descender el aire, este se calienta, creando condiciones más tibias en altura que cerca de la superficie (inversión por temperaturas).

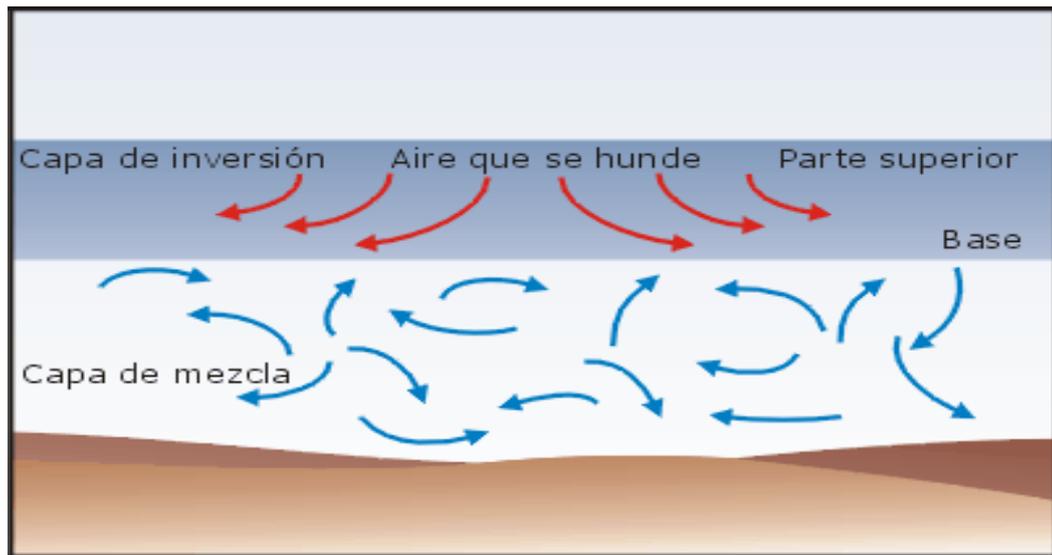


Figura 1.9: Inversión por subsidencia.

Fuente: (OMS, 2000)

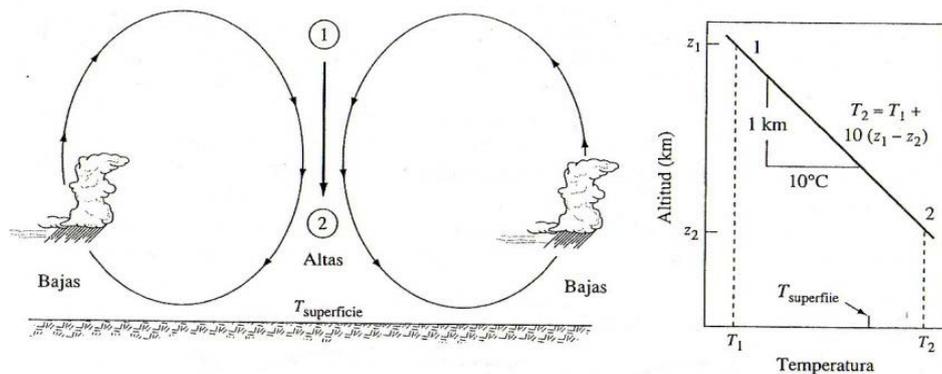


Figura 1.10: Inversión de temperaturas.

Fuente: (Gilbert & Wendell, 2008)

1.4.13. Influencias topográficas

Las características físicas de la superficie terrestre se denominan rasgos del terreno o topografía. Estos influyen en los procesos de calentamiento de la tierra, y el del flujo de aire que rodea a su superficie. Estos rasgos se pueden agrupar en cuatro categorías:

1.4.13.1. Terreno plano:

La turbulencia del viento sobre un terreno plano está limitada a la cantidad de accidentes de la superficie, ya sean naturales o hechos por el hombre (ver figura 1.11). Las áreas urbanas con construcciones densas y edificios altos ejercen una fuerza friccional grande sobre el viento haciendo que disminuya, cambie de dirección y se haga más turbulento (OMS, 2000). En la figura 1.12 se describe la variación de la gradiente del viento al exponerse sobre diferentes topografías.



Figura 1.11: Terreno plano.

Fuente: (OMS, 2000)

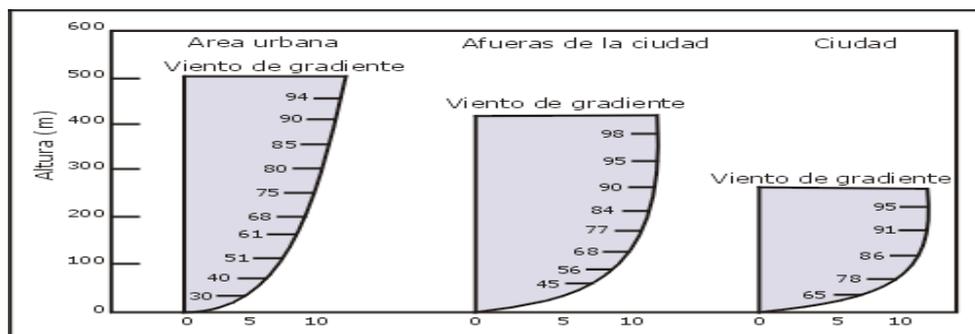


Figura 1.12: Ejemplos de la variación del viento según la altura sobre superficies con diferentes rasgos topográficos (las figuras son porcentajes de los vientos de gradiente).

Fuente: (Turner, 1970)

1.4.13.2. Montaña/valle:

Esta combinación también se denomina terreno complejo. La turbulencia térmica en un terreno con montañas y valles también guarda relación con el tamaño, la forma y la orientación de los rasgos. Como se indica en la figura 1.13, el aire tiende a elevarse sobre un obstáculo y trata de abrirse paso por los diferentes lados. En la noche, los cerros y las montañas producen flujos de vientos descendientes porque el aire es más frío en grandes elevaciones (Davis & Masten, 2005).

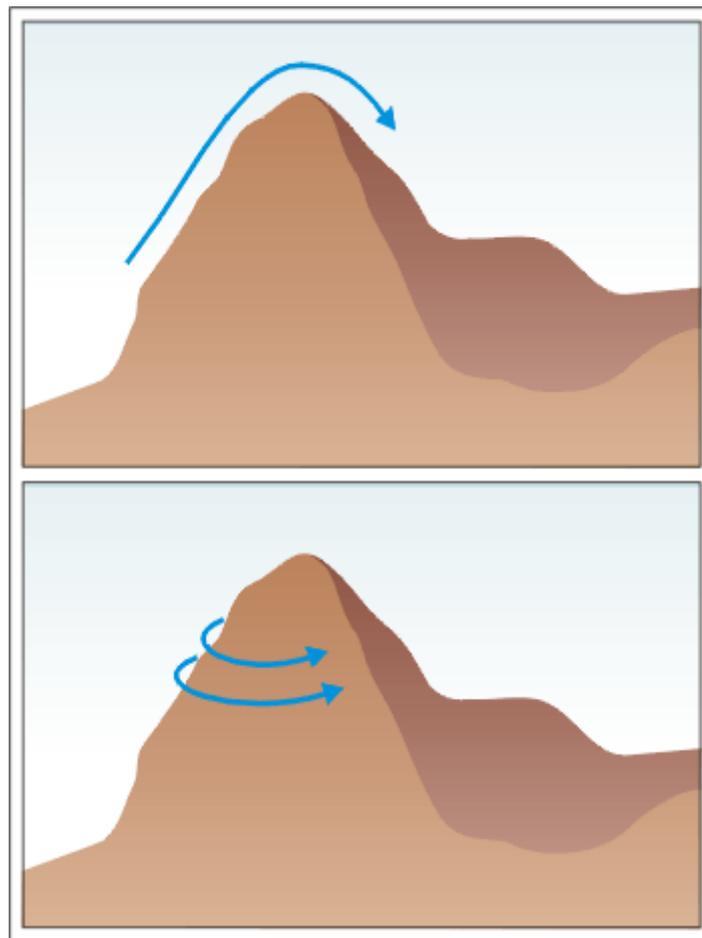


Figura 1.13: Flujo de viento sobre y alrededor de las montañas.

Fuente: (OMS, 2000)

Las montañas y los valles se calientan de forma desigual por la rotación del sol en el cielo (ver figura 1.14), con un lado iluminado y otro oscuro. El aire se eleva

sobre el lado iluminado y desciende sobre el oscuro. Al mediodía, se eleva, ya que se calientan ambos lados. Al final de la tarde, la situación es similar a la de la mañana, (OMS, 2000).

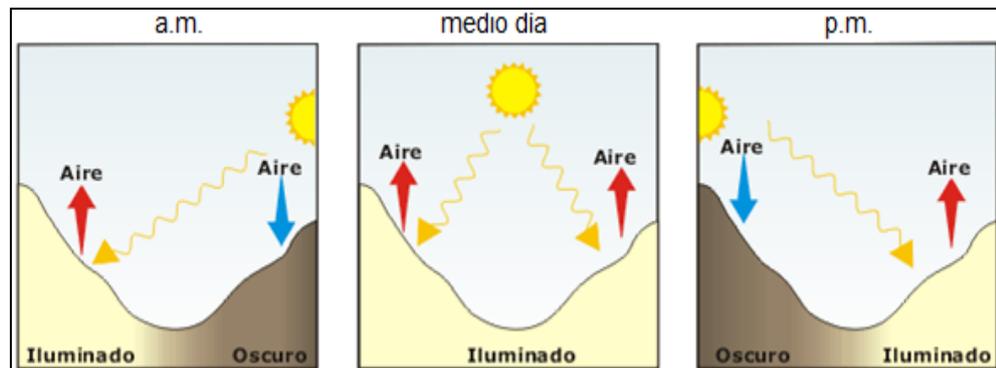


Figura 1.14: Turbulencia térmica en el valle (el aire se eleva cuando la tierra se ilumina).

Fuente: (OMS, 2000)

1.4.13.3. Tierra/agua:

En la figura 1.15 se observa que la circulación de aire durante la noche enfría la tierra mucho más rápido que el agua, desplazándose esta masa de aire hacia el agua, mientras que en la mañana la tierra se calienta mucho más rápido y el aire que se encuentra sobre ésta se desplaza hacia arriba, dejando un espacio que es reemplazado por el aire que proviene sobre la superficie del agua, (Bóveda, 2010).

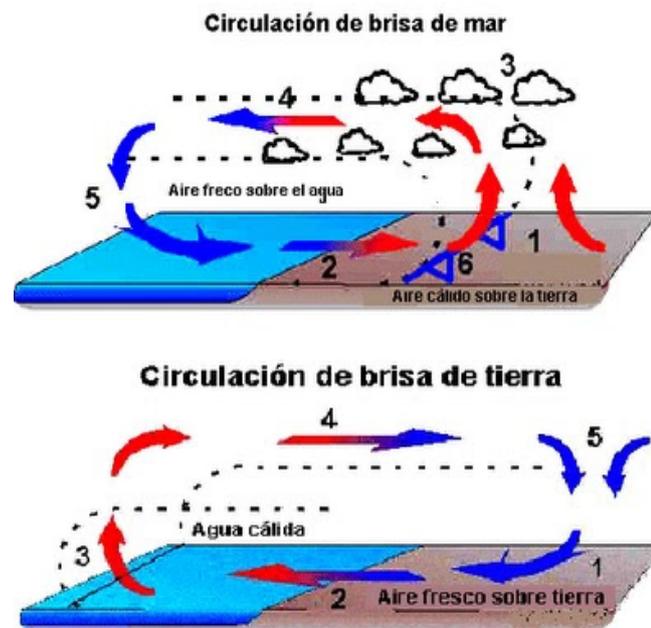


Figura 1.15: Circulación de la brisa de tierra y mar.

Fuente: (Bóveda, 2010)

Las plumas de contaminación que se liberan cerca de un cuerpo de agua pueden sufrir el fenómeno de *fumigación* (ver la figura 1.16), que es cuando la pluma se encuentra bajo una capa de inversión, y choca a su vez con un aire inestable, provocado por el calentamiento del suelo en la mañana. Cuando este aire alcanza la pluma, y a su vez la pluma alcance la capa, provoca que en algún punto sobre la tierra la pluma descienda al piso y se produzca una rápida acumulación de los contaminantes, (OMS, 2000).

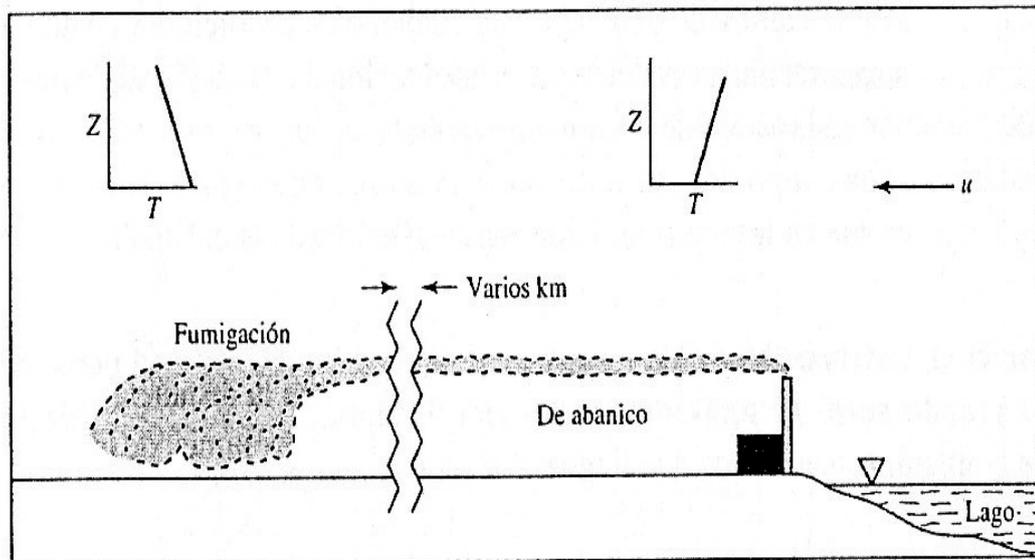


Figura 1.16: Efecto de la brisa de un cuerpo de agua sobre la dispersión de la pluma.

Fuente: (Davis & Masten, 2005)

1.4.13.4. Áreas urbanas

Las ciudades al estar rodeados de todo tipo de materiales de origen natural y antropogénico, absorben y retienen el calor de manera más eficiente que el suelo y la vegetación de las áreas rurales, como se observa en la figura 1.17. En la noche el área urbana continúa irradiando calor, ascendiendo y creando un domo sobre la ciudad. Este fenómeno se llama *isla calórica*. El área urbana empieza a enfriarse nuevamente antes del amanecer, y el ciclo nuevamente empieza (Davis & Masten, 2005)

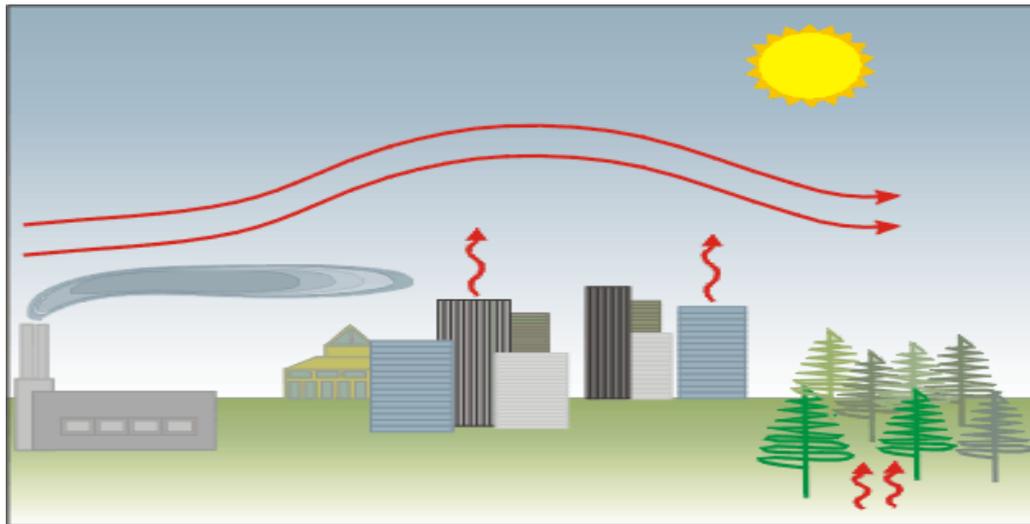


Figura 1.17: Turbulencia térmica y mecánica de las ciudades.

Fuente: (OMS, 2000)

1.4.14. Modelos de dispersión, características

Según Espert & López (2004), la modelización de contaminantes vertidos en cualquier medio receptor es una técnica para calcular y evaluar concentraciones aproximadas de uno o más contaminantes resultantes de diversas fuentes que descargan emisiones tales como gases y partículas a la atmósfera, en el espacio y en el tiempo, relacionados con una serie de variables independientes como emisiones a la atmósfera, condiciones meteorológicas y características del terreno, en la figura 1.18 se describe los pasos que se deben tomar para escoger el modelo a utilizar.

Su objetivo es la creación de un medio ficticio en el que se pueda experimentar situaciones, sin que sea necesario llegar a la realidad para observarlos. Los modelos pueden simular situaciones simples como una única fuente puntual, con un solo receptor y condiciones constantes; hasta condiciones complejas de varias fuentes, con varios receptores y variaciones de las condiciones.

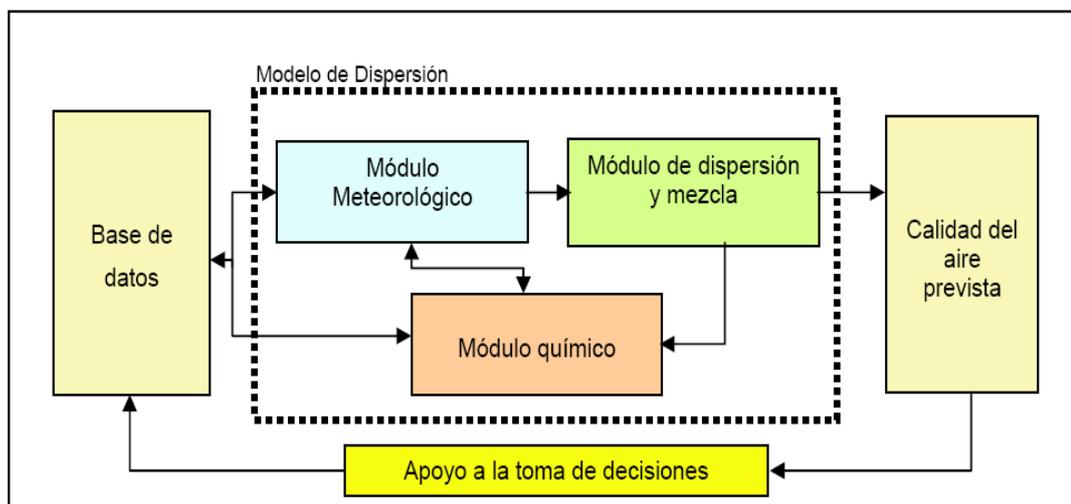


Figura 1.18: Esquema operacional de los modelos de dispersión y su integración al proceso de toma de decisiones.

Fuente: (Gallardo, 2003)

1.4.14.1. Clasificación de los modelos de dispersión

Según Peralta (2007), los modelos de dispersión se encuentran formando tres clases importantes:

- a) Los modelos empíricos: análisis estadístico de datos obtenidos de calidad del aire, datos de fuentes de emisión y datos meteorológicos registrados para una calidad específica.
- b) Los modelos semi-empíricos: para estudios de contaminación con tiempos promedio cortos o largos. Su nombre se debe a que utilizan principios científicos como por ejemplo el de conservación de energía, pero se apoyan en parámetros definidos y obtenidos de manera empírica.
- c) Los modelos numéricos: se obtienen a partir de características químicas y físicas, relacionadas con fenómenos de transporte, difusión, transformación y remoción de los contaminantes.

1.4.14.2. Tipos de modelos de dispersión

Los tipos de modelos descritos en la tabla 1.7, son los siguientes:

- a) Modelos estadísticos: según Peralta (2007), se basa en técnicas estadísticas o semi-empíricas para analizar tendencias, relaciones de calidad del aire, mediciones atmosféricas y predecir situaciones de contaminación de corto

plazo. Frecuentemente son empleadas las técnicas estadísticas cuando no se dispone de una adecuada interpretación de los procesos físico-químicos o cuando no se tiene una completa base de datos.

- b) Modelos de caja: según Ulriksen (2005), describe que el modelo de caja es un modelo simple, usado para estimaciones de concentraciones de carácter general. Asume que los contaminantes que son emitidos a la atmósfera se mezclan uniformemente en un volumen o caja de aire de dimensiones finitas (ver figura 1.19). En este modelo se establecen dimensiones con viento a favor, viento de costado y verticales de la caja y el período de tiempo de emisión de contaminantes.

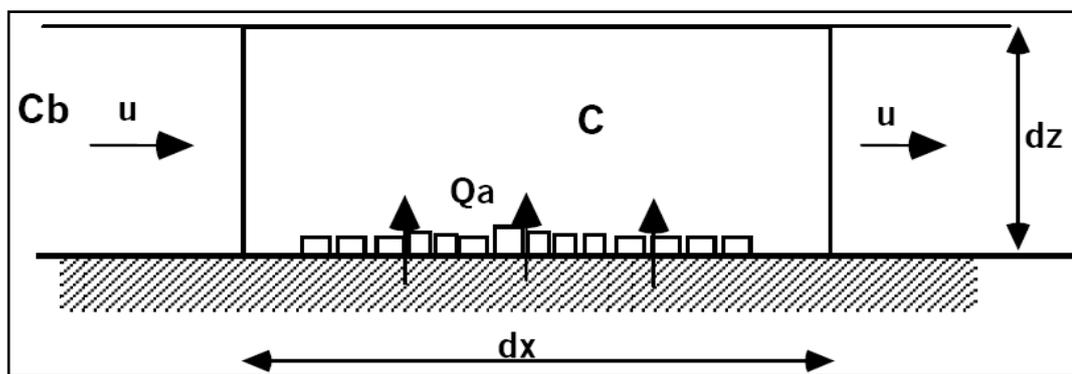


Figura 1.19: Esquema del modelo de caja.

Fuente: (Ulriksen, 2005)

Las dimensiones de la caja son Δx , Δy , Δz ; se producen desde la superficie a una tasa Q_a y se mezclan en forma homogénea en toda la caja, dando una concentración uniforme C . El aire entra a la caja por una de sus caras, con velocidad u y nivel de concentración C_b (nivel base). Por la cara opuesta, el aire sale con velocidad u y concentración C .

La conservación de masa del contaminante en estudio, aplicada a la caja, corresponde a la relación:

$$\Delta m_{\text{contaminante en la caja}} = \sum Qm_{\text{entra}} - \sum Qm_{\text{sale}}$$

La ecuación que expresa esa relación es

$$\frac{d(C \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z)}{dt} = u \cdot C_b \cdot \Delta y \cdot \Delta z + Q_a \cdot \Delta x \cdot \Delta y - u \cdot C \cdot \Delta y \cdot \Delta z dt$$

En condiciones estacionarias (sin cambios en el tiempo) (Ec. 1.1) : un equilibrio entre los flujos de entrada y salida de la caja, resultando una concentración C igual a:

$$C = C_b + \frac{Q_a \cdot \Delta x}{u \cdot \Delta z} \quad (\text{Ec. 1.2})$$

A mayor velocidad de viento y mayor altura de mezcla, la concentración es menor. A mayor emisión, la concentración resultante es mayor.

El término del denominador ($u \cdot \Delta z$) se denomina factor de ventilación. Su valor inverso corresponde a una medida del potencial de contaminación del lugar.

- c) Modelos numéricos-químicos: según Peralta (2007), se requiere bases de datos extensas y complejas, por lo que su aplicación es muy restringida, aunque son más apropiados que los gaussianos para análisis de una fuente de área urbana cuando están involucrados contaminantes reactivos que forman contaminantes secundarios.
- d) Modelos gaussianos: determinan la difusión de los penachos de chimenea, suministrando excelentes aproximaciones matemáticas a la dispersión

Tabla 1.7: Clasificación y tipos de modelos de dispersión.

Clasificación	Tipos de modelos
Modelos empíricos	Modelos estadísticos Modelos de caja
Modelos semi-empíricos	Modelos gaussianos de emisión continua o discreta
Numéricos	Modelos numéricos-químicos

Fuente: (Peralta, 2007)

1.4.15. Modelo gaussiano

Es el modelo más utilizado y recomendado por la U.S. Environmental Protection Agency. García (2006), nos indica que es utilizado en el análisis de la difusión de

contaminantes de tipo no reactivo. Permite obtener aproximaciones matemáticas de la dispersión de los contaminantes, presentes en los penachos de chimeneas de emisión continua; así como para simulaciones contaminantes de uno a menos de cincuenta kilómetros. Como desventaja los coeficientes del modelo no son aplicables para áreas de menos de 100 metros cercanas al punto de emisión y en condiciones estacionarias. La dispersión de los emisiones se analiza como una distribución normal, en donde los contaminantes se dirigen en las direcciones Y y Z, con la mayor concentración en el centro del penacho (ver figura 1.20).

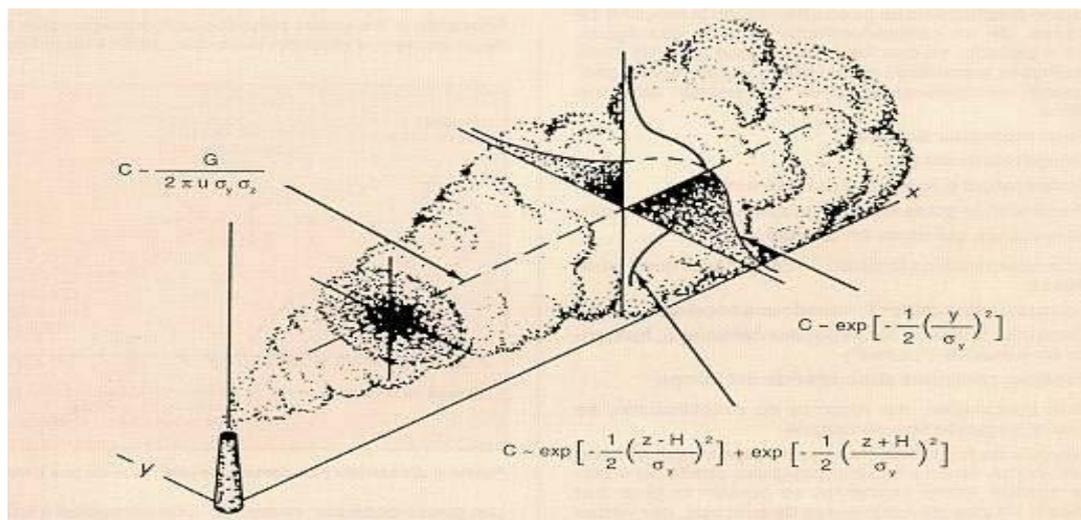


Figura 1.20: Descripción gráfica de la modelación gaussiana de la pluma de contaminación de fuentes fijas.

Fuente: (OMS, 2000)

1.4.15.1. Ecuaciones básicas

Según Ulriksen (2005), basándose en la ecuación de difusión (ecuación 1.3) se puede encontrar solución de la forma:

$$C_{(x,y,z)} = \frac{Q}{u} * f_y(x, y) * f_z(x, z) \quad (\text{Ec. 1.3})$$

Donde:

Q= tasa de emisión del contaminante (ej. g/s)

u= velocidad del viento (m/s)

f_y, f_z = funciones que describen la dispersión en torno al eje del penacho, en el sentido horizontal y vertical

Suponiendo que las condiciones de la atmósfera no cambian en el tiempo (la velocidad del aire es constante en magnitud y dirección) y las características de la turbulencia se mantienen estacionarias y homogéneas. Las funciones de dispersión se suponen son de tipo gaussiano (distribución estadística normal). En ausencia de una superficie que limite la dispersión y eligiendo el eje x orientado a lo largo del vector velocidad (ver figura 1.21), la ecuación de un penacho gaussiano para la dispersión turbulenta de contaminantes, emitidos por una fuente puntual aislada, es:

$$C_{(x,y,z)} = \frac{Q}{2\pi * u * \sigma_z * \sigma_y} * \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) * \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (\text{Ec. 1.4})$$

$$H = h + dh \quad (\text{Ec. 1.5})$$

Donde:

H = es la altura efectiva del penacho

h = altura de la chimenea (altura física de la fuente)

dh = ascenso adicional por empuje térmico (sobre elevación de la pluma Δh)

σ_y = coeficiente de dispersión horizontal

σ_z = coeficiente de dispersión vertical

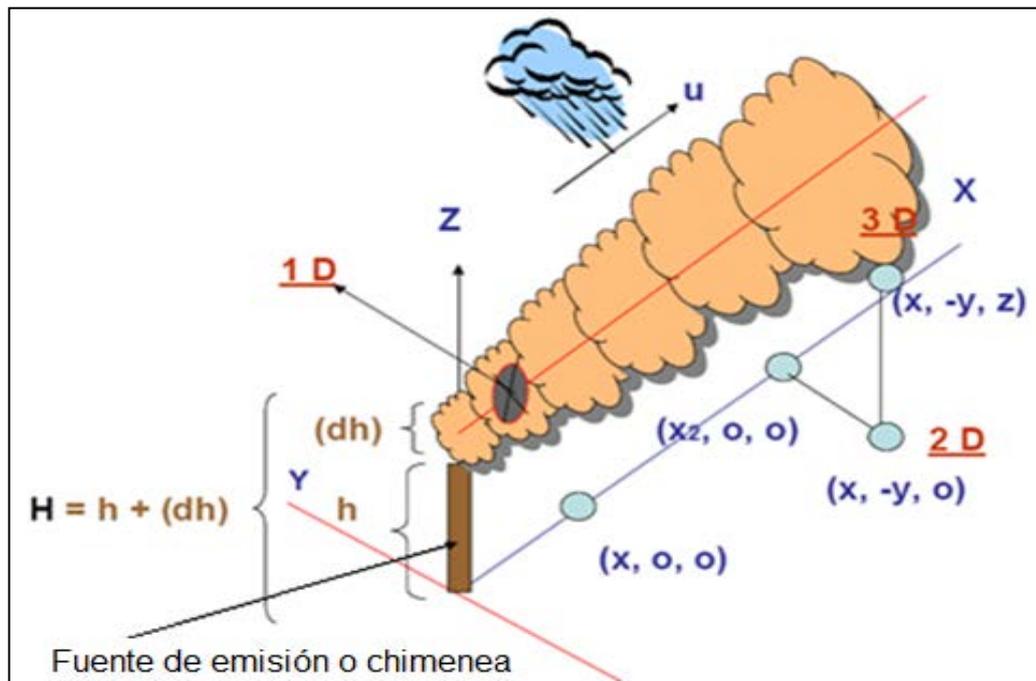


Figura 1.21: Geometría básica y sistema de coordenadas de la ecuación gaussiana de la pluma.

Fuente: (Ulriksen, 2005)

Es importante tomar en cuenta incorporar las siguientes suposiciones para el análisis:

a) Tasa de emisiones de la fuente

Es constante, se obtiene multiplicando directamente la concentración en ppm y la densidad del gas contaminante y el flujo volumétrico

b) La velocidad de viento

Es contante en el tiempo. La velocidad del viento a la altura de la fuente, se determina a través de la ecuación de la ley de potencias del viento (Peralta, 2006):

$$u_s = u_{ref} \left(\frac{hs}{z_{ref}} \right)^p \quad \text{Ec. 1.6}$$

Donde:

u_s = velocidad del viento a la altura de la fuente

u_{ref} = velocidad del viento observada

z_{ref} = altura de medición de referencia

h_u = altura de la emisión de la chimenea

p = exponente del perfil del viento (valores de p se basan en la estabilidad y clases de velocidad del viento); los exponentes se describen en la tabla 1.8

Tabla 1.8: Exponentes del perfil del viento.

Categoría de estabilidad	Exponente rural	Exponente urbano
A	0.07	0.15
B	0.07	0.15
C	0.10	0.20
D	0.15	0.25
E	0.35	0.30
F	0.55	0.30

Fuente: (Peralta, 2006)

c) Estabilidad atmosférica:

Según Davis & Masten (2005), es la propiedad del aire atmosférico que describe su tendencia a resistir o ampliar el movimiento vertical. Está relacionado con la velocidad del viento y el gradiente térmico vertical. Se caracteriza por cuatro condiciones básicas que describen la estabilidad general de la atmósfera.

- i. *Condiciones inestables:* la porción de aire que tiende a elevarse, hasta el gradiente adiabático seco el cual se enfría cerca del punto de rocío, por lo que el aire que se eleva es más cálida que el aire circundante. Estas condiciones se producen durante los días soleados con vientos de bajas velocidades y fuerte insolación.
- ii. *Condiciones neutras:* no propician ni inhiben el movimiento del aire, cuando el gradiente vertical de la temperatura del ambiente es el mismo que el gradiente vertical adiabático seco. Se produce durante los días con viento o cuando una capa de nubes impide el calentamiento o enfriamiento fuerte de la superficie terrestre.

- iii. *Condiciones estables*: cuando el gradiente vertical ambiental es menor que el gradiente vertical adiabático, el aire es estable y resiste la circulación vertical. El aire que se eleva verticalmente permanecerá más frío y, por lo tanto, más denso que el aire circundante. Una vez que se retira la fuerza de elevación, el aire regresa a su posición original. Las condiciones estables se producen durante la noche, cuando el viento es escaso o nulo. Cada una de las condiciones son descritas en la figura 1.22, como las distribuciones de la temperatura atmosférica ambiental en los movimientos verticales.

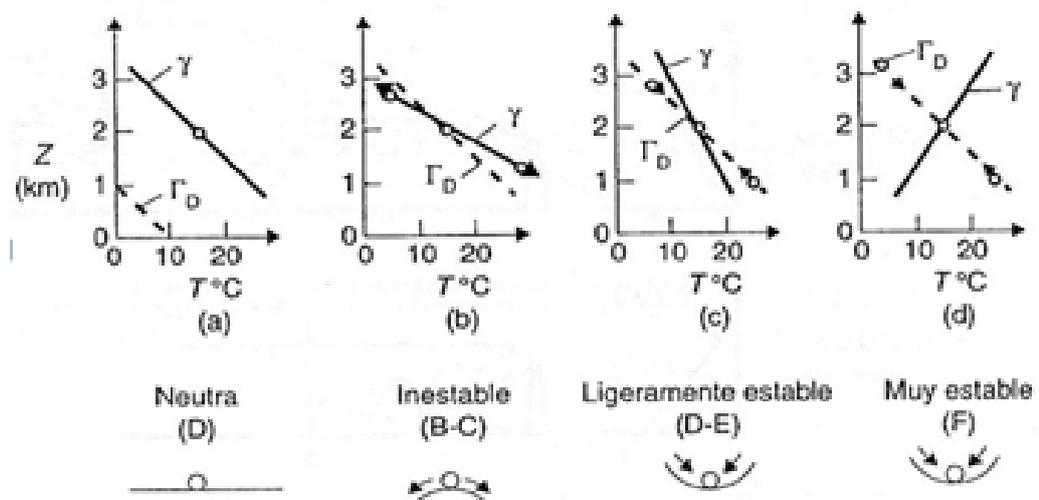


Figura 1.22: Tasas de decaimiento atmosférico y estabilidad.

Fuente: (Henry & Heinke, 1999)

En la figura 1.23 observamos el perfil de la columna contaminante de fuentes fijas, promediado en el tiempo correspondiente a cada uno de los regímenes de estabilidad. Cuando los movimientos verticales se intensifican, la sección transversal de la columna promediada en el tiempo; esto significa una mayor dispersión y disminución de la concentración.

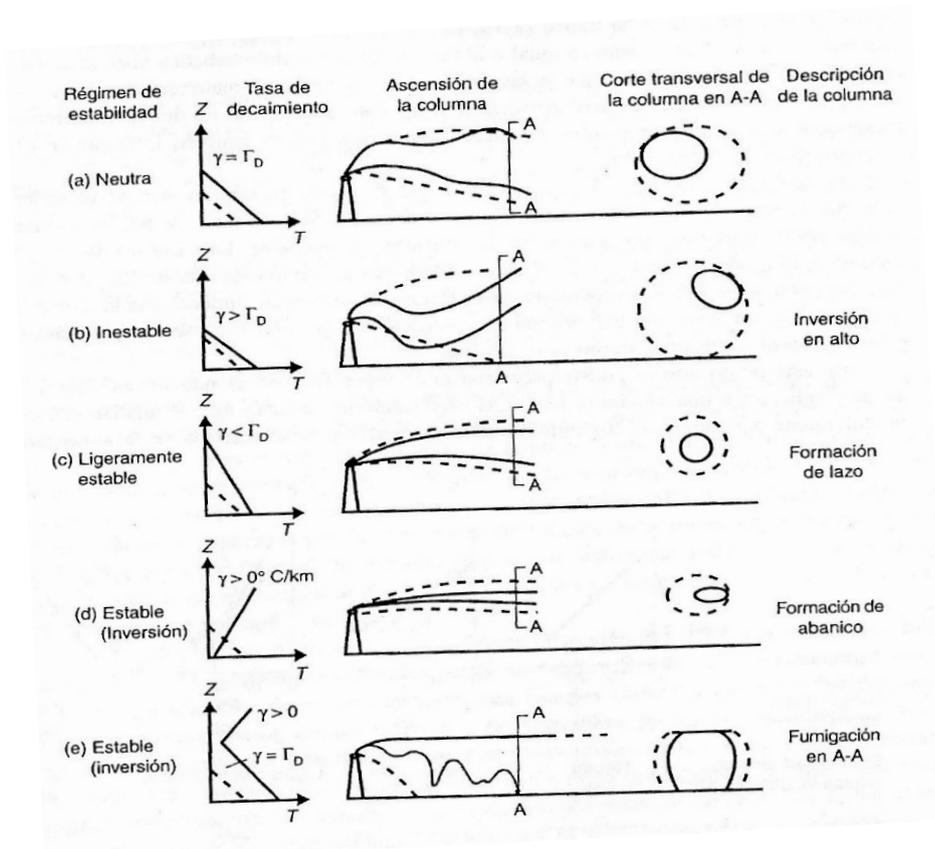


Figura 1.23: Descripción de columnas para una selección de regímenes de estabilidad atmosférica.

Fuente: (Henry & Heinke, 1999)

Los factores determinantes de las clases de estabilidad son:

- La velocidad del viento
- La nubosidad
- Flujo neto de radiación que llega a la tierra

c.1) Clasificaciones de estabilidad atmosférica

Según Espert & López (2004), como la estabilidad de la atmósfera depende de la diferencia de temperatura entre una porción de aire y el aire que la rodea, 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. Para estimar, se usa las denominadas clases de estabilidad Pasquill-Gifford, mismas que se

encuentran incluidas en la tabla 1.9; como se observa, las estabilidades A, B y C representan las horas diurnas con condiciones inestables. La estabilidad D, los días o noches con cielo cubierto con condiciones neutrales. Las estabilidades E y F, las condiciones nocturnas estables, y se basan en la cantidad de cobertura de nubes. Por consiguiente, la clasificación A representa condiciones de gran inestabilidad y la clasificación F, de gran estabilidad.

Tabla 1.9: Clasificación de estabilidad atmosférica.

Viento superficial Velocidad ^a (m/s)	Insolación			Índice de nubosidad ^e	
	Intenso ^b	Moderada ^c	Baja ^d	Nublado $\geq 4/8$	Claro $\geq 3/8$
$V < 2$	A	A-B	B	E	F
$\geq 2 - < 3$	A-B	B	C	E	F
$\geq 3 - < 5$	B	B-C	C	D	E
$\geq 5 - < 6$	C	C-D	D	D	D
≥ 6	C	D	D	D	D

Fuente: (Espert & López, 2004)

Donde

a= superficie de viento medida a 10 m sobre el suelo

b= día de verano despejado con sol a 60° sobre el horizonte

c= día de verano nublado, con el sol $35-60^\circ$ sobre el horizonte

d= día de verano nublado o en la caída de la tarde, con el sol $15-35^\circ$ sobre el horizonte

e= índice de nubosidad definido como la fracción de cielo cubierta por nubes

Para las condiciones A, B, C, D, E, F se detalla los valores obtenidos para cada uno

A = extremadamente inestable

B = inestabilidad moderada

C = ligeramente inestable

D = neutra

E = ligeramente estable

F = moderadamente estable

c.2) Coeficientes o parámetros de dispersión

Datos de alimentación para la ecuación de distribución gaussiana. Se refiere al empleo de relaciones semi-empíricas, considerando las distintas categorías de estabilidad atmosférica y la distancia viento debajo de la fuente en que se encuentra el receptor. Se calcula mediante la fórmula de Gary A. Briggs. Las ecuaciones para el cálculo de los valores σ_y (dispersión vertical) y σ_z (dispersión horizontal), varían en función de la estabilidad atmosférica y el tipo de zona (urbana o rural), descritos en las tablas 1.10, 1.11, 1.12, 1.13. Se observa la relación de las estabilidades con los coeficientes de dispersión, donde la estabilidad afecta la dispersión vertical más radicalmente que la horizontal (Pal, 1999).

Tabla 1.10: Cálculo de σ_y para zona urbana.

Clase de estabilidad	σ_y (metros)
A	$0,32x (1,0+0,0004x)^{-1/2}$
B	$0,32x (1,0+0,0004x)^{-1/2}$
C	$0,22x (1,0+0,0004x)^{-1/2}$
D	$0,16x (1,0+0,0004x)^{-1/2}$
E	$0,11x (1,0+0,0004x)^{-1/2}$
F	$0,11x (1,0+0,0004x)^{-1/2}$

Fuente: (Pal, 1999)

Tabla 1.11: Cálculo de σ_y para zona rural.

Clase de estabilidad	σ_y (metros)
A	$0,22 x (1,0 + 0,0001 x)^{-1/2}$
B	$0,16 x (1,0 + 0,0001 x)^{-1/2}$
C	$0,11 x (1,0 + 0,0001 x)^{-1/2}$
D	$0,08 x (1,0 + 0,0001 x)^{-1/2}$
E	$0,06 x (1,0 + 0,0001 x)^{-1/2}$
F	$0,04 x (1,0 + 0,0001 x)^{-1/2}$

Fuente: (Pal, 1999)

Tabla 1.12: Cálculo de σ_z para zona urbana.

Clase de estabilidad	σ_z (metros)
A	$0,24x (1,0+0,0004x)^{-1/2}$
B	$0,24x (1,0+0,0004x)^{-1/2}$
C	$0,20x$
D	$0,14x (1,0+0,0004x)^{-1/2}$
E	$0,08x (1,0+0,0004x)^{-1/2}$
F	$0,08x (1,0+0,0004x)^{-1/2}$

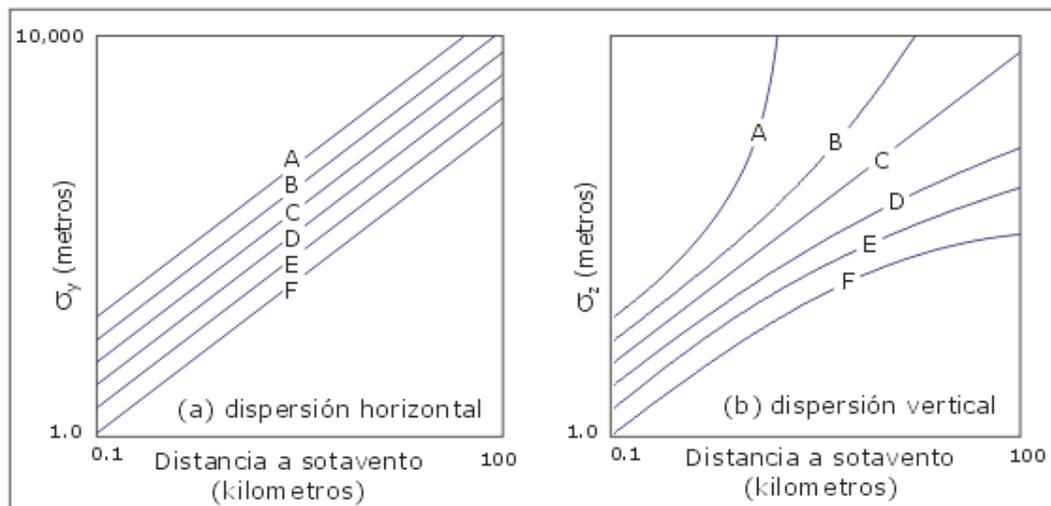
Fuente: (Pal, 1999)

Tabla 1.13: Cálculo de σ_z para zona rural.

Clase de estabilidad	σ_z (metros)
A	$0.20 x$
B	$12 x$
C	$0.08 x (1.0 + 0.0002 x)^{-1/2}$
D	$0.06 x (1.0 + 0.0015 x)^{-1/2}$
E	$0.03 x (1.0 + 0.0003 x)^{-1/2}$
F	$0.016 x (1.0 + 0.0003 x)^{-1/2}$

Fuente: (Pal, 1999)

En la figura 1.4 se visualiza las clases de estabilidad de acuerdo a la distancia vs. los coeficientes

**Figura 1.24:** Coeficientes de dispersión horizontal y vertical.

Fuente: (Turner, 1970)

d) Altura efectiva de emisión

Según Gilbert & Wendell (2008), la altura final de la pluma, conocida como altura efectiva de chimenea (H), es la suma de la altura física de la chimenea (h_s) y la elevación de la pluma (Δh). En realidad, la elevación de la pluma se estima a partir de la distancia existente hasta la línea central imaginaria de la pluma. La elevación de la pluma depende de las características físicas de la chimenea y del efluente (gas de chimenea). La diferencia de temperatura entre el gas de la chimenea (T_s) y el aire ambiental (T_a) determina la densidad de la pluma, que influye en su elevación. Además, la velocidad de los gases de la chimenea, que es una función del diámetro de la chimenea y de la tasa volumétrica del flujo de los gases de escape, determina el momento de la pluma (ver figura 1.25).

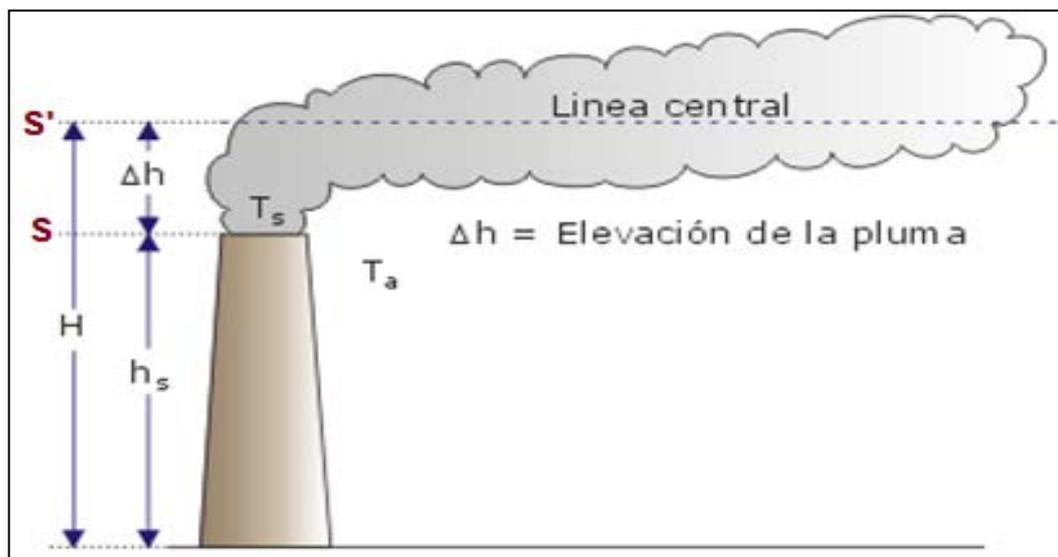


Figura 1.25: Elevación de la pluma.

Fuente: (OMS, 2000)

La elevación del penacho se calcula mediante el parámetro de Briggs para la fuerza ascensional del flujo (F_b), se expresa en m^4/s^2 .

$$F_b = g \cdot V_s \cdot D_s^2 \left(\frac{T_s - T_a}{T_s} \right) \quad \text{Ec.1.7}$$

Donde:

F_b = parámetro de Boyantes [m^4/s^3]

V_s = velocidad de salida de los gases [m/s]

D_s = diámetro de la chimenea [m]

T_s = temperatura de salida de los gases [K]

T_a = temperatura atmosférica [K]

a) Atmósferas neutrales e inestables: el cálculo de Δh se basa en Fb :

i. Si $Fb < 55$, la ecuación a utilizar es:

$$\Delta h = 21.4 \left(\frac{Fb^{3/4}}{u} \right) \quad \text{Ec.1.8}$$

ii. Si $Fb \geq 55$, la ecuación a utilizar es:

$$\Delta h = 38.7 \left(\frac{Fb^{3/5}}{u} \right) \quad \text{Ec.1.9}$$

b) Atmósferas estables: el cálculo de Δh para este tipo de atmósfera, se encuentra en función del gradiente de temperatura:

$$\Delta h = 2.6 \left(\frac{Fb}{u \cdot S} \right)^{1/3} \quad \text{Ec.1.10}$$

Donde:

S = parámetro de estabilidad, que se calcula:

$$S = \frac{g}{T_a} [T_{adi} - T_{amb}] \quad \text{Ec.1.11}$$

Donde:

T_a =temperatura ambiente

T_{adi} = gradiente de temperatura adiabático (9.8°C/km)

T_{amb} = gradiente de temperatura ambiente

1.4.16. Instrumentos meteorológicos

Según OMS (2000), la medición y el registro de las variables meteorológicas permiten obtener información necesaria para controlar la descarga de los contaminantes del aire en la atmósfera y para comprender el transporte y la dispersión de los contaminantes emitidos al aire. Estas variables pueden servir para hacer predicciones cualitativas y cuantitativas sobre las concentraciones de contaminantes en el aire en exteriores.

1.4.16.1. Anemómetro

Por lo general, la velocidad del viento se usa junto con otras variables para derivar las categorías de la estabilidad atmosférica usadas en las aplicaciones de los modelos de la calidad del aire. Se usa el anemómetro para medir la velocidad del viento (ver figura 1.26).

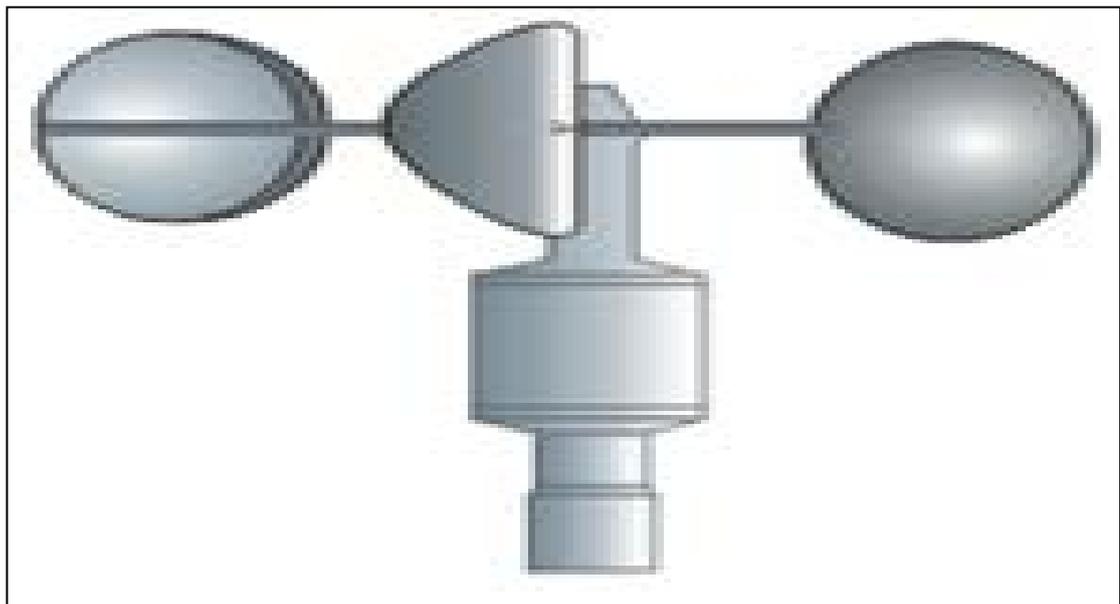


Figura 1.26: Anemómetro.

Fuente: (OMS, 2000)

1.4.16.2. Paleta de viento

El instrumento con el cual se determina la dirección del viento es conocido como paleta de viento, (ver figura 1.27).

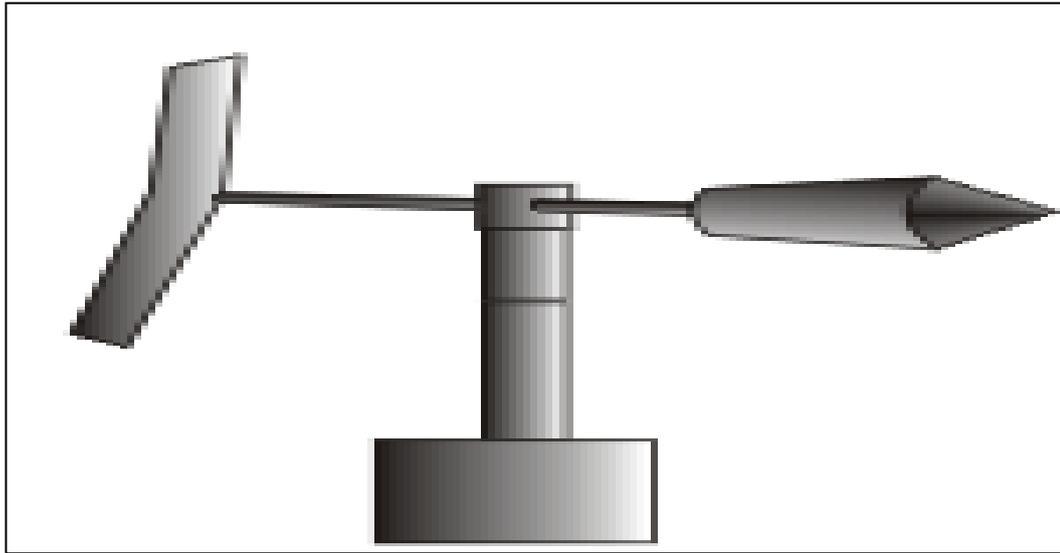


Figura 1.27: Paleta de viento.

Fuente: (OMS, 2000)

1.4.16.3. Rosa de los vientos

La rosa de los vientos es la representación gráfica del comportamiento de la velocidad y la del viento. En la figura 1.28 se presenta el diagrama típico de la rosa de los vientos por direcciones del viento, clasificadas en primarias y secundarias.

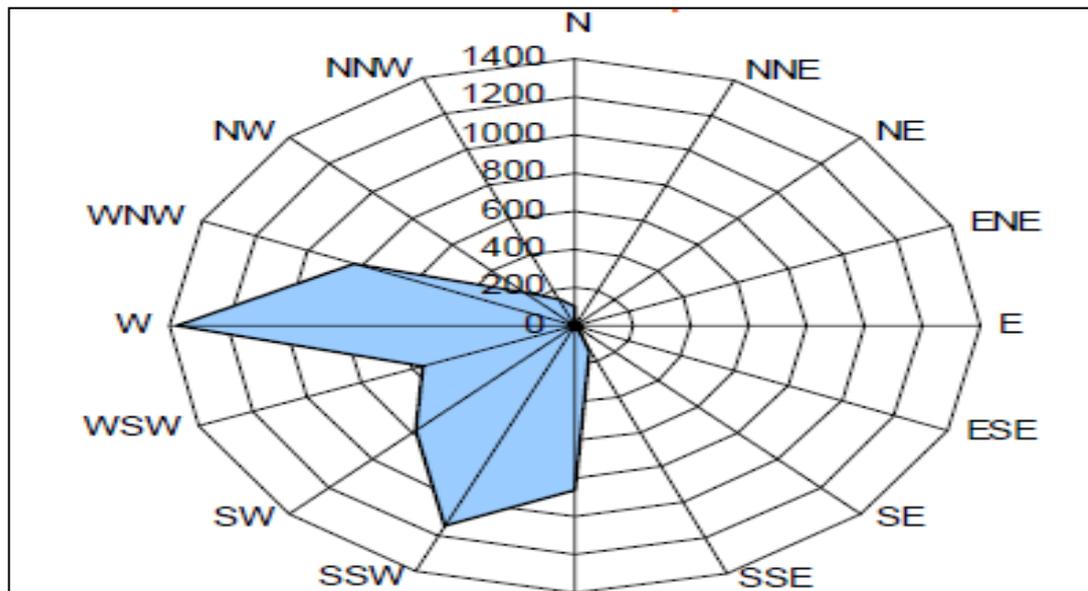


Figura 1.28: Rosa de los vientos, frecuencia por direcciones.

Fuente: (Termoesmeraldas, 2009)

1.4.17. Instrumentos informáticos

1.4.17.1. AERMET

Es un software que mediante algoritmos trabaja como un preprocesador para la organización de datos meteorológicos referentes a observaciones superficiales por hora, sondeos de la atmósfera superior dos veces al día y con los datos de una medición meteorológica específica de sitio, de acuerdo al formato utilizado por el software de modelación de dispersión de contaminantes atmosféricos AERMOD. Los datos meteorológicos mínimos que necesita el programa para preprocesar son:

- Velocidad del viento,
- dirección del viento,
- nubosidad y
- temperatura

El programa utiliza tres etapas para procesar la información

- 1) En la primera, recoge los datos y los organiza mediante varios controles de evaluación de calidad.
- 2) En la segunda etapa los datos superficiales obtenidos por períodos de 24 horas y los datos específicos del sitio se almacena en un solo archivo.
- 3) En la tercera etapa se produce la lectura del combinado de datos meteorológicos y se estima los parámetros de capa límite, necesarios para el AERMOD. Al final se generan dos archivos: un archivo de estimaciones de los parámetros de la capa límite por hora y un archivo de observaciones de múltiples niveles de velocidad y dirección del viento, temperatura y desviación estándar de los componentes fluctuantes del viento (U.S. Environmental Protection Agency, 2004).

1.4.17.2. WRPLOT View

Software versión libre que mediante datos meteorológicos básicos como velocidad y dirección del viento, temperatura y nubosidad, desarrolla una rosa de los vientos, permitiendo la estimación de la dirección y velocidad a la que el viento se mueve sobre el territorio de estudio. Permite exportar las rosas de los vientos con Google Earth a la zona (U.S. Environmental Protection Agency, 2011).

1.4.17.3. Screen View

Es un programa de versión libre que permite la modelación gaussiana de contaminantes atmosféricos no reactivos, utilizando una frecuencia de datos meteorológicos, que dan como resultado concentraciones de dispersiones cercanas a la realidad, (U.S. Environmental Protection Agency, 2007).

1.4.17.4. AERMOD

Software que permite estimar de forma gaussiana la dispersión de contaminantes atmosféricos no reactivos provenientes de fuentes fijas. A diferencia de los anteriores programas modeladores de dispersión compleja de fuente industrial que trabajan con una interfaz en MS-DOS, AERMOD es “amigable” con el usuario ya que permite combinar los datos meteorológicos procesados por AERMET con datos de emisiones industriales, presentando resultados gráficos que combinan la simulación de las localizaciones geográficas de los sitios de estudio con la dispersión de la concentración de los gases, en Google Earth (U.S. Environmental Protection Agency, 2004).

1.4.17.5. Base matemática y algorítmica de los software Screen View y AERMOD

Los software Screen View y AERMOD se basan matemática en el modelo gaussiano, donde la ecuación utilizada determina las concentraciones a nivel del suelo bajo la parte céntrica de la pluma de forma gaussiana, la cual se describe:

$$X = Q / (2\pi\mu_s\sigma_y\sigma_z) \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z_r - h_e}{\sigma_z}\right)^2\right] + \sum_{N=1}^k \left[\begin{array}{l} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z_r + h_e - 2Nz_i}{\sigma_z}\right)^2\right] \\ + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z_r + h_e - 2Nz_i}{\sigma_z}\right)^2\right] \\ + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z_r - h_e - 2Nz_i}{\sigma_z}\right)^2\right] \\ + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z_r + h_e + 2Nz_i}{\sigma_z}\right)^2\right] \end{array} \right] \right\} \quad \text{Ec.1.12}$$

Donde:

X = concentración, en g/m^3 .

Q = emisión promedio g/s .

u_s = velocidad del viento a la altura de la chimenea, en m/s .

σ_y = parámetro de la dispersión lateral, en m .

σ_z = altura del receptor desde el suelo, en m .

h_e = altura de la parte céntrica de la pluma, en m .

z_j = altura de mezcla, en m .

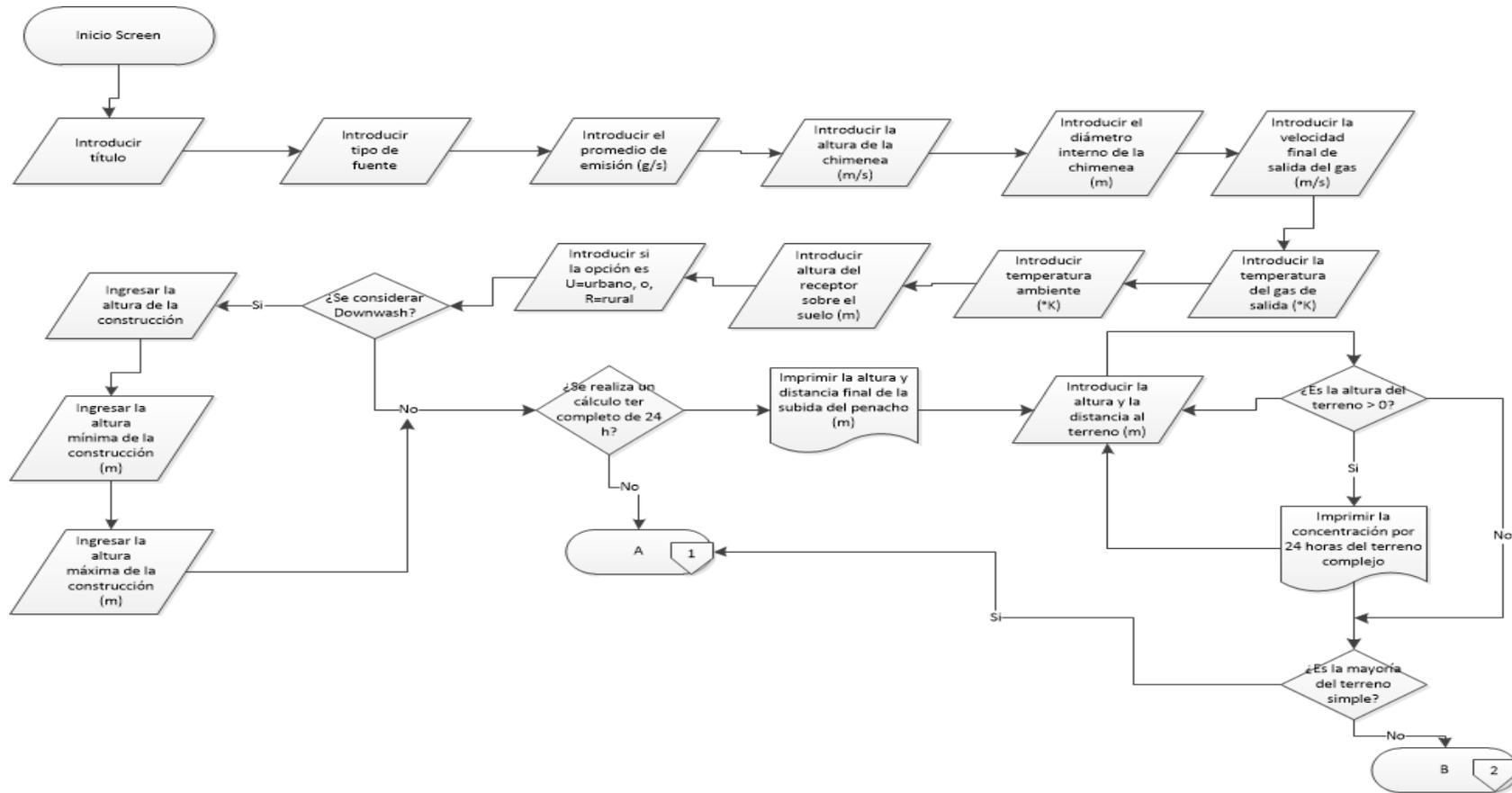
k = límite de la suma para reflexiones múltiples de la pluma fuera del suelo y la inversión elevada, usualmente ≤ 4 .

Estos software de modelación se los conoce con las siglas en inglés ISC3 que significa “modelos complejos de fuentes industriales”. Los dos tipos de datos necesarios para procesar la dispersión son:

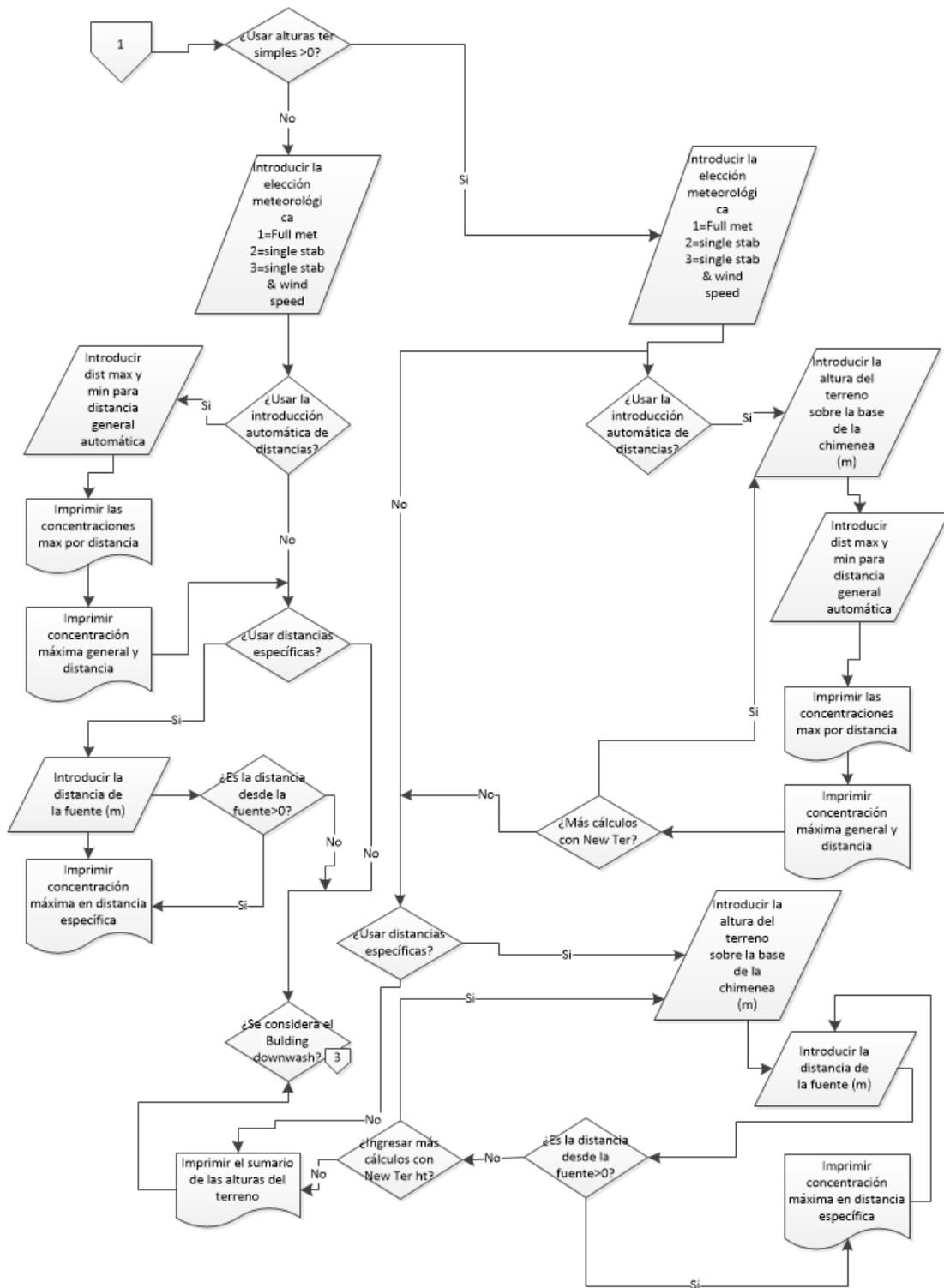
- a) El archivo de flujos de entrada:
 - i. opciones seleccionadas de modelado,
 - ii. ubicación de la fuente,
 - iii. los parámetros de datos,
 - iv. ubicaciones de los receptores (geográficamente).
- b) Las opciones de salida:
 - i. puntos de muestreo,
 - ii. con o sin building downwash
- c) El archivo de datos meteorológicos con extensión .sam.

El conjunto de algoritmos desarrollados para este tipo de programas se conocen con las siglas en inglés PRIME, que significa “mejoramiento del modelo de elevación de pluma”, el cual fue diseñado para incorporar los coeficientes de dispersión turbulenta de la pluma. PRIME permite determinar el cambio de la ubicación central de la pluma con la distancia a favor del viento y la tasa de

dispersión, así como su trayectoria cerca de un edificio. Los algoritmos del software Screen3, el cual es el software básico para este tipo de software de estimación se describen en la figura 1.29. En la figura 1.30 se encuentra representado en un diagrama de flujo los algoritmos del software AERMOD



Continúa ➡



Continúa ➡

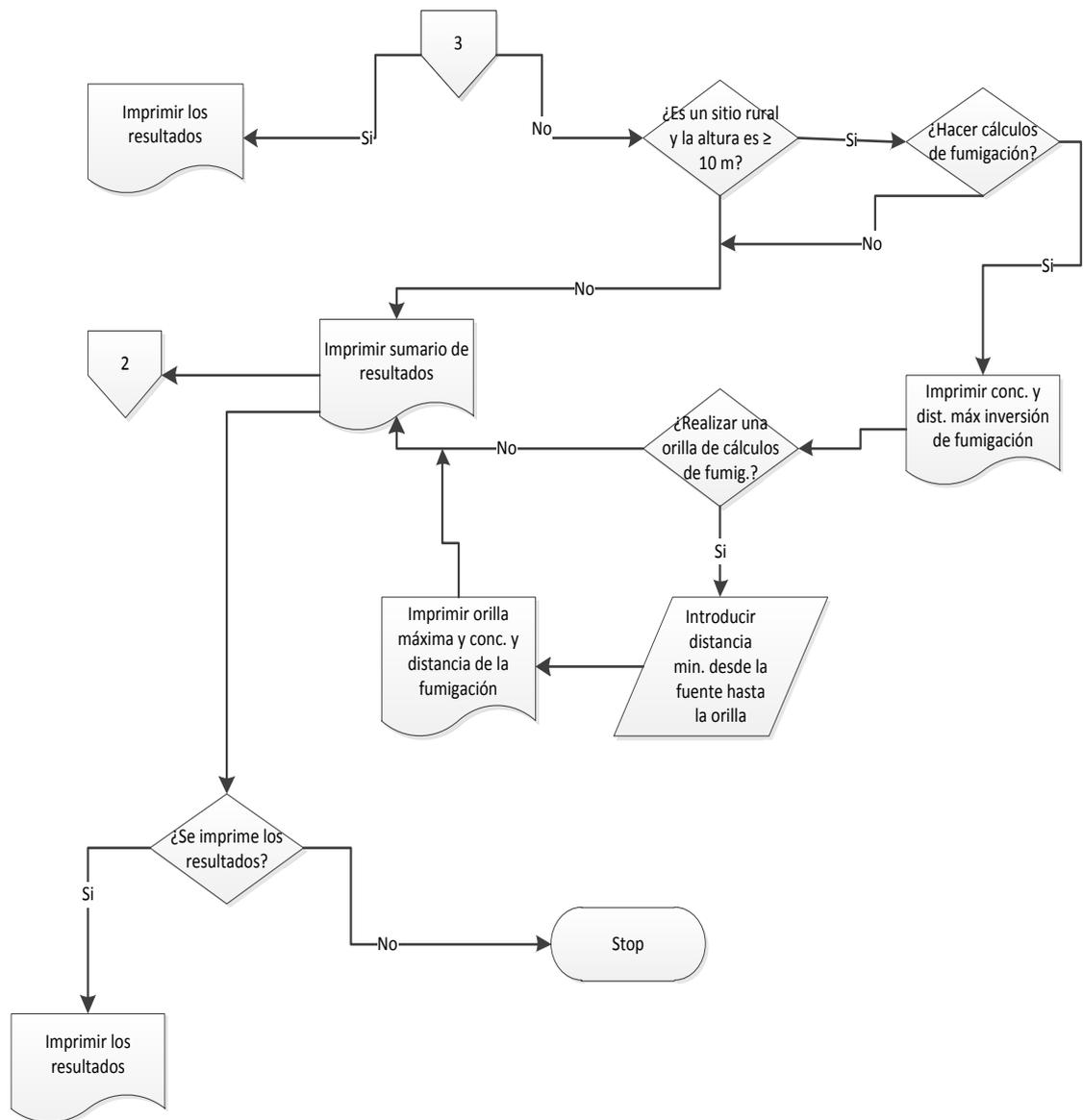


Figura 1.29: Diagrama de flujo de algoritmos del software Screen3.

Fuente: (U.S. Environmental Protection Ambiental, 2012)

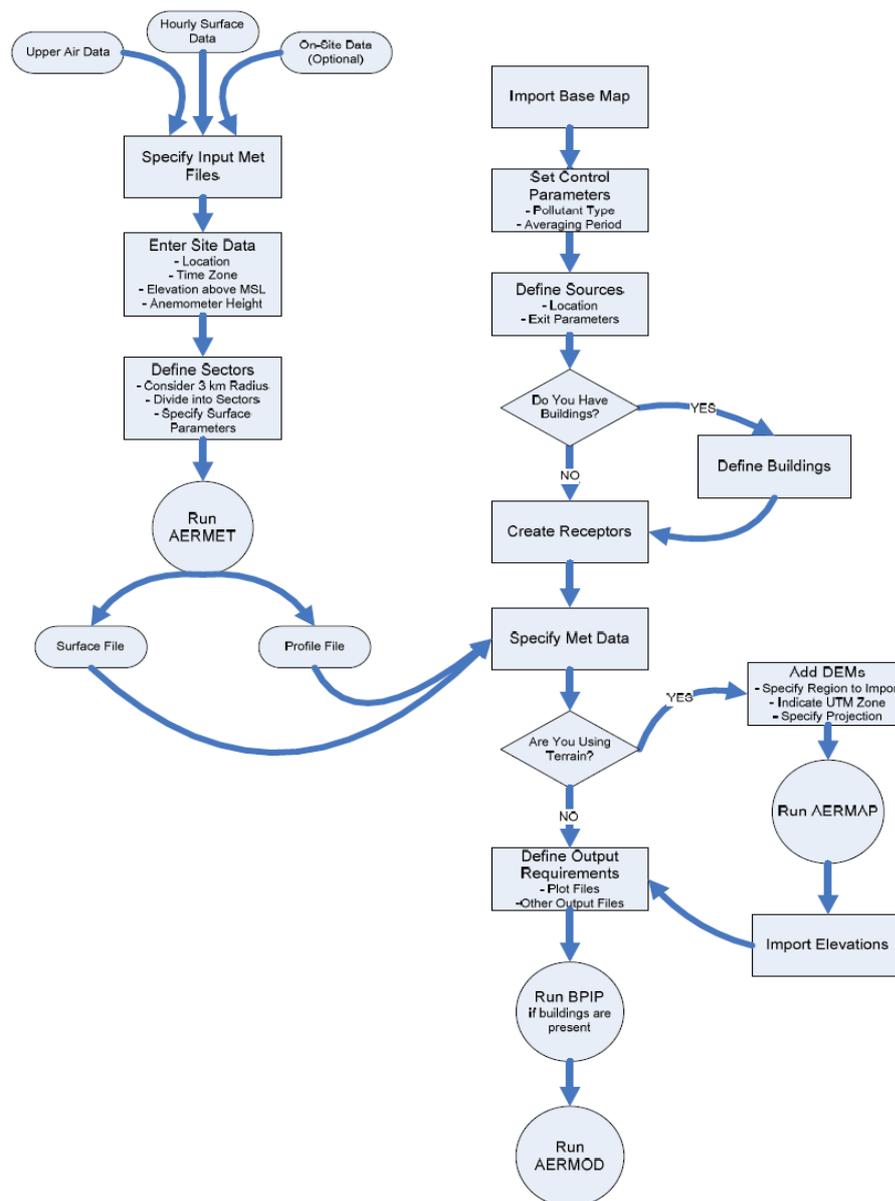


Figura 1.30: Diagrama de flujo de algoritmos del software AERMOD.

Fuente: (Lake Environmental. 2013)

1.4.17.6. Google Earth

Es un software que presenta en su interfaz un globo terráqueo virtual, que permite visualizar la cartografía terrestre, mediante fotografías satelitales. Entre las diferentes funciones que presenta, tenemos la localización de sitios mediante coordenadas geográficas, que presentan un grado de exactitud que varía hasta los 10 metros, debido a que mayor altitud mayor grado de error de medición. Entre otras

funciones tenemos la localización de sitios o calles, medición de distancias, etc. (Google Earth, 2014)

1.4.18. Normas ambientales

Para el desarrollo de la presente tesis se utiliza disposiciones técnico legales específicas de nuestro país sobre la modelación matemática de la dispersión de contaminantes atmosféricos y calidad del aire donde se expresa los límites permisibles de emisiones al aire para fuentes fijas y calidad de aire; y los lineamientos establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.

1.4.18.1. Texto de legislación secundaria del Ministerio del Ambiente Ecuador

De acuerdo al Reglamento a la ley de Gestión Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental, la normativa técnica ambiental aplicable a la prevención y control de la contaminación ambiental y de los impactos ambientales negativos producto de las actividades económicas, lo constituye el Texto Unificado Legislación Secundaria, Medio Ambiente (TULSMA), Libro VI, misma que tiene como objetivo principal “el preservar o conservar la salud de las personas, la calidad del aire ambiente, el bienestar de los ecosistemas y del ambiente en general”

Este cuerpo legal establece los requisitos mínimos para la aplicación de los modelos matemáticos de dispersión de contaminantes atmosférico específicamente.

1.4.18.2. Norma de calidad del aire

La normativa ambiental ecuatoriana que regula la calidad del aire, está dada en el Título IV, Libro VI, Anexo 4 del TULSMA. En la normativa mencionada, se fijan límites permisibles de calidad del aire, para los principales contaminantes de interés desde el punto de vista de la salud de la comunidad.

Según las normas los principales contaminantes a considerar son:

- Partículas sedimentables

- Material particulado de diámetro aerodinámico menor a 2,5 micrones (PM_{2.5})
- Óxidos de nitrógeno (NO y NO₂)
- Monóxido de carbono (CO)
- Dióxido de azufre (SO₂)
- Oxidantes fotoquímicos, expresados como ozono.

En la tabla 1.14 se analiza los valores límites de los siguientes contaminantes: dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO) y material particulado menor a 10 micras (PM₁₀), cuyos valores se encuentran sujetos a las condiciones de referencia de 25 °C y 760 mm Hg.

Tabla 1.14: Límites máximos permisibles de calidad del aire ambiente.

Contaminante emitido	Límite máximo permisible (ug/m ³)	Periodo regulado	Consideraciones
Material Particulado (PM₁₀)	50	Anual	-
Material particulado (PM_{2,5})	150	24 horas	No debe sobrepasar más de dos veces en el año
Óxidos de Nitrógeno (NO_x)	15	Anual	-
Dióxido de Azufre (SO₂)	75	24 horas	No debe sobrepasar más de dos veces en el año
Monóxido de Carbono (CO)	100	Anual	-
	150	24 horas	No debe sobrepasar más de dos veces en el año
	80	Anual	-
	350	24 horas	No debe sobrepasar más de una vez en el año
	10 000	8 horas	No debe sobrepasar más de una vez en el año
	40 000	1 hora	No debe sobrepasar más de una vez en el año

Fuente: (Ministerio del Ambiente Ecuador, 2003)

En la tabla anterior se puede observar que para concentraciones inferiores a períodos anuales, de 24 horas, 8 horas, 1 hora, etc. En la tabla 1.15 se fijan condiciones

adicionales a los límites de calidad del aire, referentes al número de veces que podrá sobrepasarse dicho límite durante el período anual. Así el modelo de dispersión deberá ejecutarse considerando dicho criterio, por lo que se utilizarán las opciones referentes al reporte de datos para el segundo, tercero, cuarto o el número máximo correspondiente según demande la aplicación del estándar de calidad del aire.

Tabla 1.15: Concentraciones de contaminantes comunes que definen los niveles de alerta, de alarma y de emergencia en la calidad de aire.

Contaminante y período de tiempo	Alerta	Alarma	Emergencia
Monóxido de carbono	15000	30000	40000
Concentración promedio en ocho horas	300	600	800
Oxidantes fotoquímicos expresados como ozono concentración promedio en hora	1200	2300	3000
Dióxido de azufre concentración promedio en 24 horas	800	1600	2100
Material particulado PM concentración promedio en 24 horas material particulado PM₁₀	250	400	500

Fuente: (Ministerio de Ambiente Ecuador, 2003)

1.5. Hipótesis

La dispersión de los contaminantes atmosféricos CO, SO₂, NO_x producto de las actividades industriales del cantón Rumiñahui, exceden significativamente normas medioambientales existentes

CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Participantes

2.1.1. Instituciones

La Dirección de Protección Ambiental del Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Rumiñahui (DPAGADMR) que colaboró con la apertura de los expedientes sobre la “Caracterización de la zona industrial de Cotogchoa” proporcionando datos históricos necesarios para la presente investigación (ver anexo A).

La Secretaría de Ambiente proporcionó los datos meteorológicos de los años 2006, 2007, 2008, 2010 y 2011.

2.1.2. Responsables del proyecto

Raquel Alexandra Merino Pozo

2.1.3. Colaboradores científicos

Quím. Erika Murgueitio Mg.

Directora de tesis

Ing-Mat. Pedro Romero Saker,

Codirector de tesis

2.2. Zona de estudio

2.2.1. Recolección de datos históricos

Los datos históricos de las emisiones industriales del cantón Rumiñahui, fueron provistas por la DPAGADMR, ubicada en las calles Montúfar # 251 y Espejo. Sangolquí, provincia de Pichincha, 0° 19' 49,76''S 78° 26' 48,54''O

Los datos meteorológicos históricos fueron proporcionados por la Secretaría de Ambiente, y que corresponde a la estación meteorológica del Valle de los Chillos, ubicada en el sector del Tingo, Sangolquí, provincia de Pichincha, 0°17'58.70''S 78°26'59.72''O

2.3. Duración del proyecto

El tiempo aproximado para culminar la presente investigación fue de 1 año.

2.4. Metodología

2.4.1. Datos meteorológicos

2.4.1.1. Datos históricos

Los datos meteorológicos históricos con los que se trabajó en esta investigación, fueron entregados por la red de monitoreo atmosférico de la Secretaría de Ambiente, pertenecientes a la estación meteorológica del Valle de los Chillos localizada en la figura 2.1, durante los periodos 2006-2008 y 2010-2011, los cuales constan principalmente de:

- Dirección del viento (wind direction),
- velocidad del viento (wind speed),
- nubosidad promedio (opaque cloud cover) y
- temperatura ambiente (dry bulb).
- Altitud

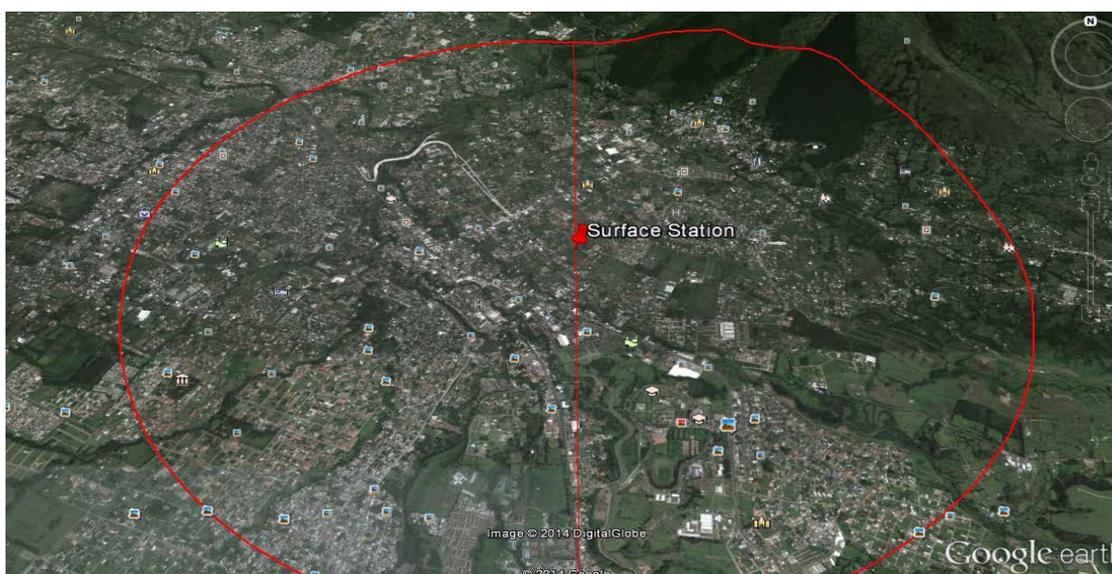


Figura 2.1: Localización de la estación meteorológica del Valle de los Chillos.

Fuente: (Google Earth, 2013)

Los datos fueron preprocesados en el software Microsoft Excel, ordenando los datos de acuerdo a las necesidades para el procesamiento con el software AERMET o la versión libre WRPLOT View. Cada archivo registra datos diarios por hora del

año completo. En la figura 2.2 se muestra una imagen de ejemplo de los archivos meteorológicos.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	AÑO	MES	DJ	HH	VV	DV	T	HR	PA	RS	P
10483	2006	mar	72	18	1,1		11,46	98,4	756,93	0,08	1,7
10484	2006	mar	72	19	1,34		10,71	99,96	757,39	0	0,1
10485	2006	mar	72	20	0,79		9,83	100	757,96	0	0,1
10486	2006	mar	72	21	0,42		10,13	100	758,54	0	0
10487	2006	mar	72	22	0,6		9,62	100	759,19	0	0
10488	2006	mar	72	23	0,49		9,23	100	759,78	0	0
10489	2006	mar	72	24	0,36		8,91	100	760,06	0	0
10490	2006	mar	73	1	0,4		8,96	100	759,62	0	0
10491	2006	mar	73	2	0,64		8,89	100	758,91	0	0
10492	2006	mar	73	3	0,1		8,54	100	758,27	0	0,1
10493	2006	mar	73	4	0,22		8,47	100	757,84	0	0
10494	2006	mar	73	5	0,54		8	100	757,78	0	0
10495	2006	mar	73	6	0,46		7,4	100	757,79	0	0
10496	2006	mar	73	7	0,65		6,83	100	758,48	0	0
10497	2006	mar	73	8	0,47		6,94	100	759,23	15,66	0
10498	2006	mar	73	9	0,7		9,08	98,22	759,69	208,94	0
10499	2006	mar	73	10	0,71		12,64	83,01	760,03	423,22	0
10500	2006	mar	73	11	0,64		15,68	73,02	759,93	696,26	0
10501	2006	mar	73	12	0,76		17,07	65,84	759,11	814,91	0
10502	2006	mar	73	13	1,31		18,78	60,45	758,14	762,49	0
10503	2006	mar	73	14	1,9		18,43	61,46	757,08	368,77	0
10504	2006	mar	73	15	2,01		15,25	79,25	756,48	79,26	1,1
10505	2006	mar	73	16	1,19		14,69	83,64	756,46	40,97	2,1

Figura 2.2: Datos meteorológicos históricos recolectados del año 2006.

Fuente: (Secretaría de Ambiente, 2012)

2.4.2. Datos de emisiones industriales históricas de fuentes fijas del cantón Rumiñahui

Se recolectó datos de emisiones de fuentes fijas de tres empresas de la zona de Cotogchoa, correspondientes al año 2006, debido a que esta información era la más completa tanto en las mediciones de emisiones, como a los datos meteorológicos. Las caracterizaciones que se encuentran descritas en las tablas 2.1, 2.3 y 2.5, fueron realizadas por laboratorios privados, cuyas identidades al igual que los nombres de las empresas, se omitirán por motivos de confidencialidad. Las empresas fueron identificadas como N°1, N°2 y N°3, mientras que los laboratorios se identificaron con las letras A, B y C.

La DPAGADMR permitió la apertura y revisión de los archivos de la zona industrial de Cotogchoa (anexo A). Debido a que la entidad se acreditó en el año 2010 para el control y monitoreo de las emisiones de las empresas del cantón, se entregó únicamente información correspondiente a los años 2010 al 2013. Estos fueron clasificados de acuerdo al año de entrega, por lo que se procedió a la

búsqueda y recolección de los datos de monitoreo de emisiones de las empresas N°1, N°2 y N°3. En el caso de la empresa N°3, la Dirección solo proporcionó datos entre los años 2011-2013. Los parámetros de las fuentes de emisión de las empresas a evaluar se describen en las tablas 2.2, 2.4 y 2.6.

Tabla 2.1: Caracterizaciones de la empresa N°1 del año 2006.

Año	Parámetro						
	Altura de la chimenea (m)	Diámetro de la chimenea (m)	Temperatura de gas (°K)	Velocidad de salida de gas (m/s)	Tasa de emisión NOx (g/s)	Tasa de emisión SO ₂ (g/s)	Tasa de emisión CO (g/s)
2006	9	0,45	573	47,94	453,434	276,59	11,72

Fuente: (Tabla de resultados del laboratorio A, 2006)

Tabla 2.2: Caracterizaciones de la empresa N°1 desde el año 2010-2013.

Año	N° Toma	Parámetro						
		Tasa de emisión NOx (g/s)	Tasa de emisión SO ₂ (g/s)	Tasa de emisión CO (g/s)	Altura de la chimenea (m)	Diámetro de la chimenea (m)	Temperatura de gas (°K)	Velocidad del gas (m/s)
2010	1	227	702	4			288,15	2,12
	2	205	659	1			429,35	2,5
	3	257	563	100			427,25	2,2
2011	1	151	346	10			428,15	8,1
	2	175	394	10			426,85	9
	3	480	1530	-	9	0,45	428,15	2,2
2012	1	497	1994	0			434,05	4,59
	2	219	497	9			448,85	7,8
2013	1	395	954	299			434,25	4,4
	2	326	1278	271			440,75	4,8

Fuente:(DPAGADMR)

Tabla 2.3: Caracterizaciones de la empresa N°2 del 2006.

Año	Parámetro						
	Altura de la chimenea (m)	Diámetro de la chimenea (m)	Temperatura de gas (°K)	Velocidad de salida de gas (m/s)	Tasa de emisión de NOx (g/s)	Tasa de emisión de SO ₂ (g/s)	Tasa de emisión de CO (g/s)
2006	6	0,39	448	27,2	63,80	257,71	2,0636

Fuente: (Tabla de resultados del laboratorio B, 2006)

Tabla 2.4: Caracterización de la empresa N°2 desde 2010-2013.

Año	N° Toma	Parámetro						
		Tasa de emisión de NOx (g/s)	Tasa de emisión de SO ₂ (g/s)	Tasa de emisión de CO (g/s)	Altura de la chimenea (m)	Diámetro de la chimenea (m)	Temperatura de gas (°K)	Velocidad del gas (m/s)
2010	1	252,5	523	15			507,15	5,43
	2	239,8	584	27			543,15	10,6
	3	233	438,5	9,75			480,15	9,56
2011	1	487,3	1993,5	11,3			493,95	9,31
2012	1	516,8	1826,7	0			463,85	11,75
	2	489,3	1644,9	19,3	6	0,39	487,25	10,41
	3	140,9	193,7	21,7			434,84	8,43
2013	1	449	1906	11			468,71	10,34
	2	534,5	2510,8	26,6			467,45	9,46
	3	507,3	1613,6	110,6			470,85	5,74

Fuente: (DPAGADMR)

Tabla 2.5: Caracterizaciones de la empresa N°3 del 2006.

Año	Parámetro						
	Altura de la chimenea (m)	Diámetro de la chimenea (m)	Temperatura de la gas (°K)	Velocidad de salida gas (m/s)	Tasa de emisión NOx (g/s)	Tasa de emisión SO ₂ (g/s)	Tasa de emisión CO (g/s)
2006	12,8	1,13	720,5	9,97	1,87	0,97	0,077

Fuente: (Tabla de resultados del laboratorio C, 2006)

Tabla 2.6: Caracterización de la empresa N°3 desde el año 2011-2013.

Año	N° Toma	Parámetro						
		Tasa de emisión NOx (g/s)	Tasa de emisión SO ₂ (g/s)	Tasa de emisión CO (g/s)	Altura de la chimenea (m)	Diámetro de la chimenea (m)	Temperatura gas (°K)	Velocidad del gas (m/s)
2011	1	127,3	808,1	3,9			488,85	12,4
	2	167,4	597,4	13,7			259,6	13,58
	3	463,2	1612,4	10			446,75	4,25
2012	1	202	139	4			448,55	9,44
	2	118,6	50,5	35,5			530,85	12
	3	183,1	406,7	35,3	12,8	1,13	525,45	13,4
2013	1	192,1	262,7	4,6			486,35	13,93
	2	166,3	624,8	39,2			528,85	10,56
	3	159,4	397,5	2,4			469,95	12,5

Fuente: (DPAGADMR)

2.4.3. Datos geográficos de la zona

Con el programa de Google Earth, se determinó las coordenadas geográficas y altitud aproximada del terreno de localización de cada una de las tres industrias (ver figura 2.3). Para la evaluación se descartó construcciones a los alrededores de las empresas (sin building downwash) y se clasificó al área de estudio como zona rural, debido a que ocupa menos del 50% dentro de un radio de tres kilómetros desde las fuentes. Se descargaron imágenes satelitales con Google Earth de las zonas con la extensión .jpg y que fueron convertidas a la extensión .kml. Estas imágenes se cargaron al software AERMOD y se procesaron con AERMAP, el cual se alimentó

con representaciones en 3D de las empresas a cada uno de los archivos de resultados generados, como se observa en la figura 2.4.



Figura 2.3: Ubicación de las empresas de estudio.

Fuente: (Google Earth, 2013)

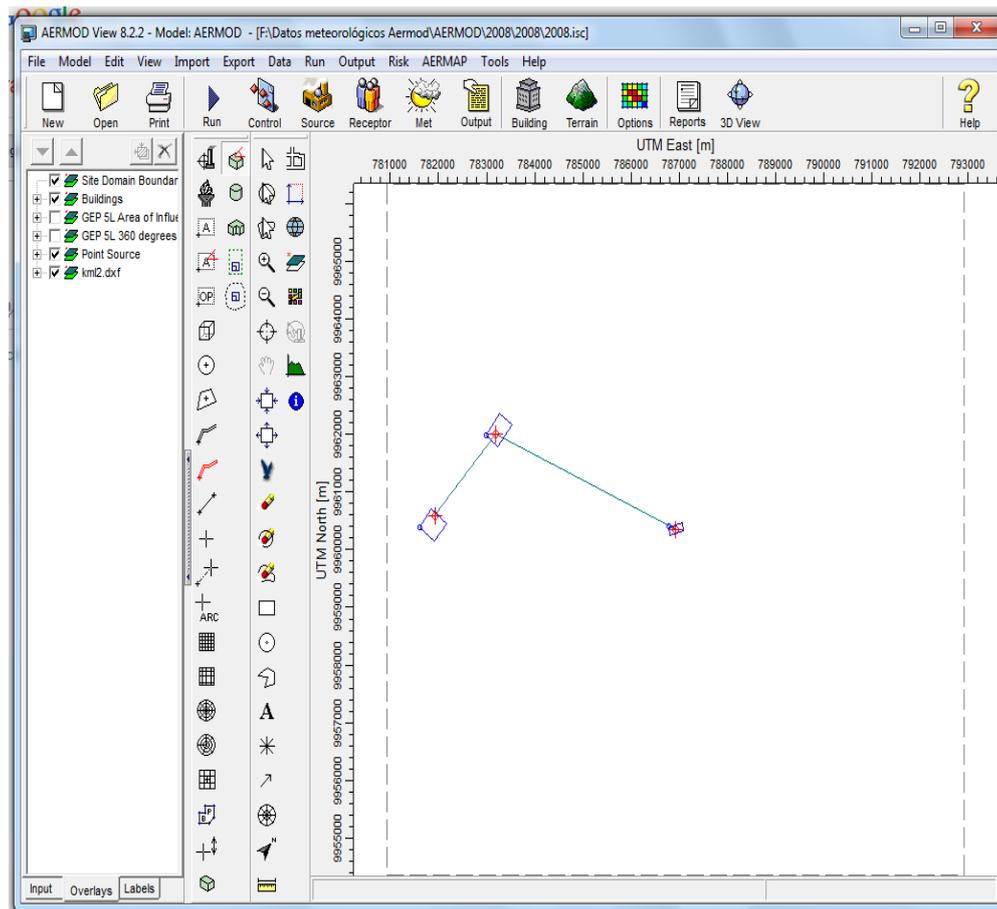


Figura 2.4: Procesamiento de la ubicación de las empresas mediante el software AERMAP

2.4.4. Procesamiento de datos meteorológicos

Los archivos meteorológicos históricos (hourly surface data) que se preprocesaron en Excel por cada año, fueron cargados conjuntamente con los datos geográficos de ubicación de cada empresa a los software WRPLOT View (ver figura 2.5) y AERMET (ver figura 2.6); los cuales fueron procesados a archivos meteorológicos con la extensión .sam. Adicionalmente a esta información AERMET necesita de datos de upper air (ver figura 2.7) los cuales fueron descargados de la página web de la NOAA, el cual registra datos meteorológicos de la mayoría de las estaciones meteorológicas del mundo. Como resultado los software generaron las rosas de los vientos de los respectivos años, los cuales fueron exportados a Google Earth.

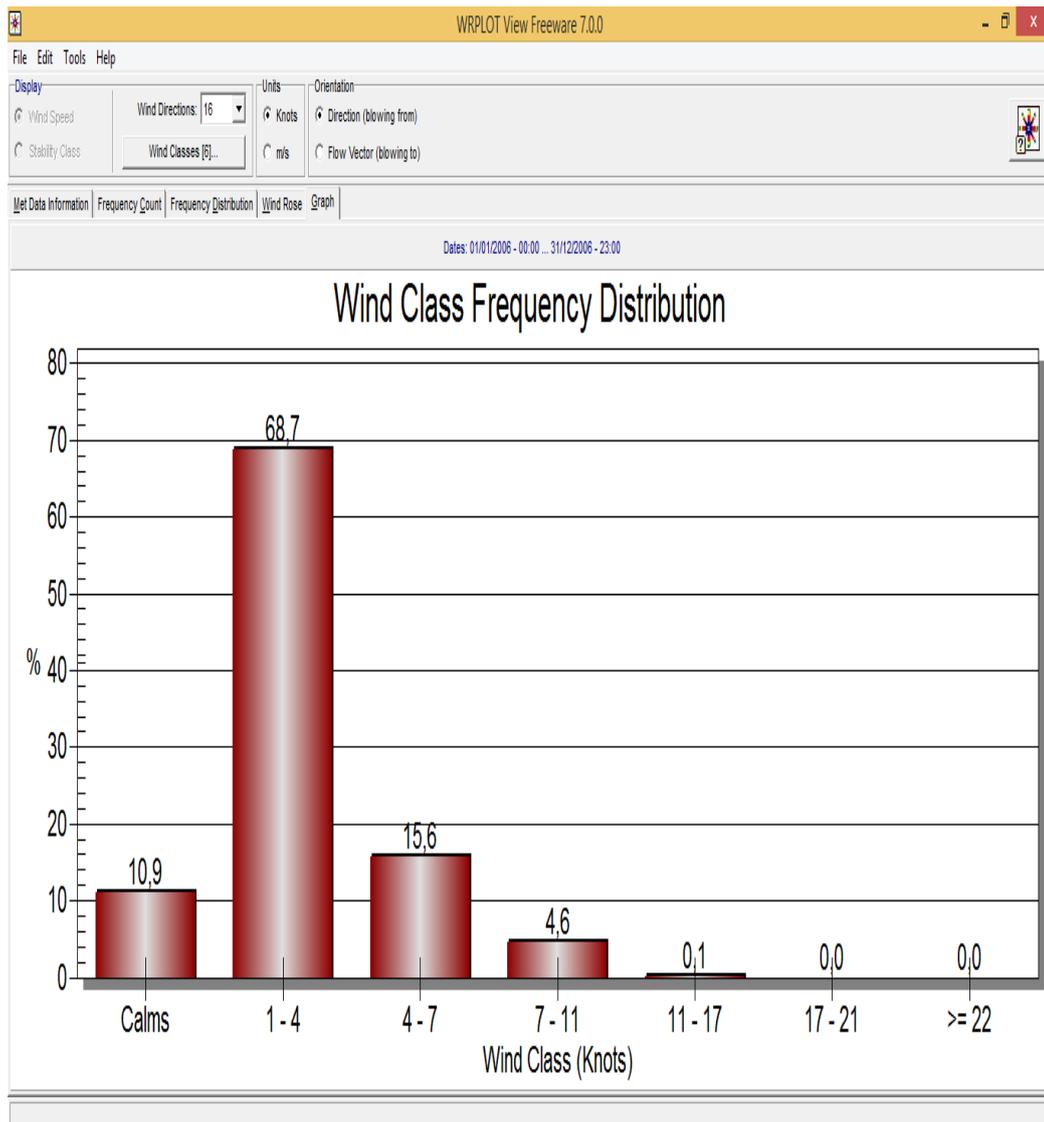


Figura 2.5: Visualización de la interfaz de WRPLOT View con datos procesados del año 2006.

Met View [Pre-Processed Surface Met Data File]

File Header Data

Surface File Name: aermet 2007.SFC

Station Latitude: 0.300S Upper Air Station ID: 99999 Unsite Station ID: N/A

Station Longitude: 78.450W Surface Station ID: 8 Version: 12345

Filter

Year: 2007 Month: All Day: All Julian Day: All Show All

	Year	Month	Day	Julian Day	Hour	Sensible Heat Flux (W/m ²)	Surface Friction Velocity (m/s)	Convective Velocity Scale (m/s)	Vertical Potential Temperature Gradient above PBL	Height of Convectively-Generated Boundary Layer PBL (m)	Height of Mechanically-Generated Boundary Layer SBL (m)	Morin-Obukhov Length (m)	Surface Roughness Length (m)	Bowen Ratio	Albedo	Wind Speed - Ws (m/s)	Wind Direction - Wd (degrees)	Reference Height for Ws and Wd (m)	Temperature - temp (K)	Reference Height for temp (m)
Min.	2007	ene	1	1	1	-999.0	-9.000	-9.000	-9.000	-999.0	-999.0	-99999.0	1.000	1.62	0.21	0.00	0.0	-9.0	273.1	2.0
Max.	2007	dic	31	365	24	336.6	1.540	2.830	0.029	2367.0	3978.0	8888.0	1.000	1.62	1.00	999.00	999.0	10.0	299.4	2.0
1	2007	ene	1	1	1	-3.6	0.087	-9.000	-9.000	-999.0	59.0	12.3	1.000	1.62	1.00	1.00	131.0	10.0	284.0	2.0
2	2007	ene	1	1	2	-8.1	0.130	-9.000	-9.000	-999.0	108.0	18.4	1.000	1.62	1.00	1.50	128.0	10.0	282.4	2.0
3	2007	ene	1	1	3	-3.6	0.087	-9.000	-9.000	-999.0	59.0	12.2	1.000	1.62	1.00	1.00	164.0	10.0	281.6	2.0
4	2007	ene	1	1	4	-3.6	0.087	-9.000	-9.000	-999.0	59.0	12.2	1.000	1.62	1.00	1.00	143.0	10.0	280.9	2.0
5	2007	ene	1	1	5	-8.1	0.130	-9.000	-9.000	-999.0	108.0	18.3	1.000	1.62	1.00	1.50	123.0	10.0	280.9	2.0
6	2007	ene	1	1	6	-3.6	0.087	-9.000	-9.000	-999.0	59.0	12.2	1.000	1.62	1.00	1.00	142.0	10.0	280.9	2.0
7	2007	ene	1	1	7	-3.4	0.087	-9.000	-9.000	-999.0	59.0	13.0	1.000	1.62	0.63	1.00	165.0	10.0	280.5	2.0
8	2007	ene	1	1	8	50.7	0.242	-9.000	-9.000	-999.0	274.0	-18.8	1.000	1.62	0.32	1.00	143.0	10.0	282.9	2.0
9	2007	ene	1	1	9	130.4	0.272	-9.000	-9.000	-999.0	327.0	-9.9	1.000	1.02	0.24	1.00	127.0	10.0	284.9	2.0
10	2007	ene	1	1	10	206.9	0.371	9.000	9.000	999.0	619.0	-16.5	1.000	1.62	0.22	1.50	231.0	10.0	287.4	2.0
11	2007	ene	1	1	11	257.7	0.475	-9.000	-9.000	-999.0	753.0	-27.9	1.000	1.62	0.21	2.10	284.0	10.0	289.4	2.0
12	2007	ene	1	1	12	287.1	0.558	-9.000	-9.000	-999.0	958.0	-40.6	1.000	1.62	0.21	2.60	276.0	10.0	291.9	2.0
13	2007	ene	1	1	13	294.1	0.402	-9.000	-9.000	-999.0	774.0	-25.5	1.000	1.02	0.21	2.10	163.0	10.0	293.4	2.0
14	2007	ene	1	1	14	280.0	0.556	9.000	9.000	999.0	963.0	-41.2	1.000	1.62	0.21	2.60	119.0	10.0	295.4	2.0
15	2007	ene	1	1	15	241.6	0.859	-9.000	-9.000	-999.0	1830.0	-175.9	1.000	1.62	0.21	4.60	82.0	10.0	294.2	2.0
16	2007	ene	1	1	16	182.1	0.848	-9.000	-9.000	-999.0	1796.0	-224.0	1.000	1.62	0.22	4.60	74.0	10.0	292.8	2.0
17	2007	ene	1	1	17	104.5	0.069	-9.000	-9.000	-999.0	1295.0	-191.9	1.000	1.02	0.26	3.00	221.0	10.0	291.5	2.0
18	2007	ene	1	1	18	17.2	0.468	9.000	9.000	999.0	778.0	398.1	1.000	1.62	0.40	2.60	137.0	10.0	291.9	2.0
19	2007	ene	1	1	19	-28.1	0.393	-9.000	-9.000	-999.0	571.0	144.3	1.000	1.62	1.00	2.60	64.0	10.0	289.1	2.0
20	2007	ene	1	1	20	-8.0	0.130	-9.000	-9.000	-999.0	198.0	18.5	1.000	1.62	1.00	1.50	167.0	10.0	287.4	2.0
21	2007	ene	1	1	21	-8.0	0.130	-9.000	-9.000	-999.0	109.0	10.5	1.000	1.62	1.00	1.50	290.0	10.0	285.9	2.0
22	2007	ene	1	1	22	-3.6	0.087	9.000	9.000	999.0	59.0	12.3	1.000	1.62	1.00	1.00	62.0	10.0	284.5	2.0
23	2007	ene	1	1	23	-0.9	0.043	-9.000	-9.000	-999.0	21.0	6.1	1.000	1.62	1.00	0.50	110.0	10.0	283.6	2.0
24	2007	ene	1	1	24	-3.6	0.087	-9.000	-9.000	-999.0	59.0	12.2	1.000	1.62	1.00	1.00	170.0	10.0	282.1	2.0
25	2007	ene	2	2	1	-8.1	0.130	-9.000	-9.000	-999.0	108.0	18.3	1.000	1.62	1.00	1.50	296.0	10.0	281.9	2.0
26	2007	ene	2	2	2	-3.6	0.087	-9.000	-9.000	-999.0	59.0	12.2	1.000	1.62	1.00	1.00	82.0	10.0	281.6	2.0
27	2007	ene	2	2	3	-3.6	0.087	-9.000	-9.000	-999.0	59.0	12.2	1.000	1.62	1.00	1.00	102.0	10.0	280.6	2.0
28	2007	ene	2	2	4	-3.6	0.087	-9.000	-9.000	-999.0	59.0	12.2	1.000	1.62	1.00	1.00	120.0	10.0	280.8	2.0
29	2007	ene	2	2	5	-8.1	0.130	-9.000	-9.000	-999.0	108.0	18.3	1.000	1.62	1.00	1.50	126.0	10.0	279.9	2.0
30	2007	ene	2	2	6	-8.1	0.130	-9.000	-9.000	-999.0	108.0	18.3	1.000	1.62	1.00	1.50	147.0	10.0	279.8	2.0
31	2007	ene	2	2	7	-3.4	0.087	-9.000	-9.000	-999.0	59.0	12.9	1.000	1.62	0.64	1.00	139.0	10.0	278.9	2.0
32	2007	ene	2	2	8	50.0	0.242	-9.000	-9.000	-999.0	273.0	-18.9	1.000	1.62	0.32	1.00	168.0	10.0	282.5	2.0

Figura 2.6: Visualización de la pantalla AERMET con datos procesados del año 2007.

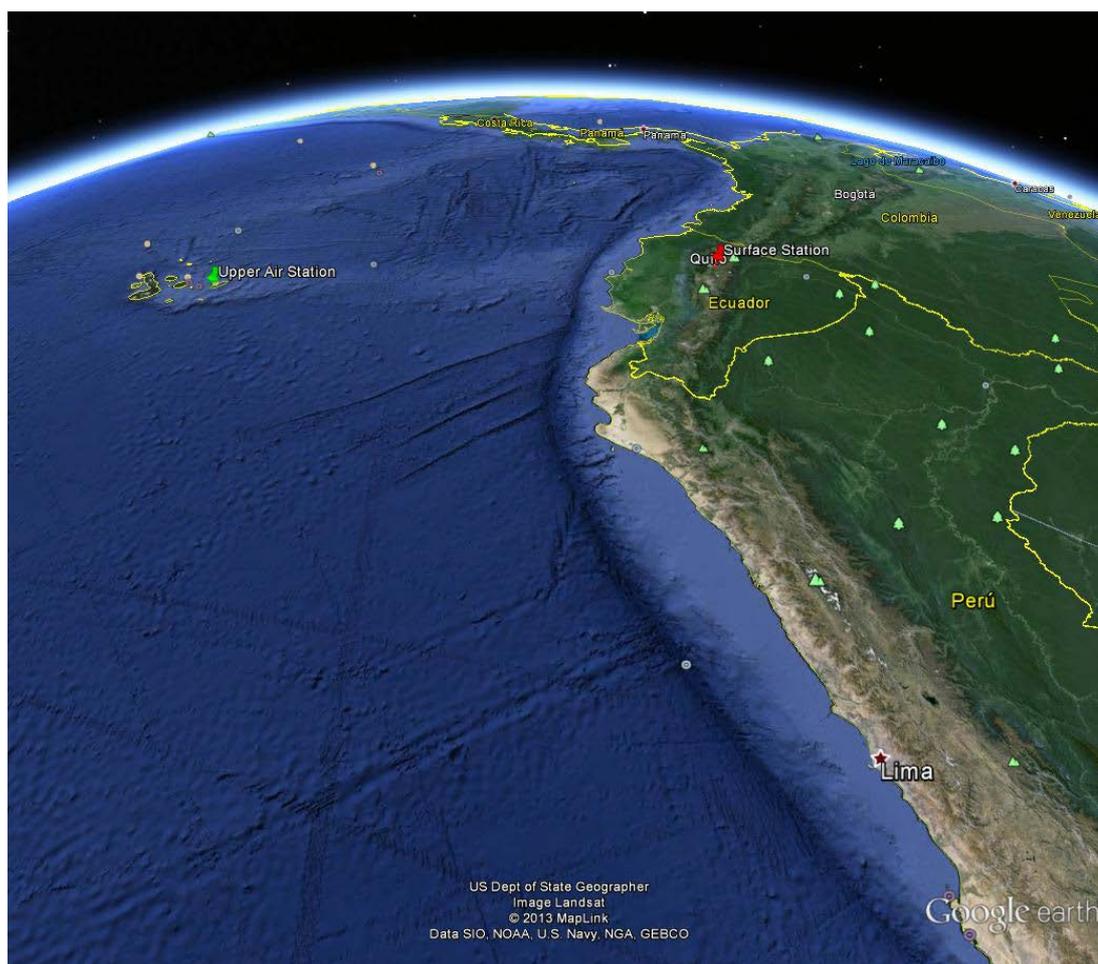


Figura 2.7: Visualización de la ubicación de las estaciones que proveyeron los datos meteorológicos de tipo hourly surface y upper air.

2.4.5. Procesamiento de los datos de emisiones contaminantes de fuentes fijas industriales

Con AERMOD se procesó los archivos meteorológicos resultantes del software AERMET, así como los datos de monitoreo de las emisiones de fuentes fijas, correspondientes al año 2006, debido a que en su conjunto fueron los datos más completos, con los que el programa pudo procesar. Los resultados gráficos de la simulación de la dispersión de los contaminantes CO, SO₂ y NO_x de las tres empresas, se presentaron en forma de curvas de iso-concentración en gráficas 3D de Google Earth. El resto de datos de emisiones de los años 2006, 2010-2013, fueron procesados con el software Screen View, el cual realiza predicciones estadísticas de la dispersión de cada contaminante a partir de los parámetros de las fuentes fijas por

contaminante (ver figura 2.8), que se diferencia de AERMOD, al procesar la información con su propia data meteorológica; es decir con todas las clases de estabilidad y velocidades de viento. Screen View reporta los resultados en gráficas de dispersión de distancia vs. concentración del contaminante. La distancia máxima de medición de la dispersión fue de tres kilómetros.

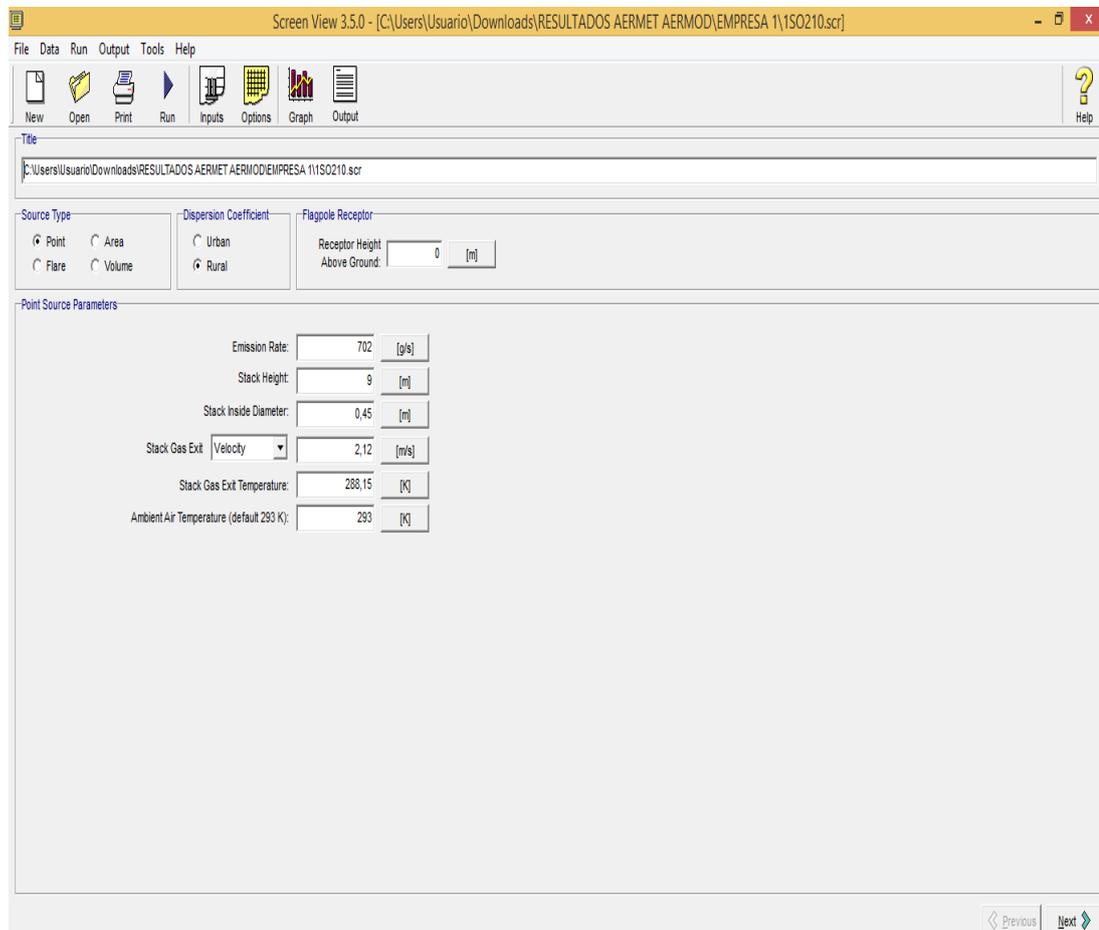


Figura 2.8: Visualización de la pantalla de Screen View con datos de fuentes fijas de la empresa N°1 para el contaminante SO₂, del año 2010.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS

3.1. Preprocesamiento de información meteorológica del cantón Rumiñahui

La información meteorológica histórica entregada por la Secretaría de Ambiente fueron preprocesadas en archivos de Excel, clasificando las tomas por año, mes, día y hora. La data meteorológica está conformada por temperatura ambiental, nubosidad (opaque cloud cover), velocidad y dirección del viento. Se muestran imágenes de ejemplo, de las bases de datos en las figuras 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, y parte de ellas se encuentran descritas en el anexo B.

N° dato	YEAR	MONTH	DAY	HOOR	OPAQUE CLOUD	DRY BULB	WIND DIRECTION	WIND SPEED
1	2006	1	1	1	6	9,77	312,1	0,61
2	2006	1	1	2	6	9,78	260,26	0,67
3	2006	1	1	3	6	9,72	289,49	0,45
4	2006	1	1	4	6	9,83	133,95	0,52
5	2006	1	1	5	6	9,48	112,62	0,37
6	2006	1	1	6	6	9,38	48,79	0,24
7	2006	1	1	7	6	9,34	138,99	0,5
8	2006	1	1	8	6	10,11	147,68	0,76
9	2006	1	1	9	6	14,18	137,94	0,6
10	2006	1	1	10	6	15,41	103,81	1,01
11	2006	1	1	11	6	16,77	158,66	1,16
12	2006	1	1	12	6	18,25	268,6	1,74
13	2006	1	1	13	6	18,92	110,92	2,19
14	2006	1	1	14	6	18,92	109,51	2,9
15	2006	1	1	15	6	18,75	84,65	3,05
16	2006	1	1	16	6	18,52	152,19	2,94
17	2006	1	1	17	6	16,34	187,03	2,17
18	2006	1	1	18	6	14,55	311,59	2,49
19	2006	1	1	19	6	12,68	307,37	2,35
20	2006	1	1	20	6	11,34	225,26	2,25
21	2006	1	1	21	6	10,33	321,55	1,63
22	2006	1	1	22	6	9,98	340,09	1,32
23	2006	1	1	23	6	9,91	294,7	1,29
24	2006	1	1	24	6	9,89	287,82	0,79
25	2006	1	2	1	6	9,92	286,84	0,58
26	2006	1	2	2	6	9,97	255,92	0,38

Figura 3.1: Datos meteorológicos clasificados en Excel del año 2006.

N° Dato	YEAR	MONTH	DAY	HOUR	OPAQUE CLOUD	DRY BULB	WIND DIRECTION	WIND SPEED
1	2007	1	1	1	5	10,89	128,75	1,01
2	2007	1	1	2	5	9,33	126,35	1,63
3	2007	1	1	3	5	8,48	163,93	0,91
4	2007	1	1	4	5	7,67	135,07	1,22
5	2007	1	1	5	5	7,8	119,54	1,28
6	2007	1	1	6	5	7,69	138,57	1,12
7	2007	1	1	7	5	7,36	164,13	1,11
8	2007	1	1	8	5	9,82	141,09	1,11
9	2007	1	1	9	5	11,8	131,03	1
10	2007	1	1	10	5	14,27	229,01	1,8
11	2007	1	1	11	5	16,32	281,19	2,22
12	2007	1	1	12	5	18,69	275,78	2,71
13	2007	1	1	13	5	20,3	154,97	1,93
14	2007	1	1	14	5	22,27	118,96	2,4
15	2007	1	1	15	5	21,12	79,55	4,52
16	2007	1	1	16	5	19,6	68,25	4,4
17	2007	1	1	17	5	18,44	215,29	3,5
18	2007	1	1	18	5	18,68	137,95	2,38
19	2007	1	1	19	5	16,04	62,19	2,74
20	2007	1	1	20	5	14,32	166,2	1,38
21	2007	1	1	21	5	12,84	289,6	1,34
22	2007	1	1	22	5	11,36	59,21	1,05
23	2007	1	1	23	5	10,54	110,07	0,69
24	2007	1	1	24	5	8,99	168,36	0,89

Figura 3.2: Datos meteorológicos del año 2007 preprocesados Excel.

N° Dato	YEAR	MONTH	DAY	HOUR	OPAQUE CLOUD	DRY BULB	WIND DIRECTION	WIND SPEED
1	2008	1	1	1	5	286,29	312,10	1,23
2	2008	1	1	2	5	286,17	293,17	1,63
3	2008	1	1	3	5	285,99	289,49	1,03
4	2008	1	1	4	5	285,74	276,54	1,22
5	2008	1	1	5	5	285,64	316,81	1,28
6	2008	1	1	6	5	285,62	276,81	1,12
7	2008	1	1	7	5	285,69	319,43	1,13
8	2008	1	1	8	5	286,61	246,67	1,11
9	2008	1	1	9	5	289,25	137,94	1
10	2008	1	1	10	5	291,95	229,01	1,8
11	2008	1	1	11	5	293,09	281,19	2,22
12	2008	1	1	12	5	293,48	275,78	2,71
13	2008	1	1	13	5	294,69	154,97	2,19
14	2008	1	1	14	5	295,47	133,32	2,9
15	2008	1	1	15	5	294,12	110,44	4,52
16	2008	1	1	16	5	292,60	229,61	4,4
17	2008	1	1	17	5	291,44	215,29	3,5
18	2008	1	1	18	5	291,68	311,59	2,49
19	2008	1	1	19	5	289,04	307,37	2,74
20	2008	1	1	20	5	287,32	225,26	2,25
21	2008	1	1	21	5	285,84	321,55	1,63
22	2008	1	1	22	5	285,76	340,09	1,32
23	2008	1	1	23	5	285,79	294,70	1,29
24	2008	1	1	24	5	285,78	287,82	0,89

Figura 3.3: Datos meteorológicos del año 2008 preprocesados en Excel.

N° Dato	YEAR	MONTH	DAY	HOUR	OPAQUE CLOUD	DRY BULB	WIND DIRECTION	WIND SPEED
1	2010	1	1	1	4	11,73	46,21	0,94
2	2010	1	1	2	4	11,02	129,35	0,81
3	2010	1	1	3	4	10,83	86,95	0,97
4	2010	1	1	4	4	10,45	90,81	1,02
5	2010	1	1	5	4	10,03	91,84	1,25
6	2010	1	1	6	4	10,29	99,14	1,2
7	2010	1	1	7	4	9,95	128,04	1,03
8	2010	1	1	8	4	12,28	147,92	1,11
9	2010	1	1	9	4	16,08	144,52	0,71
10	2010	1	1	10	4	19	71,21	0,9
11	2010	1	1	11	4	19,87	34,93	1,39
12	2010	1	1	12	4	21,52	10,91	1,33
13	2010	1	1	13	4	22,97	56,23	1,77
14	2010	1	1	14	4	24,1	10,43	1,95
15	2010	1	1	15	4	25,01	337,23	2,15
16	2010	1	1	16	4	21,25	278,54	3,35
17	2010	1	1	17	4	21,09	276,26	3,25
18	2010	1	1	18	4	19,83	188,95	1,8
19	2010	1	1	19	4	17,27	282,2	1,72
20	2010	1	1	20	4	15,47	327,31	1,72
21	2010	1	1	21	4	14,15	326,07	1,08
22	2010	1	1	22	4	13,44	345,3	0,88
23	2010	1	1	23	4	12,63	85,48	0,99
24	2010	1	1	24	4	11,41	108,02	1,09

Figura 3.4: Datos meteorológicos del año 2010 preprocesados en Excel.

N° Dato	YEAR	MONTH	DAY	HOUR	OPAQUE CLOUD	DRY BULB	WIND DIRECTION	WIND SPEED
1	2011	1	1	1		12,91	0,56	1,37
2	2011	1	1	2		12,68	353,98	0,86
3	2011	1	1	3		12,83	5,39	0,69
4	2011	1	1	4		12,79	93,79	1,16
5	2011	1	1	5		12,54	322,35	0,55
6	2011	1	1	6		12,33	71,88	0,62
7	2011	1	1	7		12,05	158,09	0,79
8	2011	1	1	8		14,16	332,52	0,76
9	2011	1	1	9		17,35	93,7	0,87
10	2011	1	1	10		18,71	129,8	1,01
11	2011	1	1	11		20,19	76,17	1,14
12	2011	1	1	12		21,64	20,14	1,48
13	2011	1	1	13		22,25	22,23	2,44
14	2011	1	1	14		22,58	6,26	2,77
15	2011	1	1	15		22,4	30,67	3,45
16	2011	1	1	16		21,85	17,09	3,53
17	2011	1	1	17		19,89	6,86	3,33
18	2011	1	1	18		17,66	336,71	2,67
19	2011	1	1	19		15,58	328,23	2,55
20	2011	1	1	20		14,47	320,19	2,48
21	2011	1	1	21		13,84	337,85	2,02
22	2011	1	1	22		13,93	346,07	1,65
23	2011	1	1	23		13,53	335,38	1,72
24	2011	1	1	24		12,97	345,91	1,6

Figura 3.5: Datos meteorológicos del año 2011 preprocesados en Excel.

3.2. Estimación de la dirección de dispersión de los contaminantes atmosféricos: rosa de los vientos con los datos meteorológicos

El informe emitido sobre la rosa de los vientos de los años 2006-2008 y 2010-2011 (ver figuras 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 y 3.10) muestra los resultados de parámetros de velocidad máxima del viento alcanzada, la velocidad que predominó durante el año y la dirección de viento que prevaleció durante más tiempo (medido en porcentajes representados en los anillos concéntricos de la rosa). En la tabla 3.1 se enlista el valor de cada parámetro para cada año de estudio. En el anexo C se describen los gráficos de distribución de frecuencia resultantes de las clases de estabilidad de viento, del procesamiento de las datos meteorológicos con WRPLOT View

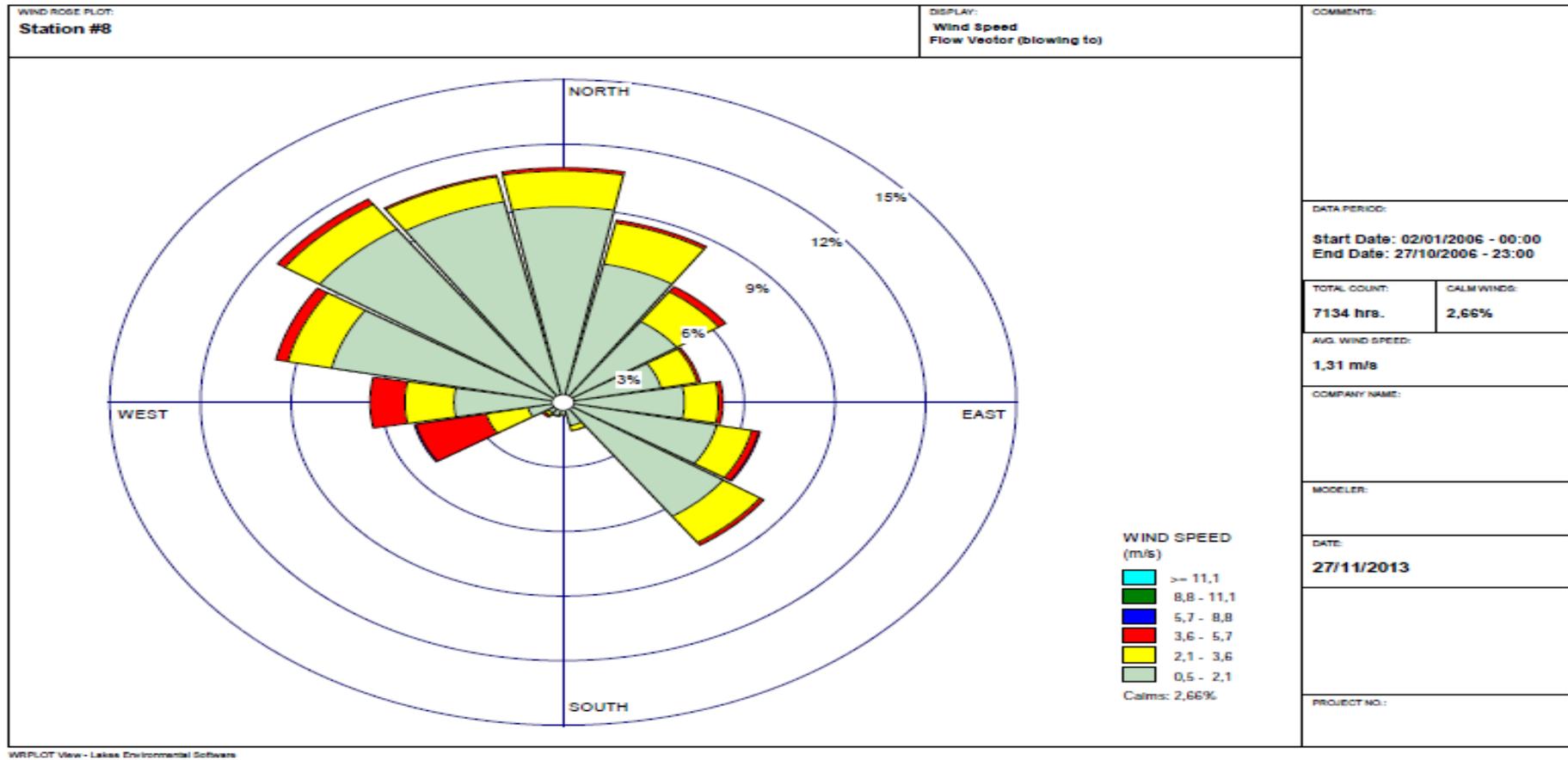


Figura 3.6: Informe de la rosa de los vientos del año 2006.

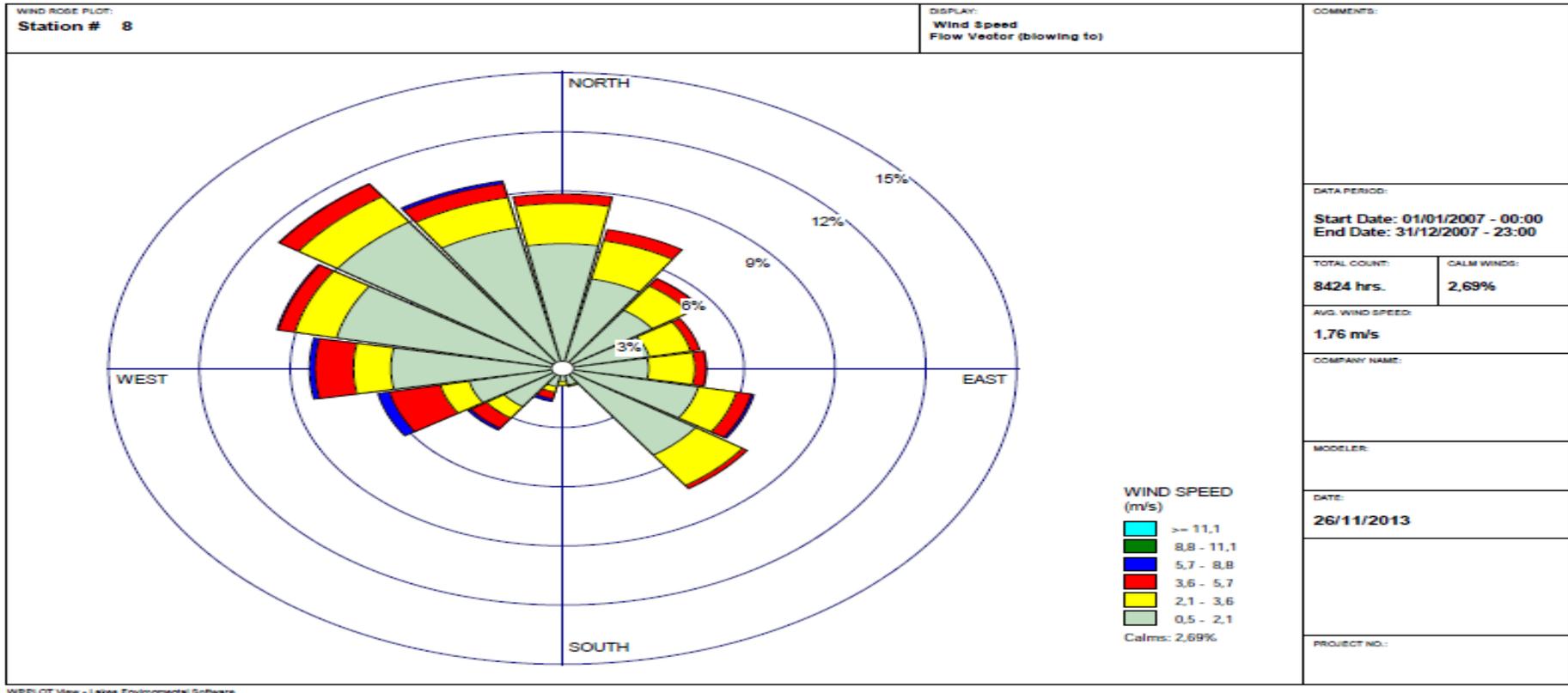


Figura 3.7: Informe de la rosa de los vientos del año 2007.

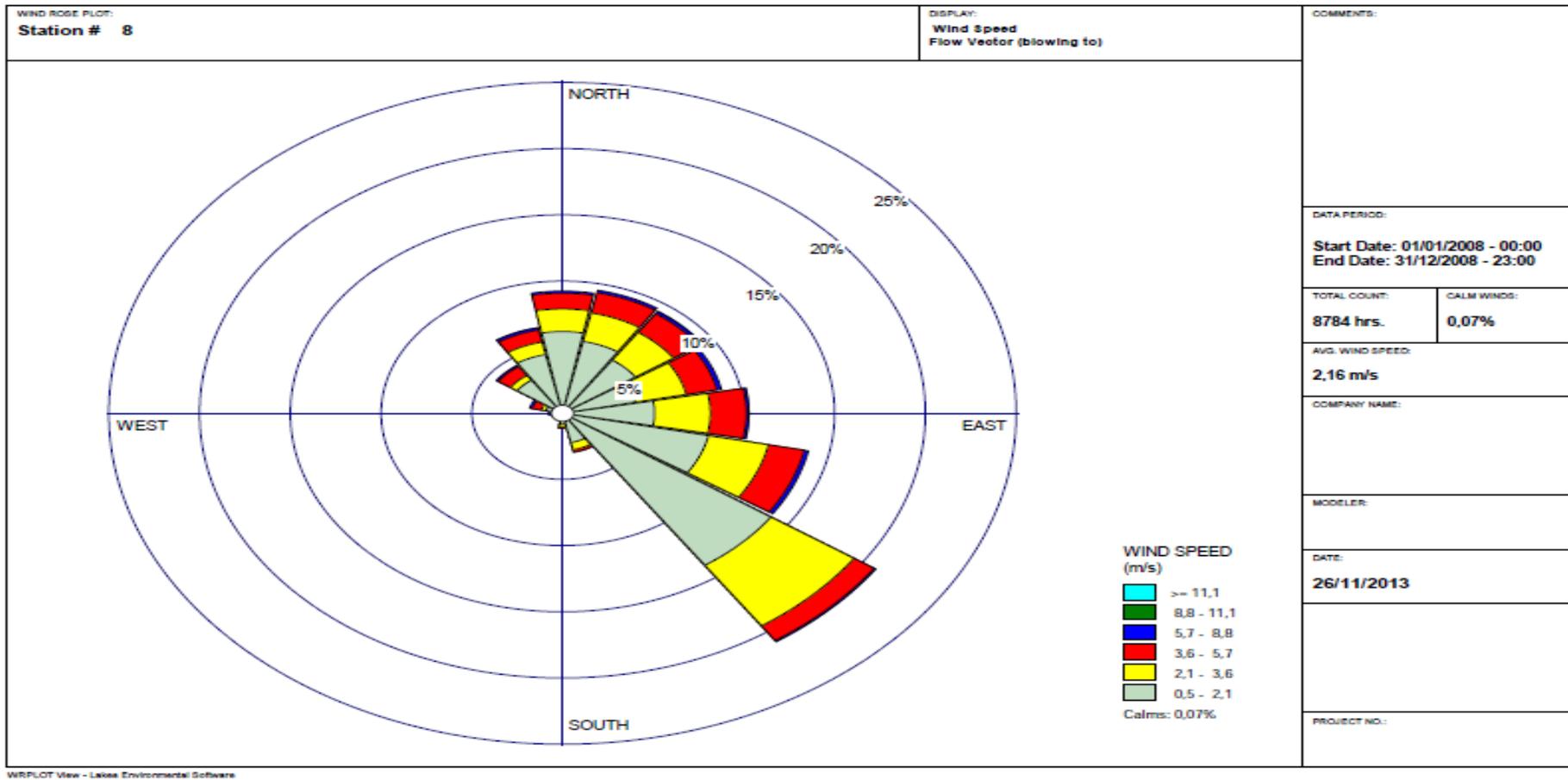


Figura 3.8: Informe de la rosa de los vientos del año 2008.

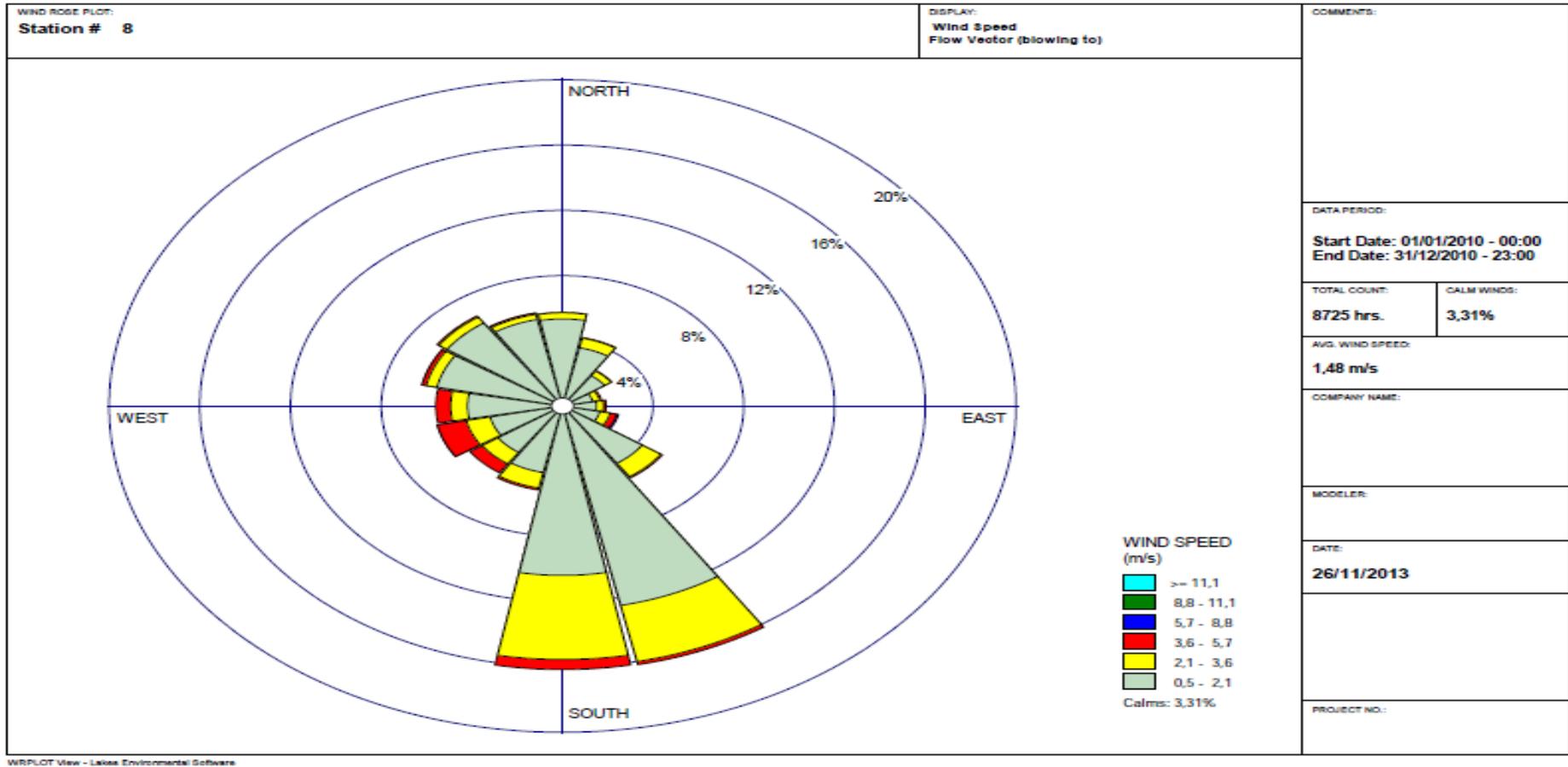


Figura 3.9: Informe de la rosa de los vientos del año 2010.

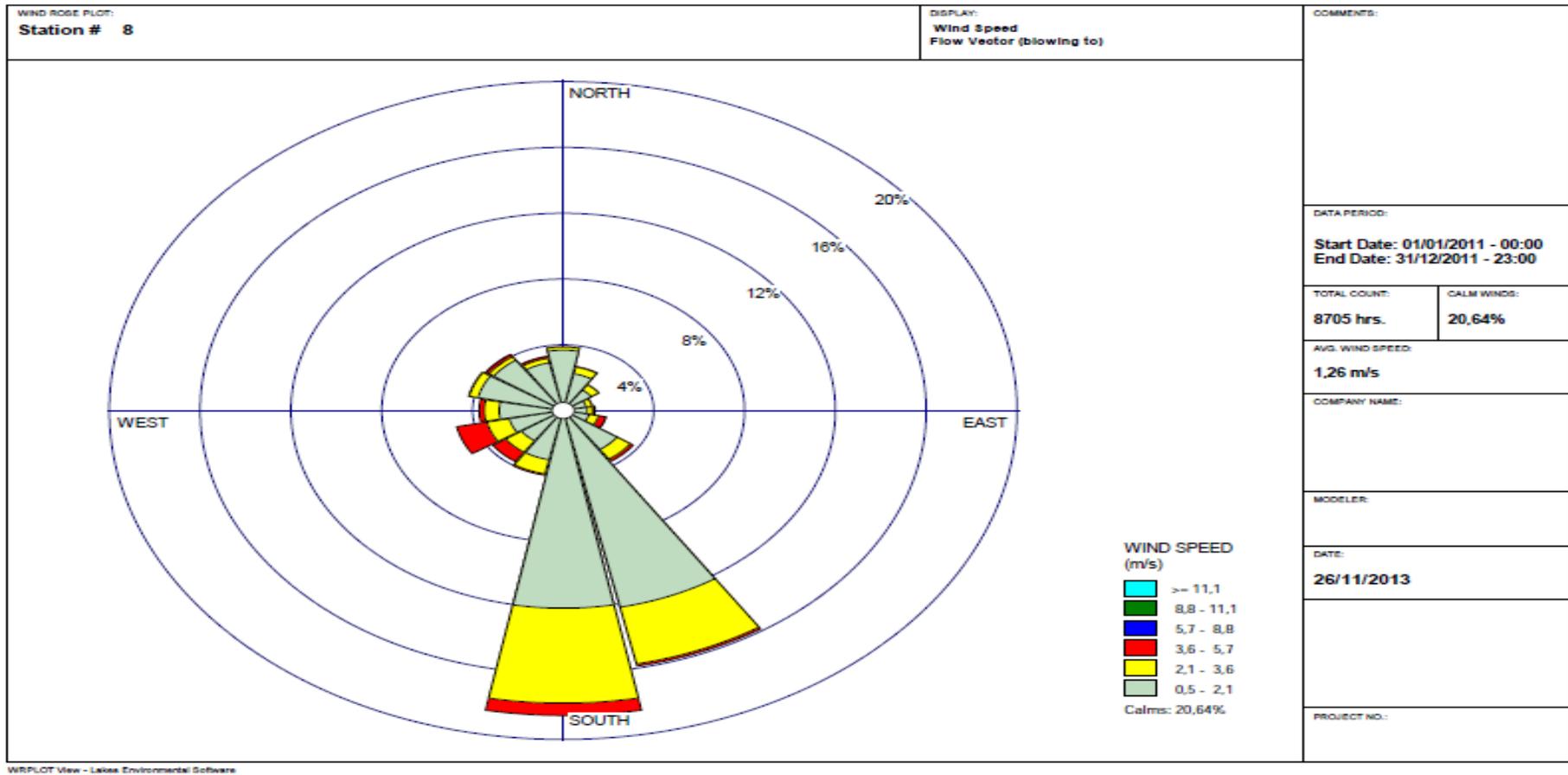


Figura 3.10: Informe de la rosa de los vientos del año 2011.

Tabla 3.1: Resultados de los parámetros medidos en las rosas de los vientos de los años 2006- 2008, 2010-2011.

AÑO	Rango de velocidad máxima de viento (m/s)	Rango de velocidad de viento predominante (m/s)	Velocidad promedio (m/s)	Dirección dominante
2006	5.7-8.8	0.5-2.1	1,31	Noroeste-Norte (NWN)
2007	5.7-8.8	0.5-2.1	1,76	Noroeste-Norte (NWN)
2008	8.8.-11.1	0.5-2.1	2,16	Sureste (SE)
2010	5.7-8.8	0.5-2.1	1,48	Sur-Sureste (SSE)
2011	5.7-8.8	0.5-2.1	1,26	Sur-Sureste (SSE)

En la figuras 3.11, 3.12, 3.13, 3.14, 3.15 se visualiza las distintas rosas de los vientos luego de ser exportadas por Google Earth al sitio de localización de la zona de monitoreo, que en este caso es la estación de la Secretaría de Ambiente de la zona del Valle de los Chillos. Estas mediciones abarcan un radio entre los 3-5 kilómetros desde la zona de monitoreo.

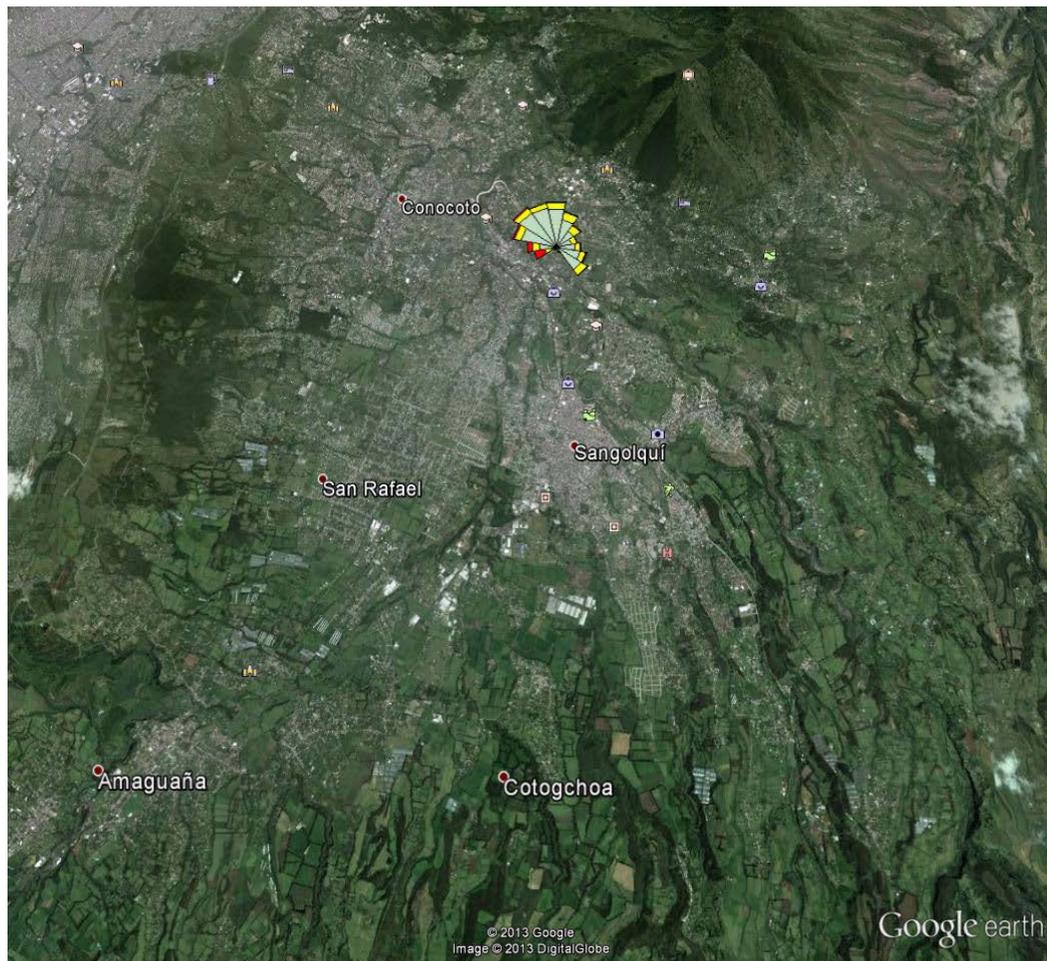


Figura 3.11: Visualización de la rosa de los vientos en Google Earth, del año 2006.



Figura 3.12: Visualización de la rosa de los vientos del año 2007 en Google Earth.



Figura 3.13: Visualización de la rosa de los vientos en Google Earth, del año 2008.



Figura 3.14: Visualización de la rosa de los vientos en Google Earth, del año 2010.

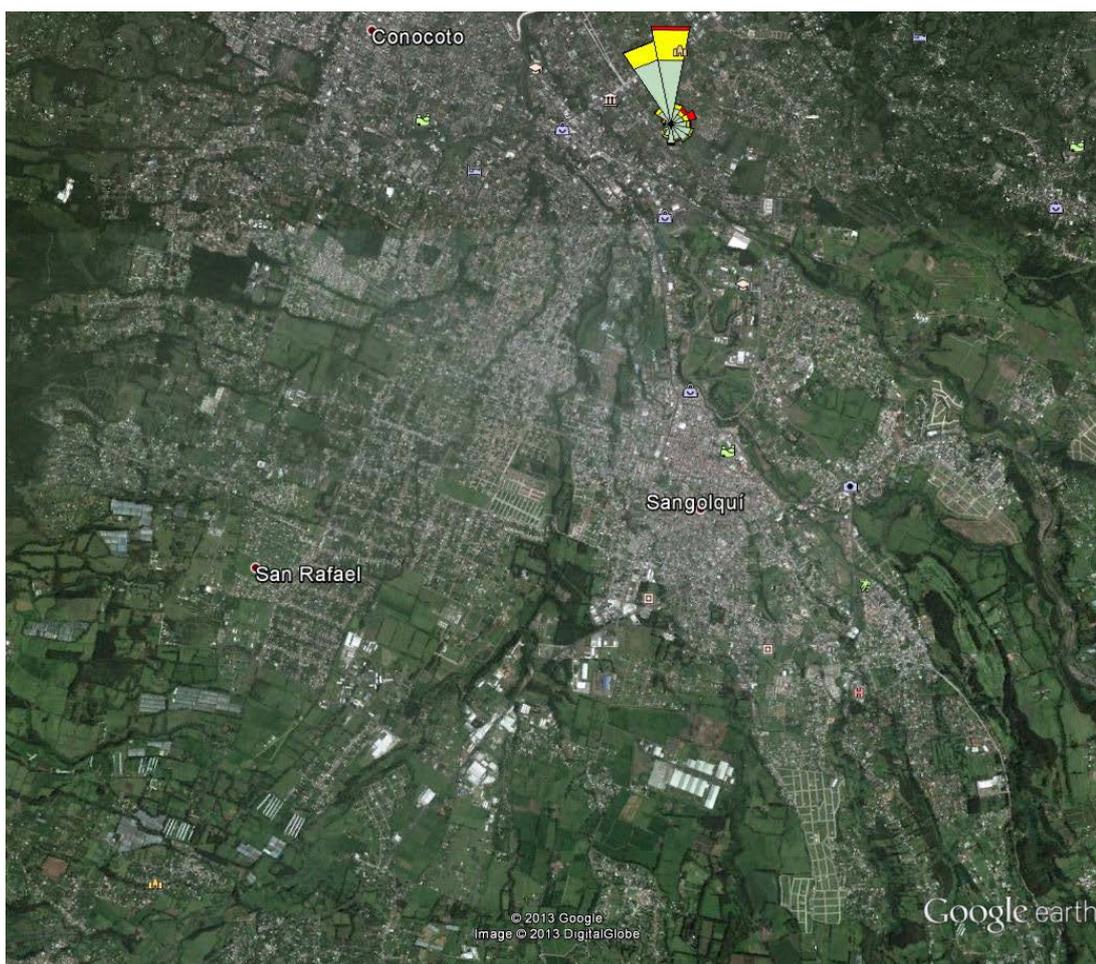


Figura 3.15: Visualización de la rosa de los vientos en Google Earth, del año 2011.

3.3. Estimación de las concentraciones de la dispersión de los gases contaminantes CO, SO₂ y NO_x producto de las emisiones de empresas N°1, N°2 y N°3 del cantón Rumiñahui.

3.3.1. Procesamiento con Screen View

Los archivos de Excel fueron procesados con el software versión libre Screen View, utilizando los datos de emisiones de fuentes fijas de las tres industrias del estudio. Se calculó la tasa de emisión promedio de las mediciones, las cuales son entre uno a tres mediciones de muestra por año, expresadas en las tablas 2.2, 2.4 y 2.6, (ver tablas 3.2, 3.3, 3.4).

Tabla 3.2: Tasas promedio de las emisiones de fuentes fijas de la empresa N°1.

Año	Tasa promedio de emisión NOx (g/s)	Tasa promedio de emisión SO2 (g/s)	Tasa promedio de emisión CO (g/s)	Velocidad promedio gas (m/s)	Temperatura promedio gas (°K)
2006	453,43	276,59	11,72	47,94	573
2010	230	641	35	2,27	382
2011	269	757	10	6,43	428
2012	358	1246	9	6,20	441
2013	361	1116	285	4,60	438

Tabla 3.3: Tasas promedio de las emisiones de fuentes fijas de la empresa N°2.

Año	Tasa promedio de emisión NOx (g/s)	Tasa promedio de emisión SO2 (g/s)	Tasa promedio de emisión CO (g/s)	Velocidad promedio gas (m/s)	Temperatura promedio gas (°K)
2006	63,80	257,71	2,06	27,20	448,00
2010	241,77	515,17	17,25	8,53	510,15
2011	487,30	1993,50	11,30	9,31	493,95
2012	382,33	1221,77	20,50	10,20	461,98
2013	496,93	2010,13	49,40	8,51	469,00

Tabla 3.4: Tasas promedio de las emisiones de fuentes fijas de la empresa N°3.

Año	Tasa promedio de emisión NOx (g/s)	Tasa promedio de emisión SO2 (g/s)	Tasa promedio de emisión CO (g/s)	Velocidad promedio gas (m/s)	Temperatura promedio gas (°K)
2006	1,87	0,97	0,08	9,97	720,50
2011	252,63	1005,97	9,20	10,08	398,40
2012	167,90	198,73	24,93	11,61	501,62
2013	172,60	428,33	15,40	12,33	495,05

Estas emisiones promedio fueron procesadas en el software, dando como resultados las concentraciones de la dispersión expresada en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en función de la distancia en metros (anexo 2).

En las tablas 3.5, 3.6, y 3.7 y figuras 3.16, 3.17 y 3.18, se muestra los datos de concentraciones de la dispersión de los contaminantes CO, NOx y SO₂ producto de

la empresa N°1, correspondientes a los distintos años en estudio. En las tablas 3.8, 3.9, 3.10 y figuras 3.19, 3.20, y 3.21 se observa los resultados de la dispersión de los contaminantes de la empresa N°2; y las tablas 3.11, 3.12, 3.13 y figuras 3.22, 3.23 y 3.24 la dispersión resultante de los contaminantes de la empresa N°3. Los resultados de simulación de la dispersión se obtuvieron a cada 100 metros de distancia, dentro de los 3 primeros km. A su vez se comparó con la norma límite del TULSMA para calidad de aire descrita en la tabla 1.14. Parte de los archivos resultantes del procesamiento con Screen View de las emisiones promedio se encuentran descritas en el anexo D

Tabla 3.5: Concentración de la dispersión del contaminante CO de la empresa N°1.

Concentración de CO de la empresa N°1						
Distancia (m)	Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)					
	2006	2010	2011	2012	2013	Norma
100	57,40	15810	1651	1196	58240	40000
200	322,50	16350	1804	1307	63480	40000
300	306,50	15580	1638	1187	57890	40000
400	287,60	13460	1542	1116	54850	40000
500	266,20	10980	1432	1030	49850	40000
600	245,90	8935	1284	955	46540	40000
700	220,60	7345	1214	865,8	41980	40000
800	207,30	6122	1117	804,5	37360	40000
900	195,50	5174	1016	757,3	33130	40000
1000	182,60	5323	920,3	704,1	29410	40000
1100	170,50	5366	835,4	650,3	26370	40000
1200	160,20	5336	761,1	600,9	23780	40000
1300	150,90	5254	696	556,1	24180	40000
1400	142,80	5139	714,5	519,6	24610	40000
1500	135,70	5001	728,5	536,1	24810	40000
1600	128,90	4849	736,6	548	24820	40000
1700	126,90	4690	739,7	555,8	24700	40000
1800	132,00	4528	738,8	560,3	24460	40000
1900	136,50	4367	734,8	561,9	24140	40000
2000	140,30	4209	728,1	561,2	23750	40000
2100	142,70	4051	716,4	555,7	23240	40000
2200	144,70	3900	704	549,1	22710	40000
2300	146,30	3757	690,9	541,8	22190	40000
2400	147,50	3620	677,5	534	21660	40000
2500	148,30	3491	663,8	525,7	21130	40000
2600	148,90	3368	650,1	517,1	20610	40000
2700	149,30	3251	636,4	508,2	20100	40000
2800	149,30	3140	622,7	499,3	19610	40000
2900	149,20	3035	609,3	490,2	19120	40000
3000	149,80	2935	596	481,2	18650	40000

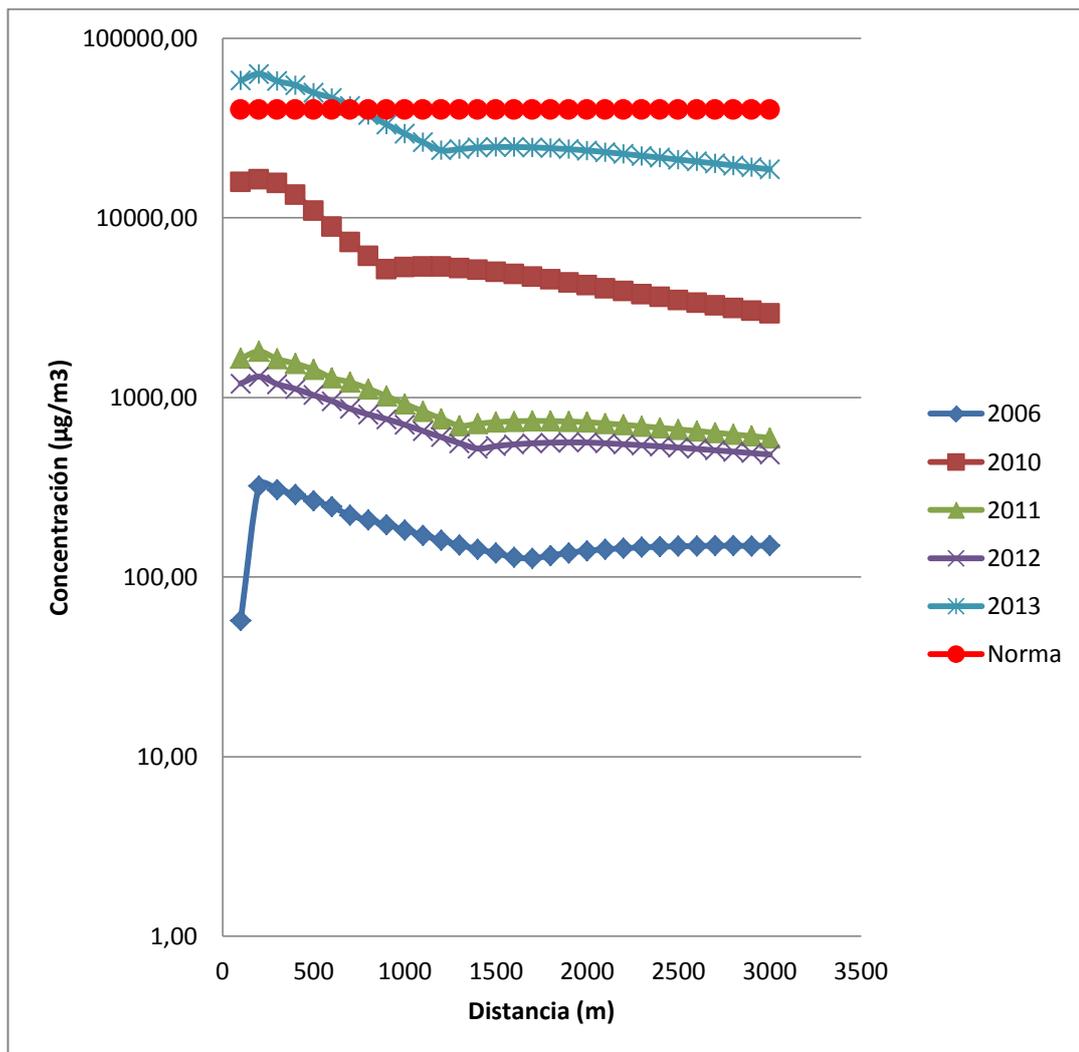


Figura 3.16: Concentración de la dispersión del contaminante CO de la empresa N°1 de los años 2006, 2010-2013 en función de la distancia, vs. la norma límite del TULSMA de calidad de aire.

Tabla 3.6: Concentración de la dispersión del contaminante NOx de la empresa N°1.

Distancia (m)	Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)					Norma
	2006	2010	2011	2012	2013	
100	2221	103900	44420	58030	73770	100
200	12480	107400	48540	63340	80410	100
300	11860	102400	44060	57550	73330	100
400	11130	88430	41480	54290	69480	100
500	10300	72180	38520	50340	63140	100
600	9514	58710	34540	45040	58950	100
700	8534	48260	32640	42570	53170	100
800	8021	40230	30060	39330	47320	100
900	7562	34000	27340	35870	41960	100
1000	7063	34980	24760	32540	37250	100
1100	6596	35260	22470	29580	33400	100
1200	6198	35060	20470	26980	30120	100
1300	5837	34530	18720	24700	30630	100
1400	5524	33770	19220	25130	31170	100
1500	5250	32860	19600	25640	31420	100
1600	4988	31860	19810	25950	31440	100
1700	4909	30820	19900	26080	31290	100
1800	5107	29760	19870	26070	30980	100
1900	5279	28700	19760	25950	30580	100
2000	5428	27660	19590	25730	30080	100
2100	5521	26620	19270	25330	29440	100
2200	5597	25630	18940	24900	28770	100
2300	5658	24690	18580	24450	28100	100
2400	5705	23790	18220	23990	27430	100
2500	5739	22940	17860	23510	26770	100
2600	5762	22130	17490	23040	26110	100
2700	5775	21360	17120	22560	25470	100
2800	5778	20630	16750	22080	24830	100
2900	5774	19940	16390	21610	24220	100
3000	5795,00	19290	16030	21150	23620	100

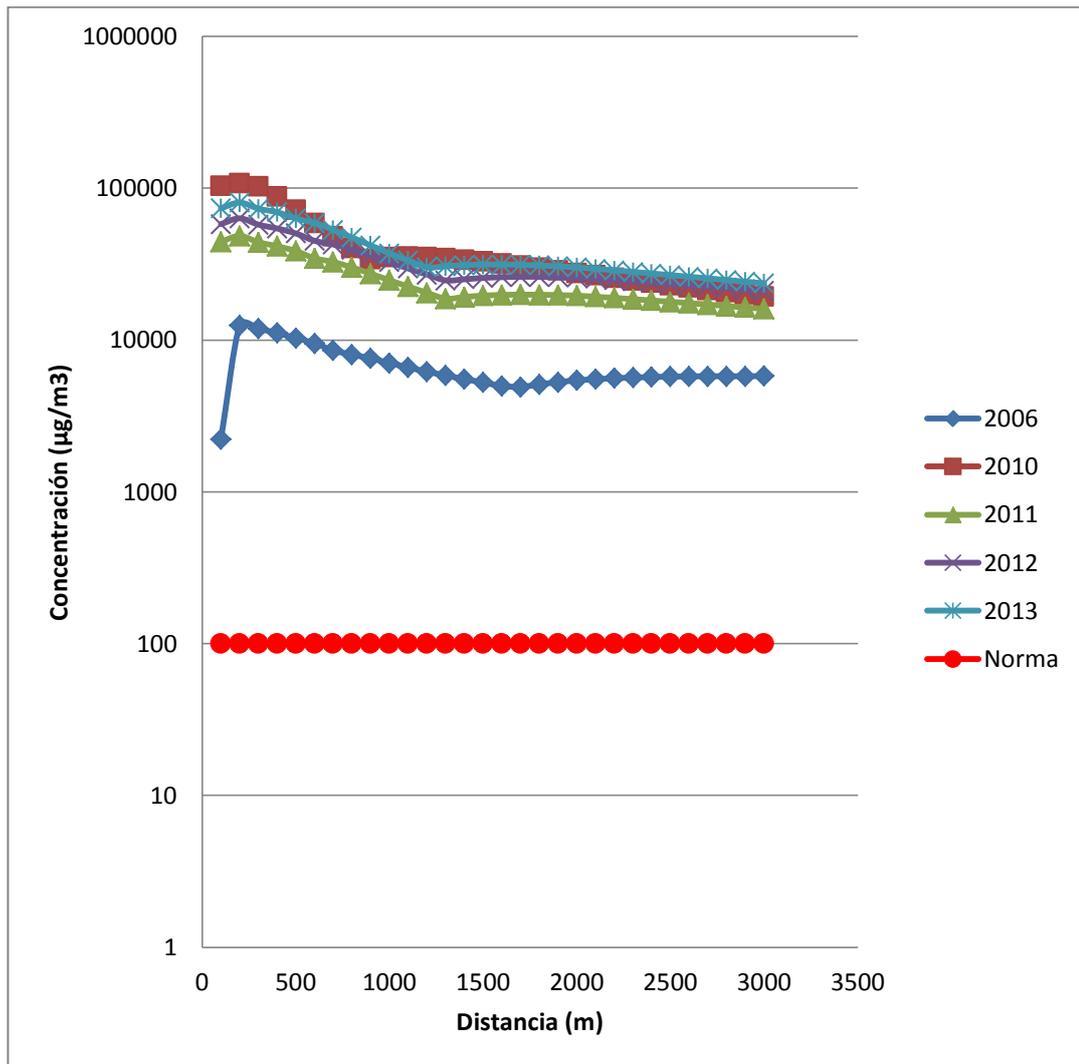


Figura 3.17: Concentración de la dispersión del contaminante NOx de la empresa N°1 de los años 2006, 2010-2013 en función de la distancia, vs. la norma límite del TULSMA de calidad de aire.

Tabla 3.7: Concentración de la dispersión del contaminante SO₂ de la empresa N°1.

Distancia (m)	Concentración (µg/m ³)					Norma
	2006	2010	2011	2012	2013	
100	1355	289600	125000	202000	228100	80
200	7610	299400	136600	220500	248600	80
300	7233	285400	124000	200300	226700	80
400	6787	246500	116700	188900	214800	80
500	6283	201200	108400	175200	195200	80
600	5804	163600	97210	156800	182200	80
700	5206	134500	91870	148100	164400	80
800	4893	112100	84590	136900	146300	80
900	4613	94760	76950	124900	129700	80
1000	4308	97480	69660	113300	115200	80
1100	4024	98270	63240	103000	103300	80
1200	3781	97720	57620	93910	93110	80
1300	3561	96230	52690	85950	94690	80
1400	3369	94110	54090	87450	96360	80
1500	3203	91580	55150	89250	97140	80
1600	3043	88810	55760	90320	97210	80
1700	2995	85900	56000	90780	96720	80
1800	3115	82940	55930	90750	95790	80
1900	3220	79980	55620	90310	94520	80
2000	3311	77080	55120	89560	93000	80
2100	3368	74180	54240	88170	91000	80
2200	3414	71430	53290	86670	88940	80
2300	3452	68800	52300	85100	86870	80
2400	3480	66300	51280	83490	84800	80
2500	3501	63930	50250	81840	82740	80
2600	3515	61670	49210	80170	80720	80
2700	3522	59540	48170	78510	78720	80
2800	3525	57510	47140	76850	76770	80
2900	3522	55580	46120	75210	74870	80
3000	3535,00	53750	45120	73590	73020	80

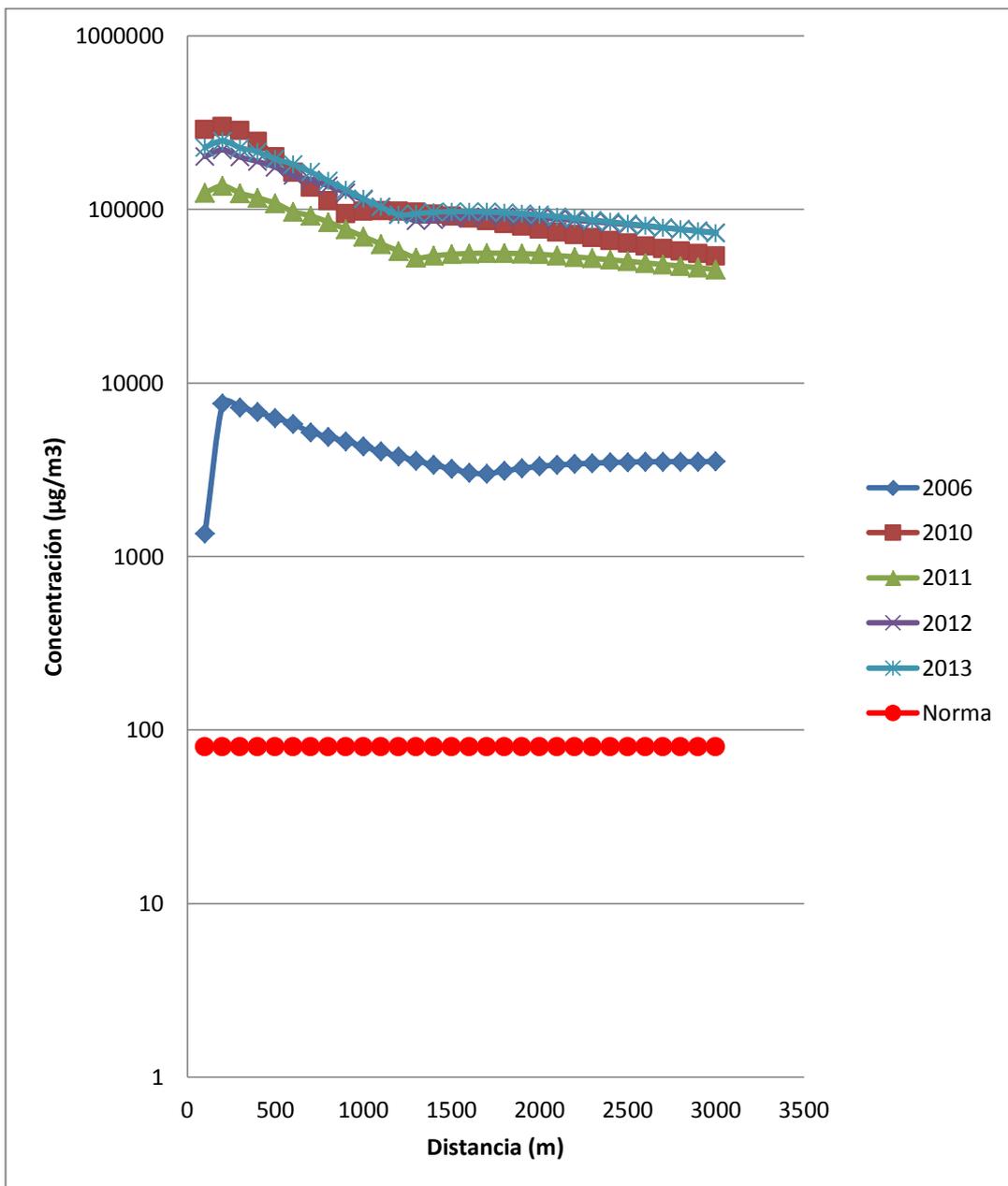


Figura 3.18: Concentración de la dispersión del contaminante SO₂ de la empresa N°1 de los años 2006, 2010-2013 en función de la distancia, vs. la norma límite del TULSMA de calidad de aire.

Tabla 3.8: Concentración de la dispersión del contaminante CO de la empresa N°2.

Distancia (m)	Concentración de CO en la empresa N°2					Norma
	2006	2010	2011	2012	2013	
100	218,70	3750,0	2377	4365	11820,0	40000
200	201,80	3462,0	2201	4036	10930,0	40000
300	182,50	3130,0	1992	3650	9924,0	40000
400	159,90	2738,0	1734	3185	8609,0	40000
500	140,70	2387,0	1506	2770	7593,0	40000
600	125,20	2137,0	1360	2493	6636,0	40000
700	113,00	1875,0	1200	2195	6041,0	40000
800	102,00	1750,0	1105	2032	5544,0	40000
900	94,39	1613,0	1025	1880	5034,0	40000
1000	86,64	1477,0	941,9	1725	4552,0	40000
1100	80,00	1350,0	863,6	1580	4130,0	40000
1200	75,38	1259,0	796,4	1463	4001,0	40000
1300	70,93	1299,0	823,2	1511	4102,0	40000
1400	71,06	1325,0	841,3	1543	4161,0	40000
1500	72,61	1340,0	852,1	1562	4185,0	40000
1600	75,61	1345,0	856,9	1570	4182,0	40000
1700	78,11	1343,0	856,8	1569	4158,0	40000
1800	80,16	1335,0	852,7	1561	4116,0	40000
1900	81,78	1322,0	845,5	1547	4061,0	40000
2000	83,02	1305,0	835,7	1529	3996,0	40000
2100	83,33	1281,0	820,8	1501	3911,0	40000
2200	83,42	1255,0	805,3	1472	3824,0	40000
2300	83,34	1229,0	789,2	1442	3736,0	40000
2400	83,10	1203,0	773	1412	3648,0	40000
2500	82,73	1177,0	756,6	1382	3562,0	40000
2600	82,24	1151,0	740,3	1352	3476,0	40000
2700	81,66	1125,0	724,1	1322	3392,0	40000
2800	81,00	1099,0	708	1292	3309,0	40000
2900	80,27	1074,0	692,3	1263	3229,0	40000
3000	79,48	1050,0	676,8	1235	3150,0	40000

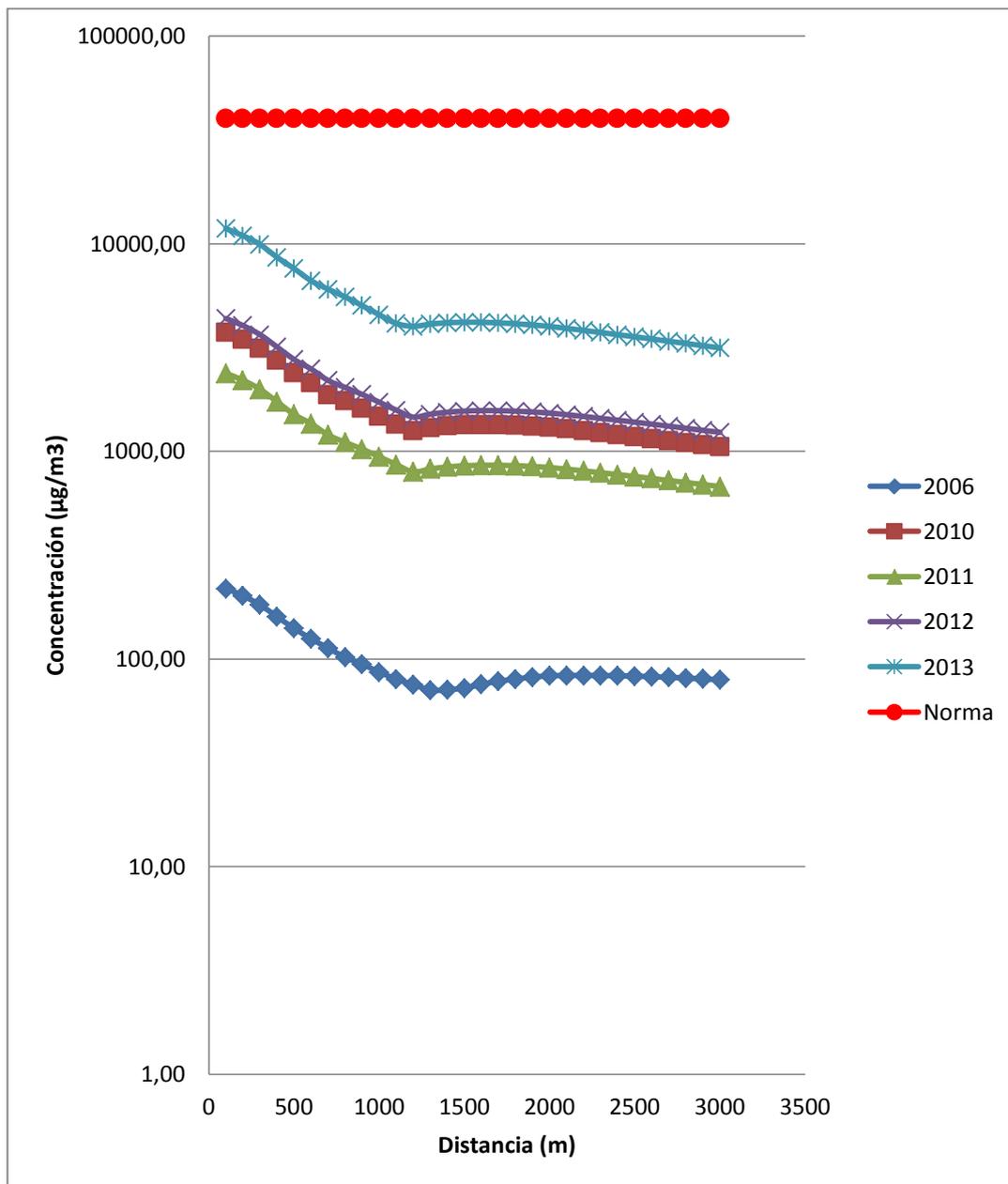


Figura 3.19: Concentración de la dispersión del contaminante CO de la empresa N°2 de los años 2006, 2010-2013 en función de la distancia, vs. la norma límite del TULSMA de calidad de aire.

Tabla 3.9: Concentración de la dispersión del contaminante NOx de la empresa N°2.

Distancia (m)	Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)					Norma
	2006	2010	2011	2012	2013	
100	6774,00	52580	102500	81400	119000,0	100
200	6251,00	48530	94910	75280	110000,0	100
300	5652,00	43880	85890,00	68080	99820,0	100
400	4952,00	38380	74780,00	59390	86600,0	100
500	4357,00	33470	64960,00	51670	76380,0	100
600	3877,00	29960	58630,00	46490	66760,0	100
700	3498,00	26280	51740,00	40940	60770,0	100
800	3159,00	24530	47660,00	37890	55770,0	100
900	2923,00	22620	44190,00	35060	50640,0	100
1000	2683,00	20700	40620,00	32180	45790,0	100
1100	2478,00	18930	37240,00	29480	41550,0	100
1200	2335,00	17650	34340,00	27290	40250,0	100
1300	2197,00	18210	35500,00	28180	41260,0	100
1400	2201,00	18570	36280,00	28790	41850,0	100
1500	2249,00	18780	36750,00	29140	42100,0	100
1600	2342,00	18850	36950,00	29290	42070,0	100
1700	2419,00	18830	36950,00	29270	41820,0	100
1800	2482,00	18710	36770,00	29110	41400,0	100
1900	2533,00	18530	36460,00	28850	40850,0	100
2000	2571,00	18290	36040,00	28510	40200,0	100
2100	2581,00	17950	35400,00	27990	39340,0	100
2200	2584,00	17600	34730,00	27450	38460,0	100
2300	2581,00	17230	34030,00	26900	37580,0	100
2400	2574,00	16860	33330,00	26340	36700,0	100
2500	2562,00	16500	32630,00	25770	35830,0	100
2600	2547,00	16130	31920,00	25210	34960,0	100
2700	2529,00	15770	31220,00	24650	34120,0	100
2800	2509,00	15410	30530,00	24100	33290,0	100
2900	2486,00	15060	29850,00	23560	32480,0	100
3000	2462,00	14710	29190,00	23030	31690,0	100

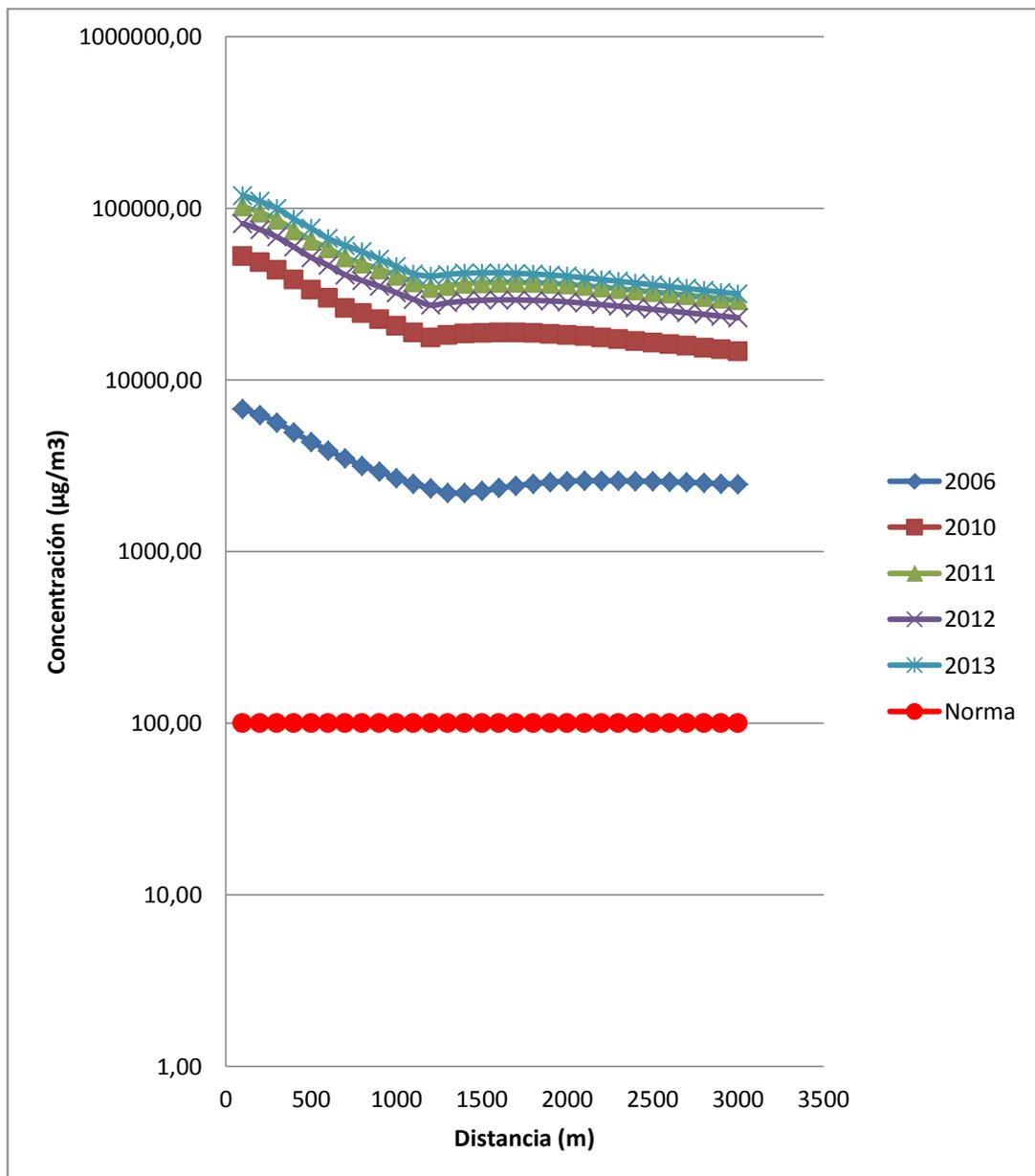


Figura 3.20: Concentración de la dispersión del contaminante NOx de la empresa N°2 de los años 2006, 2010-2013 en función de la distancia, vs. la norma límite del TULSMA de calidad de aire.

Tabla 3.10: Concentración de la dispersión del contaminante SO₂ de la empresa N°2.

Distancia (m)	Concentración (µg/m ³)					Norma
	2006	2010	2011	2012	2013	
100	27300,00	112000,0	419400	260100	481200	80
200	25190,00	103400,0	388300	240600	444800	80
300	22770,00	93500,0	351400,00	217500	403800	80
400	19950,00	81770,0	305900,00	189800	350300	80
500	17560,00	71320,0	265700,00	165100	309000	80
600	15620,00	63830,0	239900,00	148600	270000	80
700	14100,00	56000,0	211700,00	130800	245800	80
800	12730,00	52260,0	195000,00	121100	225600	80
900	11780,00	48190,0	180800,00	112000	204800	80
1000	10810,00	44110,0	166200,00	102800	185200	80
1100	9985,00	40330,0	152400,00	94190	168100	80
1200	9408,00	37610,0	140500,00	87200	162800	80
1300	8852,00	38790,0	145200,00	90070	166900	80
1400	8869,00	39570,0	148400,00	91990	169300	80
1500	9063,00	40010,0	150300,00	93110	170300	80
1600	9437,00	40180,0	151200,00	93590	170200	80
1700	9749,00	40110,0	151200,00	93530	169200	80
1800	10000,00	39870,0	150400,00	93040	167500	80
1900	10210,00	39480,0	149200,00	92200	165200	80
2000	10360,00	38980,0	147400,00	91100	162600	80
2100	10400,00	38250,0	144800,00	89450	159100	80
2200	10410,00	37490,0	142100,00	87730	155600	80
2300	10400,00	36720,0	139200,00	85960	152000	80
2400	10370,00	35940,0	136400,00	84160	148500	80
2500	10320,00	35150,0	133500,00	82360	144900	80
2600	10260,00	34370,0	130600,00	80560	141400	80
2700	10190,00	33600,0	127700,00	78780	138000	80
2800	10110,00	32840,0	124900,00	77030	134700	80
2900	10020,00	32090,0	122100,00	75300	131400	80
3000	9920,00	31350,0	119400,00	73600	128200	80

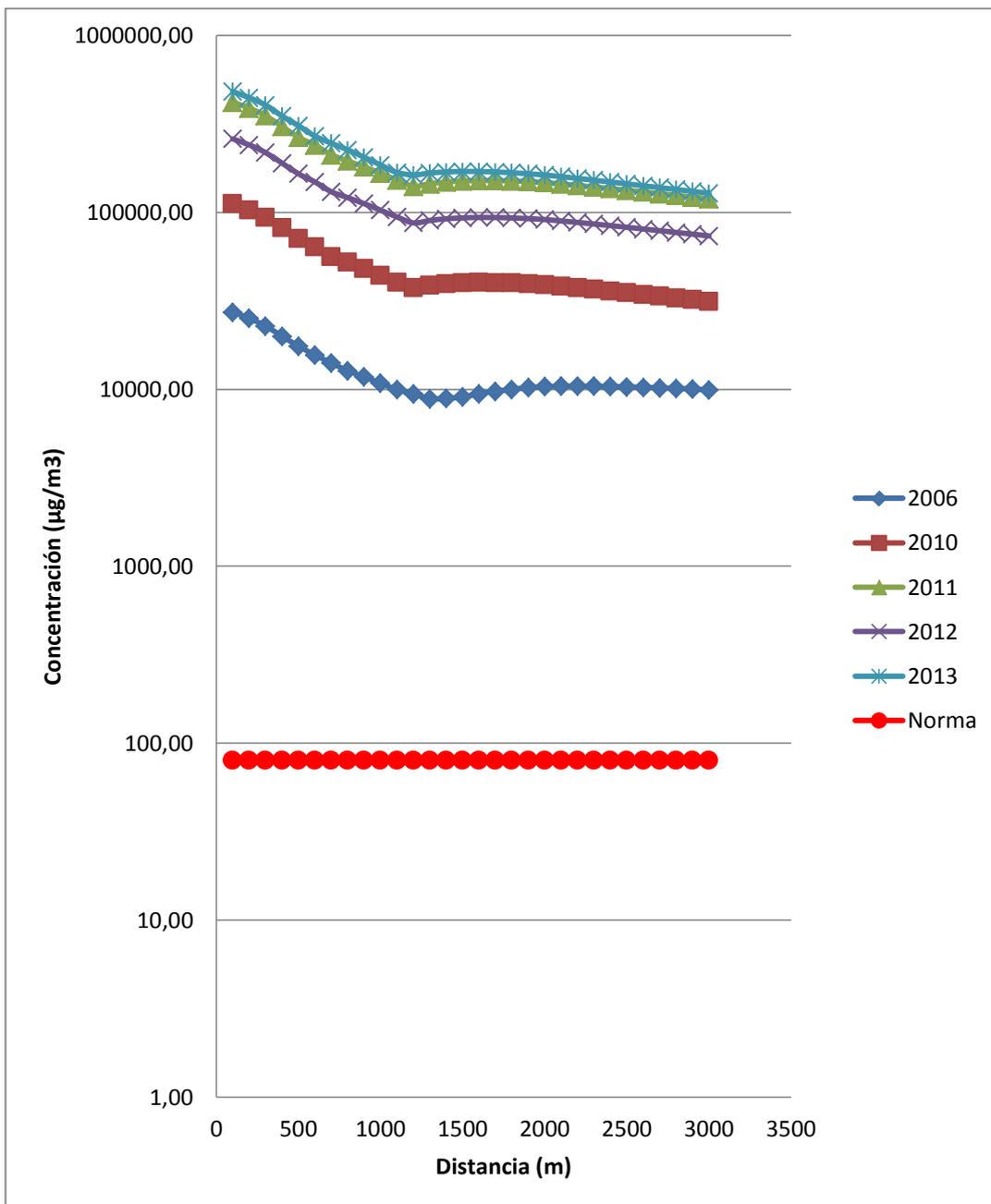


Figura 3.21: Concentración de la dispersión del contaminante SO₂ de la empresa N° 2 de los años 2006, 2010-2013 en función de la distancia, vs. la norma límite del TULSMA de calidad de aire.

Tabla 3.11: Concentración de la dispersión del contaminante CO de la empresa N°3.

Distancia (m)	Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				Norma
	2006	2011	2012	2013	
100	0,0151	51,22	12,72	5864,00	40000
200	0,8276	260,70	348,00	197,10	40000
300	1,2250	240,70	436,80	259,40	40000
400	1,1920	230,50	420,50	250,00	40000
500	1,1180	214,60	383,50	230,40	40000
600	1,0160	196,50	361,70	215,00	40000
700	0,9581	188,30	332,30	199,10	40000
800	0,8817	178,80	310,90	185,30	40000
900	0,8286	169,30	286,60	171,90	40000
1000	0,7690	160,20	274,40	163,10	40000
1100	0,7092	151,40	261,90	156,20	40000
1200	0,6725	142,80	248,70	148,80	40000
1300	0,6461	136,00	235,70	141,30	40000
1400	0,6187	129,30	224,80	134,50	40000
1500	0,5911	122,90	214,00	128,40	40000
1600	0,5646	118,10	205,20	122,70	40000
1700	0,5421	113,30	196,50	117,80	40000
1800	0,5200	113,40	188,40	113,00	40000
1900	0,5004	117,00	181,70	108,70	40000
2000	0,4937	119,90	189,20	112,10	40000
2100	0,5110	121,70	194,80	115,60	40000
2200	0,5267	123,00	199,9	118,7	40000
2300	0,5409	124,00	204,40	121,50	40000
2400	0,5537	124,60	208,20	123,90	40000
2500	0,5650	125,00	211,60	126,00	40000
2600	0,5751	125,10	214,50	127,80	40000
2700	0,5839	125,00	216,90	129,40	40000
2800	0,5916	124,70	218,90	130,70	40000
2900	0,5983	124,20	220,50	131,70	40000
3000	0,6039	123,60	221,70	132,60	40000

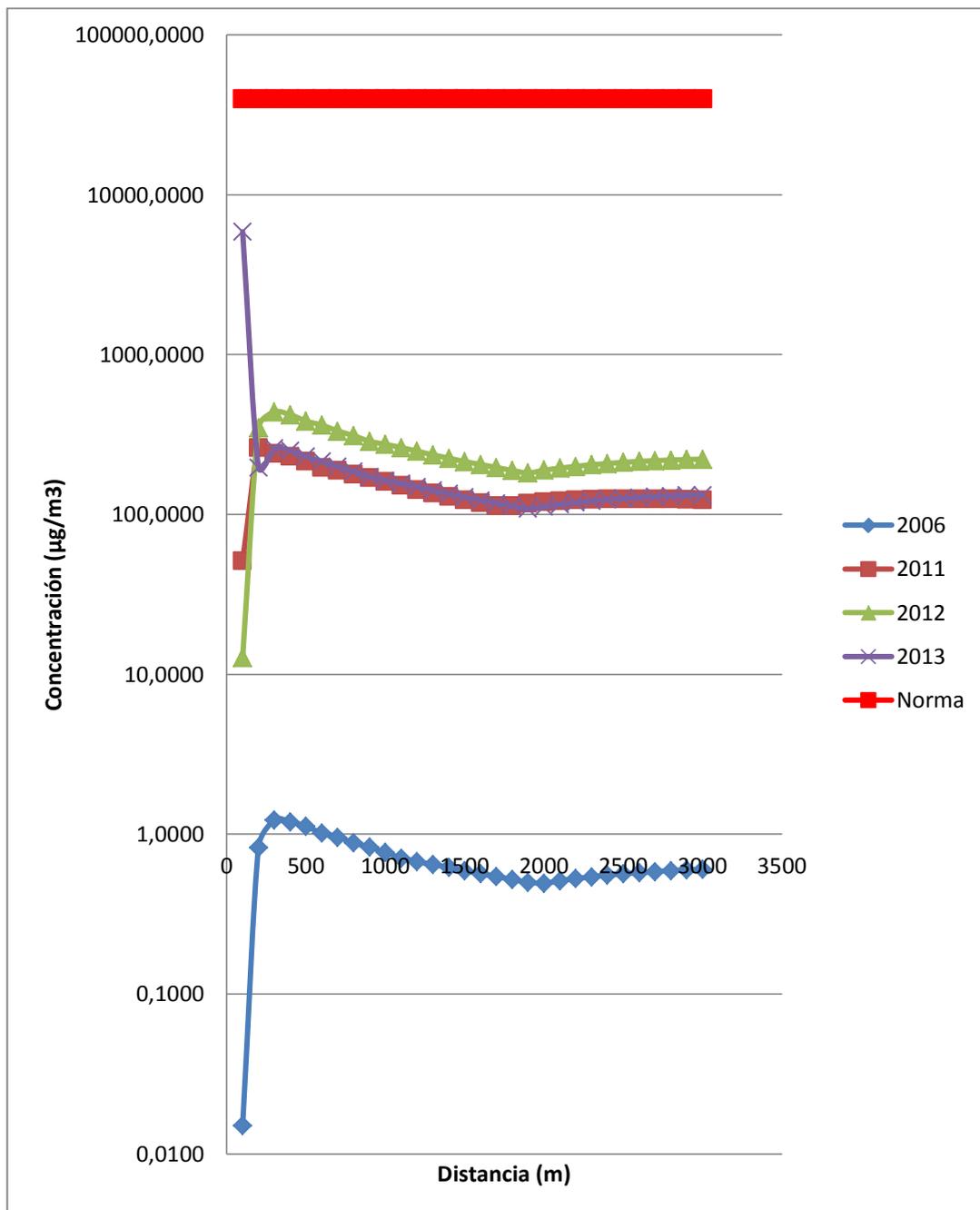


Figura 3.22: Concentración de la dispersión del contaminante CO de la empresa N°3 de los años 2006, 2011-2013 en función de la distancia, vs. la norma límite del TULSMA de calidad de aire.

Tabla 3.12: Concentración de la dispersión del contaminante NOx de la empresa N°3.

Distancia (m)	Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				Norma
	2006	2011	2012	2013	
100	0,3525	1407	85,64	66	100
200	19,35	7158	2344	2209	100
300	28,63	6610	2942	2907	100
400	27,87	6330	2832	2801	100
500	26,13	5894	2583	2582	100
600	23,75	5396	2436	2410	100
700	22,40	5171	2238	2231	100
800	20,61	4909	2094	2077	100
900	19,37	4649	1931	1926	100
1000	17,98	4399	1848	1828	100
1100	16,58	4156	1764	1751	100
1200	15,72	3920	1675	1668	100
1300	15,10	3735	1587	1584	100
1400	14,46	3549	1514	1508	100
1500	13,82	3375	1441	1439	100
1600	13,20	3243	1382	1375	100
1700	12,67	3111	1324	1320	100
1800	12,16	3114	1269	1266	100
1900	11,70	3212	1224	1218	100
2000	11,54	3293	1274	1257	100
2100	11,94	3341	1312	1296	100
2200	12,31	3377	1346	1331	100
2300	12,64	3404	1376	1362	100
2400	12,94	3422	1402	1389	100
2500	13,21	3432	1425	1412	100
2600	13,44	3435	1444	1433	100
2700	13,65	3432	1461	1450	100
2800	13,83	3424	1474	1465	100
2900	13,98	3411	1485	1477	100
3000	14,12	3394	1493	1486	100

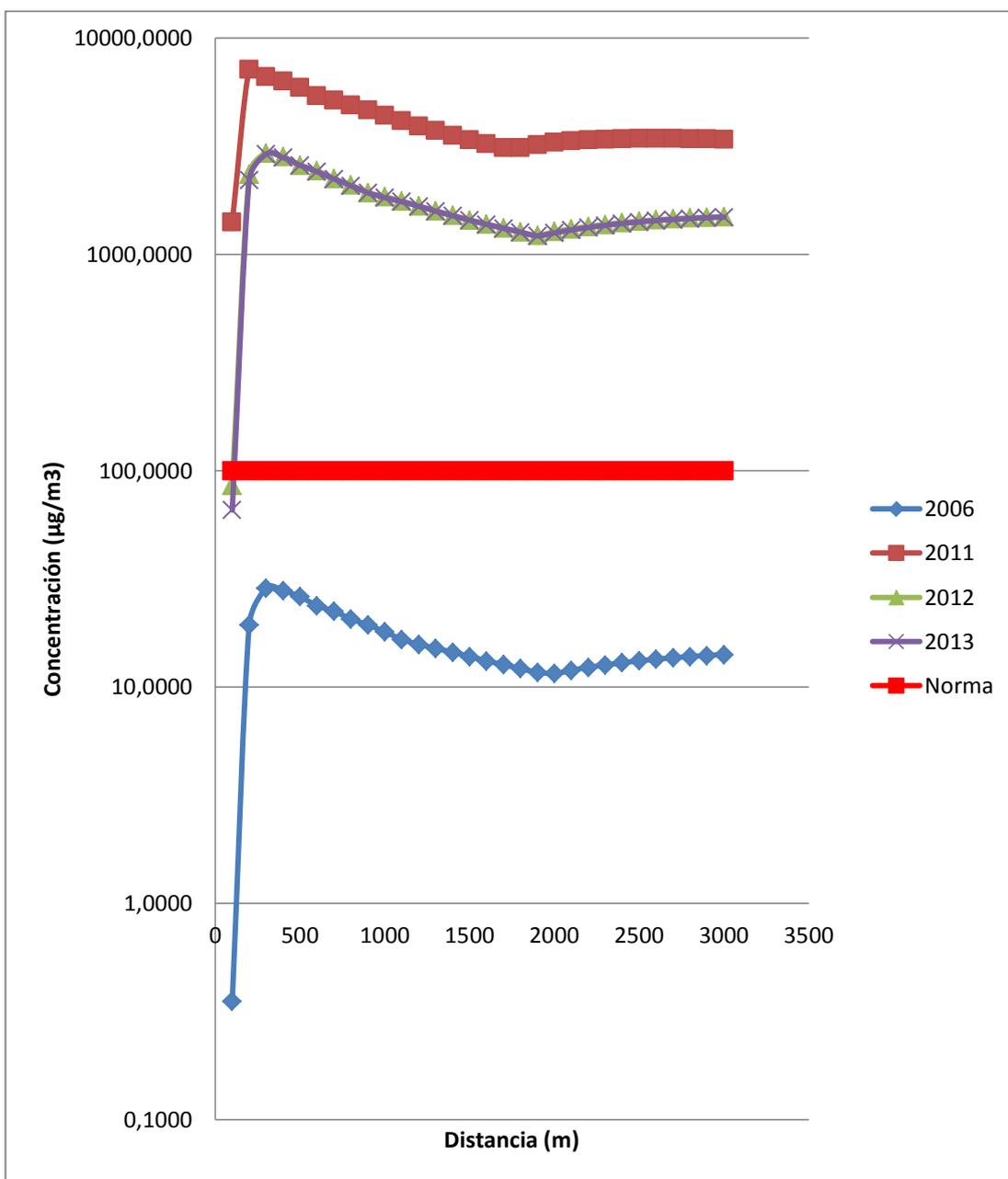


Figura 3.23: Concentración de la dispersión del contaminante NO_x de la empresa N° 3 de los años 2006, 2011-2013 en función de la distancia, vs. la norma límite del TULSMA de calidad de aire.

Tabla 3.13: Concentración de la dispersión del contaminante SO₂ de la empresa
N°3.

Distancia (m)	Concentración (µg/m ³)				Norma
	2006	2011	2012	2013	
100	0,1828	5601	101,40	163,10	80
200	10,04	28500	2774,0	5483,00	80
300	14,85	26320	3482,0	7215,00	80
400	14,46	25210	3352,0	6952,00	80
500	13,55	23470	3057,0	6409,00	80
600	12,32	21490	2883,0	5980,00	80
700	11,62	20590	2649,0	5537,00	80
800	10,69	19550	2478,0	5155,00	80
900	10,05	18510	2285,0	4780,00	80
1000	9,324	17520	2188,0	4535,00	80
1100	8,598	16550	2088,0	4345,00	80
1200	8,155	15610	1983,0	4140,00	80
1300	7,834	14870	1879,0	3931,00	80
1400	7,501	14130	1792,0	3742,00	80
1500	7,167	13440	1706,0	3571,00	80
1600	6,845	12910	1636,0	3413,00	80
1700	6,573	12390	1567,0	3277,00	80
1800	6,305	12400	1502,0	3142,00	80
1900	6,067	12790	1449,0	3022,00	80
2000	5,986	13110	1508,0	3119,00	80
2100	6,195	13300	1553,0	3216,00	80
2200	6,386	13450	1594,0	3302	80
2300	6,558	13550	1629,0	3379,00	80
2400	6,713	13620	1660,0	3447,00	80
2500	6,851	13660	1687,0	3505,00	80
2600	6,973	13680	1710,0	3556,00	80
2700	7,080	13670	1729,0	3599,00	80
2800	7,174	13630	1745,0	3635,00	80
2900	7,254	13580	1757,0	3664,00	80
3000	7,322	13520	1767,0	3688,00	80

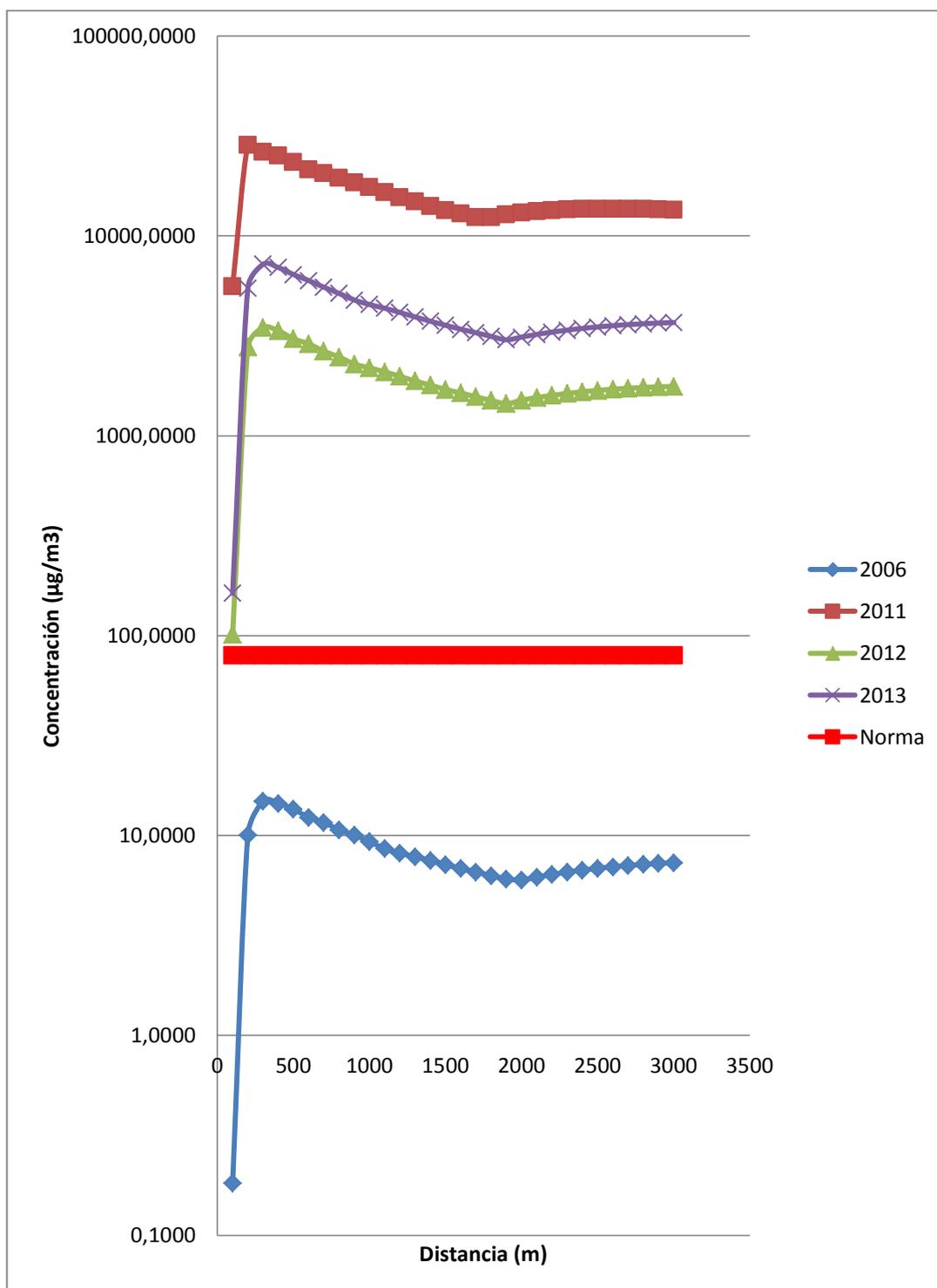


Figura 3.24: Concentración de la dispersión del contaminante SO₂ de la empresa N° 3 de los años 2006, 2011-2013 en función de la distancia, vs. la norma límite del TULSMA de calidad de aire.

Se procesó también cada una de las repeticiones de las tomas de los contaminantes de emisiones de fuentes fijas, de las tres empresas (ver anexo 3). En las tablas 3.14, 3.15 y 3.16 y figuras 3.25, 3.26 y 3.27 se observa los resultados de los cálculos de concentraciones medias de dispersión por año de los contaminantes CO, NO_x y SO₂ de la empresa N°1; en las tablas 3.17, 3.18, 3.19 y figuras 3.28, 3.29 y 3.30 corresponden a las concentraciones medias de la empresa N°2 y las tablas 3.20, 3.21, 3.22 y figuras 3.31, 3.32 y 3.33 a la empresa N°3. Las gráficas resultantes se compararon con la norma límite del TULSMA sobre calidad de aire, descrito en la tabla 1.14. En el anexo E se indica los resultados de dispersión procesados con Screen View de cada una de las repeticiones de cada contaminante analizado.

Tabla 3.14: Concentración media de las dispersiones de todas las muestras medidas de CO de la empresa N°1.

Año	Concentración (µg/m ³)	Norma límite (µg/m ³)
2006	173,09	40000
2010	5919,97	40000
2011	773,75	40000
2012	692,51	40000
2013	31021,17	40000

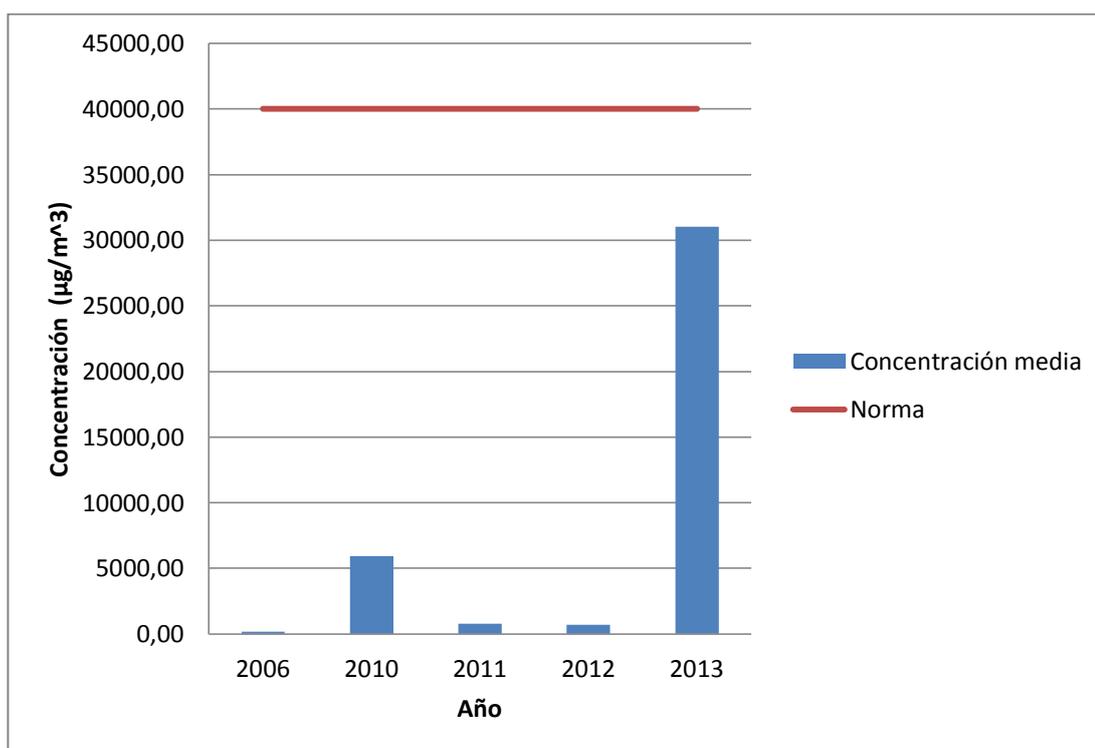


Figura 3.25: Comparación entre las concentraciones medias de la dispersión del contaminante CO de la empresa N°1 de los años 2006, 2010-2013 y la norma límite del TULSMA sobre calidad de aire.

Tabla 3.15: Concentración media de las dispersiones de todas las muestras medidas de NOx de la empresa N°1.

Año	Concentración (µg/m³)	Norma límite (µg/m³)
2006	6696,83	100
2010	53468,67	100
2011	34026,17	100
2012	35687,83	100
2013	39298,33	100

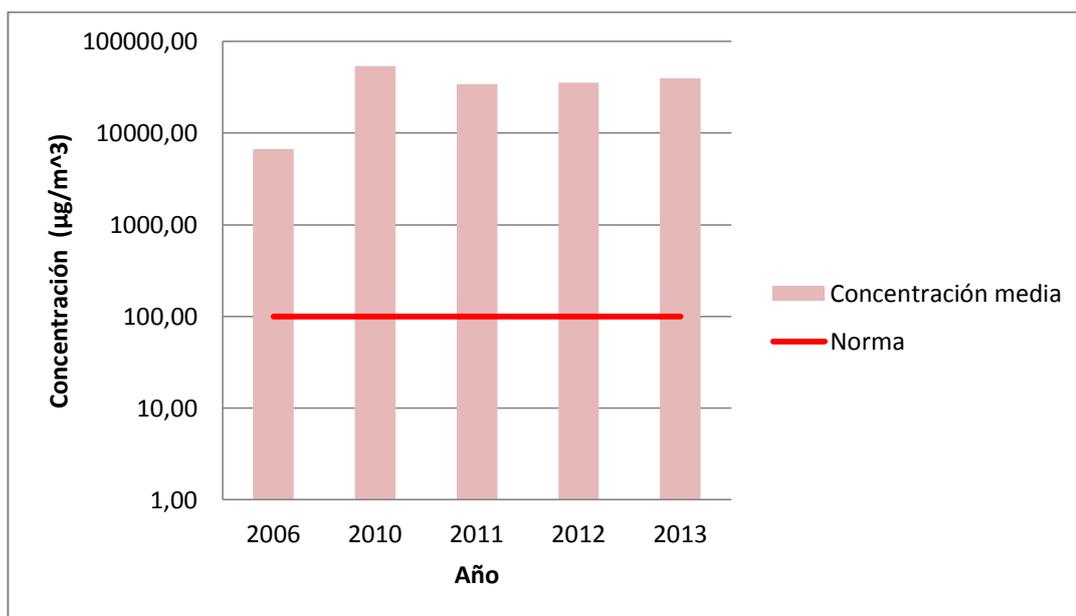


Figura 3.26: Comparación entre las concentraciones medias de la dispersión del contaminante NOx de la empresa N°1 de los años 2006, 2010-2013 y la norma límite del TULSMA sobre calidad de aire.

Tabla 3.16: Concentración media de las dispersiones de todas las muestras medidas de SO₂ de la empresa N°1.

AÑO	Concentración (µg/m ³)	Norma límite (µg/m ³)
2006	4084,93	80
2010	154201,44	80
2011	100766,78	80
2012	128501,50	80
2013	120699,83	80

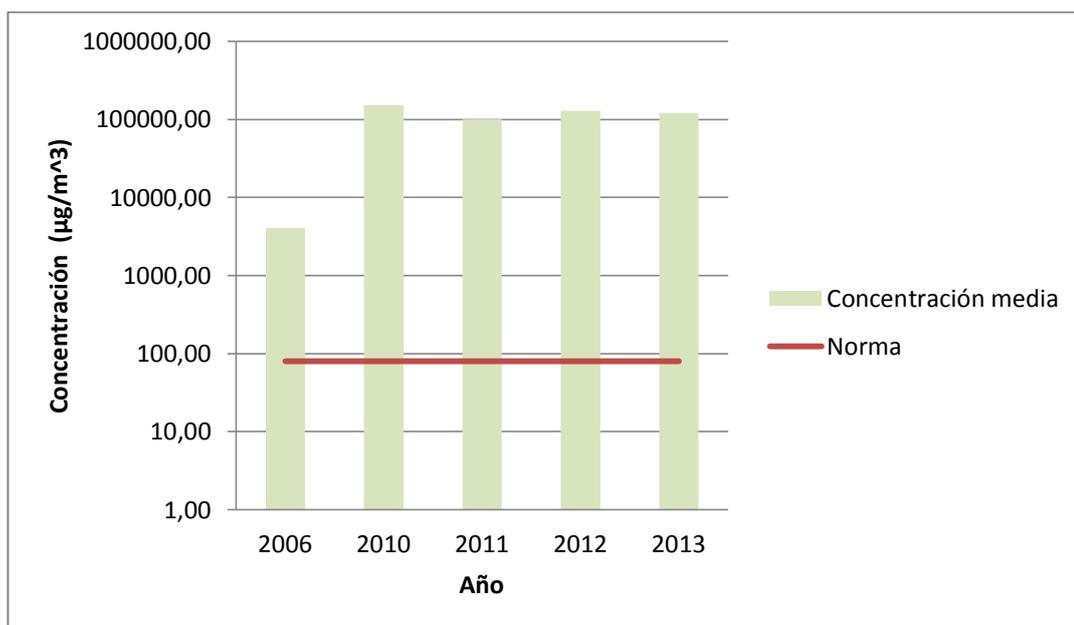


Figura 3.27: Comparación entre las concentraciones medias de la dispersión del contaminante SO₂ de la empresa N°1 de los años 2006, 2010-2013 y la norma límite del TULSMA sobre calidad de aire.

Tabla 3.17: Concentración media de las dispersiones de todas las muestras medidas de CO de la empresa N°2.

AÑO	Concentración CO (µg/m ³)	Norma límite (µg/m ³)
2006	100,47	40000
2010	1637,48	40000
2011	1045,08	40000
2012	2067,37	40000
2013	5992,47	40000

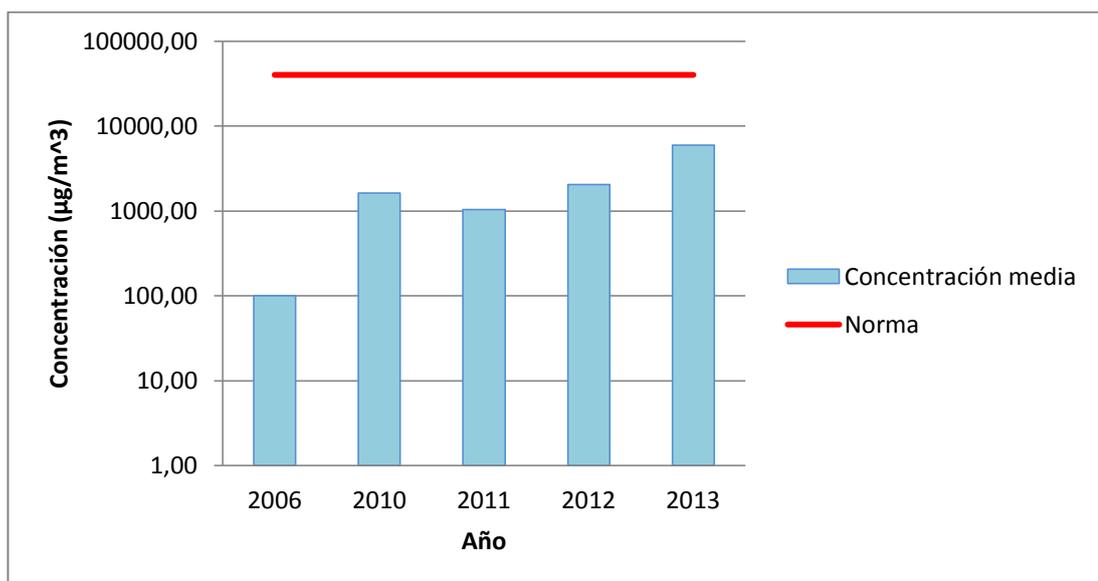


Figura 3.28: Comparación entre las concentraciones medias de la dispersión del contaminante CO de la empresa N°2 de los años 2006, 2010-2013 y la norma límite del TULSMA sobre calidad de aire.

Tabla 3.18: Concentración media de las dispersiones de todas las muestras medidas de NOx de la empresa N°2.

AÑO	Concentración NOx (µg/m ³)	Norma límite (µg/m ³)
2006	3111,60	100
2010	24123,67	100
2011	45066,33	100
2012	34099,89	100
2013	56104,67	100

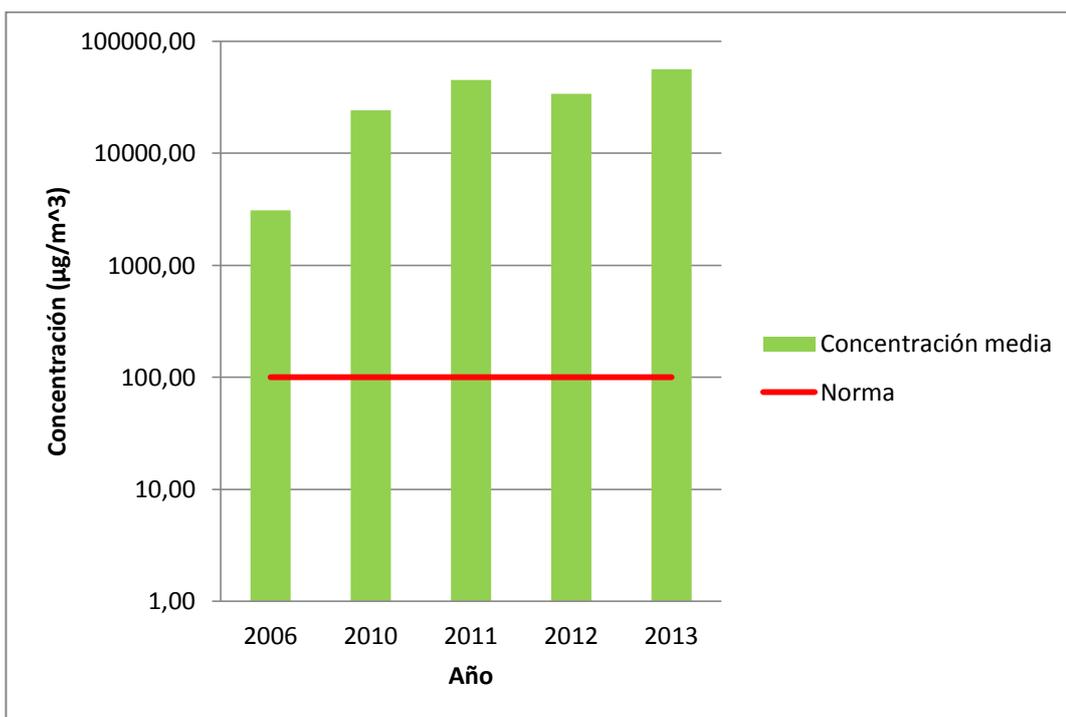


Figura 3.29: Comparación entre las concentraciones medias de la dispersión del contaminante NOx de la empresa N°2 de los años 2006, 2010-2013 y la norma límite del TULSMA de calidad de aire.

Tabla 3.19: Concentración media de las dispersiones de todas las muestras medidas de SO₂ de la empresa N°2.

AÑO	Concentración SO ₂ (µg/m ³)	Norma límite (µg/m ³)
2006	12538,10	80
2010	50865,33	80
2011	184373,33	80
2012	106601,67	80
2013	208957,78	80

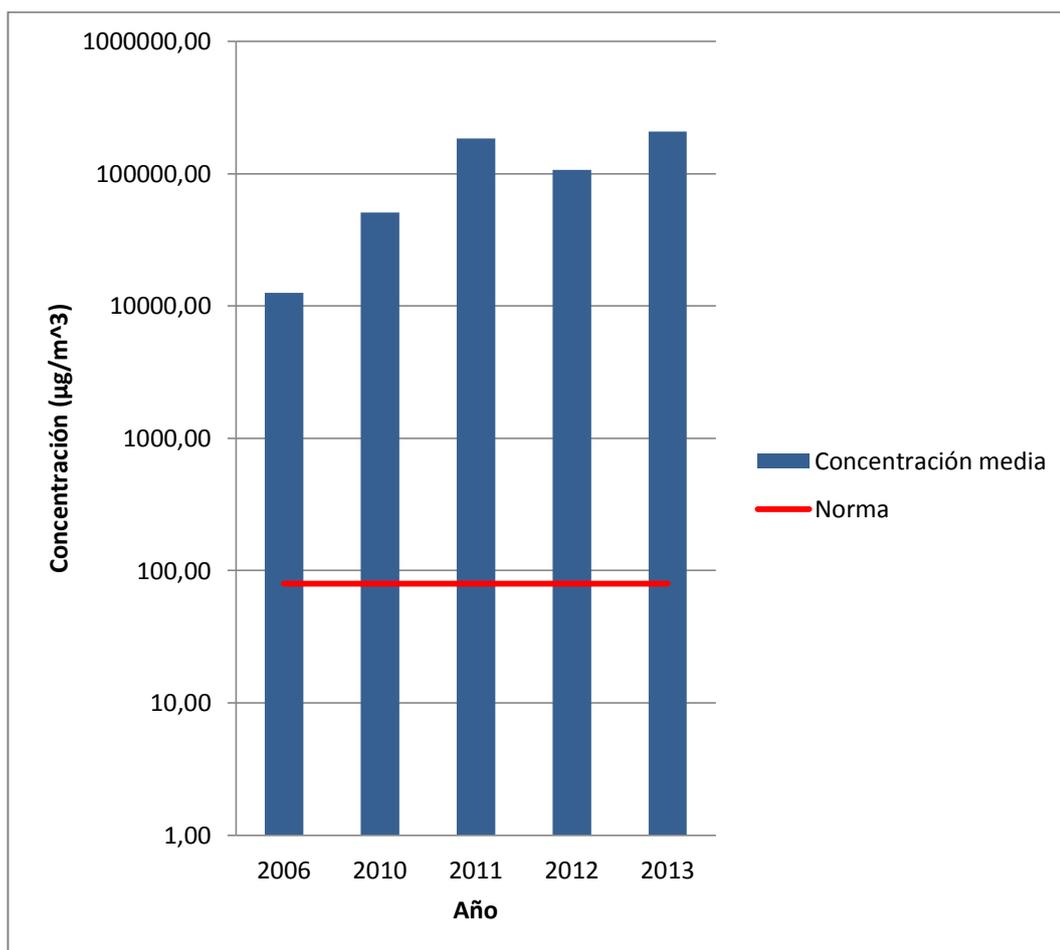


Figura 3.30: Comparación entre las concentraciones media de la dispersión del contaminante SO₂ de la empresa N°2 de los años 2006, 2010-2013 y la norma límite del TULSMA de calidad de aire.

Tabla 3.20: Concentración media de las dispersiones de todas las muestras medidas de CO de la empresa N°3.

AÑO	Concentración media CO (µg/m³)	Norma límite (µg/m³)
2006	0,678	40000
2011	455,207	40000
2012	223,248	40000
2013	154,66	40000

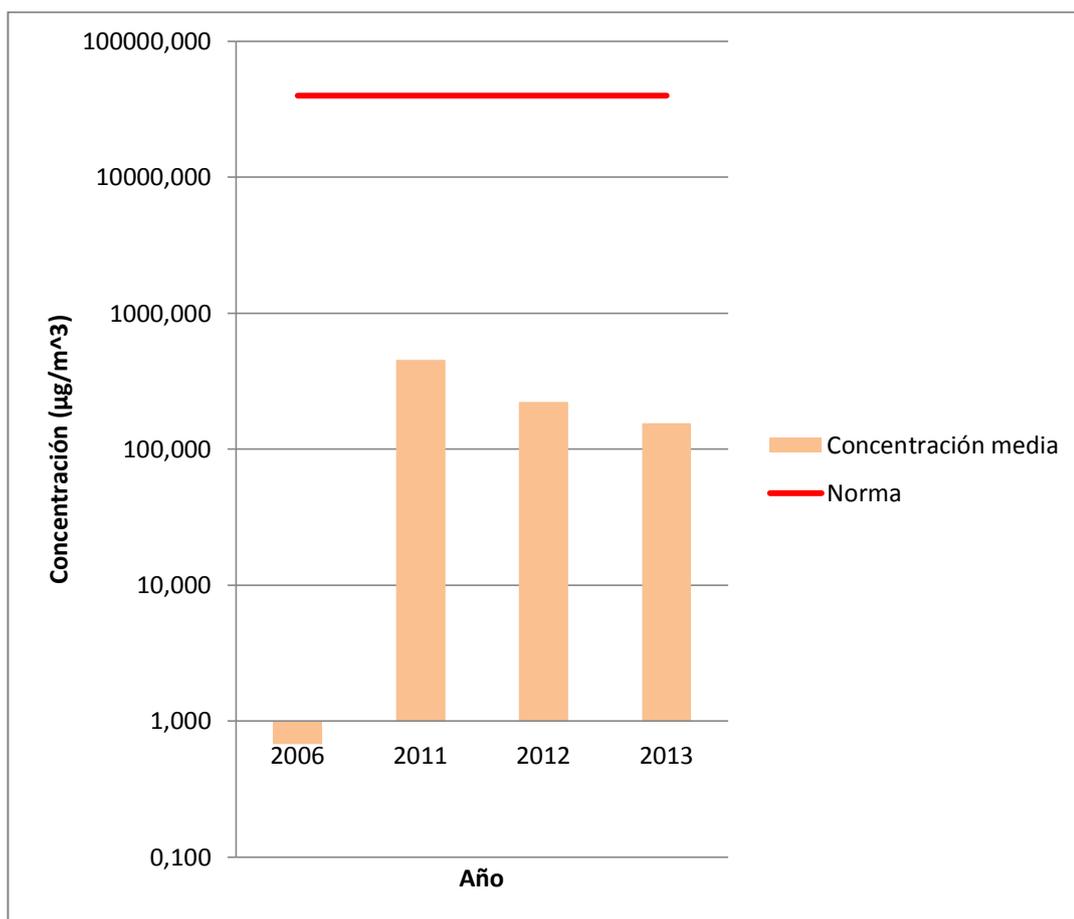


Figura 3.31: Comparación entre las concentraciones medias de la dispersión del contaminante CO de la empresa N°3 de los años 2006, 2011-2013 y la norma límite del TULSMA de calidad de aire.

Tabla 3.21: Concentración media de las dispersiones de todas las muestras medidas de NOx de la empresa N°3.

AÑO	Concentración media NOx (µg/m³)	Norma límite (µg/m³)
2006	15,848	100
2011	8518,699	100
2012	1785,618	100
2013	1662,27	100

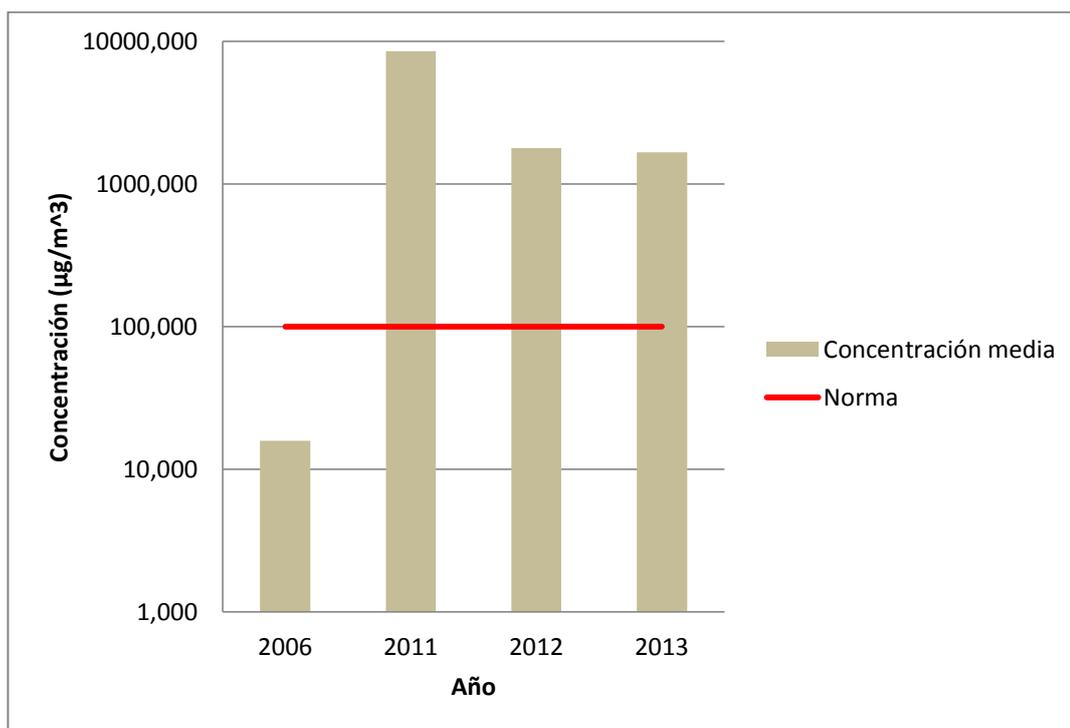


Figura 3.32: Comparación entre las concentraciones medias de la dispersión del contaminante NO_x de la empresa N°3 de los años 2006, 2011-2013 y la norma límite del TULSMA de calidad de aire.

Tabla 3.22: Concentración media de las dispersiones de todas las muestras medidas de SO₂ de la empresa N°3.

AÑO	Concentración media SO ₂ (µg/m ³)	Norma límite (µg/m ³)
2006	8,221	80
2011	31189,272	80
2012	1911,441	80
2013	4224,68	80

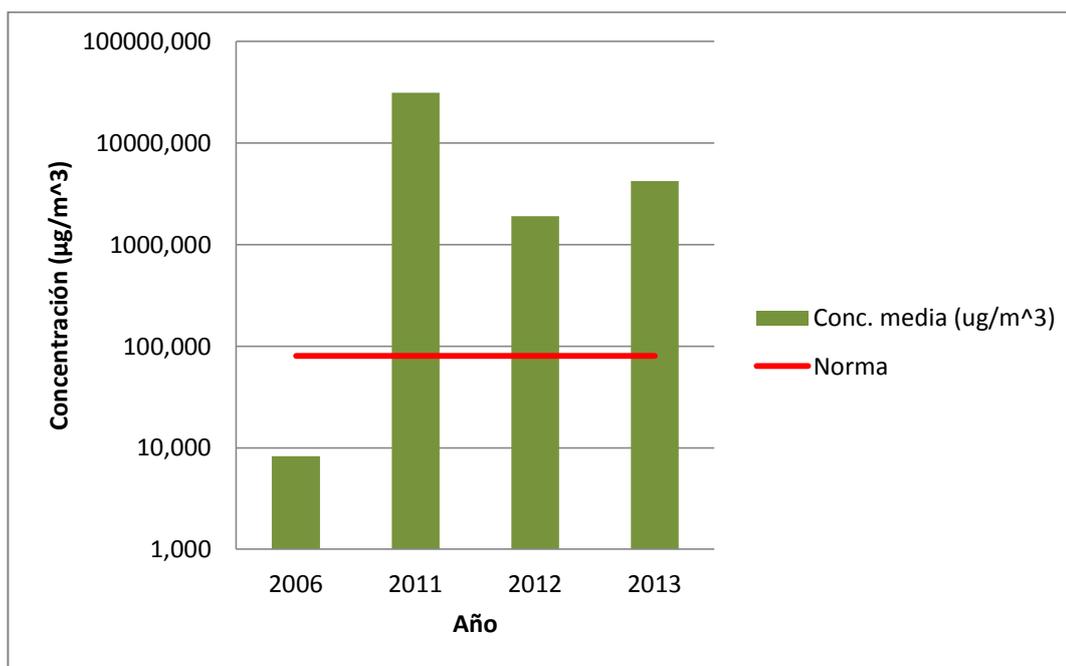


Figura 3.33: Comparación entre las concentraciones medias de la dispersión del contaminante SO_2 de la empresa N°3 de los años 2006, 2011-2013 y la norma límite del TULSMA de calidad de aire.

3.3.2. Procesamiento con AERMOD

El procesamiento con AERMOD de los datos meteorológicos, geográficos y de emisiones de las tres empresas, correspondientes al año 2006 debido a que fueron los datos más completos para determinar la dispersión de los contaminantes, fueron expresados mediante gráficas 3D exportadas por Google Earth a la zona de estudio. En las figuras 3.34, 3.36 y 3.38 se observa la dispersión de cada uno de los contaminantes tomando como punto cartesiano a la empresa N°1; mientras que las figuras 3.35, 3.37 y 3.39 difieren en que el punto cartesiano es la empresa N°3. En la parte izquierda de todas las gráficas se observa la regla de medición de la concentración que está en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, clasificado por colores que indica el valor de la concentración al momento de la simulación de dispersión en la zona según el color que lo esté cubriendo. En el anexo F se presenta el informe del procesamiento de los datos de emisiones, geográficas y meteorológicos del año 2006

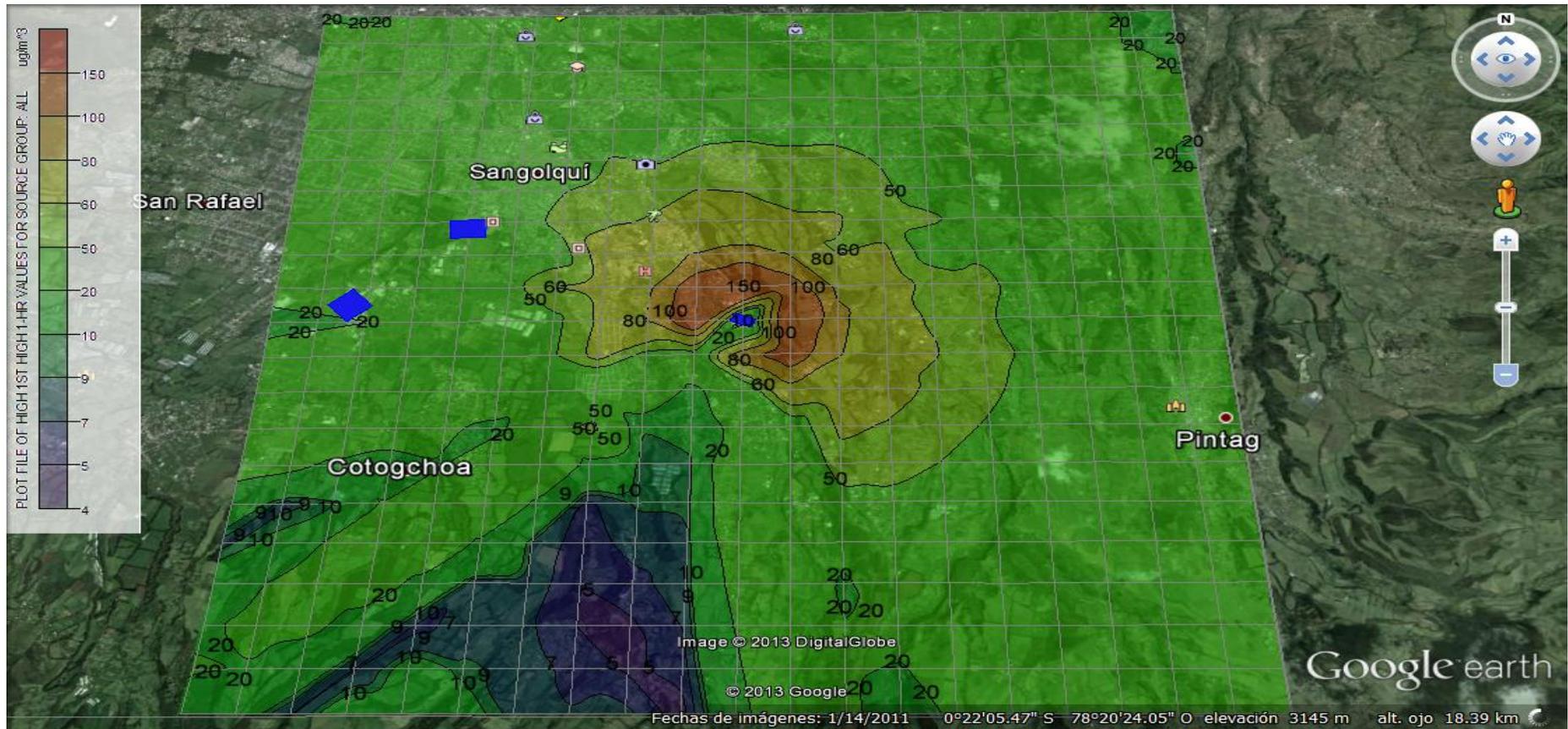


Figura 3.34: Resultado de la simulación con el software AERMOD de la dispersión del contaminante CO, producto de las emisiones de las tres empresas en el estudio del año 2006, utilizando como punto cartesiano a la empresa N°1.

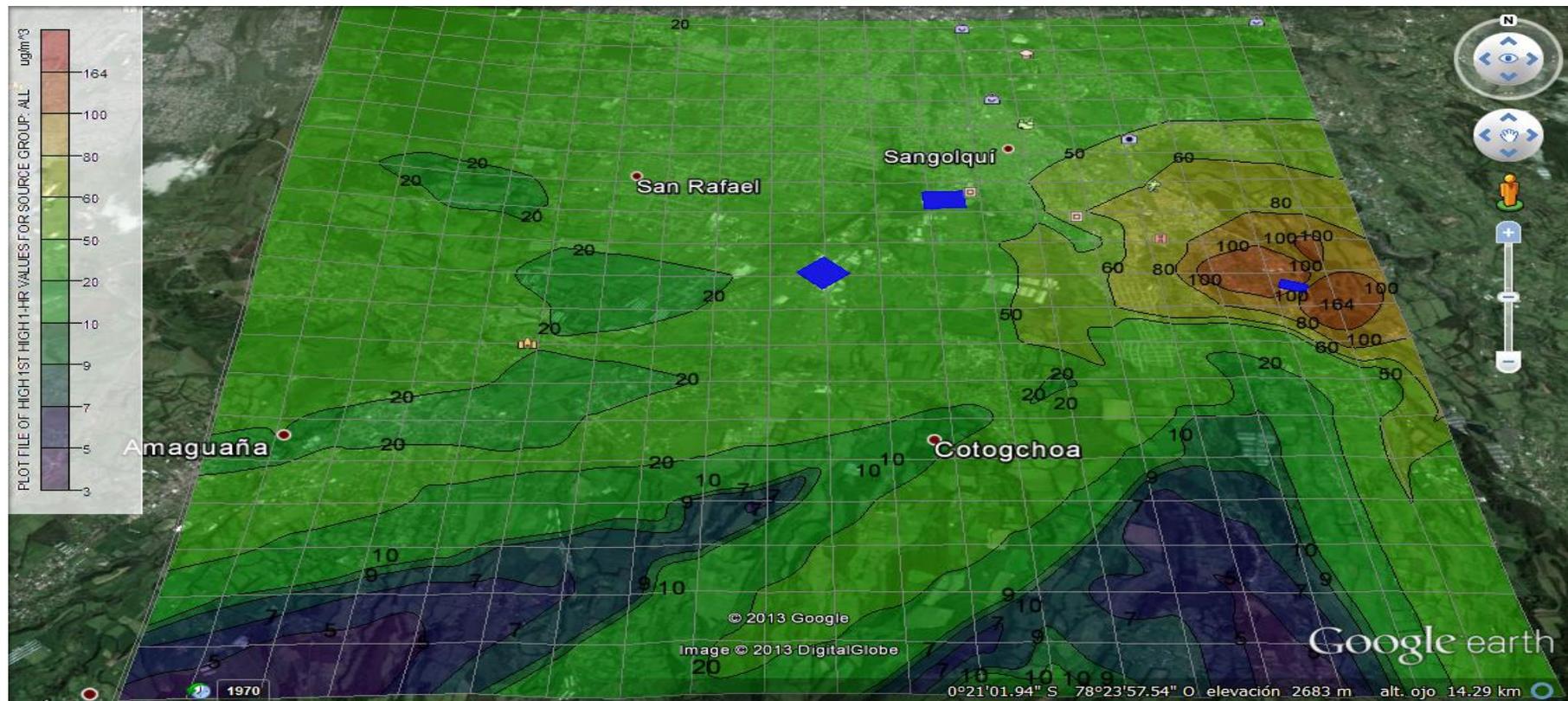


Figura 3.35: Resultado de la simulación con el software AERMOD de la dispersión del contaminante CO, producto de las emisiones de las tres empresas en estudio del año 2006, utilizando como punto cartesiano a la empresa N° 3.

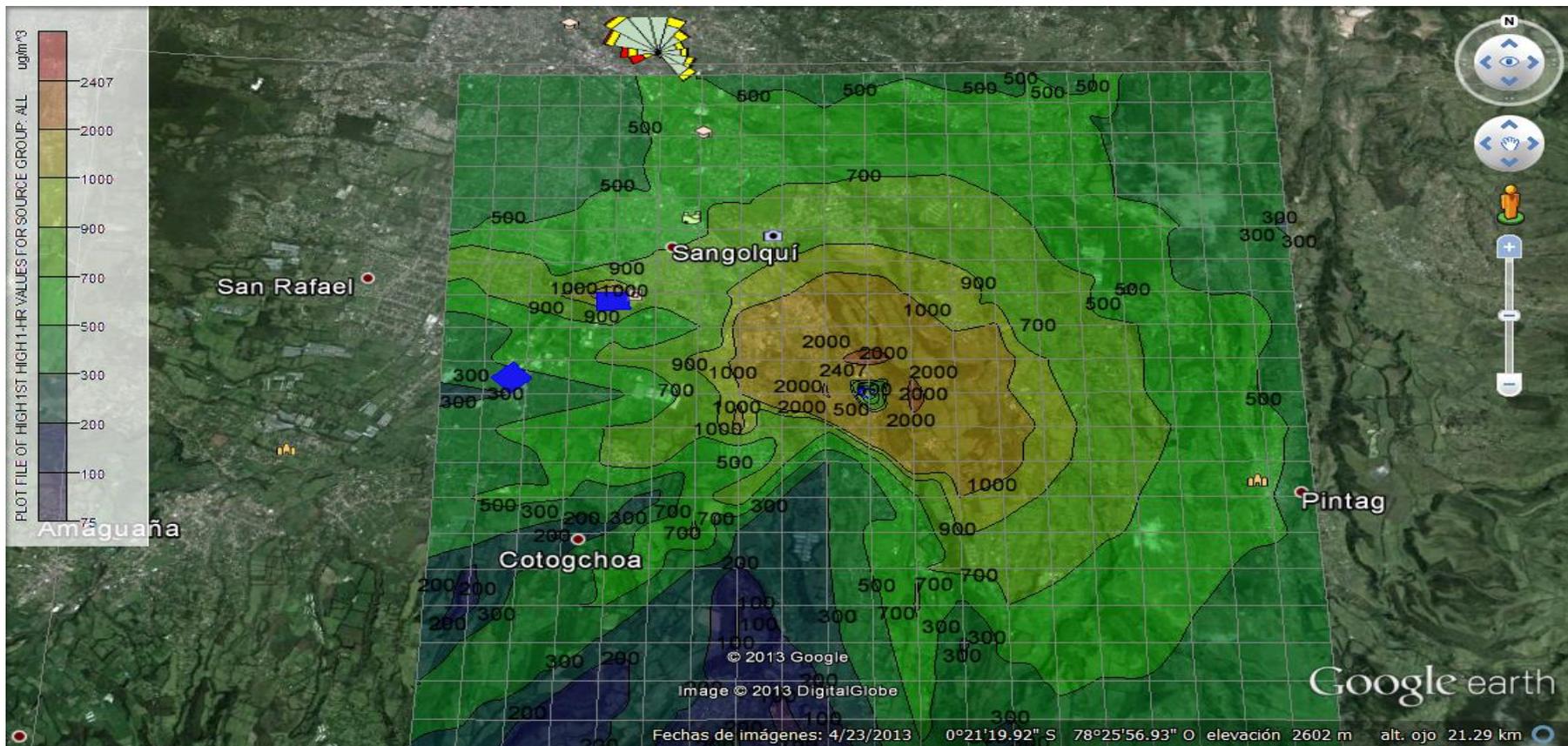


Figura 3.36: Resultado de la simulación con el software AERMOD de la dispersión del contaminante NO_x, producto de las emisiones de las tres empresas en estudio del año 2006, utilizando como punto cartesiano a la empresa N° 1.

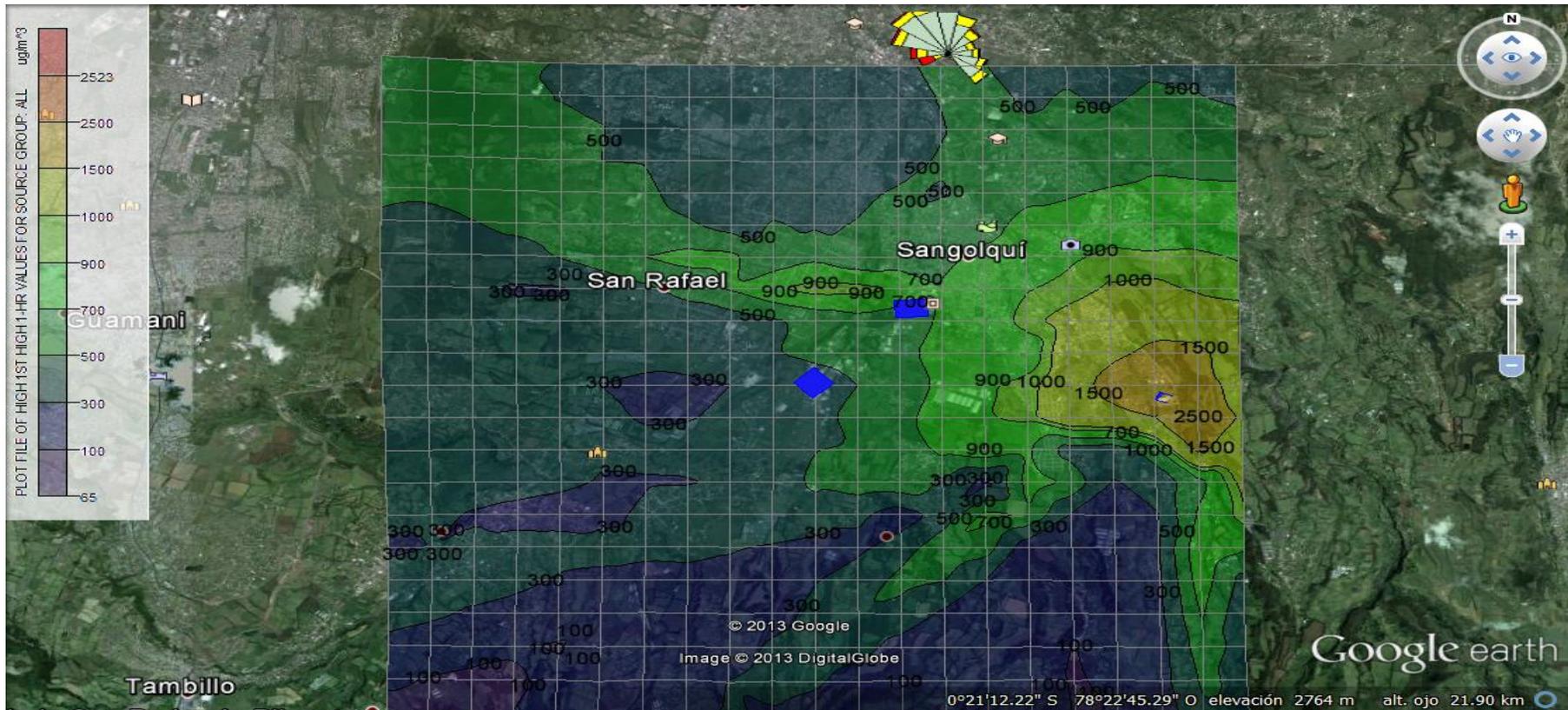


Figura 3.37: Resultado de la simulación con el software AERMOD de la dispersión del contaminante NO_x, producto de las emisiones de las tres empresas en estudio del año 2006, utilizando como punto cartesiano a la empresa N° 3.

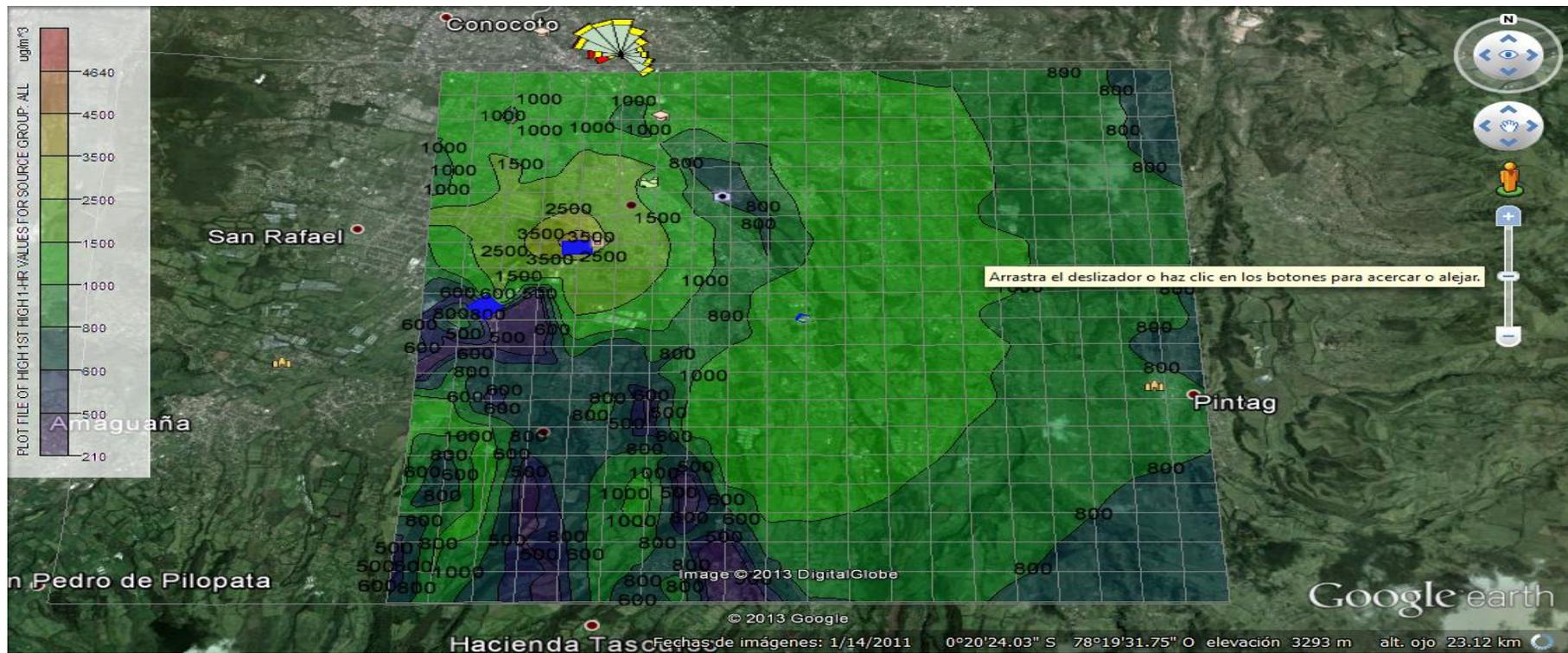


Figura 3.38: Resultado de la simulación con el software AERMOD de la dispersión del contaminante SO₂, producto de las emisiones de las tres empresas en estudio del año 2006, utilizando como punto cartesiano a la empresa N° 1.

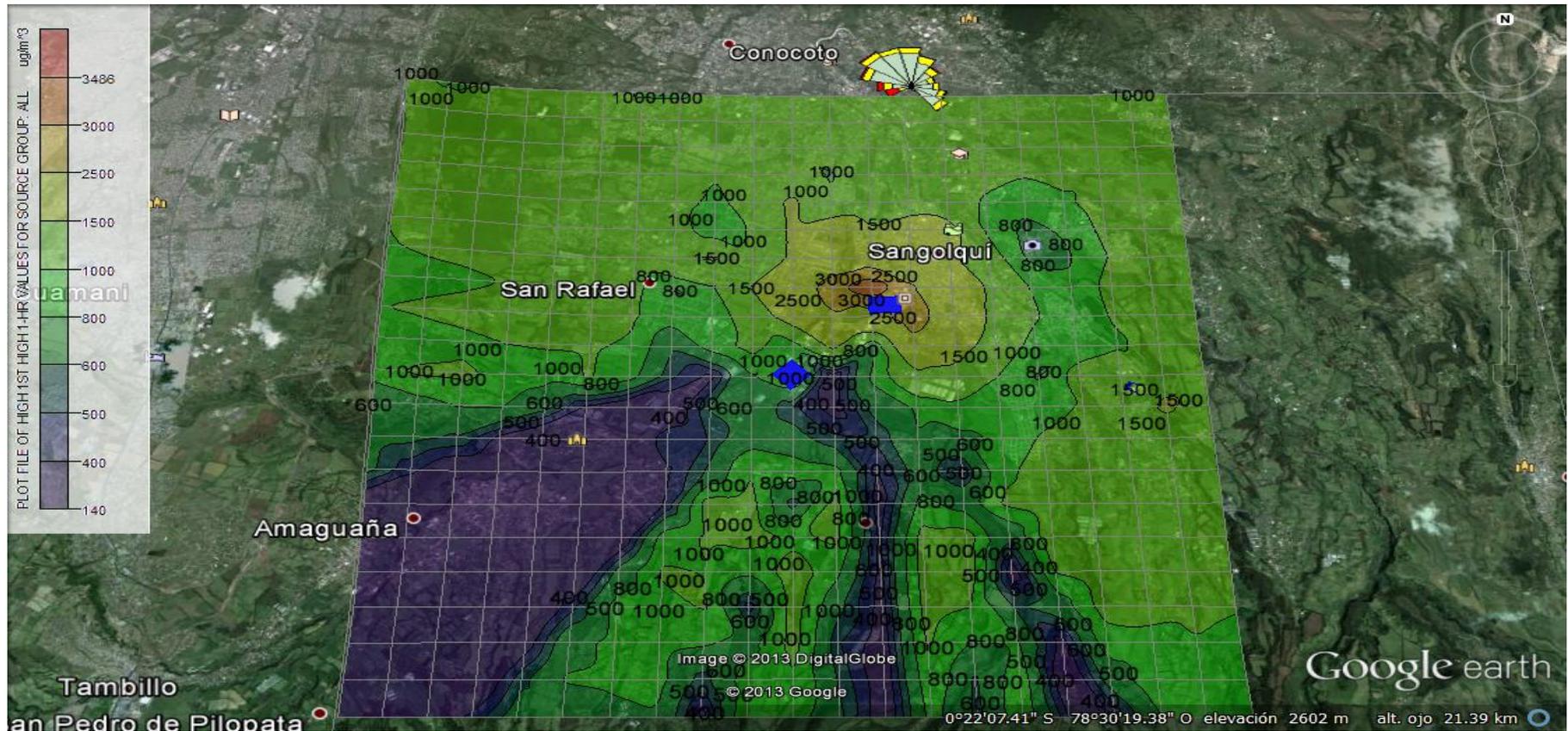


Figura 3.39: Resultado de la simulación con el software AERMOD de la dispersión del contaminante SO_2 , producto de las emisiones de las tres empresas en estudio del año 2006, utilizando como punto cartesiano a la empresa N° 3.

CAPÍTULO 4: DISCUSIÓN

4.1. Procesamiento de la información meteorológica recogida del cantón Rumiñahui: rosa de los vientos de los años 2006-2008, 2010-2011

La meteorología es parte esencial en el control de los contaminantes atmosféricos, siendo los principales parámetros que se consideran la velocidad y dirección del viento. Las rosas de los vientos son las ejemplificaciones gráficas precisas en el análisis de la dispersión de los contaminantes (De Nevers, 1998). Es importante analizar los factores de significancia como la data meteorológica y el tiempo, de acuerdo a:

- a) Chequear la ocurrencia de la data y el tiempo,
- b) los valores máximos de ocurrencia,
- a) la contaminación está condicionado por la data,
- b) y si las características del terreno causan impacto (Lakes Environmental, 2013)

Con las rosas de los vientos de los años 2006-2008 y 2010-2011, se analizó los parámetros resultantes del movimiento del viento, como el rango de la velocidad máxima, el rango de velocidad promedio del viento predominante, la velocidad promedio de viento por año y la dirección preponderante a la que se dirigió.

Las rosas de los vientos de los años en estudio representadas en las figuras 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 y 3.10, muestran que a excepción de la rosa de los vientos del año 2008, en la que se mantuvo una velocidad máxima de viento entre los 8.8-11.1 m/s; para el resto de años el rango de velocidad máxima predominante, se encontró entre los 5.7-8.8 m/s. El rango de velocidad promedio que predominó en todos los años fue de 0.5-2.1 m/s.

De acuerdo a Kiely (1999), la topografía está relacionada con la variación tanto de la velocidad como la dirección del viento, ya que los valles profundos son los que más impactan e influyen en el flujo local del viento, induciendo a que éste se levante en la mañana, mientras que en la noche baje a la superficie terrestre (inversión por subsidencia). Por esta razón es muy común ver en las mañanas desde Quito, la

formación de una especie de neblina grisácea, conocida como *tapón contaminante*, que es producto de la acumulación de gases en la noche sobre el Valle de los Chillos.

La velocidad promedio de los años analizados en este estudio fueron en general bajas, con una velocidad promedio de 1.31 m/s para el año 2006; 1.76 m/s para el año 2007; 2.16 m/s para el año 2008; 1.48 para el año 2010 y 1.26 m/s para el año 2011. Según Lakes Environmental (2013), este tipo de velocidad baja puede causar acumulación de gases contaminantes y provocar altas concentraciones en la atmósfera, ya que el proceso de dispersión se produce lentamente.

A pesar de que los resultados estadísticos de la rosa de vientos son bastante confiables, no siempre son representaciones reales de los vientos de un área. Para aumentar la confiabilidad se debe utilizar otros parámetros meteorológicos, que pueden ayudar a determinar la formación y transporte de ciertos contaminantes atmosféricos, (INECC, 2013).

El rumbo en que los contaminantes fluyeron a través del terreno, es determinado por la dirección del viento, representado en la rosa de los vientos por el porcentaje de tiempo en el que el viento sopla hacia una o varias direcciones (Ramírez & Vivanco, 2010). En las figuras 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 y 3.10, se observa que las direcciones del viento que prevalecieron en mayor porcentaje todos los años de estudio (a excepción del año 2008 que fue al SE), fueron al noroeste-norte y al sur-sureste (NWN y SSE). Esto nos indica un patrón en el movimiento del viento que se mantuvo en el territorio, y el cual permite determinar cuáles fueron posiblemente las zonas más afectadas por el arrastre de los contaminantes. Entre estas tenemos a las parroquias de Sangolquí, Cotogchoa, Pintag, San Rafael y parte fronteriza de la ciudad de Quito con el Valle.

4.2. Estimación de las concentraciones de la dispersión de los gases contaminantes CO, SO₂ y NO_x producto de las emisiones de las empresas N°1, N°2 y N°3 del cantón Rumiñahui

4.2.1. Procesamiento con Screen View de las emisiones de fuentes fijas de los años 2006, 2010-2013

Al procesar el software con una data meteorológica propia y permitir al usuario determinar condiciones generales como la altura del receptor al nivel del suelo, el tipo de terreno, building downwash, etc.; se obtiene como resultado estimaciones estadísticas representativas de la realidad, además de una idea clara del proceso de dispersión.

Las clases de estabilidad y velocidades de viento utilizadas por el software, simulan el “peor escenario”, ejecutando las peores combinaciones entre ambas, para obtener como resultado las más altas concentraciones del contaminante, a nivel del suelo en función de la distancia (Aguasclaras, 2007).

Según Davis & Masten (2005), mientras mayor sea la distancia entre el punto de descarga y un receptor a ras del suelo, mayor será el volumen de aire disponible para diluir la descarga de contaminante antes de que llegue al punto receptor.

De manera general mientras mayor es la distancia recorrida por el contaminante, menor será su concentración; pero se observa en las figuras 3.22, 3.23 y 3.24, representativas de la dispersión de los contaminantes CO, NO_x y SO₂ producto de la empresa N°3, que la dispersión de los contaminantes en algunos años, aumentó significativamente entre los primeros 100 m a 300 m de distancia, para luego estabilizarse. Esto se puede deber a condiciones atmosféricas inestables, sumado un movimiento rápido del viento de forma ondulante, pueden producir altas concentraciones momentáneas a nivel del suelo, donde los espirales de la pluma se mueven hacia la superficie, (OMS, 2000). Posiblemente exista también una relación entre las tasas de emisión bajas en estos casos, con la altura y el diámetro de la chimenea que son bastante grandes, favoreciendo con la ayuda del viento a que los contaminantes se dirijan al ras del suelo.

En la figura 3.16 la dispersión del contaminante CO del año 2013, la dispersión de los contaminantes NO_x y SO₂ de las empresas N°1 y N°2 de los años 2006, 2010-2013 (ver figuras 3.17, 3.18, 3.20 y 3.21); y la dispersión de los años 2011-2013 de los contaminantes NO_x y SO₂ de la empresa N°3 (ver figuras 3.23 y 3.24)

sobrepasaron las normas límites del TULSMA sobre calidad de calidad de aire descritas en la tabla 1.14.

Estos resultados de estimación de la concentración de contaminantes en el aire ambiente, a partir de datos reales de emisiones de fuentes fijas, nos indica que en el caso de los contaminantes SO₂ y NO_x emitidas por las tres empresas, sobrepasaron las normas límites y pudieron ser causantes de graves problemas de contaminación atmosférica sobre el cantón Rumiñahui, provocando una condición de alarma si sumamos las emisiones de las restantes empresas existentes en el territorio.

4.2.2. Procesamiento con AERMOD de los datos de emisiones de fuentes fijas del año 2006

AERMOD permite la utilización de datos reales (meteorológicos, geográficos y de emisiones) e información más detalla de parámetros, como el tipo de contaminante, la distancia de evaluación, o el número de receptores a los que llegará la dispersión (Lakes Environmental, 2013).

Ingresar datos precisos sobre las fuentes fijas, permite obtener una simulación real de los cambios que puede tomar la columna del gas a la salida de la chimenea, y predecir el proceso de dispersión. Según Gilbert & Wendell (2008), factores como la estabilidad atmosférica, o la altura de la chimenea, son determinantes en la dirección y forma que tomará la pluma a lo largo del área de estudio.

La dispersión del contaminante aumenta si se ve envuelto por grandes volúmenes de aire que aceleran la dispersión y disminuyen la concentración gradualmente. Al aumentar la velocidad o temperatura de salida del gas, los contaminantes suben desde un principio y tienen una mayor distancia para diluirse, expandirse, mezclarse y bajar al suelo en menor concentración (Davis & Masten, 2005).

En las gráficas resultantes de la dispersión del contaminante CO producto de las tres empresas en estudio (ver figuras 3.34 y 3.35), se observa que zonas con dispersión uniforme, presentan cúmulos de altas concentraciones del contaminante. Según Lakes Environmental (2013), se debe a la presencia de vientos aislados de baja velocidad, que provocan una alta acumulación en zonas que no necesariamente presentan altas concentraciones. En general la concentración promedio del

contaminante se encontró entre los 10-50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, aunque en zonas como Pintag, Sangolquí, Cotogchoa y San Rafael, la concentración se mantuvo entre los 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Las figuras 3.36 y 3.37 de la dispersión del contaminante NOx de las tres empresas, muestran que las concentraciones a los alrededores de la empresa N°1 se encontraron entre los 900 a 2000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, que la dispersión a los alrededores de las empresas N°2 y N°3 estuvieron entre los 300-900 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; sobrepasando en todos los casos la norma límite respectiva del TULSMA de calidad de aire (ver tabla 1.14). Al alejarse de las industrias, se puede observar que parroquias como Amaguaña y Cotogchoa presentaron concentraciones entre los 75-300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, cuyos valores están bajo y sobre la normativa, mientras que en Pintag existió una variación de la concentración entre los 300-700 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y Sangolquí entre los 900-1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sobrepasando la norma.

Las figuras 3.38 y 3.39 sobre la dispersión de SO₂ producto de las emisiones de las tres empresas, revelan que la concentración que se encuentra a los alrededores de la empresa N°2, varió entre los 2500 a 3500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, la cual fue la concentración más alta en comparación con las otras dos empresas. En los alrededores de la empresa N°1, la concentración fue aproximadamente de 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que para la empresa N°3 las concentraciones se encontraron entre los 500-800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Algunas zonas aisladas presentaron concentraciones entre los 800-1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En toda la zona de estudio las concentraciones sobrepasaron la norma límite del TULSMA para calidad de aire (ver tabla 1.14). Pintag presentó una concentración entre los 800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Sangolquí entre los 800-1500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y Amaguaña con 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Las estimaciones de dispersión de los contaminantes NOx y SO₂, realizadas con el software Screen View, y el paquete AERMOD, sobrepasan las normas límites respectivas del TULSMA para calidad del aire (ver tabla 1.14), lo que significa que existió un grave problema de contaminación ambiental, por lo que el gobierno de la municipalidad de Rumiñahui debería mantener un control periódico no solo de las emisiones de fuentes fijas, sino también de la calidad de aire, evitando serios problemas ambientales, así como según Henry & Heinke (1999), afectaciones a la salud de la población de tipo respiratorio y cardiovascular.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

Las rosas de los vientos de los años 2006-2008, 2010-2011 arrojaron como resultado, que la velocidad promedio histórica del viento se encontró entre el rango de los 0.5 a 2.17 m/s; mientras que el rango de velocidad máxima se mantuvo entre los 5.7-8.8 m/s, a excepción del año 2008 que fue de 8.8-11.1 m/s;

Las direcciones del viento predominantes de los años de estudio fueron el sur-suroeste y noroeste-norte (SSE y NWN), a excepción del año 2008 que tuvo una dirección al SE, considerando estos resultados como las direcciones del viento históricas del territorio.

Las estimaciones de dispersión realizadas con el software Screen View mostraron que la concentración de CO de la empresa N°1 del año 2013 y la de los contaminantes NO_x y SO₂, en los años 2006, 2010-2013 para las empresas N°1 y N°2, y del 2006, 2011-2013 para la empresa N°3, sobrepasaron las normativa límite permisible del TULSMA para calidad de aire.

La simulación de la dispersión de los contaminantes con AERMOD, mostraron que las concentraciones de NO_x y SO₂, producto de las tres empresas en estudio del año 2006, sobrepasaron la norma límite del TULSMA para calidad de aire.

En general, las concentraciones de las dispersiones producto de las tres empresas, disminuyen mientras se alejan de los puntos de emisión, ya sea por factores como mayor volumen y velocidad del viento o temperatura del gas de salida.

Las simulaciones con AERMOD mostraron tanto dispersiones aisladas así como uniformes, las cuales son producto de consideraciones meteorológicas como velocidades bajas de viento, o la tipografía

Hay que tomar en cuenta que los paquetes de simulación no consideran todos los factores que afectan el análisis, como son los relieves topográficos reales de la zona, o datos exactos de coordenadas geográficas. Aun así, los resultados referenciales son de alta confiabilidad.

CAPÍTULO 6: RECOMENDACIONES

Este estudio es el paso inicial para continuar con una investigación que se dedique a monitorear y evaluar la contaminación del aire ambiente de la zona, con datos actuales.

Es preferible que se trabaje estimaciones realizadas con datos medidos por día, semanas o meses, para comparaciones de resultados más detallados, facilitando el trabajo de análisis y determinar posibles tendencias que suceden en lapsos de tiempo más cortos, que podrían ser difíciles de detectar con datos resultantes de extensos períodos de tiempo.

Un estudio realizado con datos actualizados, podría compararse con los resultados obtenidos en esta investigación y determinar cómo se ha ido desarrollando el problema de contaminación ambiental a lo largo de los últimos siete años en el cantón Rumiñahui.

Realizar monitoreos varias veces al año de las emisiones de fuentes fijas, de las empresas del cantón Rumiñahui, por parte del gobierno municipal permitiría tener un registro más detallado, de los cambios en la concentración de las emisiones contaminantes, así como la implementación de un programa de monitoreo de calidad del aire en el cantón.

Las industrias de la zona deben ser informadas por las autoridades competentes, sobre el impacto que producen sus emisiones contaminantes, al aire ambiente que se encuentra expuesta la población. Para esto es necesario que el gobierno de la municipalidad del cantón, desarrolle un plan estratégico para toma de medidas de prevención, como por ejemplo la capacitación en los beneficios en la mejora de los procesos industriales, o la utilización de puntos de control interno mediante operaciones de absorción, adsorción o filtración de las emisiones antes de salir al exterior.

CAPÍTULO 7: BIBLIOGRAFÍA

- Aguasclaras*. (2007). Obtenido de <http://ebookbrowse.net/anexo-3-modelacion-emisiones-atmosfericas-pdf-d142746664>
- Aguilar, A. (2004). *Geografía general*. México D.F: Editorial Person.
- Ahrens, C. (1993). *Essentials of Meteorology: An Invitation to the Atmosphere*. Minneapolis: West Publishing.
- Ballester, F., Tenías, J., & Pérez, S. (1999). Efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud: una introducción. *Español Salud Pública*, 73(2).
- Bermúdez, M. (2010). *Contaminación y turismo sostenible*. Obtenido de <http://issuu.com/maubermudez/docs/contaminacion/17>
- Bóveda, A. (2010). *Términos del clima*. Obtenido de <http://antonioboveda.blogspot.com/2010/12/terminos-del-clima-tema-2.html>
- Bravo, H., & Sosa, R. (s.f.). *Fuentes de contaminación atmosférica e inventarios de emisiones*. Obtenido de <http://bvs.per.paho.org/bvsacd/eco/036993-I/036993-1.2.pdf>
- Calvo, F. (2007). *La atmósfera*. Obtenido de http://www.ugr.es/~fgarciac/pdf_color/tema6%20%5BModo%20de%20compatibilidad%5d.pdf
- Centro de Sanidad Ambiental de los Estados Unidos. (1999). Obtenido de Los contaminantes biológicos: <http://www.envtox.ucdavis.edu/cchs/toxins/spanish/biocontaminants.htm>
- Davis, M., & Masten, S. (2005). *Ingeniería y ciencias ambientales*. México D.F: Mc Graw-Hill Interamericana.
- De Nevers, N. (1998). *Ingeniería de Control de la contaminación del aire*. México D.F: Mc Graw-Hill Interamericana.

- Espert, V., & López, V. (2004). *Dispersión de contaminantes en la atmósfera*. Valencia: Alfaomega.
- Farlados, M. (2012). *Guía práctica de la fotocatalisis aplicada e infraestructura*.
Obtenido de http://www.eptisa.com/descargas/articulos/conama2012_guia_practica.pdf
- FLACSO; MAE; PNUMA. (2008). *GEOECUADOR 2008*. Obtenido de Capítulo 2: Estado del aire: www.flacsoandes.org/biblio/catalog/resGet.php?resId=16377
- Gallardo, L. (2003). Obtenido de Capítulo 4: Trazas atmosféricas y su modelación: http://www.dim.uchile.cl/~lgallard/publications_lgk/Capitulo_4.pdf
- Garcia, H. (2006). *Evaluación del riesgo por emisiones de partículas en fuentes estacionarias de combustión-estudio de caso: Bogotá*. Bogotá: Universidad de Colombia. Obtenido de Evaluación del riesgo por emisiones de partículas en fuentes estacionarias de combustión-estudio caso: Bogotá.
- García, J. (2010). Obtenido de Estrategia y control de contaminantes: http://www.intervencionsocial.fspprevencion.net/CONTENIDOS/12_ESTRAATEGIA_CONTROL_CONTAMINANTES.pdf
- Geocities. (2009). Obtenido de L'atmosfera: http://www.oocities.org/es/cienciesterra/tema3/CTMA03_02.html#protectora
- Gilbert, M., & Wendell, P. (2008). *Introducción a la ingeniería medioambiental*. Madrid: Pearson Educación S.A.
- Google Earth. (2014). Obtenido de Información: <http://www.google.com/earth/>
- Henry, J., & Heinke, G. (1999). *Ingeniería Ambiental*. México D.F: Prentice Hall Hispanoamericana S.A.
- Herrero, S., & Fernández, J. (2012). Obtenido de GASES DE LA ATMÓSFERA: Nitrógeno (N₂), Oxígeno (O₂), Argón (Ar) y Dióxido de carbono (CO₂): <http://www.nanomadrid.es/wp-content/uploads/2012/11/GASES-DE-LA-ATM%C3%93SFERA.pdf>

- ICV. (2007). Obtenido de Polvo:
<http://www.icv.csic.es/prevencion/Documentos/manuales/polvo.pdf>
- INECC. (2013). Obtenido de Definición de la rosa de los vientos:
http://sinaica.inecc.gob.mx/rosa_de_viento.html
- Inzunza, J. (2013). Obtenido de Meteorología descriptiva capítulo 3. Radiación solar y terrestre:
http://old.dgeo.udec.cl/~juaninzunza/docencia/metodologia_descriptiva/cap1.pdf
- Kiely, G. (1999). *Ingeniería ambiental: Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*. Madrid: Mc Graw-Hill Interamericana.
- Lakes Environmental. (2013). Obtenido de AERMOD Tech Guide:
<http://www.weblakes.com/guides/aermod/toc/index.html>
- Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio ambiente del gobierno de España. (2012). *NOx (Óxidos de nitrógeno)*. Obtenido de <http://www.prtr-es.es/NOx-oxidos-de-nitrogeno,15595,11,2007.html>
- Ministerio del Ambiente Ecuador. (2003). Obtenido de TULSMA:
http://www.agua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/07/TEXTO_UNIFICADO_LEGISLACION_SECUNDARIA_i.pdf
- OMS. (2000). Obtenido de Conceptos básicos sobre meteorología de la contaminación del aire:
http://www.bvsde.paho.org/cursoa_meteoro/prologo.html
- OMS. (2005). Obtenido de Guías de calidad de aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre:
<http://www.bvsde.paho.org/bvsea/fulltext/omsguiaaire.pdf>
- Orellana, J. (2009). Obtenido de Contaminación :
http://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/ing_sanitaria/Ingenieria_Sanitaria_A4_Capitulo_02_Contaminacion.pdf

- Orozco, C., Pérez, A., González, M., Rodríguez, F., & Alfayate, J. (2003). *Contaminación Ambiental*. Madrid: Editorial Thomson.
- Pal, A. (1999). *Air Pollution Meteorology and Dispersion*. New York: Oxford University Press.
- Peralta. (2007). *Aplicación del modelo de dispersión ISCST3 para la simulación de emisión en plantas térmicas medianas en la*. Obtenido de (Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral): <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/6655>
- Peralta, J. (2006). Obtenido de Desarrollo de algoritmos en Matlab para el modelaje de la dispersión de contaminantes a través de la ecuación de combustión: <http://www.cdts.espol.edu.ec/documentos/ModelajeCombustionMatlab.pdf>
- Ramírez, E., & Vivanco, S. (2007). Obtenido de Análisis de parámetros meteorológicos utilizando el modelo de la rosa de los vientos: http://www.respyn.uanl.mx/especiales/2007/ee-16-2007/documentos/ambiental/AM4_res_extenso_E.Ramirez.pdf.
- Ross, R. (1974). *La industria y la contaminación del aire*. Centro regional de ayuda técnica AID. México D.F: Editorial Diana.
- Spiegel, J., & Mayatre, L. (2000). Obtenido de Control de la contaminación ambiental : <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo2/55.pdf>
- Termoesmeraldas. (2009). Obtenido de Modelamiento matemático de dispersión de contaminantes a la atmósfera del complejo termoeléctrico: nueva planta de motores de combustión interna en conjunto con la planta termoeléctrica actual: <https://www.celec.gob.ec/termoesmeraldas/>
- Turmo, E., & Cuscó, J. (2004). Obtenido de Modelos de dispersión de gases y/o vapores en la atmósfera: fuentes puntuales continuas:

http://www.mapfre.com/documentacion/publico/i18n/catalogo_imagenes/grupo.cmd?path=1031217

Turner, D. (1970). *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates*. North California: U.S. Environmental Protection Agency.

U.S. Environmental Protection Agency. (1995). Obtenido de Guía de usuario para el modelo de dispersión de complejo de fuente industrial:
<http://www.epa.gov/ttn/catc/dir2/isc3drvs.pdf>

U.S. Environmental Protection Agency. (2004). Obtenido de User's guide for them/Epa regulatory model – AERMOD.:
www.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aermodugb.pdf

U.S. Environmental Protection Agency. (2007). Obtenido de User's guide Screen view:
http://www.weblakes.com/products/screen/resources/docs/lakes_screen_view_user_guide.pdf

U.S. Environmental Protection Agency. (2011). Obtenido de WRPLOT View:
http://www.weblakes.com/products/wrplot/resources/lakes_wrplot_view_release_notes_7.pdf

U.S. Environmental Protection Agency. (2013). Obtenido de Particulate Matter (PM): <http://www.epa.gov/air/particlepollution/index.html>

UCAR. (2012). Obtenido de Selección de canales del GOES:
http://www.meted.ucar.edu/satmet/goeschan_es/print.htm#header

Ulriksen, P. (2005). Obtenido de Modelos de Dispersión de Contaminantes :
https://www.ucursos.cl/diplomados/2005/1/DMA28/1/material_docente/bajar?id_material=62689

Wark, K., & Warner, C. (1992). *Contaminación del aire: origen y control*. México D.F: Limusa S.A.