UNIVERSIDAD DE VALPARAISO
FACULTAD DE CIENCIAS
INSTITUTO DE CIENCIAS BIOLOGICAS Y QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA AMBIENTAL

"MODELACION DE LA DISPERSION DE ANHIDRIDO SULFUROSO EN LA COMUNA DE PUCHUNCAVI UTILIZANDO EL PROGRAMA ISC3"

TESIS PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO AMBIENTAL, LICENCIADO EN INGENIERIA AMBIENTAL.

PAMELA ALEJANDRA LAZO ACUÑA.
PROFESOR GUIA: DR. HERNAN GAETE OLIVARES.
PROFESOR CO-GUIA: DR. MICHEL CURE OJEDA.

VALPARAISO, NOVIEMBRE 2005

Dedicado a todos los que me acompañaron en estos años:

A mamita por su cariño, su preocupación, sus regaloneos antes de la siesta y por esconderme los libros después de las pruebas.
A mi padre y tata por su apoyo.
A mi abuelita que está mirando desde el cielo y a sus deliciosas tortas de avena.
Especialmente a mi adorada hermanita, por ser mi guía, por su ayuda incondicional, su compañía, por aguantarme y por aquellas siempre deliciosas golosinas después de los supuestos unos.
A Pauli y Luci por su amistad.
Y a mis profesores, en especial a mi profesor guía por sus enseñanzas.

RESUMEN

El presente trabajo evalúa el modelo de dispersión atmosférica ISC3 en la comuna de Puchuncaví, mediante la modelación de las emisiones de anhídrido sulfuroso provenientes del Complejo Industrial Las Ventanas en las 5 estaciones que conforman la red de calidad del aire de este Complejo.

Se modelan mensualmente las concentraciones horarias y promedio de 24 horas para los años 2003 y 2004, minimizando los errores sistemáticos de éstas mediante la aplicación del Filtro Kalman.

Se analizan las concentraciones modeladas y filtradas en función de las observadas mediante herramientas estadísticas como la raíz del error cuadrático medio (RMSE), la diferencia media normalizada (NMD), el índice de acuerdo (IA), el factor normalizado medio del bias (B_{NMBF}) y el factor de error medio normalizado (E_{NMEF}).

A partir del análisis realizado se observa que la estación que mejor ajusta los resultados tanto para las concentraciones horarias y promedio de 24 horas es Los Maitenes, con IA superiores a 0,5 para la mayoría de los meses en estudio.

En cuanto a las estaciones Sur, Puchuncaví, Valle Alegre y La Greda, todas ellas presentan en promedio IA no superiores a 0,35 para las concentraciones horarias y 0,49 para las concentraciones promedio, salvo para La Greda en el año 2004, para la cual el IA es aceptable.

El filtro Kalman mejora considerablemente las concentraciones modeladas, entregando IA superiores a 0,5 para la mayor parte de las estaciones, llegando a valores que superan 0,8 para algunas de ellas.

Por medio de un análisis de sensibilidad frente a la variación de la tasa de emisión de anhídrido sulfuroso, como también, de velocidad del viento, se observa que el modelo es sensible a ambos factores, siendo una de las causas de los errores en las estaciones Sur,

Valle Alegre y La Greda, el mayor ajuste que el modelo presenta para velocidades del viento superiores a 4 [m/s].

Se realiza además, un análisis de sensibilidad frente a la variación de la dirección del viento, observando un mejor desempeño del modelo en la dirección Este-Oeste en la cual los vientos soplan con mayor frecuencia y que además, corresponde a la línea en la que se localiza la estación Los Maitenes.

De este modo, es posible concluir que el modelo ISC3 predice mejor las concentraciones de anhídrido sulfuroso, en la dirección en que soplan los vientos con mayor frecuencia.

El modelo ISC3 predice de mejor manera concentraciones promedio de 24 horas, que concentraciones horarias, siendo capaz de entregar un mejor ajuste para velocidades de viento elevadas para las direcciones en que el viento es menos frecuente.

Por otro lado, se observa que al aplicar una herramienta estadística como es el filtro Kalman el desempeño del modelo aumenta notablemente entregando resultados con menor error tanto para concentraciones horarias como promedio de 24 horas.

INDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN 1

OBJETIVOS 3

CAPITULO 1: ANTECEDENTES GENERALES

1.1 Antecedentes de las fuentes emisoras 4
1.2 Normativa de calidad del aire para SO_2 existente en Chile 5
1.2.1 Normativa no aplicable para anhídrido sulfuroso 5
1.2.2 Normativa aplicable para anhídrido sulfuroso 5
1.3 Anhídrido sulfuroso 6

CAPITULO 2: TEORÍA DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES

2.1 Aspectos básicos de meteorología 9
2.1.1 Capa de mezclado 10
2.1.2 Gradiente vertical de temperatura 11
2.1.3 Gradiente adiabático seco 11
2.1.4 Gradiente vertical adiabático húmedo 13
2.1.5 Gradiente ambiental 13
2.1.6 Estabilidad atmosférica 14
2.1.7 Variación de la velocidad del viento con la altitud 18
2.2 Modelo gaussiano de la pluma 19
2.2.1 Modelos de calidad del aire 19
2.2.2 Características de penachos de chimeneas 20
2.2.3 Ecuación de difusión 22

CAPITULO 3: MODELACIÓN

3.1 Modelo ISC3. Modelo complejo de fuente industrial 25
3.1.1 Modelo ISC de corto plazo 25

3.1.2 La ecuación Gaussiana 27
3.1.3 Distancias transversales y longitudinales 28
3.1.4 Perfil de velocidades de viento 29
3.1.5 Elevación de la pluma 30
3.1.6 Los parámetros de dispersión 36
3.2 Requisitos para la ejecución del modelo ISCST3 36
3.2.1 Requisitos de los datos de entrada básicos 36

CAPITULO 4: FILTRO KALMAN

4.1 El algoritmo del filtro Kalman 38
4.2 Estimación de un escalar 39

CAPITULO 5: ZONA DE ESTUDIO

5.1 Estaciones meteorológicas 41
5.2 Análisis meteorológico 42
5.2.1 Dirección del viento 43
5.2.2 Velocidad del viento 56

CAPITULO 6: METODOLOGÍA

6.1 Recopilación y análisis de información: 60
6.2 Ejecución del modelo ISC3 61
6.2.1 Archivos de entrada 61
6.2.2 Condiciones y período a modelar 65
6.2.3 Manejo de los archivos de salida y Análisis de los resultados 66

CAPITULO 7: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Análisis de la modelación de las concentraciones horarias 82
7.2 Análisis de la modelación de las concentraciones promedio de 24 horas 86
7.3 Análisis de sensibilidad frente a la variación en las emisiones 90
7.4 Análisis de sensibilidad frente a la variación de la velocidad del viento 95

7.5 Análisis de sensibilidad frente a la variación de dirección de los vientos 99

CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES 104

REFERENCIAS BIBILIGRÁFICAS 106

ANEXO A 109
ANEXO B 113
ANEXO C 116

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Valores de concentración para SO_2 establecidos por norma primaria y secundaria aplicable a la zona de Ventanas	6
Tabla 2.1	Clases de estabilidad atmosférica de Pasquill	18
Tabla 3.1	Valores de los exponentes de perfil de viento utilizados por defecto por el modelo para cada clase de estabilidad	29
Tabla 5.1	Posición geográfica de las fuentes	40
Tabla 5.2	Ubicación de las estaciones meteorológicas	41
Tabla 5.3	Parámetros meteorológicos medidos por cada estación	41
Tabla 5.4	Frecuencia de las direcciones de viento: enero-abril 2003.	50
Tabla 5.5	Frecuencia de las direcciones de viento: mayo-agosto 2003	51
Tabla 5.6	Frecuencia de las direcciones de viento: septiembre-diciembre 2003	52
Tabla 5.7	Frecuencia de las direcciones de viento: enero-abril 2004	53
Tabla 5.8	Frecuencia de las direcciones de viento: mayo-agosto 2004	54
Tabla 5.9	Frecuencia de las direcciones de viento: septiembre-noviembre 2004	55
Tabla 6.1	Clases de estabilidad de Pasquill	62
Tabla 6.2	Estaciones de calidad del aire Complejo Industrial Las Ventanas	65
Tabla 6.3	Localización de las fuentes emisoras	65
Tabla 6.4	Parámetros de emisión de las fuentes consideradas	66
Tabla 6.5	Parámetros estadísticos recomendados por EPA	67
Tabla 6.6	Parámetros estadísticos para determinar diferencias relativas	68
Tabla 7.1	Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones horarias modeladas en Los Maitenes	84
Tabla 7.2	Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones horarias filtradas en Los Maitenes	85
Tabla 7.3	Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones promedio de 24 horas modeladas en Los Maitenes	88
Tabla 7.4	Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones promedio de 24 horas filtradas en Los Maitenes	89
Tabla 7.5	Porcentaje de aumento las tasas de emisión	90

Tabla 7.6	Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones modeladas con aumento de emisiones en Los Maitenes	94
Tabla 7.7	Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones modeladas con aumento de emisiones en Valle Alegre	94
Tabla 7.8	Rangos de velocidad del viento”	95
Tabla 7.9	Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones modeladas con aumento de velocidad de vientos en Los Maitenes	98
Tabla 7.10	Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones filtradas con aumento de velocidad de vientos en Los Maitenes	98
Tabla 7.11	Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones modeladas en distintas direcciones de vientos en Los Maitenes	103
Tabla 7.12	Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones filtradas en distintas direcciones de vientos en Los Maitenes	103

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Gradiente vertical adiabático seco	12
Figura 2.2	Gradiente vertical adiabático húmedo	13
Figura 2.3	Gradiente vertical ambiental e inversión de la temperatura	14
Figura 2.4	Condiciones estables	15
Figura 2.5	Condiciones inestables y Gradiente vertical superadiabático	16
Figura 2.6	Condiciones neutrales	17
Figura 2.7	Distribución gaussiana de la pluma de contaminantes	21
Figura 2.8	Comportamiento de la pluma de contaminantes emitida desde una fuente puntual	22
Figura 2.9	Sistemas de coordenadas y reflexión sobre el terreno del desarrollo de un penacho	24
Figura 5.1	Posicionamiento de la fuentes y estaciones de monitoreo consideradas	42
Figura 5.2	Rosa de los vientos Periodo diurno: enero-2003	44
Figura 5.3	Rosa de los vientos Periodo diurno: abril-2003	44
Figura 5.4	Rosa de los vientos Periodo diurno: julio-2003	44
Figura 5.5	Rosa de los vientos Periodo diurno: octubre-2003	45
Figura 5.6	Rosa de los vientos Periodo diurno: enero-2004	45
Figura 5.7	Rosa de los vientos Periodo diurno: abril-2004	45
Figura 5.8	Rosa de los vientos Periodo diurno: julio-2004	46
Figura 5.9	Rosa de los vientos Periodo diurno: octubre-2004	46
Figura 5.10	Rosa de los vientos Periodo nocturno: enero-2003	47
Figura 5.11	Rosa de los vientos Periodo nocturno: abril-2003	47
Figura 5.12	Rosa de los vientos Periodo nocturno: julio-2003	47
Figura 5.13	Rosa de los vientos Periodo nocturno: octubre-2003	48
Figura 5.14	Rosa de los vientos Periodo nocturno: enero-2004	48
Figura 5.15	Rosa de los vientos Periodo nocturno: abril-2004	48
Figura 5.16	Rosa de los vientos Periodo nocturno: julio-2004	49
Figura 5.17	Rosa de los vientos Periodo nocturno: octubre-2004	49
Figura 5.18	Valores máximos, mínimo y promedio de velocidad del viento en [m/s] para enero, abril, julio y octubre de 2003”	57

Figura 5.19	Valores máximos, mínimo y promedio de velocidad del viento en [m/s] para enero, abril, julio y octubre de 2004".	58
Figura 7.1	Concentraciones horarias observadas, modeladas y filtradas para enero de 2003 en Los Maitenes	70
Figura 7.2	Concentraciones horarias observadas, modeladas y filtradas para abril de 2003 en Los Maitenes	70
Figura 7.3	Concentraciones horarias observadas, modeladas y filtradas para julio de 2003 en Los Maitenes	70
Figura 7.4	Concentraciones horarias observadas, modeladas y filtradas para octubre de 2003 en Los Maitenes	71
Figura 7.5	Concentraciones horarias observadas, modeladas y filtradas para enero de 2004 en Los Maitenes	71
Figura 7.6	Concentraciones horarias observadas, modeladas y filtradas para abril de 2004 en Los Maitenes	71
Figura 7.7	Concentraciones horarias observadas, modeladas y filtradas para julio de 2004 en Los Maitenes	72
Figura 7.8	Concentraciones horarias observadas, modeladas y filtradas para octubre 2004 en Los Maitenes	72
Figura 7.9	Concentraciones promedio de 24 horas observadas, modeladas y filtradas para enero de 2003 en Los Maitenes	73
Figura 7.10	Concentraciones promedio de 24 horas observadas, modeladas y filtradas para abril de 2003 en Los Maitenes	73
Figura 7.11	Concentraciones promedio de 24 horas observadas, modeladas y filtradas para julio de 2003 en Los Maitenes	73
Figura 7.12	Concentraciones promedio de 24 horas observadas, modeladas y filtradas para octubre de 2003 en Los Maitenes	74
Figura 7.13	Concentraciones promedio de 24 horas observadas, modeladas y filtradas para enero de 2004 en Los Maitenes	74
Figura 7.14	Concentraciones promedio de 24 horas observadas, modeladas y filtradas para abril de 2004 en Los Maitenes	74
Figura 7.15	Concentraciones promedio de 24 horas observadas, modeladas y filtradas para julio de 2004 en Los Maitenes	75
Figura 7.16	Concentraciones promedio de 24 horas observadas, modeladas y filtradas para octubre 2004 en Los Maitenes	75

Figura 7.17	Concentraciones promedio de 24 horas observadas, modeladas y filtradas para enero de 2003 en La Greda	75
Figura 7.18	Concentraciones promedio de 24 horas observadas, modeladas y filtradas para abril de 2003 en La Greda	76
Figura 7.19	Concentraciones promedio de 24 horas observadas, modeladas y filtradas para julio de 2003 en La Greda	76
Figura 7.20	Concentraciones promedio de 24 horas observadas, modeladas y filtradas para octubre de 2003 en La Greda	76
Figura 7.21	Concentraciones promedio de 24 horas observadas, modeladas y filtradas para enero de 2004 en La Greda	77
Figura 7.22	Concentraciones promedio de 24 horas observadas, modeladas y filtradas para abril de 2004 en La Greda	77
Figura 7.23	Concentraciones promedio de 24 horas observadas, modeladas y filtradas para julio de 2004 en La Greda	77
Figura 7.24	Concentraciones promedio de 24 horas observadas, modeladas y filtradas para octubre 2004 en La Greda	78
Figura 7.25	Concentraciones promedio de 24 horas observadas, modeladas y filtradas para enero de 2003 en Valle Alegre	78
Figura 7.26	Concentraciones promedio de 24 horas observadas, modeladas y filtradas para abril de 2003 en Valle Alegre	78
Figura 7.27	Concentraciones promedio de 24 horas observadas, modeladas y filtradas para julio de 2003 en Valle Alegre	79
Figura 7.28	Concentraciones promedio de 24 horas observadas, modeladas y filtradas para octubre de 2003 en Valle Alegre	79
Figura 7.29	Concentraciones promedio de 24 horas observadas, modeladas y filtradas para enero de 2004 en Valle Alegre	79
Figura 7.30	Concentraciones promedio de 24 horas observadas, modeladas y filtradas para abril de 2004 en Valle Alegre	80
Figura 7.31	Concentraciones promedio de 24 horas observadas, modeladas y filtradas para julio de 2004 en Valle Alegre	80
Figura 7.32	Concentraciones promedio de 24 horas observadas, modeladas y filtradas para octubre 2004 en Valle Alegre	80
Figura 7.33	Concentraciones horarias observadas, modeladas y filtradas para un 25% de aumento de emisión en noviembre de 2004	91

en Los Maitenes
Figura 7.34 Concentraciones horarias observadas, modeladas y filtradas para un 50% de aumento de emisión en noviembre de 2004 en Los Maitenes 91
Figura 7.35 Concentraciones horarias observadas, modeladas y filtradas para un 75% de aumento de emisión en noviembre de 2004 en Los Maitenes 92
Figura 7.36 Concentraciones horarias observadas, modeladas y filtradas para un 100% de aumento de emisión en noviembre de 2004 en Los Maitenes 92
Figura 7.37 Concentraciones horarias observadas, modeladas y filtradas para velocidad del viento menor a 2 [m/s] en enero de 2004 en Los Maitenes 95
Figura 7.38 Concentraciones horarias observadas, modeladas y filtradas para velocidad del viento entre 2 y 4 [m/s] en enero de 2004 en Los Maitenes 96
Figura 7.39 Concentraciones horarias observadas, modeladas y filtradas para velocidad del viento menor entre 4 y 6 [m/s] en enero de 2004 en Los Maitenes 96
Figura 7.40 Concentraciones horarias observadas, modeladas y filtradas para velocidad del viento mayor a 6 [m/s] en enero de 2004 en Los Maitenes 96
Figura 7.41 Concentraciones horarias observadas, modeladas y filtradas para las direcciones Norte-Sur en octubre de 2003 en Los Maitenes 99
Figura 7.42 Concentraciones horarias observadas, modeladas y filtradas para las direcciones Este-Oeste en octubre de 2003 en Los Maitenes 100
Figura 7.43 Concentraciones horarias observadas, modeladas y filtradas para las direcciones Noroeste-Sureste en octubre de 2003 en Los Maitenes 100
Figura 7.44 Concentraciones horarias observadas, modeladas y filtradas para las direcciones Suroeste-Noreste en octubre de 2003 en Los Maitenes 100

SIMBOLOS Y SIGLAS UTILIZADAS

D	Término de decaimiento exponencial para la ecuación gaussiana de la pluma (adimensional)
d_s	Diámetro interno de la chimenea en [m]
F_b	Parámetro de fluctuación de flotabilidad [m^4/s^3]
F_m	Parámetro de fluctuación de momento [m^4/s^2]
g	Aceleración de gravedad 9.801616 [m/s^2]
h_e	Altura efectiva de la chimenea [m]
h_s	Altura de la chimenea física de la chimenea [m]
h_s`	Altura física modificada de la chimenea [m]
K	Coeficiente de escalamiento para convertir las concentraciones calculadas a unidades dadas
P	Exponente de perfil del viento (adimensional)
Q	Tasa de emisión de contaminante [g/s]
s	Parámetro de estabilidad [s^{-2}]
T_a	Temperatura ambiental del aire [K]
T_s	Temperatura de salida del gas de la chimenea [K]
u_{ref}	Velocidad del viento medida a la altura de referencia del anemómetro [m/s]
u_s	Velocidad media del viento a la altura de descarga de la chimenea [m/s]
U_z	Velocidad del viento (horizontal) a una altura z necesaria en [m/s]
U_{10}	Velocidad del viento a 10 [m] de altura en [m/s]
V	Término vertical de la ecuación gaussiana de la pluma (adimensional)
v_s	Velocidad de salida de los gases en [m/s]
X	Coordenada x en la red de receptores cartesiano
x_f	Distancia de elevación final de la pluma [m]
z_{ref}	Altura de referencia de medición de velocidad del viento en [m]
Δh	Elevación del penacho en [m]
$\partial\theta/\partial z$	Gradiente de temperatura en función de la altura [K/m]
π	pi = 3.1415159
σ_y	Parámetro de dispersión lateral [m]
σ_z	Parámetro de dispersión vertical [m]

$\overline{O}$	Promedio aritmético de los valores observados en el tiempo
$\overline{P}$	Promedio aritmético de los valores predichos en el tiempo
NMD	Diferencia media normalizada
RMSE	Raíz del error cuadrático medio
IA	Índice de acuerdo
B_{NMBF}	Factor normalizado medio del bias
E_{NMEF}	Factor de error medio normalizado

INTRODUCCION

Las actividades humanas han tenido como resultado la emisión a la atmósfera de enormes cantidades de productos residuales potencialmente nocivos, los cuales, mediante procesos como la lluvia ácida y el smog fotoquímico, entre otros, han generado cambios en el medio ambiente y por ende, en el comportamiento de los contaminantes en la atmósfera, afectando la salud de las personas, la vegetación, la fauna y las construcciones, por lo que ha sido necesario desarrollar herramientas para predecir y evaluar estos cambios, siendo éstas los modelos de dispersión.

El empleo de modelos de dispersión atmosférica permite estimar las concentraciones totales de un contaminante en estudio, como también, identificar las causas de niveles extraordinarios de contaminación. Es por esto, que organismos Internacionales como la Organización Mundial de la Salud, la Organización Meteorológica Mundial y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, entre otros, se han dedicado a la tarea de impulsar el uso de este tipo de herramientas, ya sea, con fines regulatorios o para gestionar situaciones eventualmente problemáticas. [1,2]

Desde 1970 con motivo de la dictación de las normas de calidad del aire en Estados Unidos, la Agencia de protección ambiental de este país (EPA), ha venido desarrollando una serie de programas regulatorios para la modelización de la calidad del aire. Uno de estos programas es el ISC en su tercera versión, desarrollado por Pacific Environmental Services, Inc.

En Chile, las actividades de fundición y refinación de cobre como de generación energética constituyen una fuente importante de contaminación atmosférica, debido a que los procesos involucrados generan grandes cantidades de anhídrido sulfuroso.

En la V Región, la comuna de Puchuncaví ha sido por años una zona fuertemente afectada por las emisiones de anhídrido sulfuroso provenientes del Complejo Industrial Las Ventanas, compuesto por Fundición y Refinería Las Ventanas y termoeléctrica AES Gener S.A.

El presente trabajo realiza una modelación de las emisiones de anhídrido sulfuroso en la Comuna de Puchuncaví para los años 2003 y 2004, utilizando el modelo regulatorio de la EPA Industrial Source Complex (ISC3), con el fin de obtener las concentraciones de anhídrido sulfuroso predichas por el modelo, compararlas con las entregadas por la Red de monitoreo perteneciente al Complejo Industrial Las Ventanas y determinar cuán bien se ajustan los datos modelados a los observados.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Validar el modelo de dispersión atmosférica ISC3, mediante la modelación de anhídrido sulfuroso en la Comuna de Puchuncaví, considerando las emisiones provenientes del Complejo Industrial Las Ventanas.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Modelar las concentraciones horarias y promedio de 24 horas de anhídrido sulfuroso para los años 2003 y 2004 en las 5 estaciones que conforman la red de calidad del aire del Complejo Industrial Las Ventanas.

- Minimizar los errores sistemáticos de los resultados del modelo ISC3 mediante la aplicación del filtro Kalman.

- Realizar un análisis estadístico de las concentraciones modeladas y filtradas obtenidas.

CAPITULO 1

ANTECEDENTES GENERALES

1.1 ANTECEDENTES DE LAS FUENTES EMISORAS [3,4]

En la Quinta Región Comuna de Puchuncaví, se encuentra ubicado el Complejo Industrial Las Ventanas, compuesto por la Fundición y Refinería Las Ventanas perteneciente a CODELCO y por la Planta Termoeléctrica AES Gener S.A.

Durante años la comuna de Puchuncaví ha sido fuertemente impactada por la operación de este complejo industrial, siendo ésta una de las principales causas de la disminución de la productividad agrícola y degradación de los ecosistemas de la zona.

De este modo y de acuerdo a lo establecido en la Constitución Política de la República que garantiza el derecho a vivir en un ambiente libre de contaminación y por consiguiente, el deber del Estado de velar porque este derecho no sea afectado y tutelar la preservación de la naturaleza; el Ministerio de Minería a través del D.S. Nº185/1991 que "Regula a los establecimientos y fuentes emisoras de anhídrido sulfuroso, material particulado y arsénico" obligó a la Fundición y Refinería Las Ventanas junto a AES Gener S.A. a instalar una red de monitoreo continuo de calidad del aire y a presentar un Plan de descontaminación a más tardar el 31 de julio de 1992.

El proyecto de red de monitoreo presentado por ambas empresas fue aprobado por Resolución Conjunta Nº2005 y Nº115 del 29 de abril de 1992, y posteriormente modificado por las Resoluciones Nº3474 y Nº206, del 23 de julio del mismo año, del Servicio de Salud de Viña del Mar-Quillota y Servicio Agrícola y Ganadero V Región respectivamente.

El Plan de descontaminación fue aprobado mediante D.S. Nº252 el 30 de diciembre de 1992, en él se establece la obligación de la Fundición y Refinería Las Ventanas y de la Planta Termoeléctrica AES Gener S.A. de cumplir, conjuntamente las normas de calidad del aire para material particulado respirable (MP_{10}) a más tardar el 1º de enero de 1995 y

anhídrido sulfuroso (SO_2) a más tardar el 30 de junio de 1999, como también, un cronograma de reducción de emisiones anuales de azufre como elemento formador de anhídrido sulfuroso y material particulado respirable.

Debido a las excedencias a las normas de calidad del aire de las mediciones entregadas por la red de monitoreo, con fecha 9 de diciembre de 1993 mediante D.S. Nº 346 del Ministerio de Agricultura, se declara zona saturada por anhídrido sulfuroso y material particulado el área jurisdiccional de las comunas de Puchuncaví y Quintero.

Posteriormente el Servicio de Salud Viña del Mar-Quillota aprobó por Resolución Nº2161, del 18 de julio de 1995, el Plan de Acción Operacional ante episodios críticos por anhídrido sulfuroso, presentado por Fundición y Refinería Las Ventanas.

1.2 NORMATIVA DE CALIDAD DEL AIRE PARA SO_2 EXISTENTE EN CHILE

1.2.1 Normativa no aplicable para anhídrido sulfuroso [5]

El D.S. Nº113/2002 de la Secretaria General de la República, publicado el 6 de marzo del 2003 y que entró en vigencia el 1º de Abril del mismo año, establece la norma de calidad primaria para anhídrido sulfuroso, sin embargo, ya que su aplicación se basa en datos de 3 años calendario consecutivos a partir de la fecha de entrada en vigencia, no podrá ser aplicable hasta el año 2006.

1.2.2 Normativa aplicable para anhídrido sulfuroso [6]

El D.S. Nº185/1991 del Ministerio de Minería corresponde a la normativa para anhídrido sulfuroso actualmente aplicable en nuestro país.

En este decreto se establecen las normas primaria y secundaria de calidad del aire para anhídrido sulfuroso.

La norma primaria es aquella que tiene por objeto proteger la salud de la población y en la cual se entregan las concentraciones ambientales máximas permisibles aplicables en todo el territorio nacional.

La norma secundaria, en este decreto, se define como aquella que tiene por objeto proteger las explotaciones silvoagropecuarias y preservar los ecosistemas pertinentes a las áreas protegidas, y en ella, se diferencia el territorio nacional en norte y sur, básicamente por el tipo de vegetación existente.

En la Tabla 1.1 se presentan los valores de concentración del contaminante anhídrido sulfuroso establecidos por norma primaria y secundaria para la zona de Ventanas.

Tabla 1.1. "Valores de concentración para SO_2 establecidos por norma primaria y secundaria aplicable a la zona de Ventanas" [6]

	Norma Primaria [$\mu g/m^3N$]	Norma Secundaria [$\mu g/m^3N$]
Concentración media aritmética anual	80	80
Concentración media aritmética diaria	365	365
Concentración media aritmética horaria	No hay	1000

1.3 ANHÍDRIDO SULFUROSO [7,8,9]

Por años, el anhídrido sulfuroso ha sido considerado uno de los principales componentes de la contaminación del aire, por ser el principal precursor de la deposición ácida (lluvia ácida), la cual está asociada a la acidificación de los suelos, lagos, corrientes y acelerada corrosión de edificios y monumentos. Por otra parte, es uno de los principales formadores de PM 2,5 que es un importante contribuyente a la disminución de la visibilidad.

Las fuentes naturales, como los volcanes, contribuyen a los niveles ambientales de anhídrido sulfuroso mediante la emisión de compuestos reducidos (como SH_2, SC_2, SCO, sulfuro de metilo y sulfuro de dimetilo) los cuales se oxidan a anhídrido sulfuroso mediante un mecanismo que consiste de varias etapas, en las cuales, participan diversas especies presentes en la troposfera como son el oxígeno, ozono, NO_2 y radicales OH. Sin embargo,

son las contribuciones antropogénicas de anhídrido sulfuroso, principalmente provenientes de la combustión de combustibles fósiles las más importantes.

Una vez emitido el anhídrido sulfuroso forma ácido sulfúrico a partir de su oxidación, ya sea en fase gas o fase acuosa.

Oxidación en fase gaseosa: existen variados compuestos capaces de oxidar al anhídrido sulfuroso en ausencia de humedad, entre éstos encontramos radicales HO_2, CH_2O_2, OH y ozono. La oxidación por los radicales OH es la principal vía de oxidación siendo el mecanismo el siguiente:

$$SO_2 + OH\cdot + M \rightarrow HOSO_2\cdot + M$$
$$HOSO_2\cdot + O2 \rightarrow HO_2\cdot + SO_3$$
$$SO_3 + H_2O + M \rightarrow H_2SO_4 + M$$

Oxidación en fase acuosa: proceso en que las transformaciones ocurren en el seno de pequeñas gotas de agua que forman una nube. Los compuestos oxidantes pueden ser variados y entre ellos encontramos iones metálicos de transición (hierro y manganeso), procesos fotocatalíticos en los cuales participan partículas sólidas de óxidos metálicos, y el oxidante principal que es el agua oxigenada que oxida el ácido sulfuroso a ácido sulfúrico a través del siguiente mecanismo:

$$SO_2 + H_2O \rightarrow H_2SO_3$$
$$H_2SO_3 + H_2O_2 \rightarrow H_2SO_4 + H_2O$$

Finalmente una vez formado el ácido sulfúrico, éste desciende a la superficie terrestre mediante un proceso denominado deposición ácida, que incluye la deposición húmeda (lluvia ácida) como también la deposición seca, tales procesos se detallan a continuación.

Deposición húmeda: consiste en la disolución del ácido en agua de lluvia, nieve o granizo.

Deposición seca: consiste en la depositación de las partículas sólidas de sulfatos formados por nucleación del respectivo ácido mediante su neutralización con amoníaco. Esta depositación puede ocurrir mediante los mecanismos de difusión (las partículas migran hacia una superficie y chocan con ella, permaneciendo allí), impactación (las partículas son transportadas por el viento depositándose en los obstáculos que encuentran a su paso) y sedimentación (las partículas son depositadas por acción de la gravedad) y es dependiente de las características físicas y químicas del contaminante, volumen, forma y densidad de la partícula como también de la velocidad del viento. En el caso de un contaminante gaseoso, como el dióxido de azufre, el proceso de depositación depende de la polaridad, peso molecular y reactividad química del gas.

En consecuencia, el tiempo de residencia del anhídrido sulfuroso es de unas pocas semanas ya que rápidamente se oxida a ácido sulfúrico, así, a pesar de la elevada velocidad de emisión, tanto por medios naturales como antropogénicos, su concentración en la troposfera es baja.

CAPITULO 2

TEORIA DE DISPERSION DE CONTAMINANTES

2.1 ASPECTOS BASICOS DE METEOROLOGIA [9]

La mayoría de los contaminantes emitidos por el hombre están en forma oxidada, forma bajo la cual se disuelven en el agua de lluvia; por lo tanto, la mayor parte difunde hacia la parte baja de la atmósfera donde están sometidos a la acción química de otros elementos presentes y a la acción física de los fenómenos meteorológicos. Sin embargo, en algunas excepciones, como es el caso de determinadas erupciones volcánicas o la aviación supersónica, los contaminantes son proyectados hasta zonas más altas de la atmósfera.

En la atmósfera los contaminantes, una vez emitidos, se mezclan íntimamente gracias a los movimientos convectivos de las masas de aire; posteriormente reaccionan con otras especies presentes, sedimentan y, en consecuencia se separan de la mezcla reactiva. El destino último de los contaminantes son los océanos, los sedimentos o el suelo. En general, puede considerarse que en las áreas continentales del planeta se encuentran fuentes originarias de la contaminación, mientras que los océanos, por su extensión, son los principales depósitos hacia los que retornan los contaminantes.

Un contaminante emitido sufre una serie de transformaciones físicas y químicas, las cuales pueden considerarse que forman parte de un ciclo. Básicamente, el ciclo consiste, en primer lugar, en una mezcla de los contaminantes a causa de las turbulencias atmosféricas favorecidas por el relieve de la superficie terrestre. Luego, su dispersión por la atmósfera, la cual está favorecida por la circulación dominante de las masas de aire, con lo que además se logra una distribución homogénea de los contaminantes en una extensa región horizontal de la atmósfera.

Posteriormente, los contaminantes pueden retornar a la superficie terrestre o bien sufrir transformaciones químicas que, eventualmente, pueden dar lugar a otros contaminantes. La última etapa del ciclo de los contaminantes consiste en el retorno de éstos, mediante deposición seca o húmeda, incorporándose en este último caso en el agua de lluvia.

2.1.1 Capa de mezclado [9,10,11]

La mezcla inicial de los contaminantes tiene lugar cuando el contaminante asciende un centenar de metros, después que ha sido emitido a la atmósfera. Esta mezcla se realiza en la zona más baja de la troposfera, que está en contacto directo con la superficie terrestre y que se denomina capa de mezcla. En esta región, los contaminantes son libres de desplazarse, tanto vertical como horizontalmente, gracias a las turbulencias que se generan en las capas bajas de la atmósfera.

La altitud a la que se encuentra la capa de mezcla es muy variada y depende de muchos factores, todos ellos relacionados con el microclima imperante en la zona. En general, se encuentra situada entre los 50 metros y los 5 kilómetros por encima del suelo, aunque, habitualmente se localiza a unos 2 kilómetros durante el día, y a unos centenares de metros durante la noche. La turbulencia favorece el contacto íntimo entre los contaminantes gaseosos y no gaseosos, dando lugar a una distribución homogénea de éstos por toda la capa de mezcla, lo cual impide que se acumulen en la zona próxima a la fuente de emisión.

Una vez que los contaminantes están distribuidos por la capa de mezcla, se desplazan ya sea por difusión o incorporación a las masas circulantes de aire, hacia puntos más o menos alejados del foco emisor. La distancia que es capaz un contaminante de desplazarse, depende de su estabilidad química y del medio reactivo que vaya encontrando durante su viaje.

Los procesos químicos y fotoquímicos en los que participa el contaminante pueden generar otros secundarios, cuyas propiedades físicas y químicas son, por lo general, muy distintas a las de su precursor. Estas transformaciones químicas, pueden ser homogéneas o heterogéneas. En el caso de transformaciones químicas homogéneas, los procesos químicos ocurren en una sola fase, ya sea en fase gas o en fase líquida, tal como ocurre en el interior de las gotas que forman la nube; en este último caso, se habla de transformaciones húmedas. Las transformaciones heterogéneas implican más de una fase y habitualmente participan partículas sólidas; en este caso, el contaminante se absorbe en las partículas de aerosol, las cuales sirven de soporte a la transformación química del contaminante primario o incluso, como catalizadores del proceso.

Finalmente, el retorno de los contaminantes, transformados químicamente o no, a la superficie terrestre puede ocurrir por dos vías distintas; una de ellas consiste en una deposición húmeda, mediante la cual los contaminantes son transferidos a la superficie terrestre en forma acuosa, ya sea incorporados en el agua de lluvia, en la nieve o en la niebla, o bien, por la transferencia directa, por acción de la gravedad, del gas o de la partícula a la superficie de la Tierra (deposición seca).

El comportamiento de los contaminantes descrito, corresponde a una situación en que éstos ascienden a altitudes no superiores a unos pocos kilómetros. Sin embargo, se emiten determinados compuestos lo suficientemente estables, como para resistir las agresiones físicas y químicas que prevalecen por sobre la capa de mezcla. En estos casos, el contaminante asciende a alturas considerables con lo que puede desplazarse más libremente y ser transportado a distancias mayores, donde incluso puede llegar a traspasar la tropopausa e introducirse en la estratosfera.

De este modo, aquellas especies contaminantes que se encuentran en fase gaseosa que no son solubles en agua, presentan mayores tiempos de residencia, de forma que la probabilidad de que asciendan más allá de la capa de mezcla también es mayor.

2.1.2 Gradiente vertical de temperatura [12]

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

2.1.3 Gradiente adiabático seco [12,13]

Una porción de aire en su mayor parte no intercambia calor traspasando sus fronteras. Por consiguiente, una porción de aire más cálida que el aire circundante no transfiere calor a la atmósfera. Cualquier cambio de temperatura producido en la porción de aire se debe a aumentos o disminuciones de la actividad molecular interna. Estas modificaciones

se producen adiabáticamente y se deben sólo al cambio de la presión atmosférica provocado por el movimiento vertical de la porción de aire. Un proceso adiabático es aquel en el que no se produce transferencia de calor ni de masa a través de las fronteras de la porción de aire. En este proceso, la compresión da lugar al calentamiento, y la expansión al enfriamiento.

Una porción de aire seco que se eleva en la atmósfera se enfría en el gradiente adiabático seco de aproximadamente 9,8[ºC]/1000[m] y, por lo tanto, presenta un gradiente vertical de -9,8[ºC]/1000[m]. De manera similar, una porción de aire seco que se hunde en la atmósfera se calienta en el gradiente adiabático seco de 9,8[ºC]/1000[m] y presenta un gradiente vertical de 9,8[ºC]/1000[m]. En este contexto, se considera que el aire es seco ya que el agua que contiene permanece en estado gaseoso.

El gradiente vertical adiabático seco es fijo, totalmente independiente de la temperatura ambiental. Siempre que una porción de aire seco ascienda en la atmósfera, se enfriará en el gradiente de 9,8[ºC]/1000[m], independientemente de cual haya sido su temperatura inicial o la del aire circundante. La Figura 2.1 es un diagrama adiabático simple y en él se muestra la relación entre la elevación y la temperatura, las líneas indican el gradiente vertical adiabático seco con diversas temperaturas al inicio y a lo largo del eje horizontal.

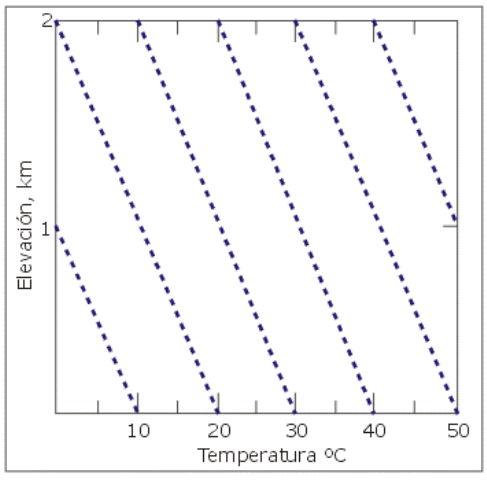


Figura 2.1. "Gradiente vertical adiabático seco" [12]

2.1.4 Gradiente vertical adiabático húmedo [12,13]

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. En este punto, la presión del vapor de agua iguala a la del vapor de saturación del aire y una parte del vapor de agua se comienza a condensar. La condensación libera calor latente en la porción de aire, y por consiguiente, el gradiente de enfriamiento de la porción disminuye. Este nuevo gradiente es conocido como gradiente vertical adiabático húmedo y a diferencia del gradiente vertical adiabático seco, no es constante, depende de la temperatura y la presión, tal como se muestra en la Figura 2.2. Sin embargo, en la mitad de la troposfera se estima un gradiente aproximado de 6-7[ºC]/1000[m].

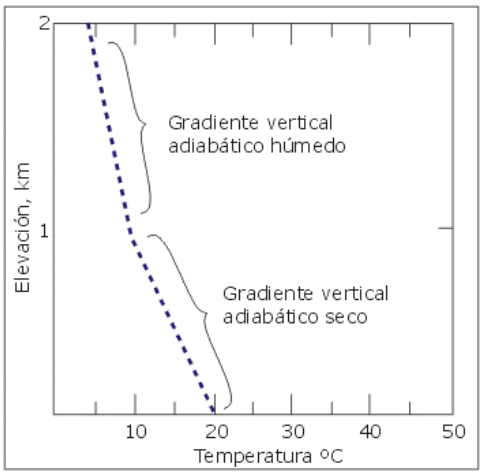


Figura 2.2. "Gradiente vertical adiabático húmedo" [12]

2.1.5 Gradiente ambiental [12]

El verdadero perfil de la temperatura del aire ambiental es denominado gradiente vertical del ambiente y algunas veces llamado también, gradiente vertical atmosférico, y es el resultado de complejas interacciones producidas por factores meteorológicos. Generalmente se considera que consiste en una disminución de la temperatura con la altura. Como se indica en la Figura 2.3a, el perfil de temperatura puede variar considerablemente con la altitud, algunas veces puede alcanzar gradientes mayores que el adiabático seco y en otras ocasiones, menores.

El fenómeno producido cuando la temperatura aumenta con la altitud se conoce como inversión de la temperatura. En la Figura 2.3b, esta inversión se produce en elevaciones de 200 a 350 [m]. Esta situación es importante principalmente en la contaminación del aire porque limita la circulación vertical de éste.

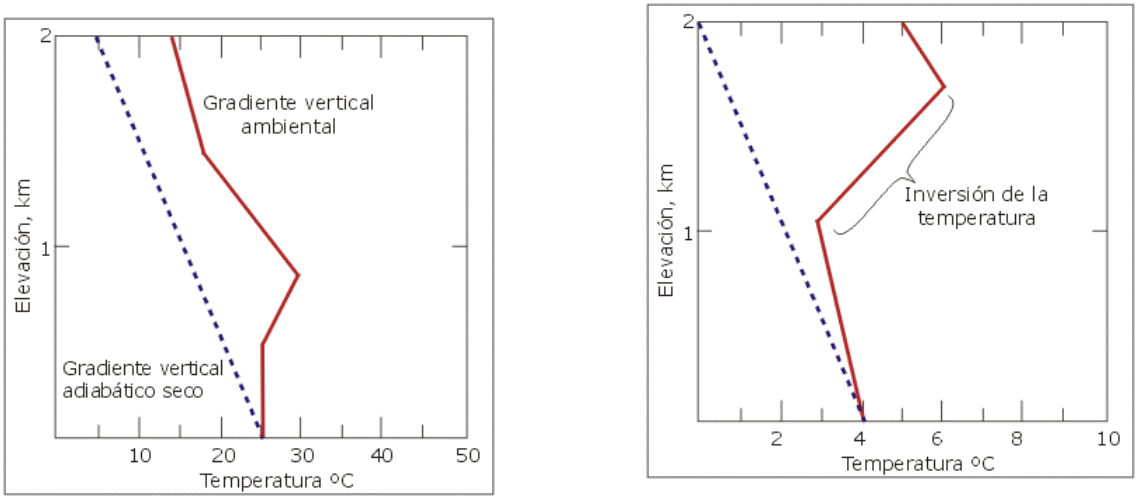


Figura 2.3. (a) "Gradiente vertical ambiental" (izquierda), (b) "Inversión de la temperatura" (derecha) [12]

2.1.6 Estabilidad atmosférica [14]

Dentro de la atmósfera, entre una masa de aire y su entorno se producen estados de equilibrio que pueden ser de tres tipos: equilibrio estable, equilibrio inestable, equilibrio neutral. La intensidad de las corrientes verticales que se producen ya sea hacia arriba o hacia abajo dependen principalmente del tipo de equilibrio.

2.1.6.1 Condiciones estables [12,14]

La estabilidad o el equilibrio estable se produce cuando, una masa de aire que es forzada a moverse verticalmente tiende a volver a su posición inicial, es decir, se resiste al desplazamiento. Este tipo de estabilidad atmosférica tiene lugar cuando el gradiente de temperatura ambiente es menor que el gradiente de temperatura seca adiabática, o lo que es lo mismo la velocidad de enfriamiento es menor a 1[ºC]/100[m], lo cual se muestra en la Figura 2.4. El gradiente de temperatura es menos pronunciado y de esta manera responsable de un menor número de turbulencias. Una variante de esta condición es la

clase isoterma donde no existe variación de la temperatura con respecto a la altura. Si la porción de aire se desplaza en sentido ascendente, se enfriará ella misma a razón de aproximadamente 1[ºC]/100[m]. La porción se encontrará más fría que los alrededores y por lo tanto se verá forzada a hundirse.

Igualmente, si la porción de aire se desplaza en sentido descendente se calentará a aproximadamente 1[ºC]/100[m]. Se encontrará más templada que los alrededores y debido a la capacidad de flote será forzada nuevamente hacia arriba. De este modo, la porción de aire no se moverá ni en sentido ascendente o descendente desde la posición "estable". La condición ambiental se conoce como "estable" con un gradiente de temperatura "subadiabático".

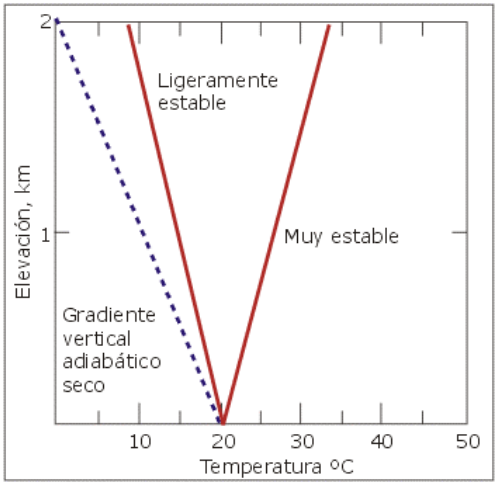


Figura 2.4. "Condiciones estables" [12]

2.1.6.2 Condiciones inestables [12,14]

La atmósfera es inestable cuando la masa de aire, al ser desplazada verticalmente continúa moviéndose aún cuando la fuerza que la desplazó deja de actuar y, por lo tanto, no regresa a la posición inicial. Una atmósfera inestable acontece cuando el gradiente de temperatura ambiental excede el gradiente de temperatura seca adiabática, o lo que es lo mismo la velocidad de enfriamiento en la ascensión es mayor a 1[ºC]/100[m].

Este gradiente de temperatura más pronunciado incita una mayor turbulencia térmica. En este caso, si la porción de aire se desplaza en sentido ascendente (por turbulencia

mecánica o por corrientes cercanas a un edificio) se enfriará en su interior a aproximadamente 1[ºC]/100[m], de forma que se encontrará más templada que el aire alrededor. Debido a la capacidad de flotación esta porción continuará en su ascensión. Igualmente, si la porción se mueve en sentido descendente (por corrientes debidas a un accidente topográfico), es más fría y densa que el aire alrededor y continuará hundiéndose. Esta condición se conoce como “inestable” con un gradiente de temperatura “superadiabático”. El gradiente vertical superadiabático y las condiciones inestables se esquematizan en la Figura 2.5a y 2.5b respectivamente.

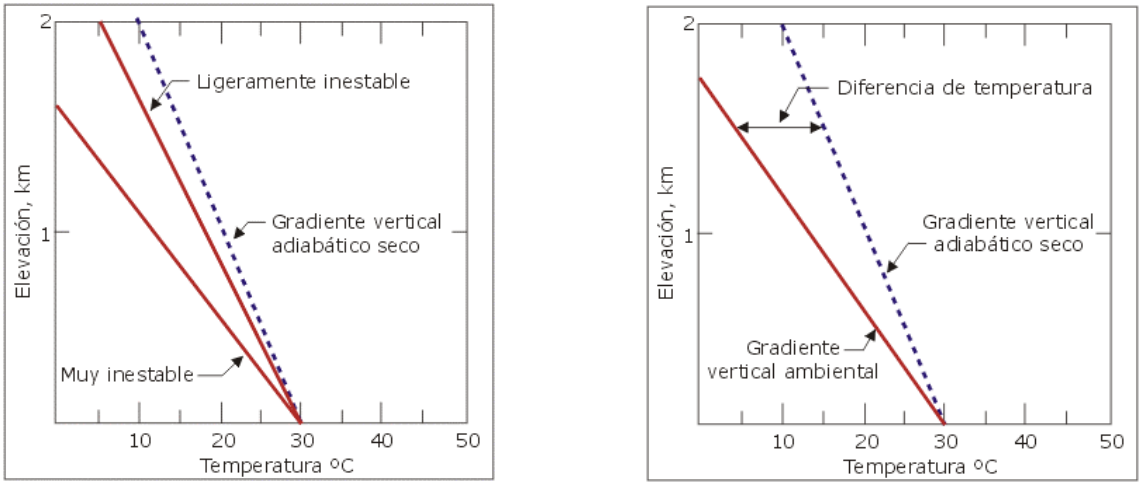


Figura 2.5. (a) “Condiciones inestables” (izquierda), (b) “Gradiente vertical superadiabático” (derecha) [12]

2.1.6.3 Condiciones neutrales [12,14]

La atmósfera está en equilibrio o tiene una estabilidad neutral cuando la masa de aire al ser desplazada mantiene el equilibrio en su nueva posición. Una atmósfera “neutral” tiene lugar cuando el gradiente de temperatura ambiental es igual al gradiente de temperatura seca adiabática o lo que es lo mismo la velocidad de enfriamiento es igual a aproximadamente 1[ºC]/100[m], tal como se muestra en la Figura 2.6. En este caso, si el volumen de aire se desplaza en sentido ascendente o descendente, su temperatura se ajustará a la de los alrededores, así, en cualquier nueva posición, no experimenta ninguna fuerza que la incite a ajustar su posición nuevamente siendo estable en su antigua y en su nueva posición.

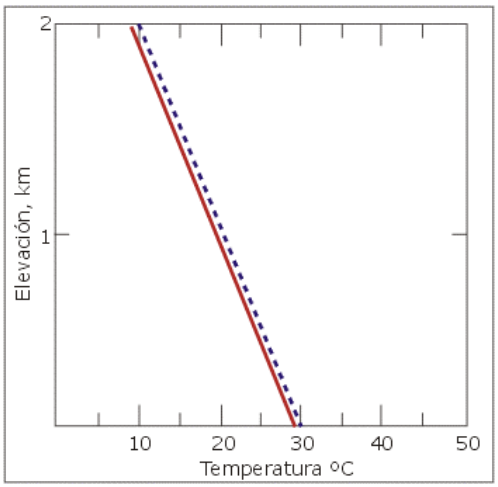


Figura 2.6. "Condiciones neutrales" [12]

2.1.6.4 Inversión [14]

La condición de "inversión estable" es una variante de una atmósfera estable. En este caso, la temperatura aumenta con la altitud. Esta situación es muy común pero generalmente está confinada a una capa relativamente superficial. Si la porción de aire se mueve en sentido ascendente se enfriará en aproximadamente 1[ºC]/100[m]. Se encontrará mucho más fría que los alrededores y estará forzada a hundirse. Si la porción de aire se mueve en sentido descendente, se calentará aproximadamente 1[ºC]/100[m]. Se encontrará más templada que los alrededores y debido a la capacidad de flote se verá forzada hacia arriba. La condición de inversión de temperatura es una condición muy estable, forzando a los contaminantes a permanecer atrapados en la atmósfera durante largos periodos.

De esta manera, la estabilidad atmosférica está determinada fundamentalmente por dos factores:

- La variación de la temperatura con la altura o gradiente vertical de temperatura del aire que rodea a la masa de aire que asciende o desciende.
- La variación de temperatura que experimenta internamente por sí misma esa masa de aire que se mueve verticalmente.

2.1.6.5 Clasificación de estabilidad de Pasquill [14]

Existe una clasificación de estabilidad atmosférica, propuesta por Pasquill (1970). De acuerdo a Pasquill se definen 7 clases de estabilidad, las que se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. "Clases de estabilidad atmosférica de Pasquill" [14]

Clase	Descripción	Variación de la temperatura con la altura
A	Muy Inestable	Desciende más de 5,6[ºC] cada 1000 [m].
B	Medianamente Inestable	Desciende entre 5.1 y 5,6[ºC] cada 1000 [m].
C	Ligeramente Inestable	Desciende entre 4.5 y 5[ºC] cada 1000 [m].
D	Neutra	Desciende entre 1.5º y 4,4[ºC] cada 1000 [m].
E	Ligeramente Estable	Aumenta de 1,5[ºC] a 4,5[ºC] cada 1000 [m].
F	Medianamente Estable	Aumenta entre 4.6 y 12[ºC] cada 1000 [m].
G	Muy estable	Aumenta más de 12[ºC] cada 1000 [m].

Aún para condiciones neutras y ligeramente estables, la temperatura disminuye con la altura pero a una tasa bastante menor que la estándar. Una capa atmosférica isotérmica en que la temperatura se mantiene constante con la altura es una capa ligeramente estable. La capa es estable cuando hay una inversión térmica y mayor será la estabilidad cuanto más intensas sean las condiciones de esa inversión.

2.1.7 Variación de la velocidad del viento con la altitud [13]

La velocidad del viento se mide a una altura estándar de 10 [m] y se denomina U_{10}. La velocidad del viento varía con la altura, desde un valor mínimo nulo en la superficie del terreno hasta un valor máximo a alguna altura por encima de la influencia de los edificios y la topografía, a ésta se le denomina U_{∞} y la altura a la que se mida depende del terreno. En una región rural la U_{∞} se encuentra a una altura de unos 250 [m], mientras que la correspondiente altura para una zona urbana es mayor que 500 [m]. Para determinar U_z,

velocidad del viento a cualquier altura se emplea algunas veces la ley de semejanza de la potencia, la cual se muestra en la Ecuación 2.1.

$$U_z = U_{10} \cdot \left(\frac{Z}{Z_{10}} \right)^P \qquad \textit{Ecuación } 2.1$$

Donde:

U_z = velocidad del viento (horizontal) a una altura z (necesaria).

U_{10} = velocidad del viento a 10 [m].

Z = altura Z (altura superior a la chimenea).

Z_{10} = 10 [m].

p = exponente de perfil del viento.

El exponente p varía con el terreno y también con la clase de estabilidad, desde aproximadamente 0,1 a 0,4.

2.2 MODELO GAUSSIANO DE LA PLUMA

2.2.1 Modelos de Calidad del Aire [13]

Los modelos de dispersión de calidad del aire consisten en grupos de ecuaciones que sirven para interpretar y predecir las concentraciones de contaminantes causadas por la dispersión y por el impacto de las plumas. Estos modelos incluyen estimados de dispersión que se determinan mediante ecuaciones de distribución y/o modelos de calidad del aire, y además, las diferentes condiciones meteorológicas, incluidos los factores relacionados con la temperatura, la velocidad del viento, la estabilidad y topografía.

Existen tres tipos genéricos de modelos:

- Estadístico.
- Físico.
- Gaussiano.

Los tres tipos de modelos mencionados corresponden a modelos numéricos, en los cuales es necesario la resolución de ecuaciones de conservación de la materia, energía y cantidad de movimiento tridimensionales.

Las técnicas estadísticas se emplean si la información sobre los procesos físico-químicos es inadecuada para satisfacer los datos de partida de un modelo gaussiano. Estas técnicas tenderán a producir una información que asista en la comprensión del fundamento del problema de la calidad del aire. Tal evaluación puede precisar un control de datos para servir de ayuda al entendimiento del problema.

Los modelos físicos son deseables en emisiones de varios focos sobre terrenos de topografía compleja.

Los modelos gaussianos emplean la ecuación de distribución gaussiana y son ampliamente usados para estimar el impacto de contaminantes no reactivos. Estos modelos se encuentran lejos de ser exactos ya que algunas de sus suposiciones comprometen a la exactitud. Entre estas suposiciones se incluyen:

1. No existe variación ni en la velocidad ni en la dirección del viento entre el foco y el receptor.
2. Todo el vertido permanece en la atmósfera de manera que no reacciona ni se deposita en forma de lluvia o partículas. Cualquier penacho que impacta en el terreno rebota en su totalidad.
3. La dispersión no ocurre en la dirección descendente del viento. Únicamente tiene lugar en las direcciones verticales y horizontales del viento. La dispersión es estocástica y describe exactamente una distribución de Gauss.

2.2.2 Características de penachos de chimeneas [13]

El perfil de concentración de un penacho que se eleva procedente de una chimenea de altura H_s se presenta en la Figura 2.7. El contaminante se emite a un caudal Q y una velocidad de salida W. El penacho gana en altura debido a su velocidad y flotabilidad antes de desplazarse en la dirección en que sopla el viento. La ganancia en altura se

denomina elevación de penacho ΔH. La altura efectiva de penacho se obtiene de la Ecuación 2.2:

$$H_e = H_S + \Delta H \qquad \textit{Ecuación } 2.2$$

A medida que el penacho progresa en la dirección del viento, se asume que su perfil de concentración por difusión adquiere una distribución gaussiana. Si la condición atmosférica es neutra, entonces, se desarrollará un penacho en forma de cono. La concentración en la línea central del penacho será máxima a una distancia cercana del foco emisor y disminuirá en la dirección en que el viento sopla. A medida que la distancia a la que sopla el viento aumenta, las extremidades del penacho pueden impactar sobre el terreno tal y como se muestra en las Figuras 2.7 y 2.8. Si el desarrollo del penacho se efectúa en las tres dimensiones, el modelo que predice la dispersión del penacho tendrá en cuenta los cambios en los tres ejes x, y y z. La concentración de un contaminante en cualquier punto aproximadamente es la señalada en la Ecuación 2.3.

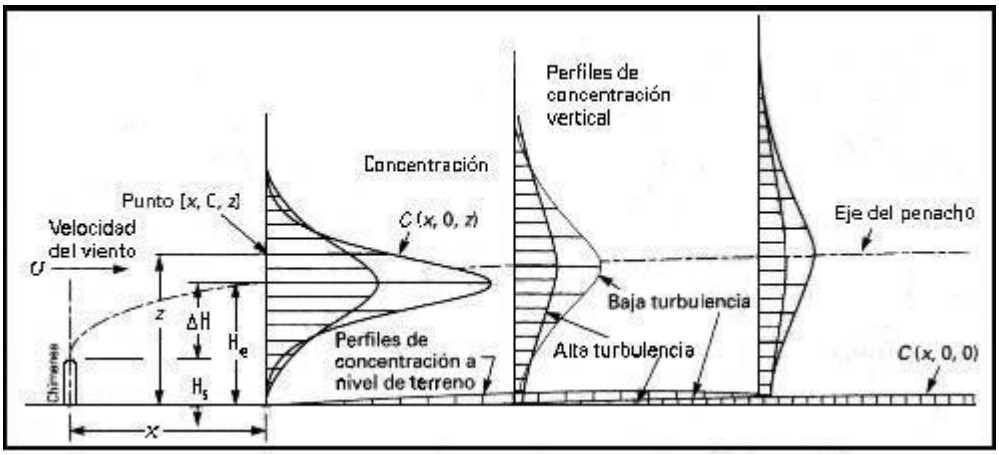


Figura 2.7. "Distribución Gaussiana de la pluma de contaminantes" [13]

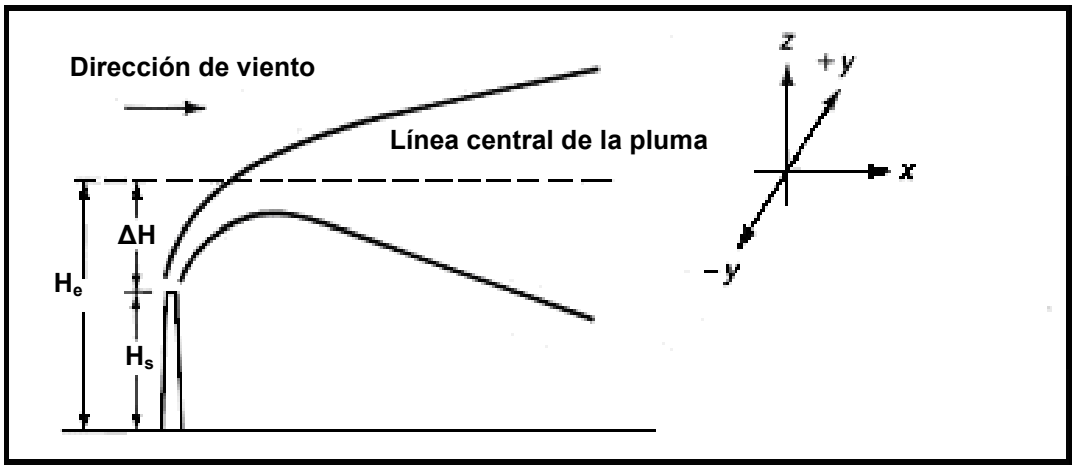


Figura 2.8. "Comportamiento de la pluma de contaminantes emitida desde una fuente puntual" [15]

$$C(x,y,z) \propto \frac{1}{U} \cdot Q \cdot G \qquad \textit{Ecuación } 2.3$$

Donde:

U = Velocidad del viento.

Q = Caudal de emisión.

G = Curva de Gauss normalizada en el plano yz.

2.2.3 Ecuación de difusión [13]

La concentración de un contaminante en un penacho en cualquier punto x, y o z puede calcularse con la Ecuación 2.4 de difusión, la cual es la expresión más reducida del modelo de dispersión gaussiano correspondiente al nivel del suelo.

$$C(x,y,z) = \frac{Q}{2\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{z}{\sigma_z}\right)^2\right] \qquad \textit{Ecuación } 2.4$$

Para el sistema de coordenadas:

x = 0 en el foco (chimenea).

y = 0 en la línea central del penacho.

z = 0 en el terreno.

Donde:

C	=	concentración lateral en puntos x, y, z, en [$\mu g/m^3$].
Q	=	coeficiente de emisiones en [$\mu g/s$].
σ_y, σ_z	=	parámetros de dispersión horizontal y vertical en [m] (son funciones de la distancia x y de la estabilidad de atmósfera).
u	=	velocidad promedio del viento en la altura de la chimenea [m/s].
y	=	distancia horizontal desde la línea central del flujo en [m].
z	=	distancia vertical desde el nivel del terreno en [m].

Si la altura efectiva del foco emisor es H, entonces la coordenada z en la línea central del penacho es (z-H), donde z se mide a partir de la cota del terreno; de este modo, la formulación matemática para el caso en el cual los contaminantes emanan a la altura de la chimenea y sin efecto de reflexión en el suelo se describe mediante la Ecuación 2.5.

$$C(x,y,z) = \frac{Q}{2\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\cdot\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\cdot\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] \qquad \textit{Ecuación } 2.5$$

Donde:

H	=	altura efectiva (H = h + Δh , donde h = altura física fuente y Δh = altura flujo de gases, [m]).

Una modificación a la Ecuación 2.5 se basa en el supuesto de la conservación de masa, de que todo el contaminante se reflejará a partir de una cierta distancia x, al dispersarse a la atmósfera desde el nivel del suelo; lo que implica a su vez que el suelo no es sumidero para dicho contaminante. Para lo anterior es necesario usar una fuente imaginaria tal y como se muestra en la Figura 2.9 con una localización en z = -H, x = 0 e y = 0 teniendo así una imagen en el espejo de la fuente original. La concentración será mayor a la determinada sin tomar en cuenta la reflexión del contaminante ya que existe la superposición de dos curvas gaussianas, la primera corresponde a una fuente virtual en H y la otra en –H. La formulación matemática se muestra en la Ecuación 2.6.

$$C(x,y,z)=\frac{Q}{2\pi\cdot\sigma_y\cdot\sigma_z\cdot u}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right]\left\{\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right]+\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right]\right\} \quad \textit{Ecuación } 2.6$$

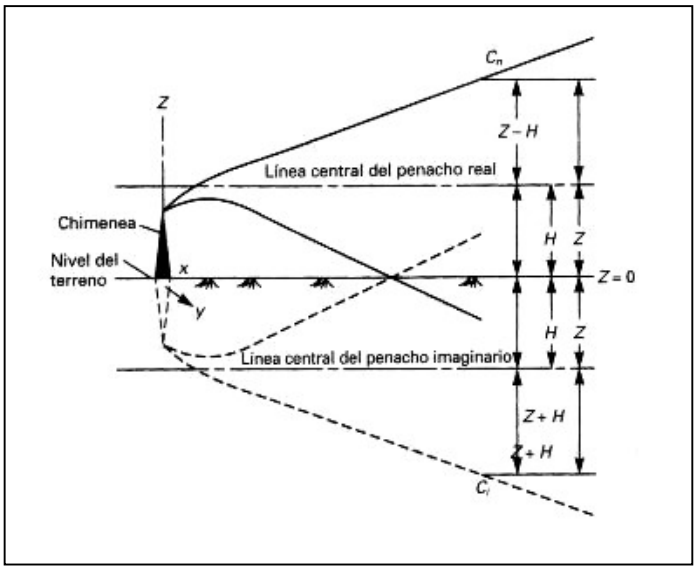


Figura 2.9. "Sistemas de coordenadas y reflexión sobre el terreno del desarrollo de un penacho" [6]

El mayor interés radica en el conocimiento de la concentración a nivel de terreno (z = 0), así la expresión anterior se reduce a la Ecuación 2.7.

$$C(x,y,z)=\frac{Q}{\pi\cdot\sigma_y\cdot\sigma_z\cdot u}\cdot\exp\left[-\frac{1}{2}\cdot\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right]\cdot\exp\left[-\frac{1}{2}\cdot\left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad \textit{Ecuación } 2.7$$

La concentración máxima a nivel del terreno, que se encuentra en la línea central del penacho, es decir, para y = 0, se presenta en la Ecuación 2.8.

$$C(x,0,0)=\frac{Q}{\pi\cdot\sigma_y\cdot\sigma_z\cdot u}\cdot\exp\left[-\frac{1}{2}\cdot\left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad \textit{Ecuación } 2.8$$

CAPITULO 3

MODELACION

3.1 MODELO ISC3 “MODELO COMPLEJO DE FUENTE INDUSTRIAL”

El modelo complejo de fuente industrial ISC cuyo nombre en inglés es Industrial Source Complex, incluye un modelo de largo y de corto plazo, donde la versión de corto plazo es conocida por la abreviación ISCST y la de largo plazo por ISCLT, correspondiente respectivamente a “short term” y “long term”.

El modelo ISC3 ha sido originalmente desarrollado para MS-DOS y se encuentra disponible en internet en la dirección: www.epa.gov/scram001/tt22.htm

De aquí en adelante la información se refiere al modelo ISCST, ya que será el usado para los propósitos del presente trabajo.

3.1.1 Modelo ISC de corto plazo [16]

Este modelo entrega opciones para modelar emisiones desde un amplio rango de fuentes. La base del modelo son la línea recta y la ecuación Gaussiana de la pluma en estado estacionario, ésta última usada con algunas modificaciones para modelar emisiones desde fuentes puntuales simples de chimenea, emisiones desde chimeneas que experimentan los efectos de caída de flujo aerodinámico, debido a la cercanía de edificios, aberturas aisladas, aberturas múltiples, pilas de almacenamiento, cinturones conductores, etc.

Las fuentes de emisión son clasificadas en cuatro tipos básicos, estos son: fuentes puntuales, fuentes de volumen, fuentes de área y fuentes de foso abierto.

Este modelo de corto plazo acepta registros de datos meteorológicos horarios para definir las condiciones de ascenso de la pluma, transporte, difusión y deposición. El modelo estima el valor de concentración o deposición para cada fuente y combinación de

receptores para cada hora de entrada meteorológica y calcula los promedios de corto plazo especificados por el usuario.

Entre las características más importantes del modelo de corto plazo se encuentran:

- Es un modelo relativamente simple de usar.
- La cantidad de datos meteorológicos requeridos es relativamente pequeña. [17]
- La elevación topográfica para cada receptor es introducida por el usuario.
- Es utilizado para modelar descargas continuas de contaminantes.
- Utiliza ecuaciones de Briggs de elevación de la pluma para la ecuación final de elevación.
- Incluye un algoritmo para efectos a sotavento de edificios.
- Se utilizan coeficientes de dispersión rural de Turner y coeficientes de dispersión urbana determinados por Briggs y reportadas por Gifford, para dispersión horizontal y vertical.
- Utiliza seis clases de estabilidad.
- Se tratan transformaciones químicas utilizando disminución exponencial.
- Se asume viento constante y uniforme para cada hora.
- Se asumen condiciones meteorológicas uniformes espacialmente. [18]

Entre las limitaciones del modelo se encuentras las siguientes:

- No se considera la localización relativa de la chimenea a las edificaciones.
- No se considera el efecto de la desviación de la línea central en la trayectoria de la pluma.
- Se desprecia el efecto del déficit de velocidad de la estela en el ascenso de la pluma.
- No se considera el material capturado en la pluma por las estelas cercanas en las concentraciones de estela lejanas.
- Hay discontinuidades en la interfase de dos algoritmos de caída de flujo por cercanía de edificios.
- No son apropiadamente considerados los efectos de la dirección del viento en los edificios bajos y extensos.

- Son predichas grandes concentraciones durante condiciones estables con velocidades de viento suaves. [19]

3.1.2 La ecuación Gaussiana [16]

El modelo ISC de corto plazo para chimeneas usa la ecuación Gaussiana de la pluma en estado estacionario para una fuente continua elevada. Para cada fuente y para cada hora, el origen del sistema de coordenadas de la fuente es ubicado en la superficie del suelo en la base de la chimenea. El eje x es horizontal y positivo en la dirección del viento, el eje y es normal al eje x y el eje z se extiende verticalmente. Las posiciones de los receptores fijos son convertidas al sistema de coordenadas de cada fuente para cada cálculo de concentraciones horarias.

Las concentraciones horarias calculadas para cada fuente en cada receptor, son sumadas para obtener la concentración total producida en cada receptor por las emisiones combinadas de las fuentes.

Para una pluma Gaussiana en estado estacionario, la concentración horaria a una distancia x (en metros) en dirección del viento y a una distancia transversal y (en metros) está dada por la Ecuación 3.1.

$$\chi = \frac{Q \cdot K \cdot V \cdot D}{2\pi \cdot u_S \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot \exp\left[-0.5 \cdot \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \qquad \textit{Ecuación } 3.1$$

Donde:

Q = Tasa de emisión del contaminante (masa por unidad de tiempo).

K = Coeficiente de escalamiento para convertir las concentraciones calculadas a las unidades deseadas (los valores por defecto son de 1×10^6 para Q en [g/s] y concentración en [$\mu g/m^3$]).

V = Término vertical.

D = Término de decaimiento.

σ_y, σ_z = Desviación estándar de distribución de concentración lateral y vertical [m].

u_s = Velocidad media del viento a la altura de la chimenea [m/s].

El término vertical toma en cuenta la distribución vertical de la pluma gaussiana. Incluye los efectos de la elevación de la fuente, elevación del receptor, elevación de la pluma y mezclado limitado en el eje vertical.

3.1.3 Distancias transversales y longitudinales [16]

El modelo ISC usa una red de receptores polar o cartesiana de acuerdo a lo especificado por el usuario. El modelo permite el uso de ambos tipos de receptores para múltiples redes en una ejecución. En el sistema de coordenadas polar, la coordenada radial del punto (r,θ) es medida desde el origen especificado por el usuario y la coordenada angular θ es medida en sentido reloj desde el norte. En el sistema de coordenadas cartesiano, el eje X es positivo al este del origen especificado por el usuario y el eje Y es positivo hacia el norte. Para cada tipo de red de receptores, el usuario debe definir la localización de cada fuente con respecto al origen de la grilla usando coordenadas cartesianas. En el sistema polar de coordenadas, se asume que el origen es $X = X_0$, $Y = Y_0$, donde X e Y, las coordenadas del receptor en el punto (r,θ) están dadas por las Ecuaciones 3.2 y 3.3.

$$X(R) = r \cdot sen\theta - X_0 \qquad Ecuación\ 3.2$$

$$Y(R) = r \cdot \cos\theta - Y_0 \qquad Ecuación\ 3.3$$

Si las coordenadas X e Y de la fuente son X(S) e Y(S), la distancia X en la dirección del viento al receptor, a lo largo de la dirección de movimiento de la pluma, está dada por la Ecuación 3.4.

$$X = -(X(R) - X(S)) \cdot sen(WD) - (Y(R) - Y(S)) \cdot \cos(WD) \qquad Ecuación\ 3.4$$

Donde WD es la dirección desde donde sopla el viento. La distancia en el sentido del viento se utiliza para calcular la elevación de la pluma dependiendo de la distancia x e y, y los parámetros de dispersión. Si algún receptor está localizado en 1 metro de una fuente puntual o 1 metro del radio efectivo de una fuente de volumen, un mensaje de advertencia se imprimirá y las concentraciones no serán calculadas para la combinación fuente-

receptor. La distancia transversal y al receptor desde la línea central de la pluma están dadas por la Ecuación 3.5.

$$Y = (X(R) - X(S)) \cdot \cos(WD) - (Y(R) - Y(S)) \cdot \sin(WD) \qquad \textit{Ecuación } 3.5$$

3.1.4 Perfil de velocidades de viento [16]

El modelo utiliza la ley de potencia del viento para ajustar la velocidad del viento observada, u_{ref}, desde una altura de medición de referencia, z_{ref}, hasta la altura de emisión de la chimenea, h_s. La velocidad del viento a la altura de la chimenea, u_s, es usada en la ecuación Gaussiana de la pluma y en las fórmulas de elevación de la pluma. La ecuación 3.6 presenta la ley de potencia.

$$u_s = u_{ref} \cdot \left(\frac{h_s}{z_{ref}} \right)^p \qquad \textit{Ecuación } 3.6$$

donde p es el exponente de perfil de viento. Los valores de p pueden ser entregados por el usuario como una función de la categoría de estabilidad y clase de velocidad del viento. El modelo utiliza valores por defecto los cuales se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. "Valores de los exponentes de perfil de viento utilizados por defecto por el modelo para cada clase de estabilidad" *[16]*

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

Además, como restricción para el modelo, la velocidad del viento a la altura de la chimenea, u_s, no debe ser menor que 1.0 [m/s].

A continuación se entrega el conjunto de ecuaciones utilizados por el ISCST para modelar la dispersión de contaminantes.

3.1.5 Elevación de la pluma [16]

3.1.5.1 Caída de la pluma en la chimenea

La altura física modificada de la chimenea h_s' se encuentra a través de la Ecuación 3.7.

$$h_s' = h_s + 2d_s \cdot \left[\frac{v_s}{u_s} - 1.5 \right] \quad para\ v_s < 1.5u_s \qquad Ecuación\ 3.7$$

$$h_s' = h_s \quad para\ v_s \geq 1.5u_s$$

Donde h_s es la altura física de la chimenea [m], v_s es la velocidad de salida de los gases [m/s] y d_s es el diámetro interno de la chimenea. Esta h_s' se utiliza durante el resto de los cálculos de altura de la pluma. Si no se considera la caída de la pluma en la chimenea, $h_s'=h_s$ en las ecuaciones siguientes.

3.1.5.2 Fluctuaciones de Momento y Flotabilidad [16]

Para la mayoría de las situaciones en que existe elevación de la pluma, se necesita el valor del parámetro de fluctuaciones de flotabilidad de Briggs, F_b [m^4/s^3], donde el modelo calcula F_b mediante la Ecuación 3.8.

$$F_b = g \cdot v_s \cdot d_s^2 \cdot \left(\frac{\Delta T}{4T_S} \right) \qquad Ecuación\ 3.8$$

Donde $\Delta T = T_s - T_a$, T_s es la temperatura del gas en la chimenea en grados Kelvin [K] y T_a es la temperatura ambiental del aire [K].

Para determinar la elevación de la pluma debido al momento de la chimenea, el parámetro de fluctuación de momento, F_m [m^4/s^2], es calculado mediante la Ecuación 3.9.

$$F_m = v_s^2 \cdot d_s^2 \cdot \frac{T_s}{4T_s} \qquad \textit{Ecuación } 3.9$$

3.1.5.3 Inestable o Neutral – Traspaso entre momento y flotabilidad [16]

Para los casos en que la temperatura del gas en la chimenea es igual o mayor a la temperatura ambiente, debe determinarse si la elevación de la pluma está dominada por el momento o la flotabilidad. La diferencia de temperatura de traspaso $(\Delta T)_c$, se calcula dependiendo del valor del parámetro F_b mediante las Ecuaciones 3.10 y 3.11.

$$F_b < 55 m^4/s^3 \qquad (\Delta T)_c = 0.0297 \cdot T_s \cdot \frac{v_s^{1/3}}{d_s^{2/3}} \qquad \textit{Ecuación } 3.10$$

$$F_b \geq 55 m^4/s^3 \qquad (\Delta T)_c = 0.00575 \cdot T_s \cdot \frac{v_s^{2/3}}{d_s^{1/3}} \qquad \textit{Ecuación } 3.11$$

Si la diferencia entre la temperatura del gas y la temperatura ambiental (ΔT), iguala o excede $(\Delta T)_c$, se asume que la elevación de la pluma está dominada por la flotabilidad, de otra forma se asume que está dominada por el momento.

3.1.5.4 Inestable o neutral – Elevación por flotabilidad [16]

Para los casos en que ΔT excede $(\Delta T)_c$ como se determinó anteriormente se presume que la flotabilidad es predominante. La distancia de elevación final, x_f, se determina a partir de las Ecuaciones 3.12 y 3.13 dependiendo del valor del parámetro F_b. [17]

$$\textit{Para } F_b < 55 m^4/s^3 \qquad x_f = 49 \cdot F_b^{5/8} \qquad \textit{Ecuación } 3.12$$

$$\textit{Para } F_b \geq 55 m^4/s^3 \qquad x_f = 119 \cdot F_b^{2/5} \qquad \textit{Ecuación } 3.13$$

La altura efectiva final de la pluma h_e [m] se determina mediante las Ecuaciones 3.14 y 3.15 para el correspondiente valor de F_b.

$$Para\ F_b < 55\,m^4/s^3 \qquad h_e = h_s' + 21.425 \cdot \frac{F_b^{3/4}}{u_s} \qquad Ecuación\ 3.14$$

$$Para\ F_b \geq 55\,m^4/s^3 \qquad h_e = h_s' + 38.71 \cdot \frac{F_b^{3/5}}{u_s} \qquad Ecuación\ 3.15$$

3.1.5.5 Inestable o Neutral – Elevación por momento [16]

Para los casos en que la temperatura del gas en la chimenea es igual o menor a la temperatura ambiente, se asume que la elevación de la pluma se encuentra dominada por el momento. Si ΔT es menor que $(\Delta T)_c$ de la ecuación para x_f donde la flotabilidad es predominante en condiciones inestables o neutrales, se asume también que la elevación de la pluma está dominada por el momento. La altura de la pluma se calcula mediante la Ecuación 3.16.

$$h_e = h_s' + 3 \cdot d_s \cdot \frac{v_s}{u_s} \qquad Ecuación\ 3.16$$

3.1.5.6 Parámetro de estabilidad [20]

Para situaciones estables el parámetro de estabilidad “s” se calcula de la Ecuación 3.17.

$$s = \left(\frac{g}{T_a}\right) + \left(\frac{\partial T_a}{\partial z} + \Gamma\right) \qquad Ecuación\ 3.17$$

Donde:

g = Aceleración de gravedad [m/s^2].

T_a = Temperatura ambiental del aire [K].

$\partial T_a/\partial z$ = Gradiente vertical de temperatura [K/m].

Γ = Gradiente adiabático atmosférico [K/m].

Como una aproximación estándar para la clase de estabilidad E ó 5 $\partial\theta/\partial z$ se toma como 0.020 [K]/[m] y para la clase F ó 6 se toma como 0.035 [K]/[m].

3.1.5.7 Estable – Traspaso entre momento y flotabilidad [16]

Para los casos en que la temperatura del gas en la chimenea es igual o mayor a la temperatura ambiente, debe determinarse si la elevación de la pluma está dominada por el momento o la flotabilidad. De tal manera, se calcula $(\Delta T)_c$ a partir de la Ecuación 3.18.

$$(\Delta T)_c = 0.019582 \cdot T_s \cdot v_s \cdot \sqrt{s} \qquad \textit{Ecuación } 3.18$$

Si la diferencia entre la temperatura del gas de la chimenea y la temperatura ambiental ΔT iguala o excede $(\Delta T)_c$, se asume que la elevación de la pluma está dominada por flotabilidad, de otra forma, se asume que está dominada por momento.

3.1.5.8 Estable – Elevación por Flotabilidad [16]

Para los casos en que ΔT excede $(\Delta T)_c$ como se determinó anteriormente se presume que la flotabilidad es predominante. La distancia de elevación final x_f, se determina mediante la Ecuación 3.19.

$$x_f = 2.0715 \cdot \frac{u_s}{\sqrt{s}} \qquad \textit{Ecuación } 3.19$$

La altura de la pluma h_e, se determina mediante la Ecuación 3.20.

$$h_e = h_s^{'} + 2.6 \cdot \left(\frac{F_b}{u_s \cdot s} \right)^{1/3} \qquad \textit{Ecuación } 3.20$$

3.1.5.9 Estable - Elevación por momento [16]

En los casos en que la temperatura del gas en la chimenea es menor o igual a la temperatura ambiente, se asume que la elevación de la pluma se encuentra dominada por el momento. Si ΔT es menor que $(\Delta T)_c$ como se determinó por la ecuación 3.8, se asume también que la elevación de la pluma está dominada por el momento. La altura de la pluma se calcula a partir de la Ecuación 3.21.

$$h_e = h_s^{'} + 1.5 \cdot \left(\frac{F_m}{u_s \cdot \sqrt{s}} \right)^{1/3} \qquad \textit{Ecuación } 3.21$$

También se evalúa la Ecuación 3.16 de elevación por momento para condiciones atmosféricas inestables o neutras. El menor resultado de estas dos ecuaciones se usa como la altura resultante de la pluma, dado que la elevación de la pluma en condiciones estables no debe exceder la elevación de la pluma en condiciones inestables o neutras.

3.1.5.10 Para toda clase de condiciones - Distancia menor a la Distancia de Elevación Final [16]

Cuando se debe estimar la elevación gradual para condiciones estables, inestables o neutras, si la distancia en la dirección del viento desde la fuente al receptor, x, es menor que la distancia de elevación final, se utiliza la Ecuación 3.22 para determinar la altura de la pluma.

$$h_e = h_s^{'} + 1.60 \cdot \left(\frac{F_b^{1/3} \cdot x^{2/3}}{u_s} \right) \qquad \textit{Ecuación } 3.22$$

Esta altura solamente será utilizada en condiciones donde predomine la flotabilidad; si se excediera la altura final para las condiciones apropiadas, se sustituye dicha elevación final por ésta.

Para las condiciones en que predomina el momento, las Ecuaciones 3.23 a 3.29 se utilizan para calcular la elevación de la pluma debida al momento y dependiente de la distancia.

$$h_e = h_s^{'} + \left(\frac{3 \cdot F_m \cdot x}{\beta_j^2 \cdot u_s^2} \right)^{1/3} \qquad \textit{Ecuación } 3.23$$

Donde x es la distancia en dirección del viento [m] con un valor máximo definido por x_{max}, donde éste último se determina mediante las Ecuaciones 3.24 a 3.26 dependiendo del valor de F_b.

$$x_{\max} = \frac{4 \cdot d_s \cdot (v_s + 3 \cdot u_s)^2}{v_s \cdot u_s} \qquad para\ F_b = 0 \qquad Ecuación\ 3.24$$

$$x_{máx} = 49 \cdot F_b^{5/8} \qquad para \quad 0 < F_b \leq 55\ m^4/s^3 \qquad Ecuación\ 3.25$$

$$x_{máx} = 119 \cdot F_b^{2/5} \qquad para \quad F_b > 55\ m^4/s^3 \qquad Ecuación\ 3.26$$

b) Condiciones estables

$$h_e = h_s^{'} + \left[3 \cdot F_m \cdot \frac{\sin(x\sqrt{s}/u_s)}{\beta_j^2 \cdot u_s \sqrt{s}} \right] \qquad Ecuación\ 3.27$$

Donde x es la distancia en la dirección del viento [m], con un valor máximo definido por x_{max} mediante la Ecuación 3.28.

$$x_{\max} = 0.5 \cdot \frac{\pi \cdot u_s}{\sqrt{s}} \qquad Ecuación\ 3.28$$

El coeficiente de admisión de partículas hacia la corriente del flujo, β_j, esta dado por la Ecuación 3.29.

$$\beta_j = \frac{1}{3} + \frac{u_s}{v_s} \qquad Ecuación\ 3.29$$

Al igual que con la elevación flotante gradual, si la elevación por momento en función de la distancia excede la elevación final para la condición apropiada, entonces se sustituye la elevación final por ésta.

3.1.6 Los parámetros de dispersión

3.1.6.1 Parámetros de dispersión de fuentes puntuales [16]

Para calcular σ_z y σ_y (en metros) para el modo rural se utilizan ecuaciones que se aproximan a las curvas de Pasquill-Gifford. Las ecuaciones para calcular σ_y son del tipo de las Ecuaciones 3.30 y 3.31.

$$\sigma_y = 465.11628 \cdot (x) \cdot \tan(TH) \qquad \textit{Ecuación } 3.30$$

Donde:

$$TH = 0.017453293 \cdot \left[c - d \ln(x)\right] \qquad \textit{Ecuación } 3.31$$

En las Ecuaciones 3.30 y 3.31 la distancia en la dirección del viento está en kilómetros y los coeficientes c y d se encuentran tabulados. La ecuación usada para calcular σ_z es de la forma de la Ecuación 3.32.

$$\sigma_z = a \cdot x^b \qquad \textit{Ecuación } 3.32$$

Donde la distancia en la dirección del viento x está en kilómetros y σ_z está en metros.

Los coeficientes a, b, c, d como las ecuaciones utilizadas para determinar σ_x y σ_z para terreno urbano se presentan en el Anexo A.

3.2 REQUISITOS PARA LA EJECUCION DEL MODELO ISCST3

3.2.1 Requisitos de los datos de entrada básicos [21]

Hay dos tipos básicos de datos de entrada que se requieren para ejecutar el modelo ISC. Estos son (1) el archivo de datos de entrada de flujos y (2) el archivo de datos meteorológicos. El archivo de datos de entrada de flujos contiene las opciones de

modelación seleccionadas, así como la ubicación de la fuente y datos de parámetro, ubicaciones de receptores, especificaciones de archivo de datos meteorológicos y opciones de información de salida.

Optativamente, el usuario puede especificar un archivo de elevaciones de terreno cuadriculado que se usa para integrar la cantidad de material de la pluma que se ha depletado, por medio de procesos de deposición seca a lo largo de la ruta de la pluma de la fuente al receptor.

Para el modelo ISC de corto plazo, el usuario tiene también la opción de especificar un archivo separado de tasa de emisión por hora.

3.2.1.1 Archivo de datos de entrada de flujos [21]

El archivo de datos de entrada está dividido en seis rutas. Estas rutas son identificadas por dos caracteres ID colocados al comienzo de cada una de ellas. Las rutas y el orden en el cual ellas son ingresadas al modelo son:

CO – Para especificar las opciones de control.
SO – Para especificar las opciones de fuente.
RE – Para especificar las opciones de receptor.
ME – Para especificar la información meteorológica.
TG – Para especificar la información de la grilla de terreno.
OU – Para especificar las opciones de fuente.
Donde la ruta TG es opcional.

CAPITULO 4

FILTRO KALMAN

4.1 ALGORITMO DEL FILTRO KALMAN [22,23]

El filtro Kalman es un procedimiento numérico, que abarca tres aspectos de importancia en la modelación de un proceso, los cuales son:

- Permite reflejar explícitamente todas las variables que intervienen en el proceso.
- Permite inferir algunas variables sin la necesidad de medirlas.
- Permite obtener mediciones libres de incertidumbres.

El filtro Kalman es un conjunto de ecuaciones matemáticas, que constituyen el principal procedimiento para estimar sistemas dinámicos, entregando una solución recursiva y óptima al problema de filtrado lineal de datos discretos, mediante el método de mínimos cuadrados.

El filtro opera mediante el mecanismo de predicción y corrección, pronosticando un nuevo estado a partir de una estimación previa de éste, por medio de un término de corrección proporcional al error de predicción, lo cual lleva a la minimización de este último.

El objetivo del filtro consiste en calcular un estimador lineal, insesgado (cuyo valor esperado es igual al valor del parámetro que se está estimando) y óptimo, que permita la actualización de información del estado de un sistema en un momento “t”, basándose en información disponible en “t-1”.

4.2 ESTIMACION DE UN ESCALAR [22]

Cuando se desea estimar una constante “m” se realizan muchas medidas de ella. Sea y una de las medidas que se realizan, tal como se expresa en la Ecuación 4.1, donde el ruido de la medición es v, con media cero y varianza σ_v^2.

$$y = m + v \qquad \textit{Ecuación } 4.1$$

Sea x_0 una primera estimación de “m” con ruido w y varianza σ_w^2, como se muestra en la Ecuación 4.2.

$$x_0 = m + w \qquad \textit{Ecuación } 4.2$$

Al realizar una nueva estimación de m, llamada x_1, su forma viene dada por la Ecuación 4.3:

$$x_1 = x_0 + k(y - x_0) \qquad \textit{Ecuación } 4.3$$

Donde k recibe el nombre de ganancia Kalman y se obtiene a partir de los ruidos de las dos primeras estimaciones, tal como se muestra en el Ecuación 4.4.

$$k = \frac{\sigma_w^2}{\sigma_w^2 + \sigma_v^2} \qquad \textit{Ecuación } 4.4$$

Así, esta nueva estimación es función lineal de las dos estimaciones anteriores, es insesgada y óptima, minimizando estadísticamente el error.

CAPITULO 5

ZONA DE ESTUDIO

La comuna de Puchuncaví posee una superficie aproximada de 300 [Km^2], se compone de 22 localidades y cuenta con una población cercana a los 12.954 habitantes con un crecimiento del 21,5% con respecto al censo de 1992. Las actividades principales son la pesca artesanal, comercio, turismo y actividades industriales. [24,25]

El valle de Puchuncaví, es una zona de suelos pobres, ya que las deposiciones ácidas producto de la actividad industrial han destruido la vegetación acelerando el proceso de erosión, por lo cual el valle ha perdido fertilidad llevando al cese de los cultivos de cereales tradicionales en la zona. El clima presenta las mismas características de Chile Central, con veranos calurosos al interior y de menor intensidad en el sector costero. [26]

Las fuentes emisoras de anhídrido sulfuroso bajo estudio de Fundición y Refinería Las Ventanas y AES Gener, se encuentran ubicadas entre las coordenadas 267000 y 268000 UTM-E [m] y 6370000 y 6380000 UTM-N [m].

Las coordenadas exactas de las fuentes en estudio se presentan en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. "Posición Geográfica de las fuentes"

Fuente		UTM-E [m]	UTM-N [m]	Altitud (m.s.n.m)
AES Gener	Nº1 (Unidad 1)	267520	6373630	6
	Nº2 (Unidad 2)	267490	6373700	6
Las Ventanas	Nº1 (Hornos)	267780	6372680	18
	Nº2 (Ácidos)	267800	6372800	18

5.1 ESTACIONES METEOROLOGICAS

Fundición y Refinería Las Ventanas y AES Gener cuentan con una red de monitoreo, la cual está conformada por 6 estaciones meteorológicas. La ubicación de las estaciones es mostrada en la Tabla 5.2 y los parámetros medidos en cada estación se muestran en la Tabla 5.3.

Tabla 5.2. "Ubicación de las estaciones meteorológicas"

Estación meteorológica	UTM-E [m]	UTM-N [m]
La Greda	268300	6373900
Los Maitenes	270075	6372161
Puchuncaví	273800	6376700
Sur	267434	6368062
Valle Alegre	271820	6367420
Principal	267391	6371929

Tabla 5.3. "Parámetros meteorológicos medidos por cada estación"

Parámetro medido	Estación meteorológica					
	Greda	Los Maitenes	Puchuncaví	Sur	Valle Alegre	Principal
Precipitación						X
Dirección viento	X	X	X	X	X	X
Velocidad viento	X	X	X	X	X	X
Temperatura						X
Humedad						X
Presión						X
Radiación						X

De las 6 estaciones mencionadas anteriormente 5 de éstas conforman la Red de Monitoreo de Calidad del aire. A continuación se presenta la representación gráfica de éstas (azul), como de las fuentes emisoras consideradas (rojo).

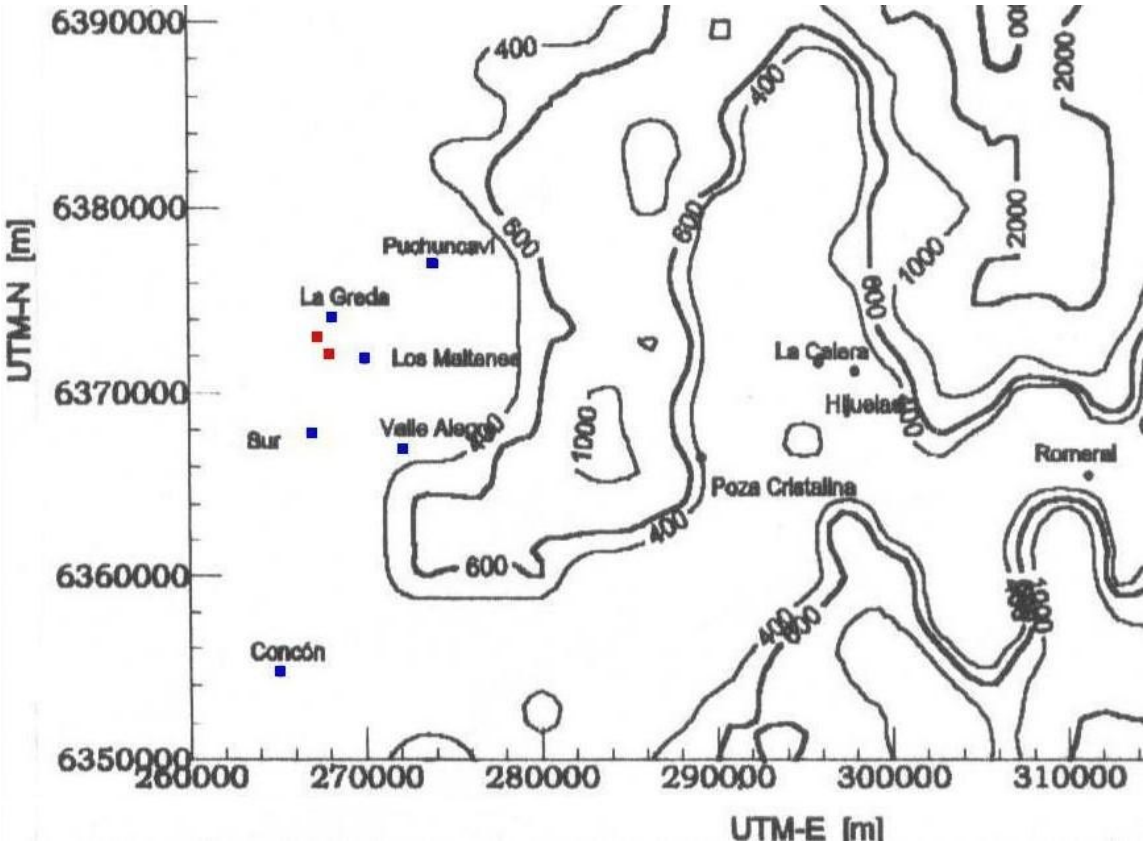


Figura 5.1. "Posicionamiento de las fuentes y estaciones de monitoreo consideradas"

5.2 ANALISIS METEOROLOGICO

El análisis del régimen de viento se basa en los datos meteorológicos registrados en la estación meteorológica Principal (mencionada en el punto 5.1) y obtenidos en CONAMA, debido a que esta estación es la más cercana a las fuentes de emisión.

Los datos analizados corresponden al año 2003 y al periodo comprendido entre enero y noviembre del año 2004.

5.2.1 Dirección del viento

Un primer análisis de los vientos se realiza en base a frecuencias de ocurrencia de las distintas direcciones de viento.

Los datos de velocidad del viento para cada hora del día y para cada día del año se agrupan en dos periodos:

- Periodo diurno: 10 AM – 8 PM.
- Periodo nocturno: 10 PM – 8 AM.

Para cada mes de los periodos 2003 y 2004, se grafica la rosa de los vientos, para el periodo diurno y nocturno. En las Figuras 5.2 a la 5.17, se presentan las rosas de los vientos para el periodo diurno y nocturno para los meses de enero, abril, julio y octubre de ambos años.

5.2.1.1 Periodo Diurno

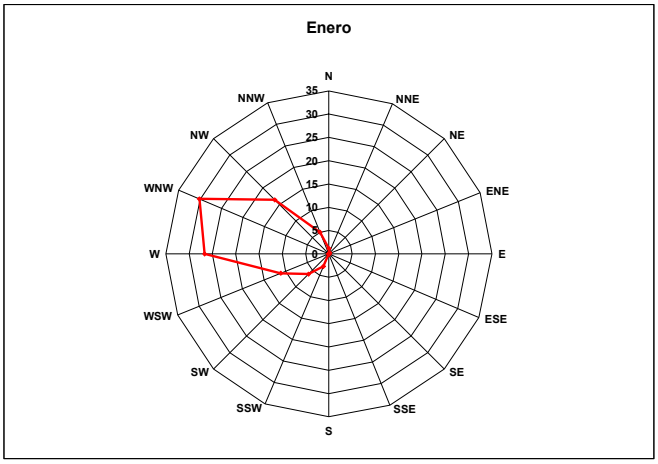


Figura 5.2. "Rosa de los vientos Periodo diurno: enero-2003"

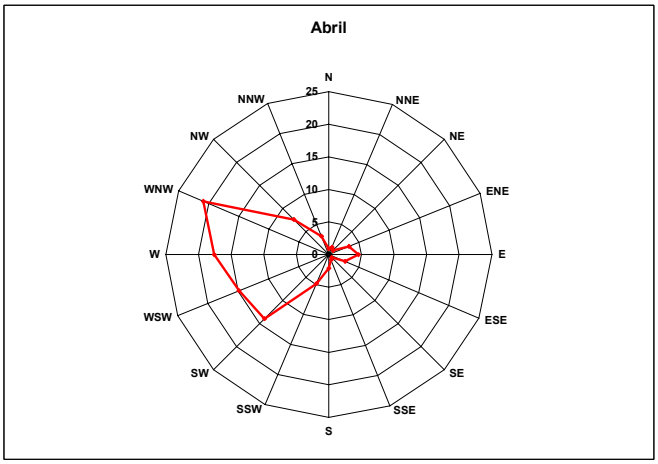


Figura 5.3. "Rosa de los vientos Periodo diurno: abril-2003"

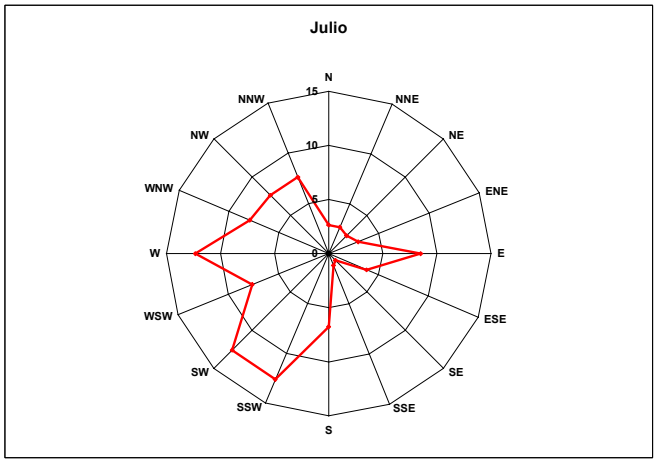


Figura 5.4. "Rosa de los vientos Periodo diurno: julio-2003"

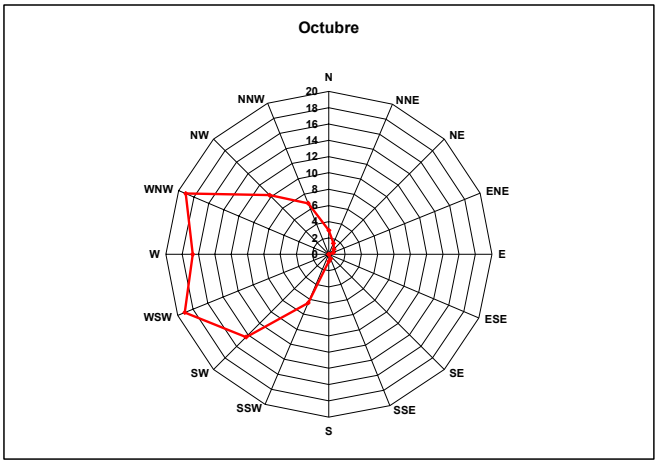


Figura 5.5. "Rosa de los vientos Periodo diurno: octubre-2003"

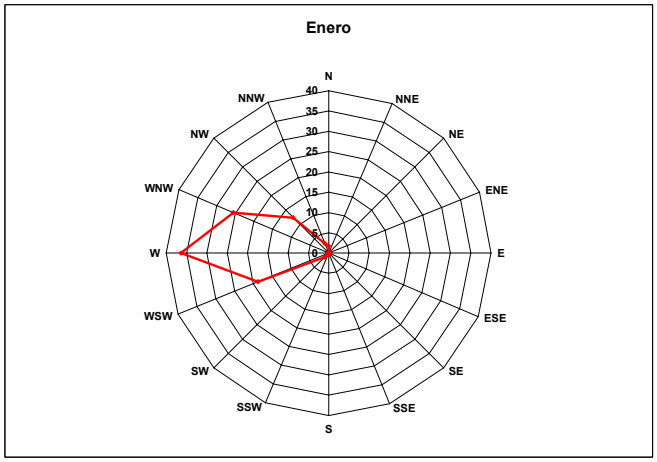


Figura 5.6. "Rosa de los vientos Periodo diurno: enero-2004"

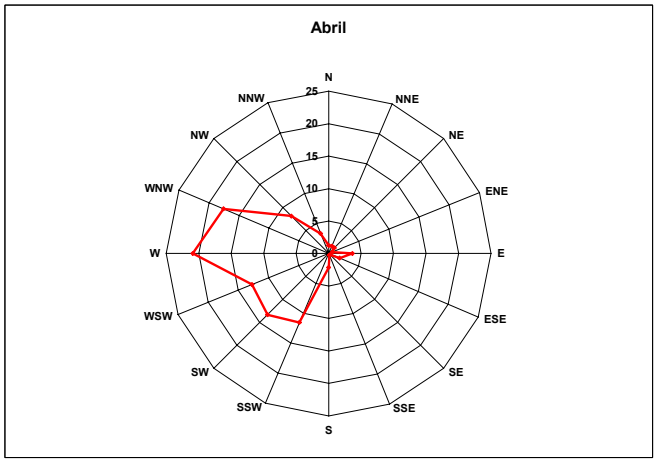


Figura 5.7. "Rosa de los vientos Periodo diurno: abril-2004"

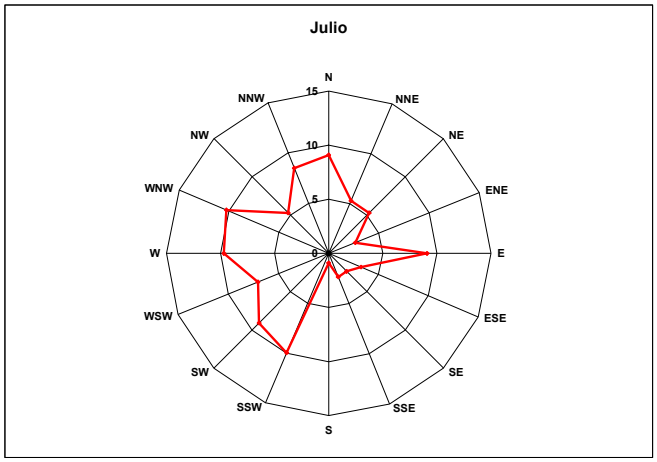


Figura 5.8. "Rosa de los vientos Periodo diurno: julio-2004"

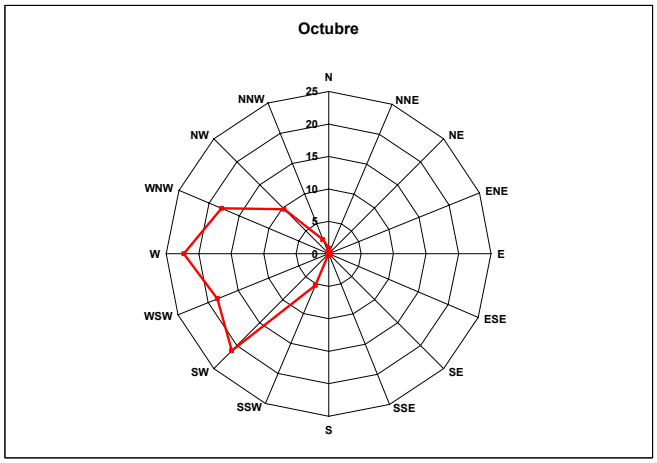


Figura 5.9. "Rosa de los vientos Periodo diurno: octubre-2004"

5.2.1.2 Periodo Nocturno

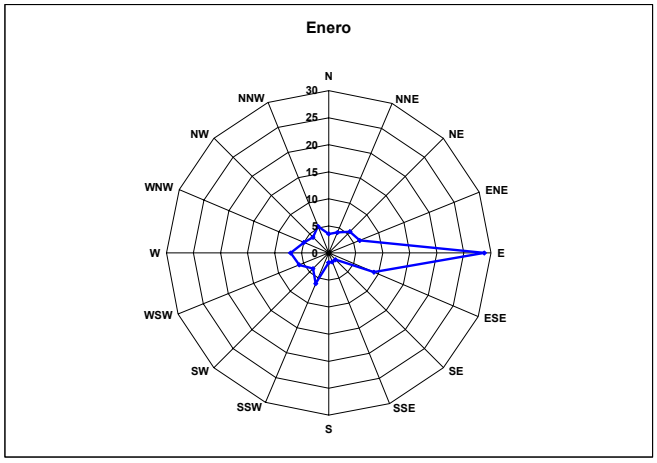


Figura 5.10. "Rosa de los vientos Periodo nocturno: enero-2003"

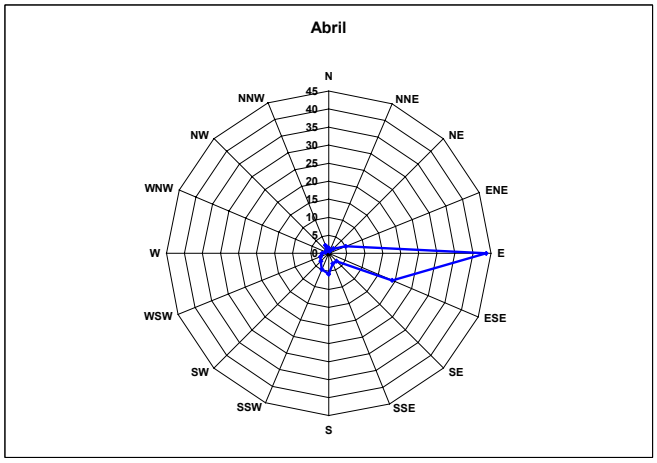


Figura 5.11. "Rosa de los vientos Periodo nocturno: abril-2003"

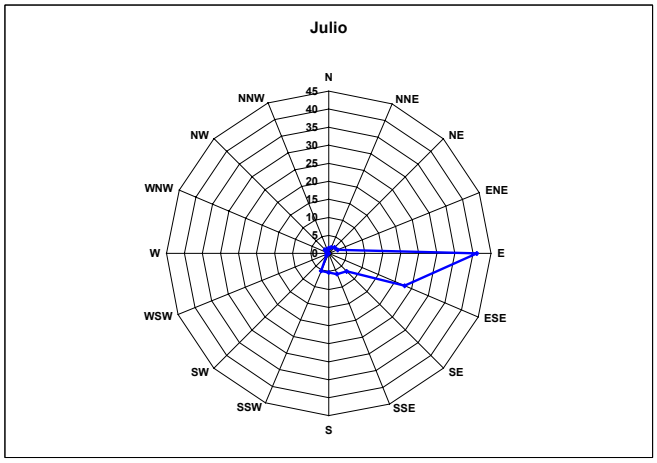


Figura 5.12. "Rosa de los vientos Periodo nocturno: julio-2003"

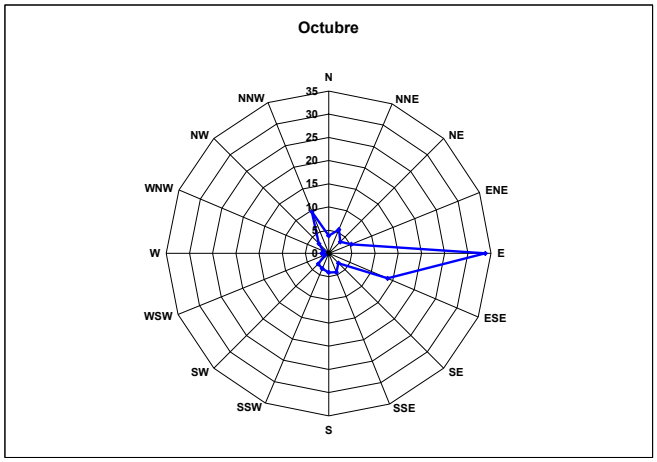


Figura 5.13. "Rosa de los vientos Periodo nocturno: octubre-2003"

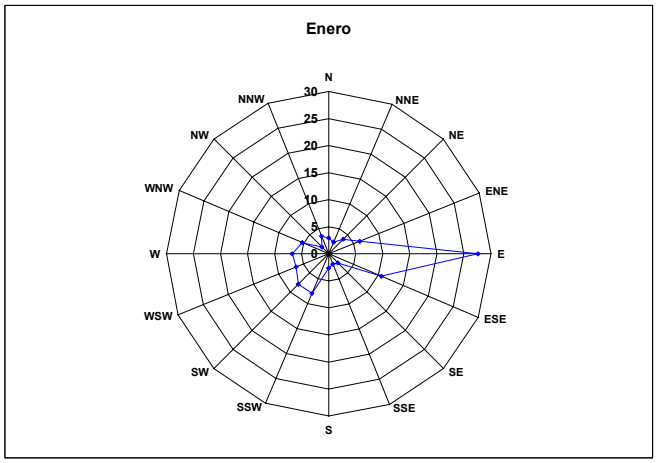


Figura 5.14. "Rosa de los vientos Periodo nocturno: enero-2004"

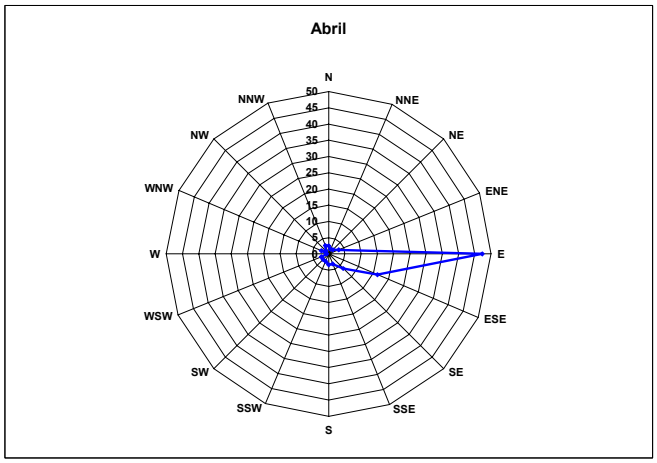


Figura 5.15. "Rosa de los vientos Periodo nocturno: abril-2004"

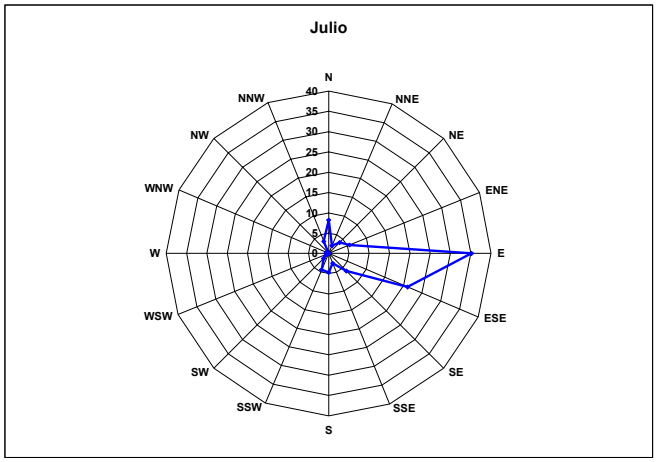


Figura 5.16. "Rosa de los vientos Periodo nocturno: julio-2004"

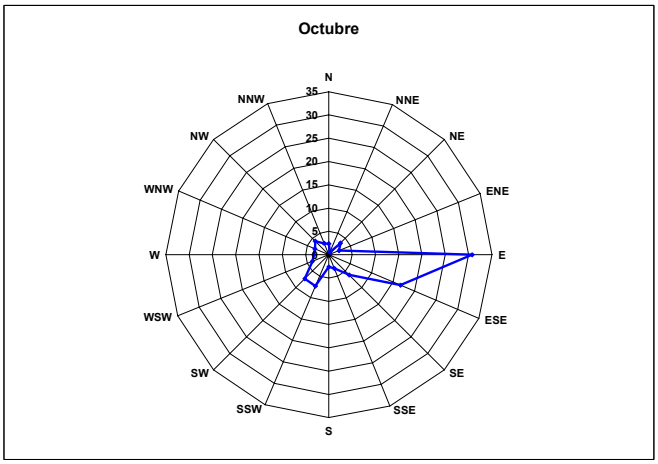


Figura 5.17. "Rosa de los vientos Periodo nocturno: octubre-2004"

En las Tablas 5.4, 5.5 y 5.6 se presentan los porcentajes de ocurrencia de las direcciones de viento, para cada mes del año 2003 y en las Tablas 5.7, 5.8 y 5.9 los correspondientes porcentajes para el periodo comprendido entre enero y noviembre de 2004. En estas tablas D denota periodo diurno y N periodo nocturno.

Tabla 5.4. "Frecuencia de las direcciones de viento: enero-abril 2003"

Año 2003	Enero		Febrero		Marzo		Abril	
Frecuencia	D	N	D	N	D	N	D	N
N	1.2	3.5	1.9	1.9	4.1	4.4	0.9	1.5
NNE	0.3	4.1	0.3	4.2	0.6	3.2	1.2	0.6
NE	-	5.6	1.3	3.6	0.9	6.7	0.9	1.8
ENE	-	6.2	0.3	9.4	-	6.5	3.3	5.2
E	-	28.7	0.3	36.4	-	21.7	4.5	43.6
ESE	-	9.1	-	9.7	-	11.7	2.7	19.1
SE	-	1.8	-	2.9	-	2.6	0.6	3.0
SSE	-	1.8	-	2.6	-	1.8	0.9	3.0
S	-	1.8	-	2.3	-	3.8	2.1	5.8
SSW	2.9	6.2	1.9	7.8	2.9	12.0	4.8	4.8
SW	6.2	4.1	8.8	6.5	6.2	6.5	13.9	3.0
WSW	11.1	5.9	13.0	2.3	11.4	3.2	14.8	2.4
W	26.7	7.0	23.4	3.2	27.3	2.1	17.6	1.8
WNW	30.2	5.0	33.4	2.6	26.1	1.2	20.9	0.9
NW	16.4	4.1	11.7	2.9	12.6	3.2	7.6	0.9
NNW	5.0	5.3	3.6	1.6	7.9	9.4	3.0	2.4

Tabla 5.5. "Frecuencia de las direcciones de viento: mayo-agosto 2003"

Año 2003	Mayo		Junio		Julio		Agosto	
Frecuencia	**D**	N	D	N	D	N	D	N
N	7.6	2.6	8.5	5.5	2.6	1.5	3.2	1.8
NNE	3.8	2.6	6.1	4.8	2.6	1.8	3.8	3.2
NE	1.8	4.4	3.6	1.8	2.3	2.3	1.2	2.1
ENE	4.4	5.9	3.9	7.0	2.9	2.6	1.8	4.1
E	8.2	49.0	7.3	30.9	8.5	41.1	5.9	29.9
ESE	4.1	18.2	3.9	19.4	3.8	22.9	1.8	24.9
SE	1.2	5.6	2.7	9.1	0.9	7.0	0.9	8.5
SSE	1.5	2.9	1.8	4.8	1.2	6.2	2.1	5.3
S	2.6	5.3	2.4	5.8	6.7	5.3	4.1	7.6
SSW	3.2	0.6	3.9	2.7	12.6	5.3	10.6	3.2
SW	7.0	0.6	7.9	0.9	12.6	0.9	15.0	1.2
WSW	13.5	0.6	13.0	0.9	7.6	0.3	10.0	0.9
W	12.9	-	10.9	0.6	12.3	-	11.4	0.3
WNW	13.2	0.3	6.4	0.9	7.9	0.6	14.7	0.3
NW	10.0	0.6	5.5	0.9	7.6	1.5	7.3	3.2
NNW	5.0	0.9	12.1	3.9	7.6	0.9	6.5	3.5

Tabla 5.6. "Frecuencia de las direcciones de viento: septiembre-diciembre 2003"

Año2003	Septiembre		Octubre		Noviembre		Diciembre	
Frecuencia	D	N	D	N	D	N	D	N
N	3.0	3.6	2.9	3.8	0.3	4.8	0.3	2.1
NNE	1.5	7.3	1.5	5.6	1.2	3.3	0.0	3.5
NE	1.2	3.6	0.9	3.5	0.6	6.7	0.3	3.8
ENE	1.2	6.4	0.6	5.3	0.3	8.2	-	4.1
E	0.6	25.8	-	33.7	0.3	28.5	-	22.9
ESE	0.3	13.6	-	13.8	0.3	8.2	-	17.9
SE	0.3	7.6	-	2.9	0.3	3.9	-	5.0
SSE	1.2	5.2	0.6	4.4	-	2.7	-	3.8
S	3.0	7.9	0.9	4.1	0.3	3.6	-	6.2
SSW	10.6	8.2	6.5	3.5	3.6	5.5	4.1	6.2
SW	15.2	0.6	14.4	3.2	8.8	6.1	19.1	7.6
WSW	10.9	0.6	19.1	0.9	26.7	3.6	25.8	5.0
W	17.6	2.1	16.7	1.5	26.7	2.7	17.6	3.5
WNW	16.4	0.9	19.1	1.2	17.3	4.5	18.8	2.6
NW	9.4	1.5	10.3	2.9	11.2	3.3	11.7	3.5
NNW	7.6	5.2	6.7	9.7	2.1	4.2	2.3	2.3

Tabla 5.7. "Frecuencia de las direcciones de viento: enero-abril 2004"

Año 2004	**Enero**		Febrero		Marzo		Abril	
Frecuencia	D	N	D	N	D	N	D	N
N	1.8	2.9	2.8	2.8	4.4	5.9	1.2	2.4
NNE	0.3	2.3	1.9	3.8	3.8	5.0	1.2	1.5
NE	-	3.8	0.9	2.5	1.8	4.4	1.2	1.8
ENE	-	6.2	1.6	7.5	1.5	6.7	0.6	3.3
E	0.3	27.6	0.3	31.3	1.8	36.7	3.6	47.3
ESE	-	10.6	-	9.4	-	11.7	1.8	16.4
SE	-	2.3	-	2.8	-	3.8	0.3	6.4
SSE	0.3	2.1	-	3.4	0.3	2.9	0.3	3.3
S	-	2.6	-	8.2	0.6	2.3	2.1	3.3
SSW	0.3	7.9	2.2	5.3	2.1	5.3	11.5	2.4
SW	1.5	7.9	5.6	7.5	11.1	2.6	13.3	2.4
WSW	18.8	6.5	11.0	4.4	8.5	2.6	12.7	2.4
W	36.4	6.7	27.0	5.3	16.1	2.3	20.9	0.6
WNW	25.5	5.3	28.2	1.6	24.0	1.2	17.6	2.4
NW	12.3	1.8	11.0	1.9	15.8	2.1	8.2	1.2
NNW	2.6	3.5	7.5	2.2	8.2	4.4	3.3	2.7

Tabla 5.8. "Frecuencia de las direcciones de viento: mayo-agosto 2004"

Año 2004	Mayo		Junio		Julio		Agosto	
Frecuencia	D	N	D	N	D	N	D	N
N	3.8	0.6	3.9	2.1	9.1	8.2	4.1	2.3
NNE	3.5	2.9	3.9	0.9	5.3	2.1	3.2	2.1
NE	3.2	3.8	2.1	1.5	5.3	3.8	4.4	3.8
ENE	5.0	6.5	6.1	3.9	2.6	5.6	2.9	6.7
E	9.1	49.9	10.6	45.2	9.1	35.2	2.9	43.7
ESE	5.0	16.1	6.1	22.1	3.2	21.1	2.1	16.4
SE	0.6	3.5	2.7	7.3	2.3	6.2	0.6	7.0
SSE	2.1	4.1	2.4	4.5	2.3	2.6	1.5	4.1
S	2.3	5.6	3.6	2.7	0.9	4.7	2.3	4.7
SSW	4.1	3.8	5.5	2.7	10.0	4.4	6.5	2.3
SW	8.5	0.3	9.7	3.0	9.1	1.8	10.9	2.1
WSW	8.8	-	9.1	1.2	7.0	0.6	10.9	0.9
W	10.0	0.3	10.6	1.2	9.7	-	12.0	1.2
WNW	17.0	0.6	14.5	0.3	10.3	0.6	12.3	0.9
NW	9.7	0.3	6.4	0.3	5.3	-	7.0	0.9
NNW	7.3	1.8	2.7	0.9	8.5	3.2	16.4	0.9

Tabla 5.9. "Frecuencia de las direcciones de viento: septiembre-noviembre 2004"

Año 2004	Septiembre		Octubre		Noviembre	
Frecuencia	**D**	N	D	N	D	N
N	8.2	10.6	0.9	2.3	1.2	4.8
NNE	1.5	2.4	0.3	0.6	0.6	4.2
NE	0.3	4.5	0.3	3.5	0.3	2.1
ENE	2.4	3.0	0.3	2.3	0.3	4.5
E	1.5	27.6	0.3	30.8	0.3	20.0
ESE	0.3	15.5	0.3	16.7	-	12.1
SE	0.6	7.9	0.3	6.2	-	3.6
SSE	-	3.6	0.3	3.2	-	1.5
S	2.4	6.7	-	2.6	-	4.8
SSW	7.9	9.1	5.3	7.3	3.9	10.6
SW	19.1	1.8	21.1	7.3	18.2	10.6
WSW	10.9	0.3	18.5	3.8	18.5	5.8
W	13.0	0.3	22.3	3.2	26.1	3.3
WNW	17.6	0.6	17.9	3.2	16.1	3.6
NW	6.4	0.3	9.7	4.1	13.3	3.6
NNW	7.9	5.8	2.3	2.6	1.2	4.5

Los datos entregados anteriormente señalan que:

- En las Tablas 5.4 a la 5.6 se observa que durante el año 2003, las direcciones de viento predominantes para el periodo diurno son aquellas comprendidas entre el Sur-oeste y Oeste-noroeste. Las direcciones Sur-oeste y Oeste-suroeste alcanzan su máximo porcentaje de ocurrencia el mes de diciembre con un 19.1% y 25.8% respectivamente, la dirección Oeste alcanza su máximo porcentaje de ocurrencia el mes de marzo con un 27.3% y la Oeste-noroeste alcanza un 33.4% el mes de febrero.

- La dirección más frecuente durante el año 2003, en el periodo nocturno es la Este, que presenta un porcentaje máximo de ocurrencia del 49% para el mes de mayo.

- Entre enero y noviembre de 2004, tal como muestran las Tablas 5.7 a la 5.9 se observa que para el periodo diurno, las direcciones predominantes de viento son aquellas comprendidas entre el Sur-oeste y Oeste-noroeste. Para la dirección Sur-oeste la máxima ocurrencia es un 21.1% en octubre, la dirección Oeste-suroeste presenta su máxima ocurrencia de un 18.5% en los meses de octubre y noviembre, la dirección Oeste presenta un máximo de 36.4% en enero y, finalmente, la Oeste-noroeste presenta un porcentaje máximo de ocurrencia de 28.2% para febrero.

- Durante el periodo comprendido entre los meses de enero y noviembre de 2004, la dirección más frecuente es la Este, alcanzando el mayor porcentaje de ocurrencia de un 49.9% en el mes de mayo.

- Para el periodo nocturno, entre enero de 2003 y noviembre 2004, la segunda dirección en frecuencia es la Este-sureste, que presenta un porcentaje máximo de ocurrencia para el 2003 de 24.9% en el mes de agosto, mientras que para el año 2004 la máxima ocurrencia de esta dirección es en junio con un 22.1%.

5.2.2 Velocidad del viento

A continuación se muestra la variación de los valores máximos, mínimos y promedio de velocidad para cada mes entre enero de 2003 y noviembre de 2004.

En las Figuras 5.18 y 5.19 se presentan los Gráficos para los meses de enero, abril, julio y octubre de 2003 y 2004.

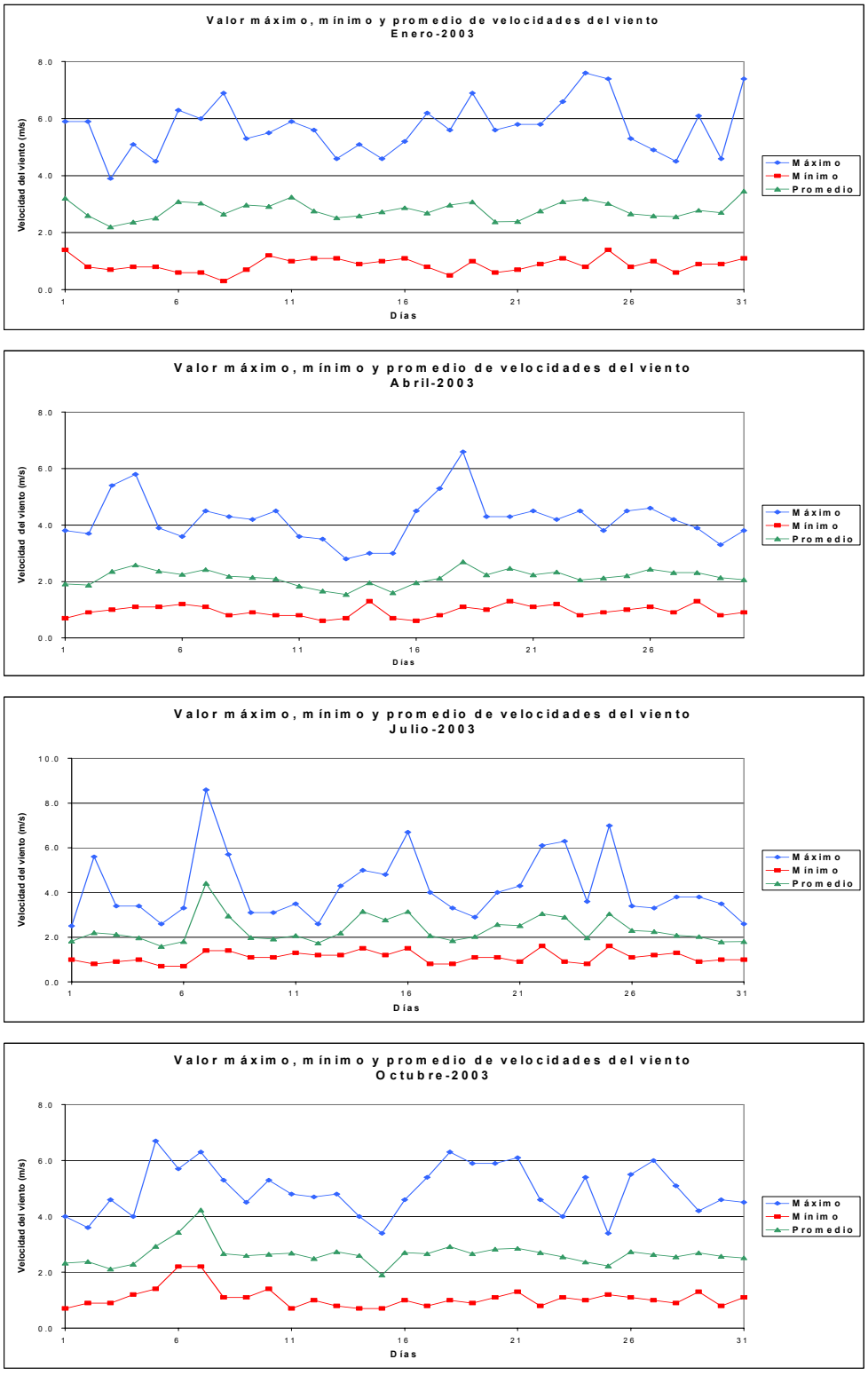
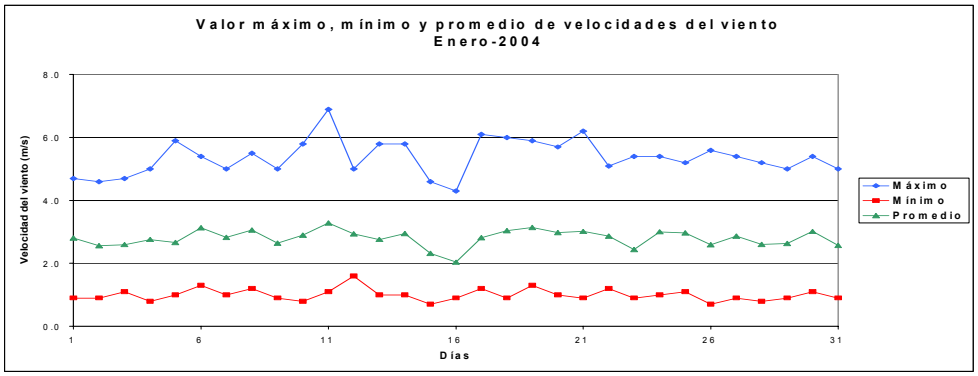
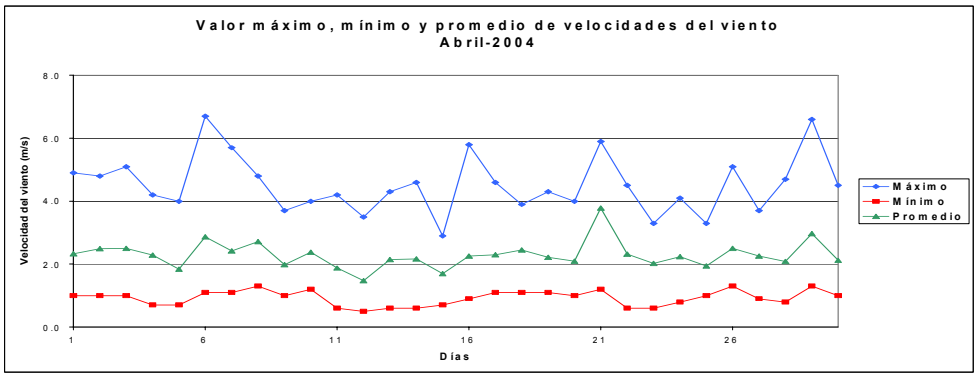
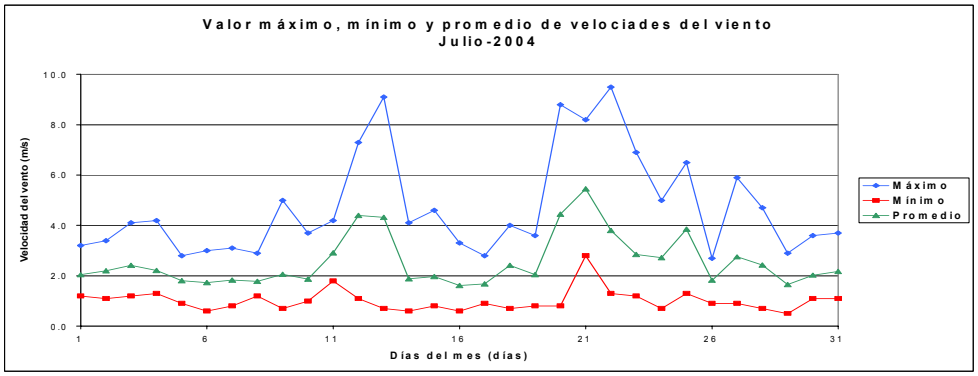


Figura 5.18. "Valores máximos, mínimo y promedio de velocidad del viento en [m/s] para enero, abril, julio y octubre de 2003"







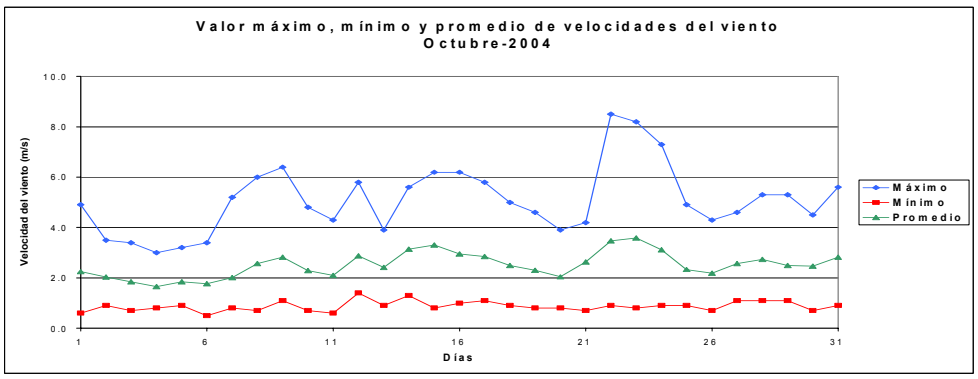


Figura 5.19. "Valores máximos, mínimo y promedio de velocidad del viento en [m/s] para enero, abril, julio y octubre de 2004"

Con respecto a las Figuras 5.17 y 5.18 se puede concluir que:

- Tal como se observa en la Figura 5.18 para el año 2003 los meses que presentan las mayores velocidades de viento son enero, noviembre y diciembre.

- Durante el año 2003 los meses que presentan las velocidades más bajas son enero, febrero y marzo.

- Durante el periodo enero-noviembre 2004 y como muestra la Figura 5.19, los meses que presentan las velocidades más altas son enero, febrero, marzo y noviembre.

- Los meses que presentan las velocidades de viento más bajas para el periodo 2004 son abril, agosto y octubre.

CAPITULO 6

METODOLOGIA

El presente trabajo contempla la ejecución y evaluación del modelo ISC3 en la Comuna de Puchuncaví, considerando las emisiones de anhídrido sulfuroso provenientes de Fundición y Refinería Las Ventanas como de Termoeléctricas AES Gener S.A.

La metodología de trabajo se presenta en los siguientes puntos.

6.1 RECOPILACION Y ANALISIS DE INFORMACION

En primer lugar se procede a la recopilación de información meteorológica y de las fuentes emisoras necesaria para la ejecución del modelo.

La información meteorológica se ha obtenido en CONAMA para la estación Principal y para el periodo de aplicación del modelo.

La información de caracterización de las fuentes consideradas se ha obtenido del documento Evaluación Plan de descontaminación de Ventanas [4], es importante mencionar que los valores usados en la modelación corresponden a promedios anuales, por lo cual, para el periodo de ejecución del modelo se asume una operación constante.

Por otro lado, para poder validar el modelo es necesario contar con información de las mediciones de concentración de anhídrido sulfuroso de las estaciones que conforman la red de calidad del aire del Complejo Industrial Las Ventanas, la cual se ha obtenido en CONAMA.

6.2 EJECUCION DEL MODELO ISC3

6.2.1 Archivos de entrada

Para la ejecución del modelo ISC3 se requieren dos tipos básicos de datos de entrada: el archivo datos meteorológicos y el archivo de entrada de flujos.

6.2.1.1 Archivo de datos meteorológicos

Corresponde a un archivo en formato ASCII, considerando las mediciones horarias provenientes de la estación Principal localizada en Ventanas y con coordenadas UTM-E 267391 [m] UTM-N 6371929 [m]. Los parámetros que se requieren son los siguientes:

- Dirección del Viento: la dirección del viento se introduce en grados y luego se rota 180º.
- Velocidad del viento: se incorporan las mediciones horarias de velocidad del viento en [m/s].
- Temperatura: se incorporan las mediciones horarias de temperatura en grados Kelvin [K].
- Altura de la capa de mezcla: se trabaja con una altura de capa de mezcla de 1000 [m]. Durante todo el periodo de modelación se asume esta altura constante debido a que el modelo ISC3 es prácticamente insensible a errores en la altura de la capa de mezclado. [21]
- Estabilidad atmosférica: la estabilidad atmosférica se calcula a partir de los datos de velocidad del viento y radiación solar, utilizando las clases de estabilidad de Pasquill las cuales se detallan en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1. "Clases de estabilidad de Pasquill" [27]

Clases de estabilidad de Pasquill			
Velocidad del viento a 10 [m] en [m/s]	Radicación solar		
	Fuerte	Moderada	Débil
< 2	A	A-B	B
2-3	A-B	B	C
3-5	B	B-C	C
5-6	C	C-D	D
> 6	C	D	D
Radiación Solar	[W/m^2]		
Fuerte	I > 700		
Moderada	350 <= I <= 700		
Débil	I < 350		

6.2.1.2 Archivo de entrada de flujos

Consistió en la creación de un archivo en formato ASCII, el cual está estructurado en 5 rutas las cuales se describen a continuación:

Opciones Generales de Control (Ruta CO)

En esta opción la información más relevante incluida corresponde al título del archivo, el tipo de información a obtener (en este caso concentración), el periodo de promediación, el contaminante modelado, el tipo de terreno (sencillo o complejo) y la localización de los receptores.

Opciones de Información de las Fuentes (Ruta SO)

En esta opción se incluye la información correspondiente a identificación de las fuentes: el tipo y nombre de la fuente y su localización geográfica, como también, los parámetros de emisión de las fuentes: tasa de emisión [g/s], altura de chimenea [m], temperatura de los gases de salida [K], velocidad de los gases de salida [m/s] y diámetro interno de la chimenea [m].

Opciones de información de Receptor (Ruta Re)

En esta opción se señala la posición en la cual debe estar localizado el receptor en coordenadas UTM.

Opciones de información Meteorológica (Ruta Me)

En esta opción se señala el archivo meteorológico a utilizar, la altura del anemómetro (en este caso se consideró 10 [m] por ser la altura estándar).

Opciones de información de Salida (Ruta OU)

En esta opción se especifican los archivos de salida, en el presente trabajo sólo se obtienen dos archivos: uno con el valor de concentración en [$\mu g/m^3$] más alto del mes y otro con el promedio horario de concentración en [$\mu g/m^3$] para cada mes.

A continuación se presenta un ejemplo de archivo de entrada, en este caso, correspondiente a la estación Los Maitenes para enero del 2003.

```
CO STARTING
  TITLEONE  MODELACIÓN ENERO 2003
  MODELOPT  RURAL  CONC
  AVERTIME  24
  POLLUTID  SO2
  TERRHGTS  ELEV
  RUNORNOT  RUN
  EVENTFIL  EVENTENER03.INP
  ERRORFIL  ERRORENER03.OUT
CO FINISHED

SO STARTING
  LOCATION  ENAMI1  POINT  267780   6372680   18.0
** FUENTE PUNTUAL    QS      HS      TS   VS   DS
** PARAMETROS:      ----  ----  ----  ----  ---
  SRCPARAM  ENAMI1  505.8  155.0  540.0  4.8  2.5
  LOCATION  ENAMI2  POINT  267800   6372800   18.0
** FUENTE PUNTUAL    QS    HS    TS    VS   DS
** PARAMETROS:      ----  ----  ----  ----  ---
  SRCPARAM  ENAMI2  13.8  40.0  333.0  9.0  1.8
  LOCATION  GENER1  POINT  267520   6373630   6.0
** FUENTE PUNTUAL    QS    HS    TS    VS   DS
** PARAMETROS:      ----  ----  ----  ----  ---
  SRCPARAM  GENER1  2.83  61.0  379.0  9.2  4.1
  LOCATION  GENER2  POINT  267490   6373700   6.0
** FUENTE PUNTUAL    QS     HS    TS    VS    DS
** PARAMETROS:      ----  ----  ----  ----  ---
  SRCPARAM  GENER2  3.88  62.0  393.0  11.9  4.9
  SRCGROUP  ALL
SO FINISHED

RE STARTING
  DISCCART 270075 6372161 25
RE FINISHED

ME STARTING
  INPUTFIL  ENE03.MET
  WDROTATE  180
  ANEMHGHT  10 METERS
  URFDATA  94823  2004  PITTSBURGH
  UAIRDATA  94823  2004  PITTSBURGH
ME FINISHED

OU STARTING
  RECTABLE  ALLAVE  FIRST
  PLOTFILE  24   ALL 1ST     LMENE03.FIL
  POSTFILE  24   ALL PLOT   TODENE03.FIL
OU FINISHED
```

6.2.2 Condiciones y periodo a modelar

El presente trabajo se lleva a cabo para el periodo enero-diciembre 2003 y enero-noviembre 2004, se realiza la modelación horaria y del promedio de 24 horas para cada mes dentro del periodo considerado. La modelación se efectúa para cada una de las cinco estaciones de calidad del aire del Complejo Industrial Las Ventanas, cuya localización se presenta en la Tabla 6.2. Así también en la Tabla 6.3 se presenta la localización de las fuentes emisoras consideras.

Tabla 6.2. . "Estaciones de calidad del aire Complejo Industrial Las Ventanas"

Estación de Monitoreo	UTM-E [m]	UTM-N [m]	Altitud (m.s.n.m)
La Greda	268300	6373900	25
Los Maitenes	270075	6372161	25
Puchuncaví	273800	6376700	35
Sur	267434	6368062	25
Valle Alegre	271800	6367420	20

En la Tabla 6.4 se presentan los parámetros de emisión para ENAMI y AES Gener S.A, se trabaja con los promedios anuales de emisión de anhídrido sulfuroso para cada fuente, por lo que se supone una operación constante durante todo el periodo.

Tabla 6.3. "Localización de las fuentes emisoras"

Fuente		UTM-E [m]	UTM-N [m]	Altitud (m.s.n.m)
Fundición Las Ventanas	Horno	267780	6372680	18
	Planta de ácido	267800	6372800	18
AES Gener S.A.	Unidad 1	267520	6373630	6
	Unidad 2	267490	6373700	6

Tabla 6.4. "Parámetros de emisión de las fuentes consideradas"

Fuente		Emisión [g/s]	Altura chimenea [m]	Temp. gases [K]	Vel. gases [m/s]	Diámetro chimenea [m]
Fundición Las Ventanas	Horno	505,8	155	540	4,8	2,5
	Planta de ácido	13,8	40	333	9	1,8
AES Gener S.A	Unidad 1	2,83	61	379	9,2	4,1
	Unidad 2	3,88	62	393	11,9	4,9

6.2.3 Manejo de los archivos de salida y Análisis de los resultados

Los archivos resultantes de la ejecución del modelo ISC3 se manejan mediante el lenguaje de programación Perl. [28,29]

Se analizan los resultados correspondientes a las concentraciones horarias para cada mes, como también, los promedios diarios para cada día dentro del periodo a modelar.

A los resultados obtenidos de la modelación se les aplica el filtro Kalman con la finalidad de minimizar los errores sistemáticos del modelo. [22,23]

Para las concentraciones horarias modeladas se aplica el filtro por mes, utilizando las 14 primeras horas de cada mes para la estabilización del filtro. Para las concentraciones promedio de 24 horas se aplica el filtro por año, utilizando los 14 primeros días de enero para estabilizar el filtro en el período 2003 y los 14 últimos días del mes de diciembre del 2003 para estabilizar el filtro para el año 2004.

El análisis de los resultados corresponde a la comparación de los valores entregados por el modelo ISC3 y los valores filtrados, con los datos reales existentes para la red de receptores.

En primer lugar, las concentraciones filtradas y modeladas son evaluadas mediante los estimadores estadísticos recomendados por U.S EPA [30] presentados en la Tabla 6.5.

Tabla 6.5. "Parámetros estadísticos recomendados por EPA" [30]

Herramienta	Definición	Descripción
Promedio	$\overline{O} = \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T} O_t$ $\overline{P} = \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T} P_t$	Promedio aritmético de las series de valores de O_t y P_t. Se espera que el valor medio predicho sea cercano al valor medio observado.
Desviación estándar	$\sigma_o = \left(\frac{1}{T-1}\sum_{t=1}^{T}(O_t - \overline{O})^2\right)^{0.5}$ $\sigma_p = \left(\frac{1}{T-1}\sum_{t=1}^{T}(P_t - \overline{P})^2\right)^{0.5}$	Denota la desviación estándar de las series de valores de O_t y P_t. Se espera que la desviación predicha sea cercana a la observada
Diferencia Media Normalizada	$NMD = \left(\frac{\overline{O} - \overline{P}}{\overline{O}}\right)$	Medida del bias de P respecto a O. Idealmente debe ser cercano a cero.
Raíz del Error Cuadrático Medio	$RMSE = \left(\frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}(O_t - P_t)^2\right)^{0.5}$	Denota el tamaño del error entregado.
Índice de Acuerdo	$IA = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{T}(P_t^{`} - O_t^{`})^2}{\sum_{t=1}^{T}(\lvert P_t^{`}\rvert + \lvert O_t^{`}\rvert)^2}$ $P_t^{`} = P_t - \overline{O}; \quad O_t^{`} = O_t - \overline{O}$	Corresponde a una medida normalizada del RMSE. Idealmente debe ser lo más cercano a 1

Donde:

T = Número de datos observados o pronosticados en el tiempo.

O_t = Valores de concentración en [µg/m^3] observados en el tiempo.

P_t = Valores de concentración en [µg/m^3] pronosticados en el tiempo.

Por otro lado, para evaluar las diferencias relativas entre el modelo y las observaciones se utilizan dos nuevas herramientas estadísticas que se presentan en la Tabla 6.6, el Factor normalizado medio del bias y el Factor de error medio normalizado [31], y que en comparación con las medidas tradicionales utilizadas como son la desviación media normalizada y el error relativo, tratan de manera simétrica los problemas relacionados con las sobre y sub estimaciones presentadas por los modelos de calidad del aire.

Tabla 6.6. "Parámetros estadísticos para determinar diferencias relativas" [31]

Herramienta	Definición	Descripción
Factor normalizado medio del bias (B_{NMBF})	Para $\overline{P} \geq \overline{O}$ (sobre estimación) $$B_{NMBF} = \left(\frac{\overline{P}}{\overline{O}} - 1 \right)$$ Para $\overline{P} < \overline{O}$ (bajo estimación) $$B_{NMBF} = \left(1 - \frac{\overline{O}}{\overline{P}} \right)$$	Indica el grado de sobre o sub estimación de las P_t frente a O_t. Se expresa sumando ± 1 al resultado obtenido
Factor de error medio normalizado (E_{NMEF})	Para $\overline{P} \geq \overline{O}$ (sobre estimación) $$E_{NMEF} = \left(\frac{\sum_{t=1}^{T} \lvert P_t - O_t \rvert}{\sum_{t=1}^{T} O_t} \right)$$ Para $\overline{P} < \overline{O}$ (bajo estimación) $$E_{NMEF} = \left(\frac{\sum_{t=1}^{T} \lvert P_t - O_t \rvert}{\sum_{t=1}^{T} P_t} \right)$$	Indica el tamaño de las diferencias relativas entre P_t y O_t.

El filtro y los parámetros estadísticos utilizados se programan en Perl, se comprueba su correcta programación mediante hojas de cálculo para un mes de prueba y las gráficas de los resultados se obtienen utilizando el programa Gnuplot.

El programa en Perl para el cálculo del filtro Kalman presenta en el Anexo B.

CAPITULO 7

RESULTADOS Y DISCUSION

El presente trabajo entrega como resultados las concentraciones horarias y promedio de 24 horas en [$\mu g/m^3$] de anhídrido sulfuroso predichas por el modelo ISC3 junto, con las concentraciones filtradas mediante el filtro Kalman, en las 5 estaciones que conforman la red de calidad del aire del Complejo Industrial Las Ventanas.

En las Figuras 7.1 a la 7.8 se presentan las gráficas de las concentraciones horarias modeladas, filtradas y observadas en la estación Los Maitenes para dos días de los meses de enero, abril, julio y octubre de 2003 y 2004, debido a que esta estación presenta el mejor ajuste entre las concentraciones predichas y las observadas.

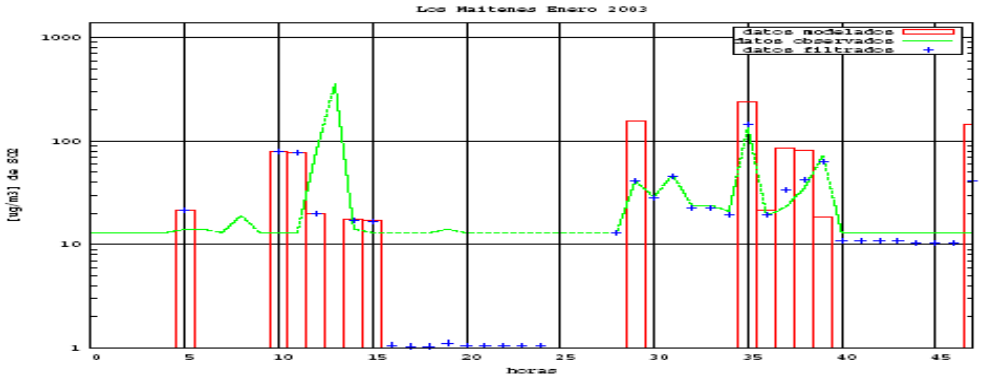


Figura 7.1. "Concentraciones horarias observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para enero de 2003 en Los Maitenes"

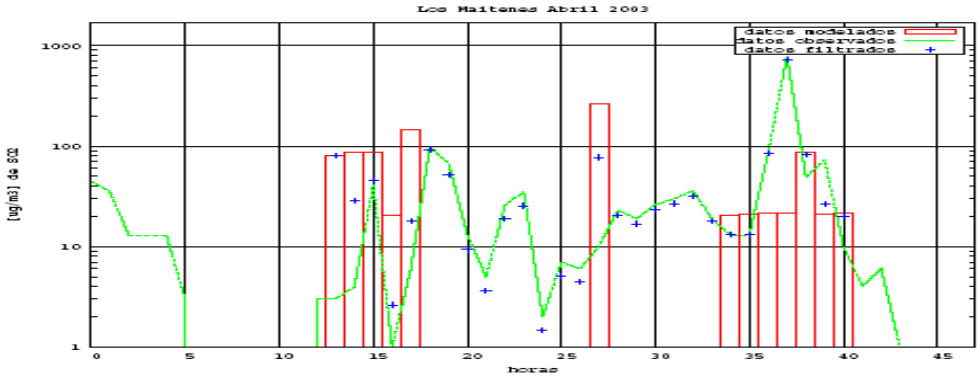


Figura 7.2. "Concentraciones horarias observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para abril de 2003 en Los Maitenes"

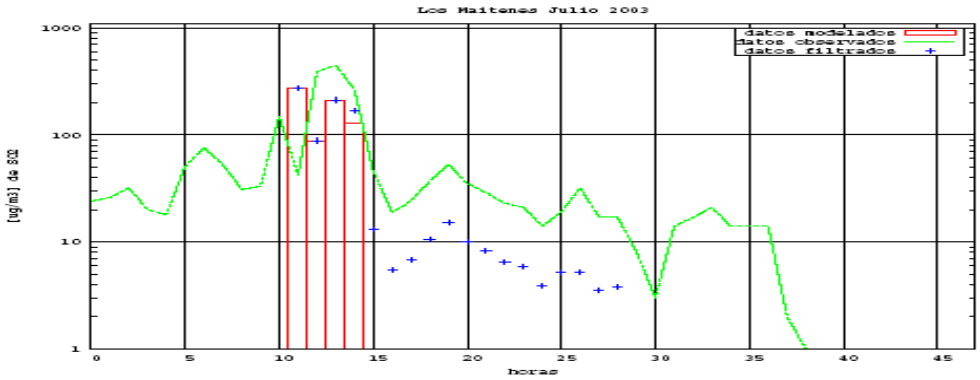


Figura 7.3. "Concentraciones horarias observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para julio de 2003 en Los Maitenes"

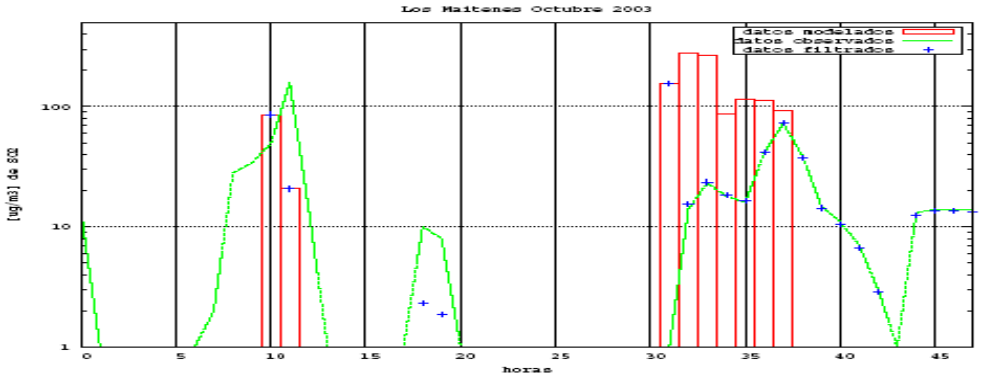


Figura 7.4. "Concentraciones horarias observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para Octubre de 2003 en Los Maitenes"

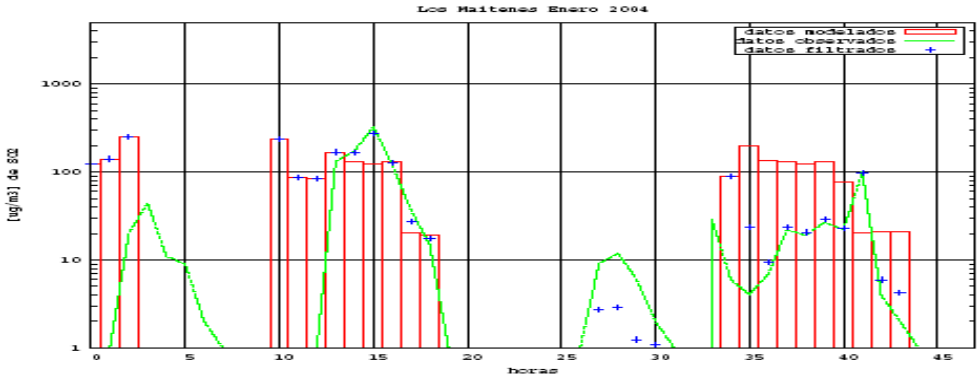


Figura 7.5. "Concentraciones horarias observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para enero de 2004 en Los Maitenes"

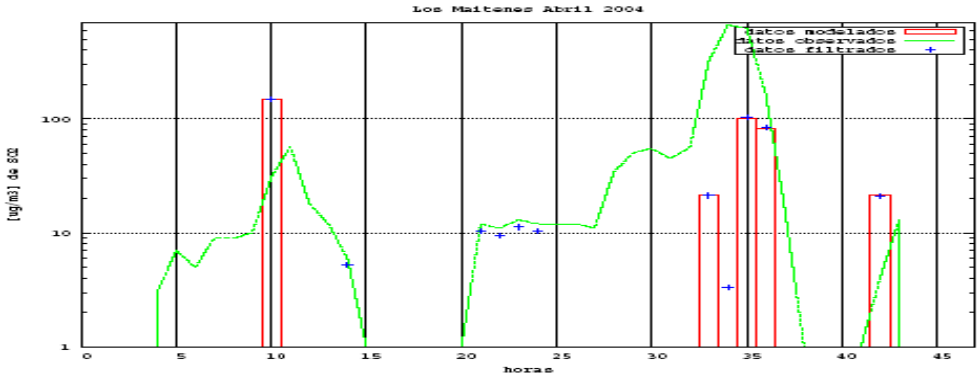


Figura 7.6. "Concentraciones horarias observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para abril de 2004 en Los Maitenes"

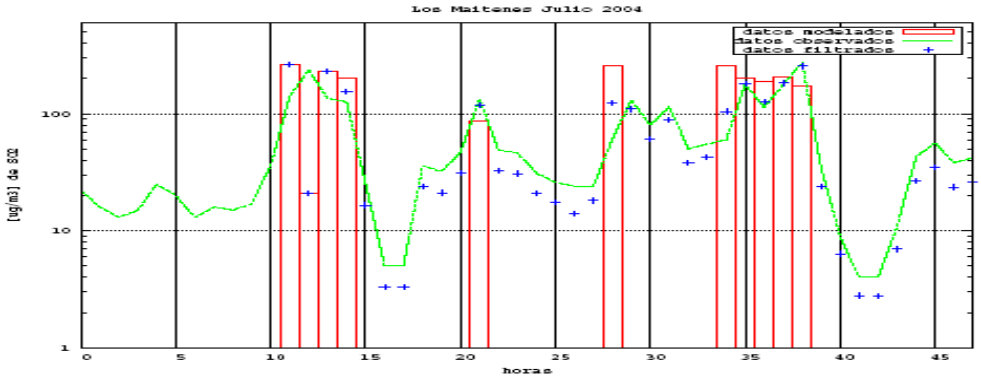


Figura 7.7. "Concentraciones horarias observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para julio de 2004 en Los Maitenes"

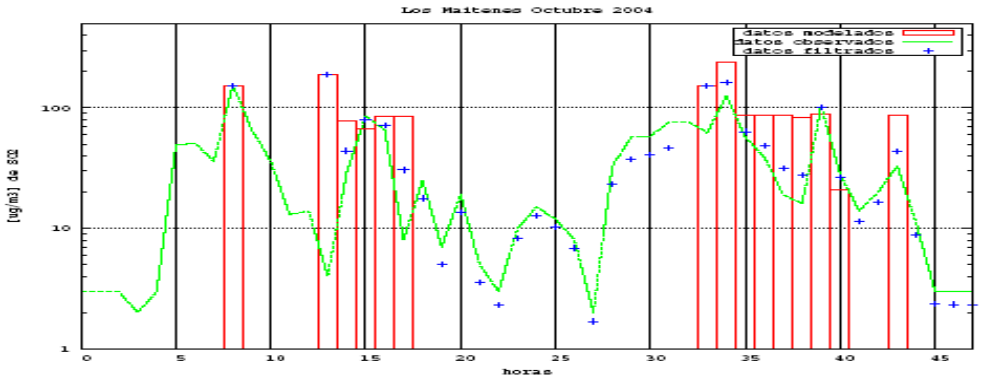


Figura 7.8. "Concentraciones horarias observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para octubre de 2004 en Los Maitenes"

En la Figura 7.1 se observa que enero de 2003 presenta la tendencia más uniforme de las concentraciones observadas, por su parte, las Figuras 7.7 y 7.8 muestran de mejor manera como la aplicación del filtro Kalman disminuye el error entre las concentraciones modeladas y las observadas.

Por otro lado, en la Figura 7.3 se observa, que para el mes de julio de 2003 el modelo predijo un mayor número de horas con concentraciones de 0 [$\mu g/m^3$].

A continuación, se presentan las Figuras 7.9 a la 7.32 las cuales corresponden a las gráficas de las concentraciones promedio de 24 horas observadas, modeladas y filtradas para los meses de enero, abril, julio y octubre de los años 2003 y 2004, en las estaciones Los Maitenes, La Greda y Valle Alegre, debido a que éstas presentan el mejor ajuste entre las concentraciones predichas y observadas.

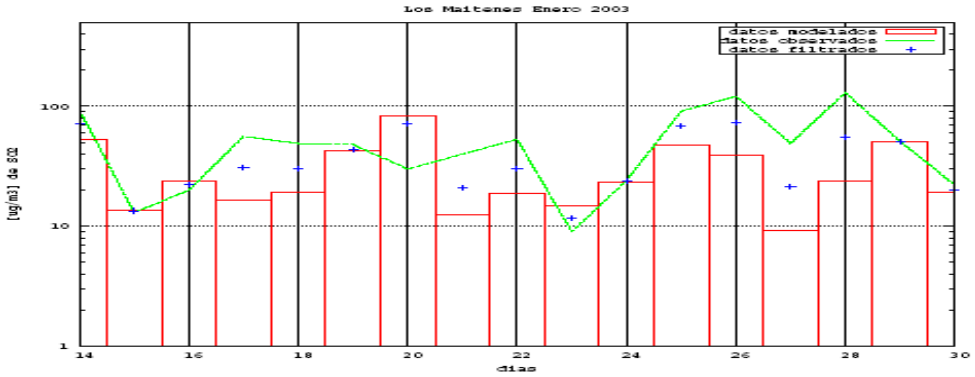


Figura 7.9. "Concentraciones promedio de 24 horas observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para enero de 2003 en Los Maitenes"

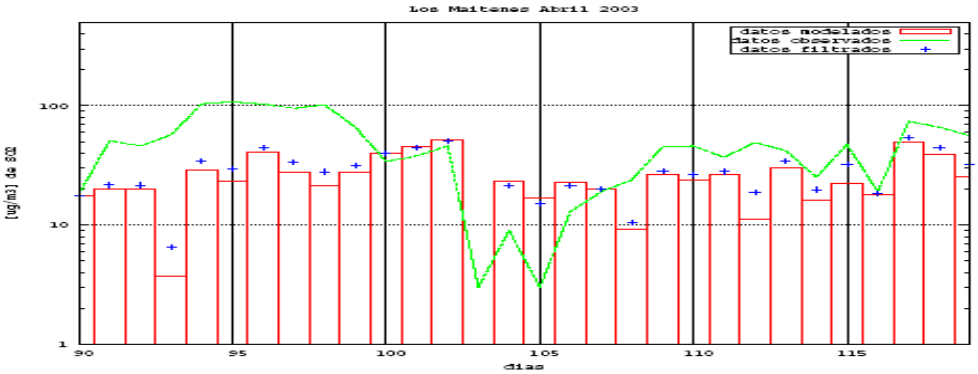


Figura 7.10. "Concentraciones promedio de 24 horas observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para abril de 2003 en Los Maitenes"

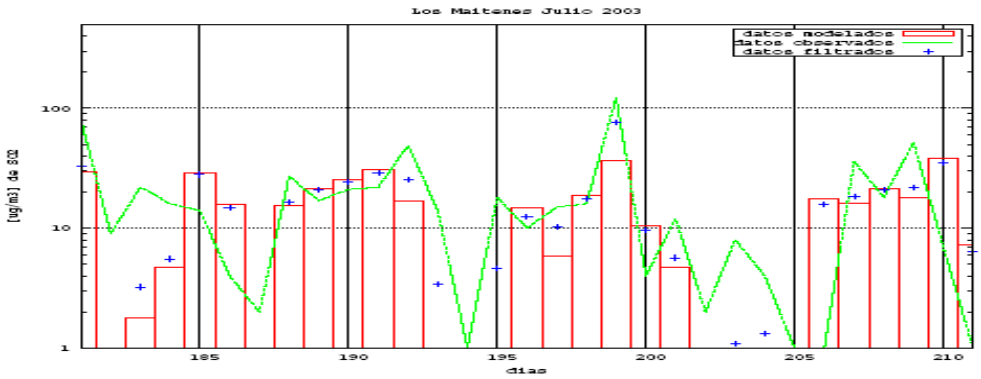


Figura 7.11. "Concentraciones promedio de 24 horas observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para julio de 2003 en Los Maitenes"

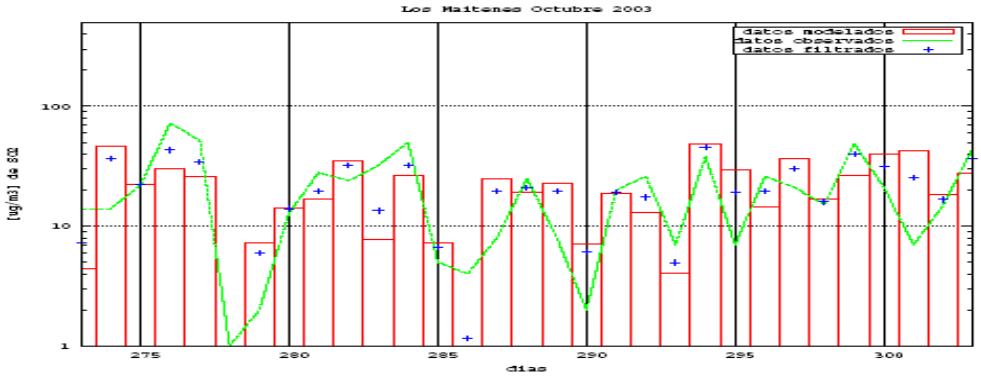


Figura 7.12. "Concentraciones promedio de 24 horas observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para octubre de 2003 en Los Maitenes"

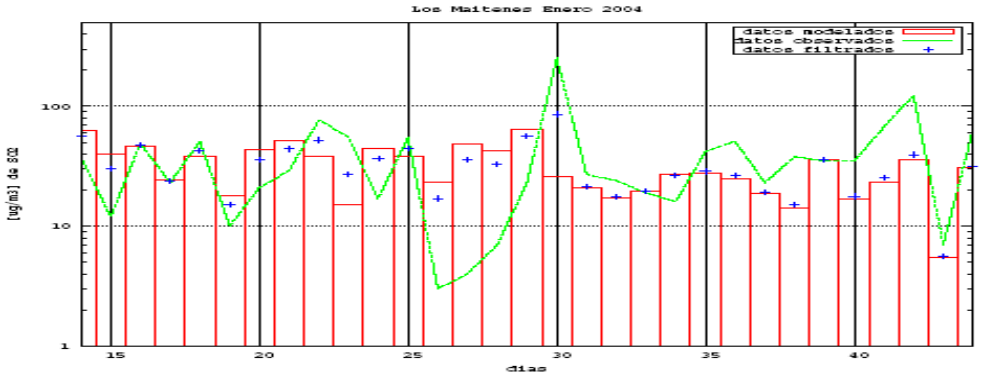


Figura 7.13. "Concentraciones promedio de 24 horas observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para enero de 2004 en Los Maitenes"

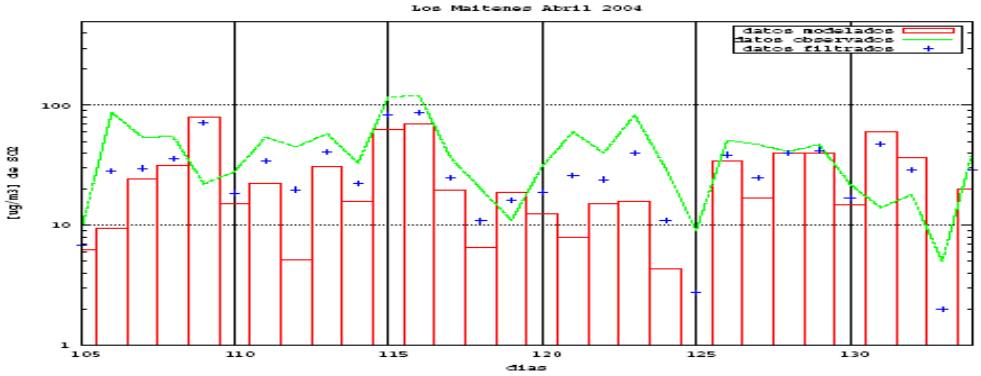


Figura 7.14. "Concentraciones promedio de 24 horas observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para abril de 2004 en Los Maitenes"

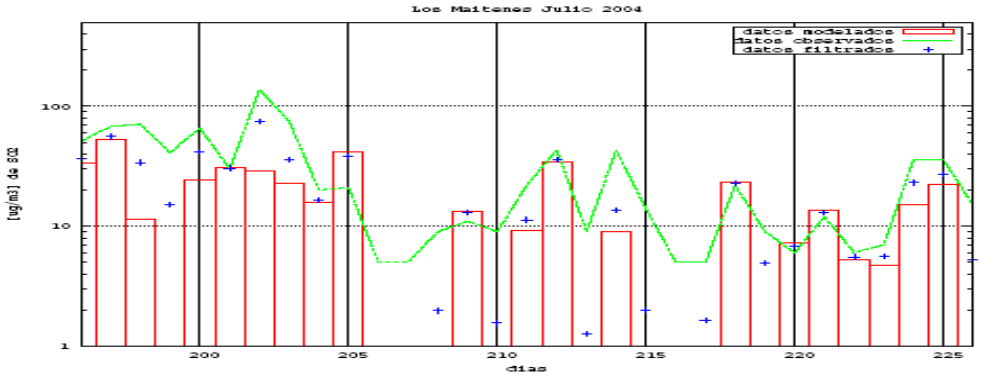


Figura 7.15. "Concentraciones promedio de 24 horas observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para julio de 2004 en Los Maitenes"

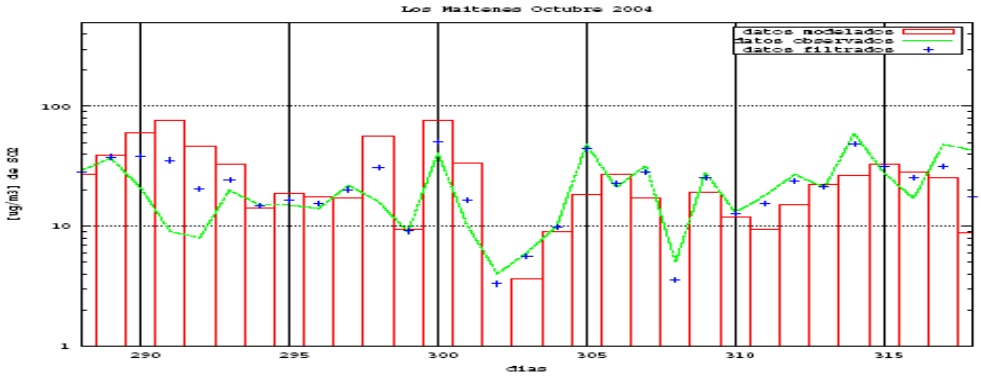


Figura 7.16. "Concentraciones promedio de 24 horas observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para octubre de 2004 en Los Maitenes"

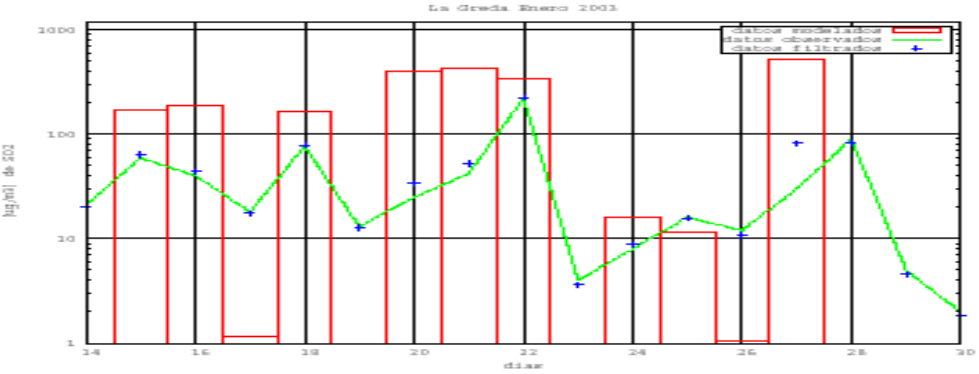


Figura 7.17. "Concentraciones promedio de 24 horas observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para enero de 2003 en La Greda"

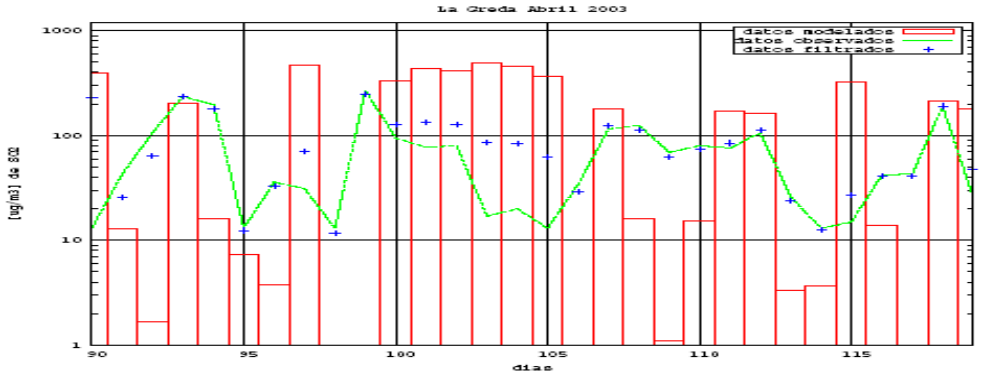


Figura 7.18. "Concentraciones promedio de 24 horas observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para abril de 2003 en La Greda"

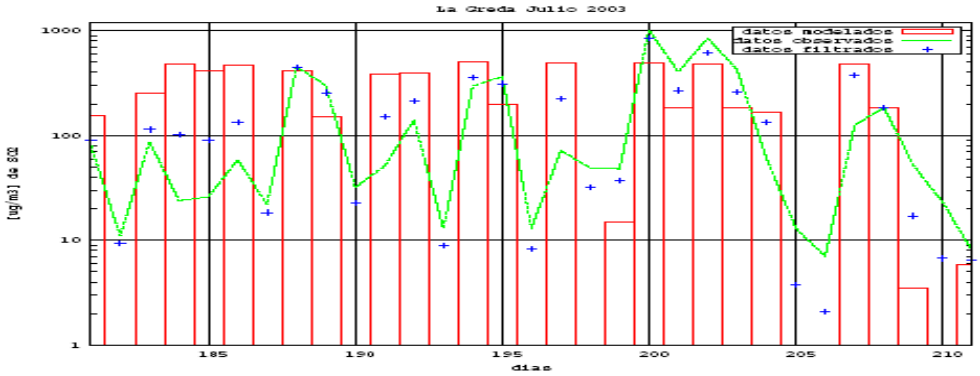


Figura 7.19. "Concentraciones promedio de 24 horas observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para julio de 2003 en La Greda"

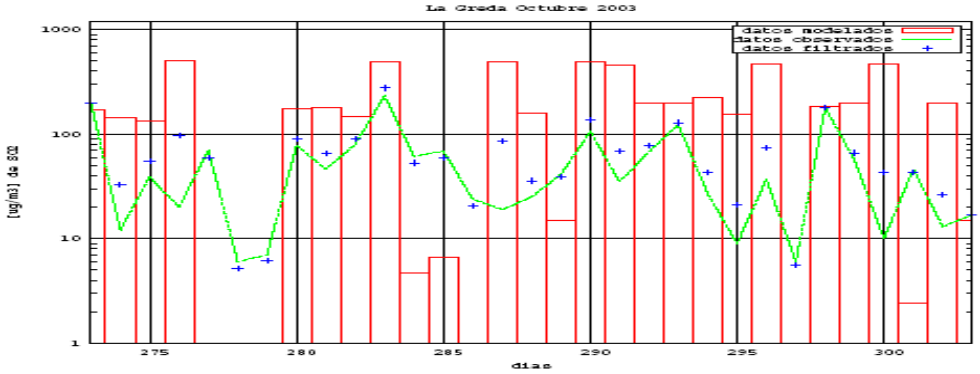


Figura 7.20. "Concentraciones promedio de 24 horas observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para octubre de 2003 en La Greda"

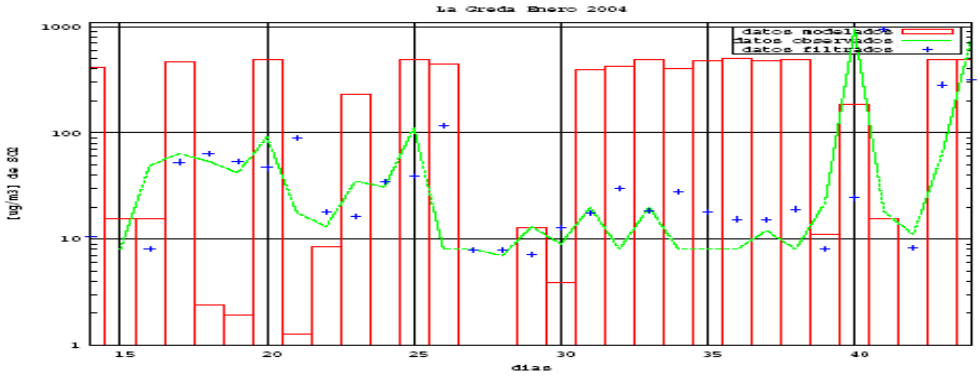


Figura 7.21. "Concentraciones promedio de 24 horas observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para enero de 2004 en La Greda"

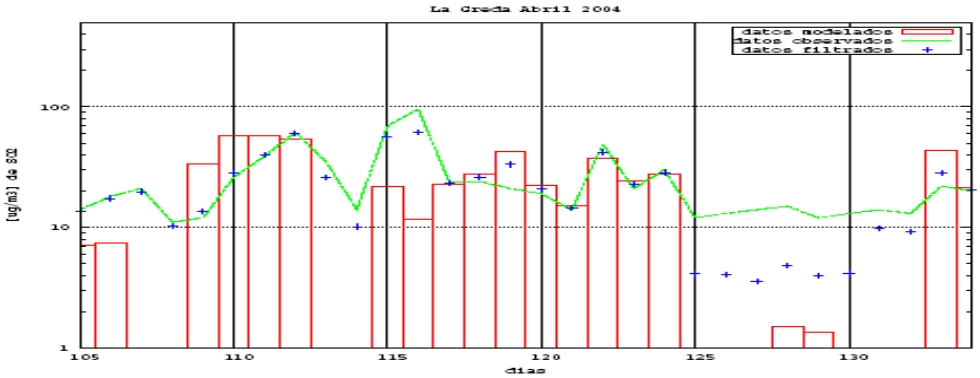


Figura 7.22"Concentraciones promedio de 24 horas observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para abril de 2004 en La Greda"

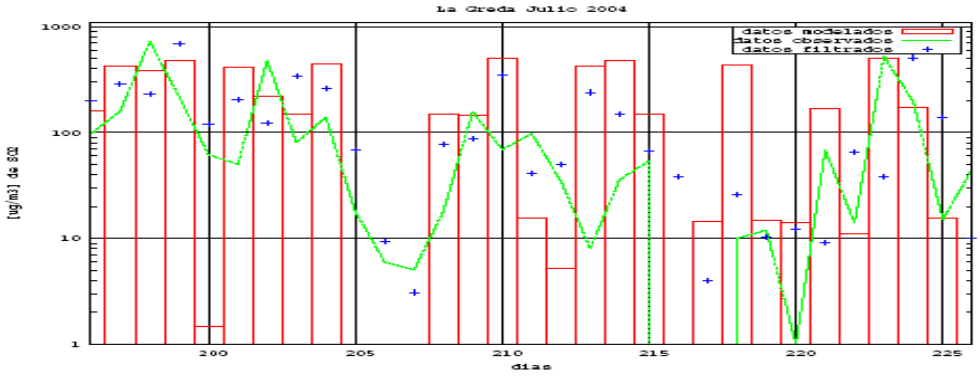


Figura 7.23. "Concentraciones promedio de 24 horas observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para julio de 2004 en La Greda"

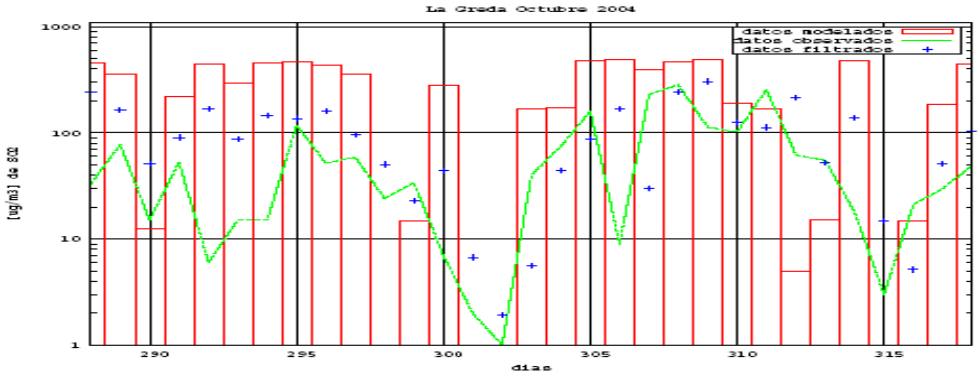


Figura 7.24. "Concentraciones promedio de 24 horas observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para octubre de 2004 en La Greda"

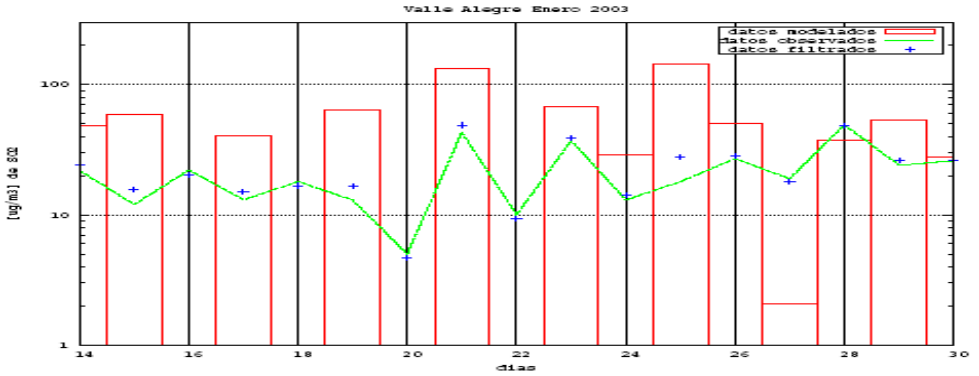


Figura 7.25. "Concentraciones promedio de 24 horas observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para enero de 2003 en Valle Alegre"

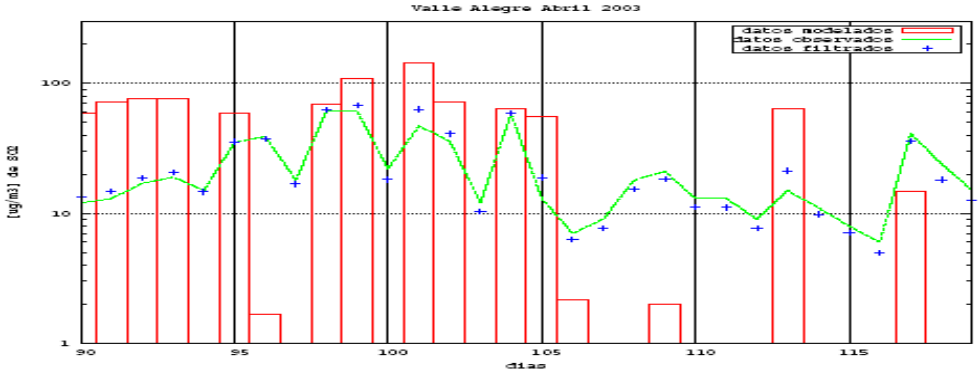


Figura 7.26. "Concentraciones promedio de 24 horas observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para abril de 2003 en Valle Alegre"

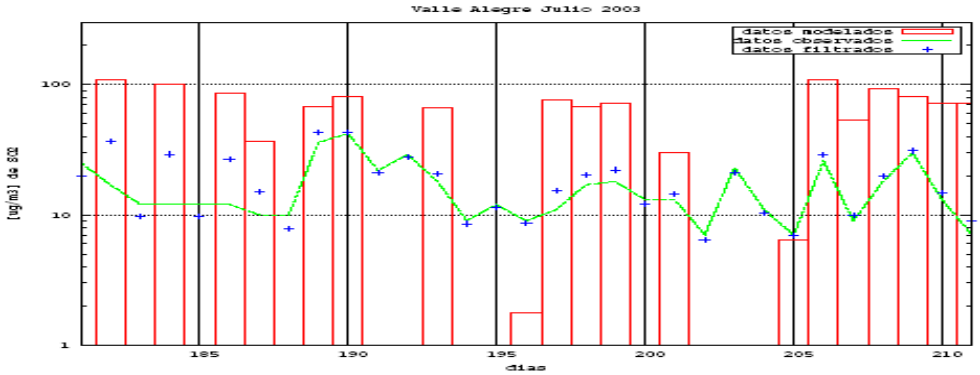


Figura 7.27. "Concentraciones promedio de 24 horas observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para julio de 2003 en Valle Alegre"

Figura 7.28. "Concentraciones promedio de 24 horas observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para octubre de 2003 en Valle Alegre"

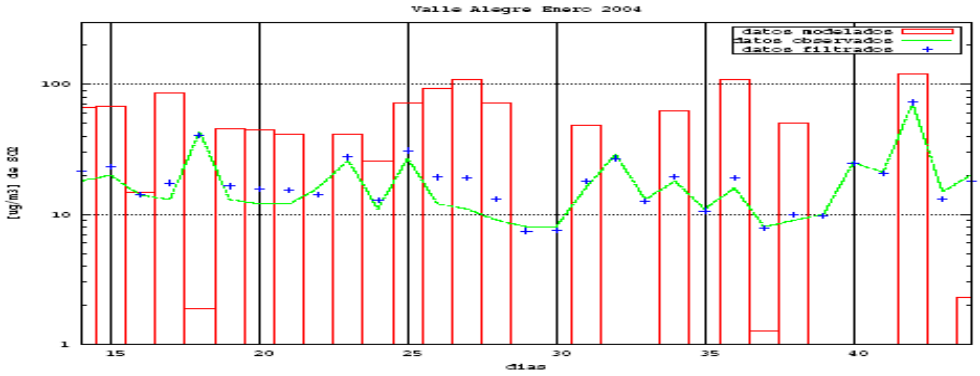


Figura 7.29. "Concentraciones promedio de 24 horas observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para enero de 2004 en Valle Alegre"

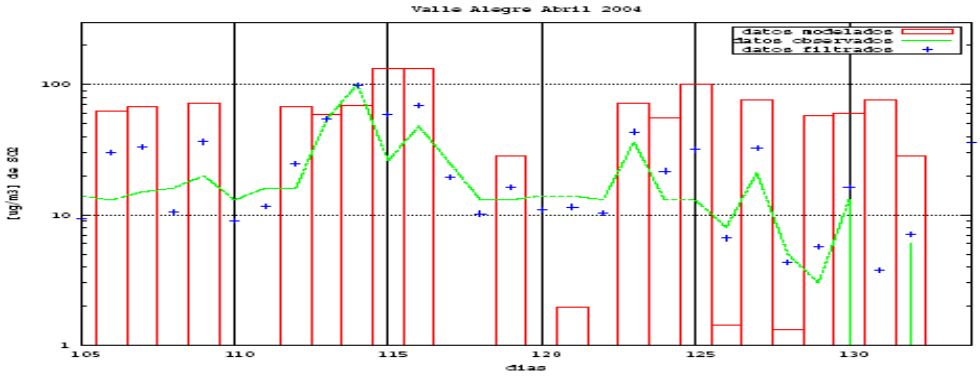


Figura 7.30. "Concentraciones promedio de 24 horas observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para abril de 2004 en Valle Alegre"

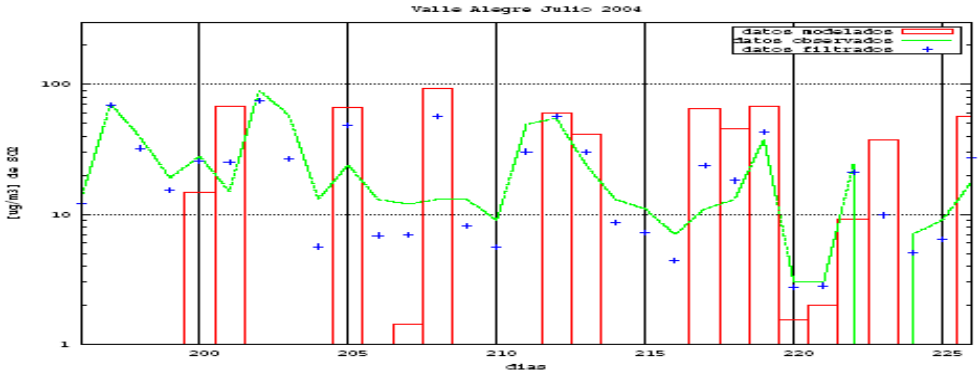


Figura 7.31. "Concentraciones promedio de 24 horas observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para julio de 2004 en Valle Alegre"

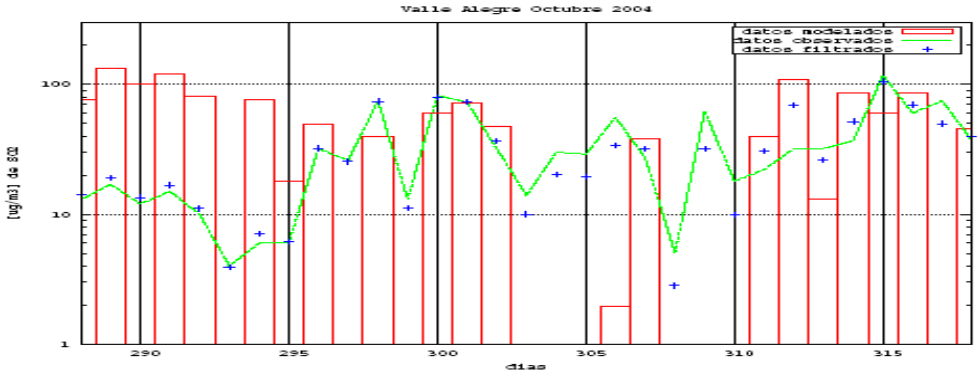


Figura 7.32. "Concentraciones promedio de 24 horas observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para octubre de 2004 en Valle Alegre"

En general, para las tres estaciones se observa un mejor ajuste entre las concentraciones modeladas y observadas que para la modelación horaria, obteniendo el mejor ajuste en la estación Los Maitenes.

En la Figura 7.13 se observa la tendencia más uniforme de los datos modelados, encontrándose la mayor parte de los valores de concentración entre los 20 y 70 [$\mu g/m^3$], por su parte, la tendencia más uniforme tanto de las concentraciones observadas como las filtradas se presenta en la Figura 7.29 con valores que fluctúan entre los 10 y 80 [$\mu g/m^3$] para ambas series.

En las Figuras 7.17 a la 7.24 se observa que para la estación La Greda las concentraciones observadas, modeladas y filtradas alcanzan valores casi 10 veces superiores a los observados en las otras dos estaciones.

7.1 ANALISIS DE LA MODELACION DE LAS CONCENTRACIONES HORARIAS

En la Tabla 7.1. se observa que el modelo entrega el mejor desempeño en la estación Los Maitenes, con IA ≥ 0,50 para la mayoría de los meses modelados entregando un valor máximo de 0,63 para julio y septiembre del 2004.

Si bien, se obtienen elevados valores de RMSE, para esta estación el modelo entrega la menor subestimación de las concentraciones observadas con B_{NMBF} promedio de –1,51 para el año 2003 y -1,67 para el 2004. Los valores de E_{NMEF} también son menores que en las otras cuatro estaciones con un máximo de 3,46 en junio de 2004, lo cual indica que el error entre el modelo y las observaciones es 3,46 veces el valor de la observación.

En Los Maitenes para enero de 2004 existe un valor de concentración observada cincuenta veces mayor a las restantes concentraciones, lo cual incide fuertemente en el valor del IA, entregando en este mes uno de los menores valores para este parámetro.

En cuanto a las concentraciones filtradas presentadas en la Tabla 7.2, se observa que tal como era esperado, los errores diminuyen considerablemente alcanzando un E_{NMEF} de 0,82 y 0,84 para los años 2003 y 2004 respectivamente. La tendencia del modelo a subestimar las concentraciones observadas también decrece alcanzando 1,40 en promedio para ambos años. Por otra parte, el IA mejora notoriamente con un valor de 0,82 para ambos años y un máximo de 0,95 para noviembre del 2004.

En las Tablas C.1 a la C.8 presentadas en el Anexo C, se observa que para las restantes cuatro estaciones los resultados obtenidos de la modelación horaria no son tan satisfactorios, si bien, el modelo mantiene la tendencia a subestimar las concentraciones observadas en la estación La Greda más de la mitad de los meses analizados entregan valores positivos de B_{NMBF}.

La estación Valle Alegre presenta el menor RMSE con un valor promedio de 10,6 para ambos años, sin embargo, el IA es aceptable sólo para el mes de abril de 2003 con un valor de 0,52. Para las concentraciones filtradas el IA alcanza valores aceptables para la mayor parte de los meses entregando valores promedios anuales de 0,57 y 0,50 para el 2003 y 2004 respectivamente.

En relación a La Greda, los valores de RMSE modelados para los años 2003 y 2004 alcanzan 77,85 y 82,44 respectivamente y a pesar de que para las concentraciones modeladas el IA $\approx$ 0,27, para las filtradas este valor se eleva a 0,62 en promedio para ambos años, con concentraciones que alcanzan valores promedio de 1,01 veces el valor de la observación.

Para Puchuncaví y Sur ningún mes en ambas estaciones presenta un IA superior a 0,45 encontrándose la mayor parte de los valores alrededor de 0,29 y 0,35 respectivamente. Por otro lado, se observan los más altos valores de B_{NMBF} con máximos de -15,47 y -14,31 y E_{NMEF} de 15,82 y 14,98 para los años 2003 y 2004 respectivamente lo cual indica marcadas diferencias relativas con los valores observados.

En cuanto a las concentraciones filtradas para ambas estaciones, aunque los errores se amortiguan no se logra en promedio un IA superior a 0,5.

Tabla 7.1. "Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones horarias modeladas en Los Maitenes"

Concentraciones Horarias Modeladas										
Los Maitenes		RMSE	$\overline{P}$	$\overline{O}$	σ_p	σ_o	NMD	IA	B_{NMBF}	E_{NMEF}
2003	Enero	118.84	34.21	45.99	65.66	117.32	25.61	0.44	-0.34	1.51
	Febrero	80.87	30.27	23.84	56.41	76.38	-26.96	0.49	0.27	1.54
	Marzo	101.14	23.06	36.42	51.47	101.95	36.68	0.44	-0.58	1.72
	Abril	132.93	25.32	48.84	59.82	132.45	48.15	0.40	-0.93	2.10
	Mayo	101.37	16.84	38.13	52.19	103.76	55.83	0.47	-1.26	2.17
	Junio	67.19	12.03	27.89	44.23	58.01	56.86	0.44	-1.32	2.55
	Julio	61.00	12.41	18.64	44.26	60.61	33.44	0.54	-0.50	1.72
	Agosto	56.79	15.31	17.92	48.18	54.56	14.58	0.59	-0.17	1.42
	Septiembre	66.10	20.83	25.07	54.29	62.20	16.93	0.57	-0.20	1.30
	Octubre	61.40	21.34	21.68	53.31	60.67	1.55	0.62	-0.02	1.16
	Noviembre	80.22	23.15	30.41	52.54	80.57	23.87	0.53	-0.31	1.46
	Diciembre	75.19	19.86	34.12	50.27	83.09	41.78	0.62	-0.72	1.53
2004	Enero	199.58	30.89	42.34	57.81	201.19	27.05	0.21	-0.37	1.55
	Febrero	81.94	26.38	31.20	56.10	85.00	15.46	0.56	-0.18	1.26
	Marzo	92.29	23.34	36.47	55.97	93.33	36.02	0.51	-0.56	1.60
	Abril	92.09	24.85	43.46	60.56	100.37	42.82	0.61	-0.75	1.60
	Mayo	77.48	15.96	40.77	49.17	80.36	60.85	0.59	-1.55	2.30
	Junio	103.35	16.20	59.54	50.90	95.41	72.79	0.49	-2.68	3.46
	Julio	59.64	13.12	28.85	45.70	61.39	54.51	0.63	-1.20	2.04
	Agosto	54.12	16.71	20.20	50.99	47.06	17.29	0.60	-0.21	1.41
	Septiembre	56.52	19.00	17.27	53.36	53.32	-10.02	0.63	0.10	1.28
	Octubre	61.72	25.79	22.23	59.23	54.55	-16.01	0.61	0.16	1.29
	Noviembre	168.54	25.35	28.67	58.97	163.79	11.55	0.15	-0.13	1.45

Tabla 7.2. "Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones horarias filtradas en Los Maitenes"

Concentraciones Horarias Filtradas										
Los Maitenes		RMSE	$\overline{P}$	$\overline{O}$	σ_p	σ_o	NMD	IA	B_{NMBF}	E_{NMEF}
2003	Enero	76.79	33.87	45.99	69.40	117.32	26.35	0.82	-0.36	0.75
	Febrero	45.85	20.53	23.84	57.04	76.38	13.90	0.87	-0.16	0.68
	Marzo	81.50	23.38	36.42	57.78	101.95	35.79	0.70	-0.56	1.05
	Abril	75.77	36.61	48.84	109.42	132.45	25.05	0.89	-0.33	0.73
	Mayo	73.57	21.42	38.13	60.96	103.76	43.82	0.78	-0.78	1.14
	Junio	50.43	18.32	27.89	39.88	58.01	34.32	0.68	-0.52	0.97
	Julio	43.48	12.42	18.64	40.42	60.61	33.39	0.79	-0.50	1.06
	Agosto	31.44	15.29	17.92	52.23	54.56	14.68	0.91	-0.17	0.73
	Septiembre	39.08	21.02	25.07	53.45	62.20	16.15	0.87	-0.19	0.64
	Octubre	36.39	19.91	21.68	52.29	60.67	8.14	0.89	-0.09	0.53
	Noviembre	48.54	24.71	30.41	61.82	80.57	18.76	0.87	-0.23	0.70
	Diciembre	56.92	24.35	34.12	58.68	83.09	28.62	0.82	-0.40	0.83
2004	Enero	170.73	31.12	42.34	69.10	201.19	26.51	0.53	-0.36	0.79
	Febrero	53.20	25.19	31.20	57.74	85.00	19.26	0.85	-0.24	0.71
	Marzo	70.74	24.27	36.47	53.66	93.33	33.45	0.74	-0.50	1.00
	Abril	68.42	29.26	43.46	68.03	100.37	32.68	0.82	-0.49	0.87
	Mayo	48.35	26.45	40.77	62.17	80.36	35.12	0.88	-0.54	0.87
	Junio	82.19	25.84	59.54	54.37	95.41	56.60	0.69	-1.30	1.61
	Julio	41.07	16.89	28.85	44.25	61.39	41.46	0.84	-0.71	1.00
	Agosto	33.09	14.85	20.20	44.22	47.06	26.49	0.85	-0.36	0.84
	Septiembre	28.40	16.00	17.27	51.09	53.32	7.33	0.92	-0.08	0.55
	Octubre	30.96	21.69	22.23	52.28	54.55	2.40	0.91	-0.02	0.49
	Noviembre	60.34	23.95	28.67	115.72	163.79	16.46	0.95	-0.20	0.57

7.2 ANALISIS DE LA MODELACION DE LAS CONCENTRACIONES PROMEDIO DE 24 HORAS

En las Tablas 7.3 y C.9 a C.12 éstas últimas presentadas en el Anexo C, se observa un mejor desempeño del modelo ISC3 en todas las estaciones de calidad del aire, aunque, la tendencia del modelo a subestimar las concentraciones observadas se mantiene.

En la Tabla 7.3, del mismo modo que para la modelación horaria, se observa que el modelo presenta el mejor ajuste de concentraciones en la estación Los Maitenes con IA ≥ 0,5 para la mayor parte de las estaciones, y a pesar de entregar RMSE elevados, presenta los menores valores de NMD y E_{NMEF} llegando éste último a alcanzar un valor promedio para los años 2003 y 2004 de 1,01 y 1,15 respectivamente, lo cual indica pequeñas diferencias relativas con los datos observados para esta estación. Por otra parte, esta estación continúa presentando la menor subestimación de las concentraciones observadas con un valor máximo de -3,59 y un promedio anual no superior a -1,7.

En cuanto a las concentraciones filtradas en la Tabla 7.4. se observa que el IA es cercano a 0,80 para ambos años, los valores de NMD disminuyen en 36% y 43% y los de E_{NMEF} en 23% y 26% para los años 2003 y 2004 respectivamente.

Para las estaciones restantes y tal como se observa en las Tablas C.13 a C.16 presentadas en el Anexo C, los valores de IA de las concentraciones modeladas no superan en promedio 0,5 para los periodos en estudio, salvo para La Greda en el 2004 que se alcanza un IA de 0,56. Al igual que para la modelación horaria Valle Alegre presenta los menores valores de RMSE con un valor de 6,82 en promedio para ambos años.

Es importante mencionar, que los resultados obtenidos para la modelación de concentraciones promedio están de acuerdo con un trabajo anteriormente realizado en la zona de Ventanas en el cual se evalúa el desempeño de tres modelos de dispersión atmosférica, [32] uno de los cuales es ISC3 en función de las estaciones de calidad del aire Valle Alegre, La Greda y Puchuncaví. Si bien, sólo se analizan tres estaciones de monitoreo los resultados obtenidos son del mismo orden de magnitud que en el presente trabajo.

En cuanto a las concentraciones filtradas en general las estaciones Sur, Valle Alegre y La Greda entregan IA superiores a 0,6 alcanzando un máximo en La Greda en enero del 2004. Para Puchuncaví sólo cuatro meses presenta IA $\geq$ 0,5 con un promedio de 0,48 para ambos años.

En un análisis general de los resultados filtrados se observa que La Greda entrega mejores resultados que Los Maitenes con IA $\approx$ 0,9; la tendencia a subestimar las concentraciones se mantiene, aunque es mucho menor llegando a un mínimo en diciembre de 2003, por otra parte los valores de E_{NMEF} también son menores para esta estación lo cual indica leves diferencias relativas entre las concentraciones filtradas y observadas.

Tabla 7.3. "Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones promedio de 24 horas modeladas en Los Maitenes"

Concentraciones Promedio de 24 horas Modeladas										
Los Maitenes		RMSE	$\overline{P}$	$\overline{O}$	σ_p	σ_o	NMD	IA	B_{NMBF}	E_{NMEF}
2003	Enero	42.15	30.07	52.88	19.69	36.05	43.14	0.48	-0.76	1.01
	Febrero	31.76	29.64	24.13	21.93	42.78	-22.86	0.48	0.23	1.02
	Marzo	37.54	23.02	35.81	23.05	55.77	35.71	0.41	-0.56	1.04
	Abril	36.48	24.94	48.17	26.42	64.49	48.22	0.51	-0.93	1.09
	Mayo	34.46	16.70	38.35	29.53	70.12	56.46	0.56	-1.30	1.47
	Junio	28.99	11.80	27.53	31.69	77.35	57.14	0.53	-1.33	1.44
	Julio	22.71	12.94	20.23	33.38	80.33	36.01	0.58	-0.56	1.14
	Agosto	16.37	15.02	18.16	36.06	82.13	17.29	0.66	-0.21	0.85
	Septiembre	21.76	20.82	26.40	41.06	86.93	21.15	0.70	-0.27	0.72
	Octubre	17.15	21.08	21.71	42.51	87.22	2.89	0.61	-0.03	0.63
	Noviembre	25.57	22.70	29.93	46.06	92.18	24.16	0.56	-0.32	0.85
	Diciembre	24.31	20.01	33.90	46.84	93.18	40.99	0.58	-0.69	0.82
2004	Enero	49.64	31.77	41.87	14.42	46.73	24.12	0.23	-0.32	0.90
	Febrero	24.12	27.24	30.86	21.83	55.05	11.75	0.59	-0.13	0.76
	Marzo	33.57	22.90	36.10	29.13	63.01	36.57	0.57	-0.58	1.03
	Abril	33.70	24.58	43.03	36.22	70.35	42.89	0.59	-0.75	1.11
	Mayo	33.79	15.78	40.77	38.15	75.62	61.29	0.62	-1.58	1.61
	Junio	56.40	16.59	59.57	41.67	86.97	72.15	0.51	-2.59	2.69
	Julio	28.53	13.57	29.32	43.49	90.49	53.72	0.61	-1.16	1.30
	Agosto	22.03	16.40	19.94	46.76	92.68	17.75	0.56	-0.22	0.94
	Septiembre	19.32	19.47	17.73	50.82	96.46	-9.77	0.70	0.10	0.73
	Octubre	22.36	25.76	22.39	53.72	95.89	-15.06	0.46	0.15	0.68
	Noviembre	40.13	25.34	28.77	58.14	104.36	11.89	0.31	-0.14	0.91

Tabla 7.4. "Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones promedio de 24 horas filtradas en Los Maitenes"

Concentraciones Promedio de 24 horas Filtradas										
Los Maitenes		RMSE	$\overline{P}$	$\overline{O}$	σ_p	σ_o	NMD	IA	B_{NMBF}	E_{NMEF}
2003	Enero	28.04	38.73	52.88	21.91	36.05	26.77	0.74	-0.37	0.51
	Febrero	24.27	26.79	24.13	23.52	42.78	-11.05	0.73	0.11	0.73
	Marzo	32.96	23.73	35.81	25.37	55.77	33.73	0.57	-0.51	0.85
	Abril	33.15	27.59	48.17	28.70	64.49	42.72	0.56	-0.75	0.87
	Mayo	27.18	21.25	38.35	32.15	70.12	44.60	0.68	-0.81	0.92
	Junio	24.07	14.83	27.53	34.92	77.35	46.12	0.68	-0.86	0.92
	Julio	16.86	14.90	20.23	37.71	80.33	26.34	0.82	-0.36	0.79
	Agosto	10.97	16.38	18.16	39.96	82.13	9.83	0.85	-0.11	0.51
	Septiembre	13.77	23.56	26.40	44.74	86.93	10.77	0.88	-0.12	0.39
	Octubre	11.14	21.15	21.71	45.71	87.22	2.59	0.85	-0.03	0.41
	Noviembre	16.13	25.30	29.93	49.40	92.18	15.46	0.84	-0.18	0.50
	Diciembre	16.75	24.22	33.90	50.15	93.18	28.56	0.76	-0.40	0.48
2004	Enero	38.38	32.70	41.87	16.15	46.73	21.90	0.59	-0.28	0.69
	Febrero	17.09	28.53	30.86	24.20	55.05	7.57	0.83	-0.08	0.50
	Marzo	22.11	27.11	36.10	31.88	63.01	24.89	0.83	-0.33	0.59
	Abril	23.70	30.72	43.03	38.45	70.35	28.62	0.78	-0.40	0.62
	Mayo	26.01	22.40	40.77	41.52	75.62	45.07	0.75	-0.82	0.83
	Junio	49.79	21.81	59.57	45.07	86.97	63.38	0.57	-1.73	1.80
	Julio	18.37	18.61	29.32	48.01	90.49	36.52	0.85	-0.58	0.65
	Agosto	13.33	17.96	19.94	50.28	92.68	9.93	0.84	-0.11	0.46
	Septiembre	12.30	19.45	17.73	53.84	96.46	-9.66	0.88	0.10	0.44
	Octubre	9.36	23.50	22.39	54.37	95.89	-4.97	0.86	0.05	0.26
	Noviembre	18.50	27.59	28.77	60.38	104.36	4.09	0.90	-0.04	0.42

Existen dos factores que pueden influir en la calidad de los resultados de la modelación, estos son las tasas de emisión del contaminante utilizado y los datos meteorológicos. Es por esto, que se analizan cada uno de estos factores en forma independiente mediante un análisis de sensibilidad el cual se presenta a continuación.

7.3 ANALISIS DE SENSIBILIDAD FRENTE A LA VARIACION EN LAS EMISIONES

Uno de los factores que pueden afectar el desempeño de un modelo de dispersión son las tasas de emisión del contaminante considerado, debido a que la modelación entrega subestimaciones de las concentraciones reales, se realiza una modelación de las concentraciones horarias de SO_2 considerando sólo el aumento de las emisiones producidas por las fuentes consideradas, incrementando éstas un 12,5% hasta doblar las emisiones originales, tal como se muestra en la Tabla 7.5.

Tabla 7.5. "Porcentaje de aumento las tasas de emisión"

Porcentaje de incremento sobre las emisiones originales (%)	Emisiones [g/s]			
	Fundición Las Ventanas		AES Gener S.A.	
	Hornos	Planta de ácido	Unidad 1	Unidad 2
12,5	569,1	15,5	3,18	4,37
25	632,3	17,3	3,54	4,85
37,5	695,5	19,0	3,89	5,34
50	758,7	20,7	4,25	5,82
62,5	821,93	22,4	4,60	6,31
75	885,2	24,2	4,95	6,79
87,5	948,4	25,9	5,31	7,28
100	1011,6	27,6	5,66	7,76

Esta modelación se lleva a cabo en las estaciones que entregan los menores y mayores valores de RSME para los años 2003-2004, realizando ambas modelaciones para el mes que entrega el mayor error. De acuerdo a ésto, el análisis de sensibilidad frente a las emisiones se realizó para las estaciones de Valle Alegre en noviembre de 2004 y Los Maitenes en enero de 2004.

En las Figuras 7.33 a la 7.36 se presentan las gráficas de las concentraciones observadas, modeladas y filtradas para el aumento de las emisiones en un 25, 50, 75 y 100% respectivamente en la estación Los Maitenes.

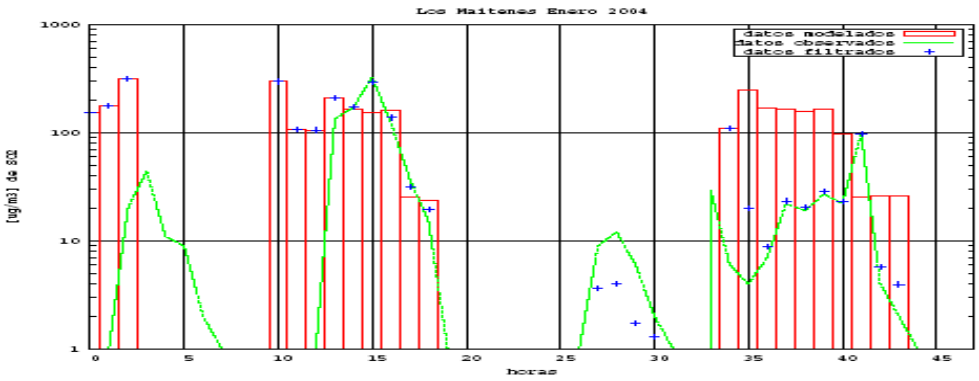


Figura 7.33. "Concentraciones horarias observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para un 25% de aumento de emisión en noviembre de 2004 en Los Maitenes"

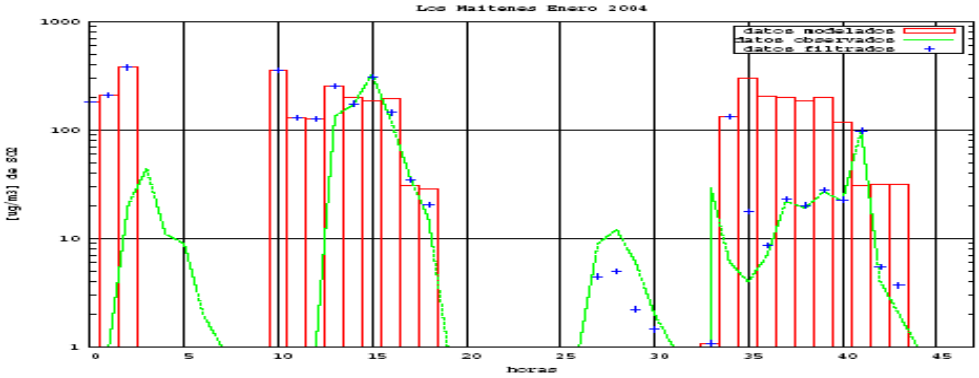


Figura 7.34. "Concentraciones horarias observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para un 50% de aumento de emisión en noviembre de 2004 en Los Maitenes"

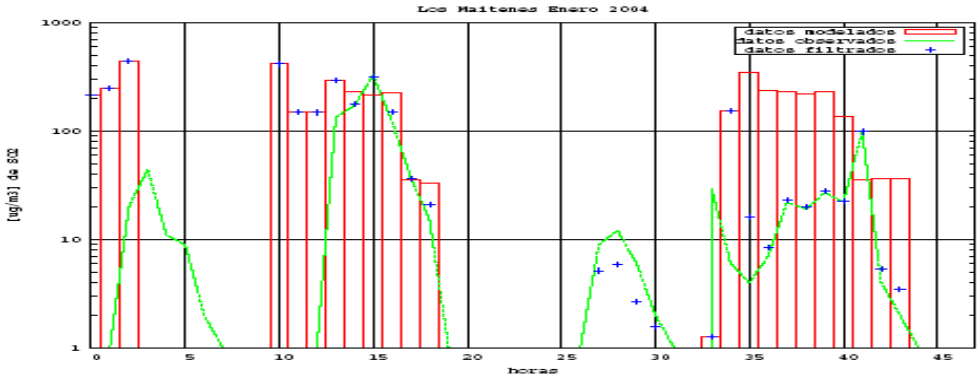


Figura 7.35. "Concentraciones horarias observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para un 75% de aumento de emisión en noviembre de 2004 en Los Maitenes"

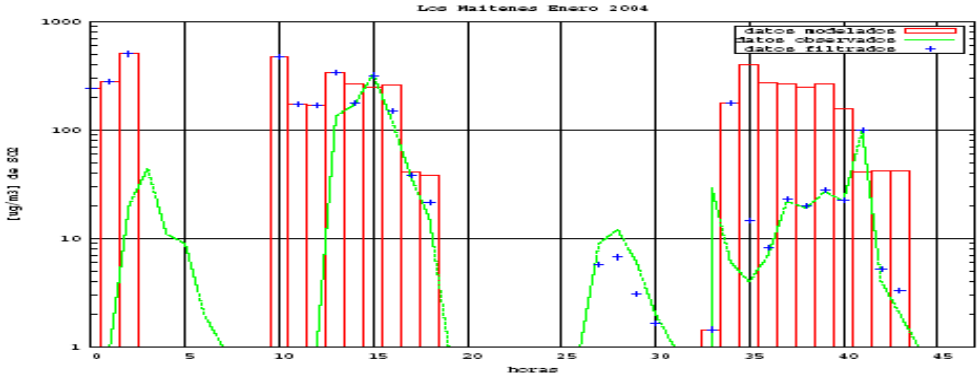


Figura 7.36. "Concentraciones horarias observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para un 100% de aumento de emisión en noviembre de 2004 en Los Maitenes"

En la Figuras 7.33 y 7.34 se observa la misma tendencia para las series de valores observados, modelados y filtrados. En cambio, con respecto a las Figuras 7.35 y 7.36, en estas últimas se observa una tendencia de aumento de las concentraciones modeladas a medida que se incrementa la tasa de emisión, sin embargo, este incremento es muy leve.

A partir de los estimadores presentados en las Tablas 7.6 y 7.7 se observa que a medida que se incrementa la tasa de emisión los datos comienzan a mostrar una mayor dispersión con respecto al promedio, lo cual se refleja en un aumento sostenido de la σ para ambas estaciones.

Por otra parte, para la estación de Valle Alegre la tendencia general del modelo es subestimar las concentraciones observadas, lo cual marca un diferencia con respecto a Los Maitenes que muestra a partir de un aumento de 137.5% una sobre estimación de las concentraciones, entregando un valor de NMD y B_{NMEF} igual a 1,03 para un aumento de 125% lo que indica promedios similares entre ambas series de datos.

Al observar el ajuste entre datos observados y modelados para la estación de Los Maitenes, se observa un leve y sostenido aumento de éste en aproximadamente 0,01 por cada incremento del 12,5% en la tasa de emisión, por lo cual y considerando que se mantiene esta tendencia lineal se logrará un ajuste aceptable (IA=0,5) para un aumento del 310% sobre las emisiones inicialmente consideradas.

Un comportamiento inverso presenta la estación Valle Alegre para la cual el IA disminuye en igual proporción, lo cual se explica debido a que al aumentar las emisiones, se produce un incremento en los promedios de los valores modelados llevando a un menor valor del IA.

En general, se observa que aunque los errores no presentan un comportamiento similar para las estaciones analizadas, si lo hace el IA, con un aumento o disminución del 4% por cada 12,5% de incremento de emisión.

Tabla 7.6. "Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones modeladas con aumento de emisiones en Los Maitenes"

Análisis de Sensibilidad de Emisiones Concentraciones Horarias Modeladas										
Los Maitenes		RMSE	$\overline{P}$	$\overline{O}$	σ_p	σ_o	NMD	IA	B_{NMBF}	E_{NMEF}
% de aumento en las tasa de emisión	12.5	200.35	34.75	42.34	65.04	201.19	0.18	0.23	-0.22	1.43
	25	201.44	38.61	42.34	72.27	201.19	0.09	0.24	-0.10	1.35
	37.5	202.87	42.47	42.34	79.50	201.19	0.00	0.26	0.00	1.28
	50	204.60	46.33	42.34	86.72	201.19	-0.09	0.27	0.09	1.33
	62.5	206.65	50.19	42.34	93.95	201.19	-0.19	0.28	0.19	1.39
	75	209.00	54.05	42.34	101.17	201.19	-0.28	0.29	0.28	1.45
	87.5	211.64	57.91	42.34	108.40	201.19	-0.37	0.30	0.37	1.51
	100	214.56	61.77	42.34	115.63	201.19	-0.46	0.31	0.46	1.58

Tabla 7.7. "Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones modeladas con aumento de emisiones en Valle Alegre"

Análisis de Sensibilidad de Emisiones Concentraciones Horarias Modeladas										
Valle Alegre		RMSE	$\overline{P}$	$\overline{O}$	σ_p	σ_o	NMD	IA	B_{NMBF}	E_{NMEF}
% de aumento en las tasa de emisión	12.5	29.09	5.68	10.45	19.35	22.39	0.46	0.30	-0.84	2.37
	25	30.38	6.32	10.45	21.50	22.39	0.40	0.29	-0.65	2.22
	37.5	31.77	6.95	10.45	23.65	22.39	0.33	0.28	-0.50	2.10
	50	33.25	7.58	10.45	25.80	22.39	0.27	0.27	-0.38	2.00
	62.5	34.82	8.21	10.45	27.95	22.39	0.21	0.26	-0.27	1.92
	75	36.45	8.84	10.45	30.10	22.39	0.15	0.26	-0.18	1.85
	87.5	38.15	9.47	10.45	32.25	22.39	0.09	0.25	-0.10	1.80
	100	39.90	10.11	10.45	34.40	22.39	0.03	0.24	-0.03	1.74

7.4 ANALISIS DE SENSIBILIDAD FRENTE A LA VARIACION DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO

Otro factor que influye en el grado de predicción de un modelo de dispersión atmosférica son las condiciones meteorológicas ya que, es sabido que estos modelos son sensibles a la variación de la velocidad del viento, factor que también influye en la estabilidad atmosférica.

Por este motivo se realiza una modelación horaria en las 5 estaciones de calidad del aire para el mes de enero de 2004. En la Tabla 7.8 se presentan los rangos de velocidad del viento considerados para el análisis.

Tabla 7.8. "Rangos de velocidad del viento"

Rangos de velocidad del viento en [m/s]			
$v < 2$	$2 \leq v < 4$	$4 \leq v < 6$	$6 \geq v$

En las Figuras 7.37 a 7.40 se presentan las gráficas de las concentraciones observadas, modeladas y filtradas para los cuatro rangos de velocidad del viento consideradas para enero de 2004 en la estación Los Maitenes.

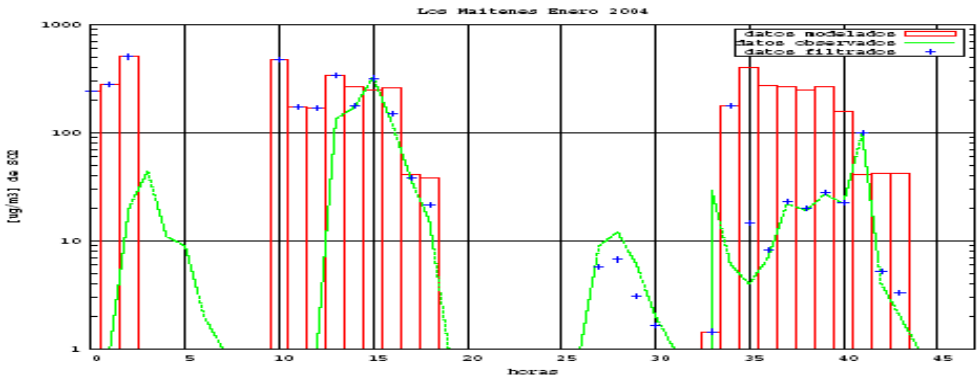


Figura 7.37. "Concentraciones horarias observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para velocidad del viento menor a 2 [m/s] en enero de 2004 en Los Maitenes"

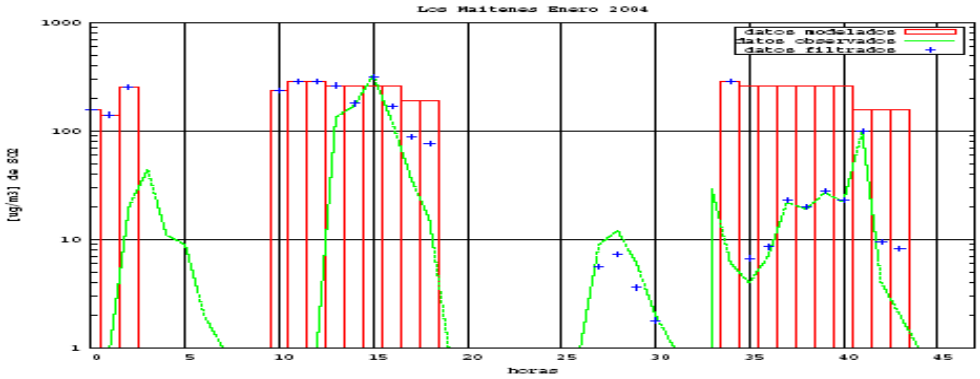


Figura 7.38. "Concentraciones horarias observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para velocidad del viento entre 2 y 4 [m/s] en enero de 2004 en Los Maitenes"

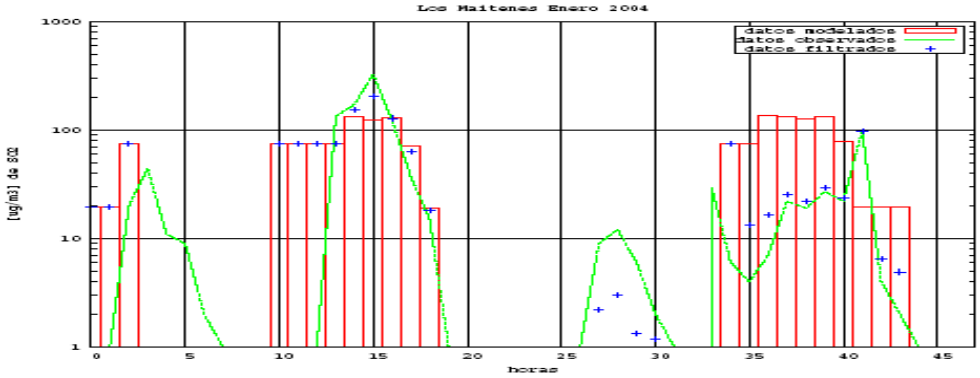


Figura 7.39. "Concentraciones horarias observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para velocidad del viento entre 4 y 6 [m/s] en enero de 2004 en Los Maitenes"

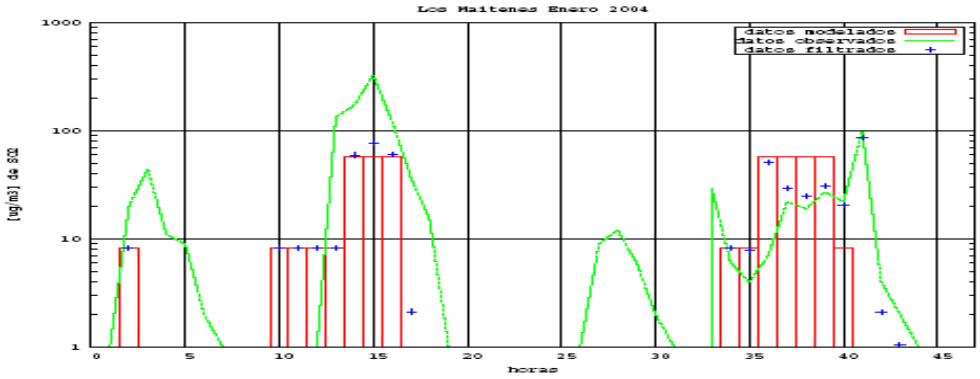


Figura 7.40. "Concentraciones horarias observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para velocidad del viento mayor a 6 [m/s] en enero de 2004 en Los Maitenes"

En general se observa que a medida que aumenta la velocidad del viento, las concentraciones modeladas disminuyen, de este modo en la Figura 7.37 la mayoría de las concentraciones modeladas sobrepasan los 100 [$\mu g/m^3$], sin embargo, para velocidades mayores a 6 [m/s] tal como se muestra en la Figura 7.40 las concentraciones modeladas se encuentran entre los 8 y 80 [$\mu g/m^3$].

Como se observa en las Tablas C.17, C.19 y C.20 presentadas en el Anexo C para las estaciones Sur y La Greda se obtiene un mejor desempeño para velocidades del viento de 4 a 6 [m/s], del mismo modo para Valle Alegre se obtiene el mejor acuerdo para velocidades mayores a 6 [m/s]. Esto en parte explica los altos errores obtenidos para estas estaciones debido a que la mayor parte de las mediciones horarias de velocidad del viento en la estación Principal presenta valores menores a este rango.

En la Tabla 7.9 se observa que para Los Maitenes los mejores resultados se obtienen para velocidades del viento menores a 4 [m/s], lo cual confirma el mejor desempeño del modelo para esta última estación.

En el caso de Puchuncaví y como se observa en la Tabla C.18 presentada en el Anexo C, también se logra un mejor desempeño para velocidades entre 0 y 4 [m/s], sin embargo, el IA es de 0,46 lo cual confirma los resultados obtenidos en la modelación, ya que el IA alcanza un valor promedio de 0,35 para los dos años en estudio.

Tabla 7.9. "Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones modeladas con aumento de velocidad de vientos en Los Maitenes"

Análisis de Sensibilidad Velocidad de Vientos Concentraciones Horarias Modeladas										
Los Maitenes		RMSE	$\overline{P}$	$\overline{O}$	σ_p	σ_o	NMD	IA	B_{NMBF}	E_{NMEF}
Velocidad del viento [m/s]	$v < 2$	207.00	74.73	42.34	106.55	201.19	-0.62	0.51	0.77	1.60
	$2 \leq v < 4$	207.00	74.73	42.34	106.55	201.19	-0.62	0.51	0.77	1.60
	$4 \leq v < 6$	195.54	21.10	42.34	36.96	201.19	0.35	0.35	-1.01	1.89
	$6 \geq v$	201.86	3.69	42.34	10.53	201.19	0.91	0.27	-10.49	10.99

Tabla 7.10. "Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones filtradas con aumento de velocidad de vientos en Los Maitenes"

Análisis de Sensibilidad Velocidad de Vientos Concentraciones Horarias Filtradas										
Los Maitenes		RMSE	$\overline{P}$	$\overline{O}$	σ_p	σ_o	NMD	IA	B_{NMBF}	E_{NMEF}
Velocidad del viento [m/s]	$v < 2$	132.50	45.57	42.34	101.38	201.19	0.07	0.94	0.08	0.47
	$2 \leq v < 4$	132.50	45.57	42.34	101.38	201.19	0.07	0.94	0.08	0.47
	$4 \leq v < 6$	176.25	25.15	42.34	54.15	201.19	0.26	0.60	-0.68	1.02
	$6 \geq v$	200.03	5.80	42.34	15.68	201.19	0.86	0.28	-6.30	6.47

7.5 ANALISIS DE SENSIBILIDAD FRENTE A LA VARIACION DE DIRECCION DE LOS VIENTOS

A partir de los análisis anteriores se observa que la estación que mejor resultados entrega es Los Maitenes, la cual se encuentra localizada al este de las fuentes emisoras, como también, en la dirección en que soplan los vientos la mayor parte del año.

Por esto, se realiza una modelación de concentraciones horarias frente a las distintas direcciones de viento en la estación Los Maitenes, considerando el mes de enero de 2003 en que los vientos se presentan durante el día con un 30,2% de incidencia en dirección Oeste-noroeste y un 26,7% en dirección Oeste, y en la noche con un 28,7% de incidencia en dirección Este, también se analiza el mes de Octubre del mismo año en el cual los vientos durante el día se encuentran distribuidos entre las direcciones Noroeste y Suroeste y en la noche predominantemente en dirección E con un 33,7% de ocurrencia.

En las Figuras 7.41 a la 7.44 se presentan las gráficas de las concentraciones observadas, modeladas y filtradas para el mes de octubre de 2003 en la estación Los Maitenes considerando las principales direcciones de los vientos.

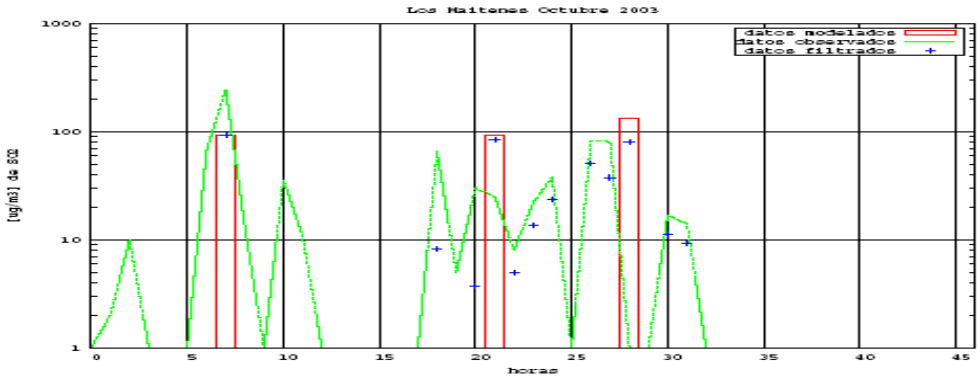


Figura 7.41. "Concentraciones horarias observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para las direcciones Norte-Sur en octubre de 2003 en Los Maitenes"

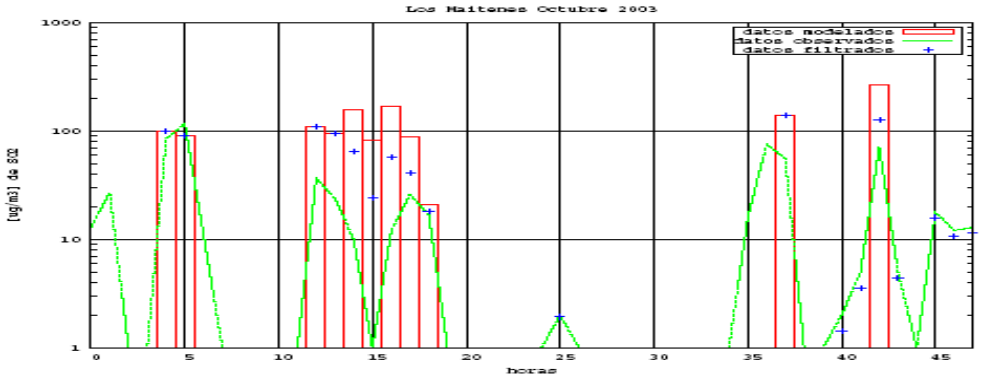


Figura 7.42. "Concentraciones horarias observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para las direcciones Este-Oeste en octubre de 2003 en Los Maitenes"

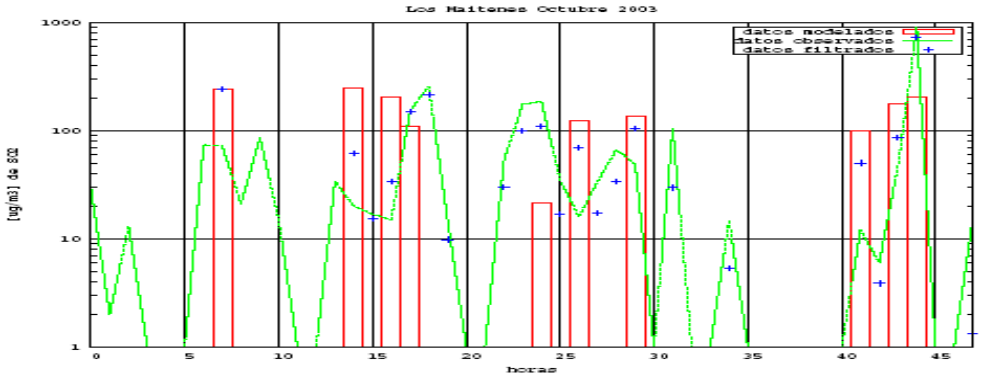


Figura 7.43. "Concentraciones horarias observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para las direcciones Noroeste-Sureste en octubre de 2003 en Los Maitenes"

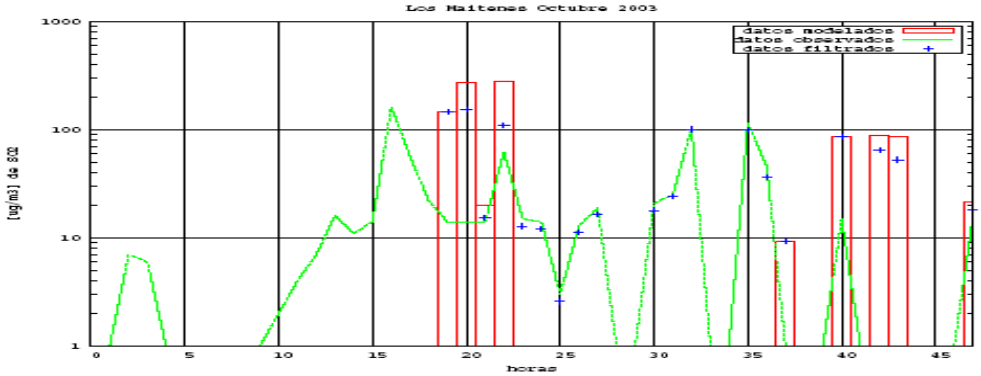


Figura 7.44. "Concentraciones horarias observadas (verde), modeladas (rojo) y filtradas (azul) para las direcciones Suroeste-Noreste en octubre de 2003 en Los Maitenes"

En las Figuras 7.41 y 7.43 se observa que para las líneas de dirección Norte-Sur y Suroeste-Noreste el modelo entrega la mayor cantidad de horas con predicciones de 0 [$\mu g/m^3$].

A su vez, como se muestra en las Figuras 7.42 y 7.43 es posible notar un mejor desempeño del modelo para las direcciones Este-Oeste y Noroeste-Sureste, observándose para la últimas direcciones un mejor ajuste entre las concentraciones observadas y modeladas.

En las Tablas 7.11 y C.25 esta última presentada en el Anexo C, se observa que el mes de octubre de 2003 es el que entrega mejores resultados, por lo cual es el que se emplea en el presente análisis.

En la Tabla 7.11 se observan IA aceptables para las direcciones en la línea Este Oeste, Nor-noroeste con Sur-sureste, Noroeste con Sureste, Oeste-noroeste con Este-sureste y Oeste-suroeste con Este-noreste, presentándose los mas altos valores para las dos primeras direcciones con un valor de 0,75 y 0,68 respectivamente.

En relación a los valores de B_{NMBF} el menor valor se obtiene para la dirección Oeste-noroeste con Este-sureste sobreestimando las concentraciones modeladas 1,06 veces con respecto a las concentraciones observadas, por otro lado, los valores de E_{NMEF} son bajos para las cinco direcciones que presentan mayor IA, con un mínimo de 1,15 para la dirección Nor-noroeste con Sur-sureste.

En general, se puede observar que el modelo ISC3 presenta un mejor desempeño en la dirección Este-Oeste, que es donde se presenta el mayor porcentaje de incidencia de los vientos y donde se localiza la estación Los Maitenes, la cual entrega los mejores resultados tanto para la modelación horaria como del promedio de 24 horas.

Si bien, en las direcciones Noroeste-Sureste y Nor-noroeste con Sur-sureste se obtiene un alto valor de IA, el error para la dirección Noroeste con Sureste es de 1,92, lo cual indica concentraciones modeladas que casi duplican el valor de las reales, por otro lado, el porcentaje de incidencia de vientos en estas direcciones es bajo, lo cual explica que el

resultado de la modelación en la estación Valle Alegre, ubicada entre éstas no sea el mejor.

Para las direcciones en la línea Norte-Sur, Nor-noreste con Sur-suroeste y Noreste con Suroeste, que son en las que se localizan las estaciones La Greda, Sur y Puchuncaví, los valores de IA no son aceptables lo que coincide con la baja incidencia de vientos en estas direcciones y explica el bajo desempeño del modelo en estas tres estaciones.

Tabla 7.11. "Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones modeladas en distintas direcciones de vientos en Los Maitenes"

Análisis de Sensibilidad Dirección de Vientos Concentraciones Horarias Modeladas										
Los Maitenes		RMSE	$\overline{P}$	$\overline{O}$	σ_p	σ_o	NMD	IA	B_{NMBF}	E_{NMEF}
Dirección del viento Octubre 2003	W-E	37.51	12.10	14.89	45.44	35.97	0.19	0.75	-0.23	1.34
	N-S	36.19	6.83	12.45	27.81	22.98	0.45	0.28	-0.83	2.59
	NNW-SSE	43.44	19.55	16.29	54.55	27.64	-0.20	0.68	0.20	1.15
	NW-SE	134.03	32.78	55.79	68.31	144.18	0.41	0.52	-0.70	1.92
	WNW-ESE	56.14	17.84	16.87	54.64	38.23	-0.06	0.50	0.06	1.41
	WSW-ENE	75.04	22.07	23.59	52.99	85.71	0.06	0.63	-0.07	1.24
	SW-NE	56.77	18.89	15.59	54.18	32.05	-0.21	0.37	0.21	1.65
	SSW-NNE	28.92	6.30	8.80	25.93	15.21	0.28	0.25	-0.39	2.03

Tabla 7.12. "Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones filtradas en distintas direcciones de vientos en Los Maitenes"

Análisis de Sensibilidad Dirección de Vientos Concentraciones Horarias Filtradas										
Los Maitenes		RMSE	$\overline{P}$	$\overline{O}$	σ_p	σ_o	NMD	IA	B_{NMBF}	E_{NMEF}
Dirección del viento Octubre 2003	W-E	21.08	13.10	14.89	38.04	35.97	0.12	0.91	-0.14	0.61
	N-S	22.77	10.22	12.45	21.81	22.98	0.18	0.67	-0.22	1.04
	NNW-SSE	19.94	19.58	16.29	38.69	27.64	-0.20	0.90	0.20	0.41
	NW-SE	40.54	45.91	55.79	117.66	144.18	0.18	0.98	-0.22	0.49
	WNW-ESE	39.70	16.57	16.87	41.75	38.23	0.02	0.69	-0.02	0.65
	WSW-ENE	45.96	25.09	23.59	64.17	85.71	-0.06	0.90	0.06	0.71
	SW-NE	36.06	18.33	15.59	36.71	32.05	-0.18	0.64	0.18	0.95
	SSW-NNE	22.32	8.88	8.80	24.62	15.21	-0.01	0.58	0.01	0.83

CAPITULO 8

CONCLUSIONES

A partir del trabajo realizado es posible concluir lo siguiente:

- El modelo ISC3 es capaz de predecir concentraciones horarias y promedio de 24 horas de anhídrido sulfuroso en la Comuna de Puchuncavi, mostrando un mejor desempeño en la predicción de concentraciones promedio.

- El modelo ISC3 muestra una tendencia a subestimar las concentraciones modeladas en las 5 estaciones de calidad del aire, siendo ésta más marcada en las estaciones Sur y Puchuncaví, tendencia que se presenta tanto para la modelación de concentraciones horarias como de promedios de 24 horas.

- Para la modelación de concentraciones horarias la estación que presenta mejores resultados es Los Maitenes y aunque los valores de raíz del error cuadrático medio (RMSE) son los más altos dentro de las estaciones en estudio, se observan índices de acuerdo (IA) superiores a 0,5; la menor subestimación de las concentraciones observadas y menores diferencias relativas en comparación con las 4 estaciones restantes.

- Para la modelación de los promedios de 24 horas Los Maitenes también presenta un mejor desempeño, y aunque la tendencia general de las restantes 4 estaciones es presentar valores de índice de acuerdo menores a 0,5; para La Greda y Valle Alegre es posible observar meses con muy buen desempeño.

- El hecho de que la estación Los Maitenes se encuentre localizada en la dirección en que los vientos soplan con mayor frecuencia, es uno de los principales factores que influyen en el mejor desempeño que el modelo presenta para esta estación.

- Otro factor que influye en el menor desempeño del modelo en tres de las cinco estaciones, está en relación directa con la velocidad de los vientos, debido a que

en las estaciones Sur, La Greda y Valle Alegre el modelo entrega mejores resultados para velocidades mayores a 4 [m/s], rango de velocidades de viento menos predominantes dentro de los datos meteorológicos medidos en la estación Principal.

- En general, el modelo ISC3 entrega un desempeño aceptable (IA≥0,5) en la estación Los Maitenes para los años 2003 y 2004, como también, muy buen ajuste para algunos meses en La Greda y Valle Alegre, en la modelación de las concentraciones horarias de anhídrido sulfuroso.

- En cuanto a la modelación de concentraciones promedio de 24 horas, el modelo ISC3 es capaz de predecir concentraciones de anhídrido sulfuroso con menor error y mayor índice de acuerdo (IA) para todas las estaciones, presentando un mejor desempeño en tres de las cinco estaciones consideradas.

- Por su parte, el empleo del filtro Kalman mejora en gran medida las concentraciones modeladas, minimizando el error y aumentando el ajuste de los datos, obteniendo elevados valores de IA en tres de las cinco estaciones de calidad del aire para la modelación horaria, y para todas las estaciones en la modelación de concentraciones promedio.

- En resumen, el modelo ISC3 predice con menor error concentraciones promedio de 24 horas que concentraciones horarias. Siendo mucho más aplicable en la modelación de concentraciones en puntos localizados en la dirección predominante de los vientos, que en la obtención de una visión global de las concentraciones de anhídrido sulfuroso en la comuna de Puchuncaví.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] www.crid.or.cr/. Anexo L. Programas Internacionales.

[2] www.epa.gov/ttn/atw/.Evaluación de exposiciones de contaminantes tóxicos del aire. Agencia de protección ambiental de EE.UU (EPA).

[3] www.minmineria.latlink.net. Producción limpia en el sector minero.

[4] Gobierno de Chile, Comisión Nacional del Medio Ambiente. 2003. Evaluación Plan de Descontaminación de Ventanas.

[5] Ministerio Secretaría General de la Presidencia, D.S. Nº113/2002. Norma de calidad primaria del aire para dióxido de azufre.

[6] Ministerio de Minería, D.S. Nº185/1991. Decreto que regula a los establecimientos y fuentes emisoras de anhídrido sulfuroso, material particulado o arsénico.

[7] www.epa.gov/airtrends/sixpoll.html. Six principal pollutants. Agencia de protección ambiental de los EE.UU (EPA).

[8] www.epa.gov/airtrends/suAglphur.html. Sulfur dioxide. Agencia de Protección ambiental de los EE.UU (EPA).

[9] Xavier Doménech. 1995. Química Atmosférica: Origen y efectos de la contaminación. Ediciones Miraguano. Páginas 59-62, 87-110.

[10] www.ucm,es/eprints/4622/. Silvia Nuñez. 2002. Memoria para optar al título de Doctor. Altura de la capa de mezcla: Caracterización experimental y aplicación de un modelo meteorológico para el estudio de su evolución diurna. Universidad Complutense de Madrid.

[11] Elsom Derek. 1990. La Contaminación Atmosférica. Editorial Cátedra. Páginas 97-114.

[12] Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Curso de autoinstrucción: Conceptos básicos sobre la meteorología de la contaminación del aire. Lección 4: Circulación vertical y estabilidad atmosférica. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS).

[13] Gerard Kiely. 1999. Ingeniería Ambiental: Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión. Editorial McGraw-Hill. Páginas 453-520.

[14] www.meteochile.cl. Dirección Meteorológica de Chile. Ayuda al estudiante.

[15] Ambar S.A. 2002. Estudio de Impacto ambiental: Uso de carbón de petróleo en los Hornos 8 y 9 de la Planta Industrial La Calera de Empresas Melón S.A.

[16] Pacific Environmental Services. 1995. Users Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models. Volumen II: Descripción de los algoritmos del modelo. Agencia de protección ambiental de EE.UU. (EPA).

[17] Steve Hanna, Bruce Egan, John Purdum y Jen Wagler. Evaluation of the ADMS, AERMOD, and ISC3 Dispersion Models with the OPTEX, DUKE, FOREST, KINCAID, INDIANAPOLIS, and LOVETT field data sets. Páginas 2-3.

[18] Rudolph Randy, Fellin Phil, Tang You-Zhi, Davis Claude, Davies Mervyn y Warren Kevin. 1998. Métodos de monitoreo para evaluar la calidad del aire urbano. Asociación Regional de Empresas de Petróleo y Gas Natural en Latinoamérica y el Caribe (ARPEL).

[19] Petersen Ronald, Cochran Brad y Carter John. 2000. Comparison of ISC3 and Prime Model Predictions Against Wind Tunnel Observations. Reporte presentado en la 93rd Conferencia Annual y Exhibición de “Air & Waste Management Associations”, Ciudad Salt Lake. Páginas 1-2.

[20] www.sc.doe.gov/sc-80/pub/cap-88/mathmodl.pdf. Barry Parks. 1997. Mathematical models in CAP-88.PC. Departamento de energía de EE.UU

[21] Pacific Environmental Services. 1995. Users Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models. Volumen I: Instrucciones para el usuario. Agencia de protección ambiental de EE.UU. (EPA).

[22] www.bccr.fi.cr. Álvaro Solera Ramírez. 2003. El Filtro de Kalman. Banco Central de Costa Rica

[23] http://vision.ee.pusan.ac.kr/. Greg Welch y Gary Bishop. 2004. An Introduction to the Kalman filter. University of North Carolina at Chapel Hill.

[24] www.ine.cl. Instituto Nacional de Estadísticas.

[25] Claudia Mena Rojas. 1996. Tesis para optar al título de Ingeniero Industrial. Análisis de la situación ambiental en la zona de Puchuncaví producida por la minería y sus perspectivas. Universidad Técnica Federico Santa María.

[26] www.ecolideres.cl/suelo/problema.htm.

[27] María Carolina Silva Báez. 2003. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil Químico. Análisis del impacto de las emisiones de SO_2 en el Valle de Aconcagua, Sector La Calera. Universidad Técnica Federico Santa María.

[28] Diego Sevilla Ruiz. 1999. Programación en Perl: Programación para Internet: Perl & CGI.

[29] www.cicei.com. Introducción al Perl.

[30] Knut Gronskei, Frederick Gram, Steinar Larssen y Sam-Erik Walker. 2001. Evaluation of urban scale time-dependent dispersion model with subgrid elements in Oslo, Norway. Norsk institutt for luftforskning.

[31] Shocai Yu, Brian Eder, Robin Dennis, Shao-hang Chu, Stephen Schwartz. New unbiased symmetric metrics for evaluation of the air quality model. Office of air quality planning and standars. U.S EPA.

[32] Ninive Barraza. 1998. Modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos: comparación de desempeños en zona de Ventanas, V Región.

ANEXO A

Tabla A.1. "Parámetros utilizados para calcular σ_y de Pasquill-Gifford" [16]

Parámetros utilizados para calcular σ_y de Pasquill-Gifford		
Categoría de Estabilidad de Pasquill	$\sigma_y = 465.11628(x)\tan(TH)$	
	$TH = 0.017453293[c - d\ln(x)]$	
	C	D
A	24.1670	2.5334
B	18.3330	1.8096
C	12.5000	1.0857
D	8.3330	0.72382
E	6.2500	0.54287
F	4.1667	0.36191

Tabla A.2. "Parámetros utilizados para calcular la σ_z de Pasquill-Gifford" [16]

Parámetros utilizados para calcular la σ_z de Pasquill-Gifford			
Categoría de Estabilidad de Pasquill	$\sigma_z\ en\ metros = ax^b \quad (x\ en\ km)$		
	x (km)	A	B
A*	<.10	122.800	0.94470
	0.10 – 0.15	158.080	1.05420
	0.16 – 0.20	170.220	1.09320
	0.21 – 0.25	179.520	1.12620
	0.26 – 0.30	217.410	1.26440
	0.31 – 0.40	258.890	1.40940
	0.41 – 0.50	346.750	1.72830
	0.51 – 3.11	453.850	2.11660
	>3.11	**	**
B*	<0.20	90.673	0.93198
	0.21 – 0.40	98.483	0.98332

	>0.40	109.300	1.09710
C*	Todos	61.141	0.91465
D*	<0.30	34.459	0.86974
	0.31 – 1.00	32.093	0.81066
	1.01 – 3.00	32.093	0.64403
	3.01 – 10.00	33.504	0.60486
	10.01 – 30.00	36.650	0.56589
	>30.00	44.053	0.51179
E	<0.10	24.260	0.83660
	0.10 – 0.30	23.331	0.81956
	0.31 – 1.00	21.628	0.75660
	1.01 – 2.00	21.628	0.63077
	2.01 – 4.00	22.534	0.57154
	4.01 – 10.00	24.703	0.50527
	10.01 – 20.00	26.970	0.46713
	20.01 – 40.00	35.420	0.37615
	>40.00	47.618	0.29592
F	<0.20	15.209	0.81558
	0.21 – 0.70	14.457	0.78407
	0.71 – 1.00	13.953	0.68465
	1.01 – 2.00	13.953	0.63227
	2.01 – 3.00	14.823	0.54503
	3.01 – 7.00	16.187	0.46490
	7.01 – 15.00	17.836	0.41507
	15.01 – 30.00	22.651	0.32681
	30.01 – 60.00	27.074	0.27436
	>60.00	34.219	0.21716

* Si el valor calculado σ_z excede los 5000 [m], σ_z es igual a 5000 [m].

** σ_z es igual a 5000 [m].

Tabla A.3. "Fórmulas de Briggs utilizadas para calcular σ_y de McElroy-Pooler" [16]

Fórmulas de Briggs utilizadas para calcular σ_y de McElroy-Pooler	
Categoría de Estabilidad de Pasquill	σ_z (metros)*
A	$0.32\times(1.0+0.0004x)^{-1/2}$
B	$0.32\times(1.0+0.0004x)^{-1/2}$
C	$0.22\times(1.0+0.0004x)^{-1/2}$
D	$0.16\times(1.0+0.0004x)^{-1/2}$
E	$0.11\times(1.0+0.0004x)^{-1/2}$
F	$0.11\times(1.0+0.0004x)^{-1/2}$

* Donde x está en [m]

Tabla A.4. "Fórmulas de Briggs utilizadas para calcular la σ_z de McElroy-Pooler" [16]

Fórmulas de Briggs utilizadas para calcular la σ_z de McElroy-Pooler	
Categoría de Estabilidad de Pasquill	σ_z (metros)*
A	$0.24\times(1.0+0.001x)^{-1/2}$
B	$0.24\times(1.0+0.001x)^{-1/2}$
C	$0.20x$
D	$0.14\times(1.0+0.0003x)^{-1/2}$
E	$0.08\times(1.0+0.0015x)^{-1/2}$
F	$0.08\times(1.0+0.0015x)^{-1/2}$

* Donde x está en [m]

ANEXO B

B.1 Programa en Perl para el cálculo de concentraciones filtradas y obtención gráfica de resultados en Gnuplot. [28,29]

```
#!/usr/bin/perl

# Conversión de archivos de datos observados y modelados a arreglos.
        open(IN1, "<modelados.txt");
        open(IN2, "<reales.txt");
        open(OUT1,">f0103_0.txt");
        read(IN1,$b,200000);
        read(IN2,$c,200000);
        @lista1=split(/\n/,$b);
        @lista2=split(/\n/,$c);
                for ($j=0;$j<=730;$j++){
                        $m=0; $m1=0; $n=0; $n1=0;
                for ($i=$j;$i<=$j+13;$i++){
                        $m=$m+$lista1[$i]; $m1=$m1+$lista2[$i];
                        $p=($m/14)**2; $p1=($m1/14)**2;
                        $n=$n+$lista1[$i]**2; $n1=$n1+$lista2[$i]**2;
                        $pc=$n/14; $pc1=$n1/14;
                        $t=$pc-$p; $t1=$pc1-$p1;
                }
                print OUT1 "$t1\n$t\n";
        }
        close (IN1); close (IN2); close (OUT1);

# Cálculo del filtro Kalman

        open(IN, "<f0103_0.txt");
        open(OUT,">f0103_1.txt");
        read(IN,$b,200000);
```

```
@lista=split(/\n/,$b);
        for ($i=0; $i<=730; $i++) {
                $g=($lista[$i*2]+$lista[$i*2+1]);
                if ($g != 0){
                $k=$lista[$i*2+1]/$g;
        print OUT "$k\n";
        }
        else {
                $k=0;
        print OUT "$k\n";
        }
}
close (IN); close (OUT);

open(IN1,"<m0103_1.txt");
open(IN2,"<r0103_1.txt");
open(IN3,"<f0103_1.txt");
open(OUT,">f0103_2.txt");
read(IN1,$b,200000);
read(IN2,$c,200000);
read(IN3,$d,200000);
@lista1=split(/\n/,$b);
@lista2=split(/\n/,$c);
@lista3=split(/\n/,$d);
        for ($i=0; $i<=13; $i++) {
                print OUT "$lista1[$i]\n";
        }
        for ($i=0; $i<=729; $i++) {
                $funcion=($lista1[$i+14]+$lista3[$i]*($lista2[$i+14]-lista1[$i+14]));
        print OUT "$funcion\n";
        }
close (IN1); close (IN2); close (IN3); close (OUT);
```

Gráfica de las concentraciones observadas, modeladas y filtradas, utilizando el programa GNUPLOT

```
$ENV{GDFONTPATH} = "/usr/bin/gnuplot";

        open (GNUPLOT, "|gnuplot");
        print GNUPLOT <<EOPLOT;
        set term post color "Courier" 12
        set title "Los Maitenes Enero 2003"
        set logscale y
        set xrange [0:743]
        set yrange [1:1400]
        set xlabel "horas"
        set ylabel "[ug/m3] de SO2"
        set output "lm0103.ps"
        set size 1 ,1
        set nokey
        set grid
        set key right box
        plot "m0103_1.txt" title "datos modelados" with boxes,"r0103_1.txt" title "datos
        observados" with lines, "f0103_2.txt" title "datos filtrados" with points
        EOPLOT
        close(GNUPLOT);
```

ANEXO C

Tabla C.1. "Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones horarias modeladas en Sur"

Concentraciones Horarias Modeladas										
Sur		RMSE	$\overline{P}$	$\overline{O}$	σ_p	σ_o	NMD	IA	B_{NMBF}	E_{NMEF}
2003	Enero	55.94	5.89	19.51	34.95	43.48	69.80	0.29	-2.31	3.97
	Febrero	39.45	4.73	8.97	31.81	22.97	47.23	0.15	-0.90	2.80
	Marzo	50.77	8.88	21.58	40.59	33.30	58.85	0.39	-1.43	2.98
	Abril	97.68	2.92	43.70	25.52	86.37	93.32	0.31	-13.97	15.31
	Mayo	105.48	7.36	49.29	34.66	90.41	85.07	0.31	-5.70	7.09
	Junio	94.60	9.10	47.30	38.36	77.12	80.75	0.31	-4.20	5.63
	Julio	97.23	2.96	45.78	23.17	84.25	93.54	0.33	-14.47	15.82
	Agosto	86.51	4.97	37.11	31.69	73.45	84.32	0.29	-6.46	8.07
	Septiembre	64.54	7.34	28.82	38.13	48.13	74.54	0.30	-2.93	4.57
	Octubre	59.06	6.58	27.04	34.41	45.57	75.65	0.31	-3.11	4.61
	Noviembre	49.37	4.79	26.50	29.54	33.88	81.93	0.33	-4.53	6.17
	Diciembre	84.41	2.70	33.23	23.80	75.74	91.86	0.23	-11.29	12.80
2004	Enero	42.07	4.13	23.91	26.83	28.48	82.71	0.36	-4.78	6.31
	Febrero	38.67	5.96	9.75	32.58	24.52	38.87	0.29	-0.64	2.33
	Marzo	75.29	9.36	25.54	41.22	62.98	63.37	0.29	-1.73	3.28
	Abril	58.82	3.79	24.76	27.55	47.37	84.69	0.30	-5.53	7.23
	Mayo	84.41	4.10	41.47	27.88	69.74	90.10	0.35	-9.10	10.74
	Junio	110.26	4.13	62.35	27.26	91.81	93.38	0.41	-14.11	14.98
	Julio	90.66	8.99	45.53	34.86	78.50	80.26	0.38	-4.06	5.19
	Agosto	46.84	3.89	14.89	24.69	39.35	73.88	0.27	-2.83	4.42
	Septiembre	71.59	14.80	16.59	50.04	53.14	10.79	0.22	-0.12	1.78
	Octubre	42.54	3.02	13.78	25.86	31.95	78.05	0.23	-3.56	5.43
	Noviembre	62.75	6.68	15.68	37.52	49.40	57.38	0.13	-1.35	3.19

Tabla C.2. "Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones horarias modeladas en Puchuncaví"

Concentraciones Horarias Modeladas										
Puchuncaví		RMSE	$\overline{P}$	$\overline{O}$	σ_p	σ_o	NMD	IA	B_{NMBF}	E_{NMEF}
2003	Enero	25.44	2.75	13.73	9.12	21.82	79.94	0.37	-3.99	5.14
	Febrero	19.23	2.32	8.48	6.73	16.62	72.65	0.25	-2.66	4.05
	Marzo	31.33	3.14	13.91	9.83	29.15	77.44	0.32	-3.43	4.63
	Abril	44.08	3.71	25.04	11.01	39.20	85.20	0.37	-5.75	6.57
	Mayo	43.13	2.17	16.96	8.01	41.56	87.23	0.25	-6.83	7.58
	Junio	17.86	2.68	10.48	8.96	15.88	74.38	0.45	-2.90	3.75
	Julio	19.88	1.82	11.88	6.91	17.10	84.70	0.37	-5.54	6.28
	Agosto	24.41	1.95	13.66	6.87	21.99	85.75	0.36	-6.02	6.75
	Septiembre	31.81	1.73	20.36	6.00	26.64	91.51	0.38	-10.77	11.26
	Octubre	26.72	2.95	16.93	8.06	22.59	82.56	0.37	-4.74	5.54
	Noviembre	32.28	3.27	16.68	7.85	29.45	80.41	0.34	-4.11	4.79
	Diciembre	39.33	3.49	25.51	7.96	32.76	86.33	0.41	-6.31	6.82
2004	Enero	75.24	3.46	36.57	9.46	68.30	90.55	0.36	-9.58	10.35
	Febrero	41.08	2.64	23.95	8.28	35.70	88.98	0.41	-8.08	8.67
	Marzo	38.63	2.25	19.96	8.19	34.12	88.72	0.36	-7.87	8.96
	Abril	64.08	2.99	42.84	10.07	49.56	93.01	0.43	-13.31	13.93
	Mayo	49.01	1.57	20.35	6.34	46.77	92.27	0.31	-11.94	12.55
	Junio	77.16	2.59	31.82	8.91	71.45	91.86	0.27	-11.28	12.14
	Julio	37.11	2.21	16.95	8.68	35.45	86.95	0.34	-6.66	7.51
	Agosto	34.56	2.77	12.28	9.75	32.51	77.46	0.22	-3.44	4.59
	Septiembre	15.28	1.92	10.32	6.05	13.16	81.36	0.43	-4.36	5.06
	Octubre	26.31	4.37	19.63	10.79	19.86	77.74	0.39	-3.49	4.35
	Noviembre	19.59	4.82	15.36	11.23	12.85	68.59	0.33	-2.18	3.10

Tabla C.3. "Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones horarias modeladas en Valle Alegre"

Concentraciones Horarias Modeladas										
Valle Alegre		RMSE	$\overline{P}$	$\overline{O}$	σ_p	σ_o	NMD	IA	B_{NMBF}	E_{NMEF}
2003	Enero	16.04	4.51	6.85	15.25	5.98	34.26	0.31	-0.52	2.05
	Febrero	14.68	3.38	5.03	14.10	4.71	32.87	0.23	-0.49	2.20
	Marzo	15.75	4.39	4.34	15.23	5.23	-1.06	0.23	0.01	1.76
	Abril	14.24	2.74	8.00	13.34	8.43	65.79	0.52	-1.92	3.19
	Mayo	14.48	2.76	8.18	12.18	8.50	66.26	0.44	-1.96	3.35
	Junio	17.22	2.39	9.48	13.21	11.30	74.76	0.42	-2.96	4.43
	Julio	14.38	3.00	6.81	14.17	5.16	55.91	0.38	-1.27	2.85
	Agosto	14.60	3.16	5.22	13.36	6.00	39.51	0.26	-0.65	2.39
	Septiembre	16.04	2.25	9.51	10.02	12.74	76.38	0.48	-3.23	4.26
	Octubre	15.26	3.50	6.62	13.32	7.47	47.13	0.31	-0.89	2.49
	Noviembre	15.16	3.69	4.78	14.59	4.48	22.83	0.19	-0.30	2.04
	Diciembre	18.07	3.74	10.48	13.27	10.66	64.30	0.25	-1.80	3.27
2004	Enero	15.85	3.39	9.32	13.99	4.88	63.65	0.22	-1.75	3.33
	Febrero	13.97	2.99	4.77	12.91	5.34	37.40	0.25	-0.60	2.37
	Marzo	17.24	4.10	12.96	14.13	6.97	68.37	0.31	-2.16	3.42
	Abril	16.52	2.95	9.67	13.70	8.17	69.49	0.38	-2.28	3.75
	Mayo	12.90	2.69	1.42	12.81	4.02	-89.12	0.21	0.89	2.56
	Junio	12.82	2.26	4.67	12.79	6.73	51.58	0.47	-1.07	2.55
	Julio	12.32	1.51	6.78	8.54	8.22	77.79	0.40	-3.50	4.89
	Agosto	10.68	2.05	3.99	10.19	3.99	48.57	0.26	-0.94	2.57
	Septiembre	12.99	2.36	3.72	12.53	3.38	36.62	0.16	-0.58	2.35
	Octubre	18.63	4.05	8.99	15.98	11.25	54.96	0.40	-1.22	2.65
	Noviembre	27.92	5.05	10.45	17.20	22.39	51.63	0.30	-1.07	2.56

Tabla C.4. "Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones horarias modeladas en La Greda"

Concentraciones Horarias Modeladas										
La Greda		RMSE	$\overline{P}$	$\overline{O}$	σ_p	σ_o	NMD	IA	B_{NMBF}	E_{NMEF}
2003	Enero	76.02	15.83	8.12	75.61	15.13	-94.88	0.09	0.95	2.67
	Febrero	65.66	15.01	2.91	65.71	8.21	-415.11	0.10	4.15	5.49
	Marzo	106.51	28.60	14.02	99.68	58.23	-103.95	0.31	1.04	2.52
	Abril	73.18	15.71	14.00	70.16	25.93	-12.18	0.15	0.12	1.86
	Mayo	52.71	5.82	14.34	41.23	36.28	59.40	0.27	-1.46	3.01
	Junio	74.58	12.03	19.92	67.00	31.16	39.61	0.12	-0.66	2.45
	Julio	88.31	23.19	29.06	80.32	83.85	20.20	0.61	-0.25	1.45
	Agosto	97.63	21.09	26.77	80.94	77.82	21.22	0.43	-0.27	1.72
	Septiembre	97.00	27.09	31.65	94.03	74.70	14.40	0.56	-0.17	1.48
	Octubre	65.42	14.60	9.85	64.25	15.41	-48.20	0.09	0.48	2.20
	Noviembre	71.74	16.13	11.05	71.54	18.49	-45.97	0.15	0.46	2.09
	Diciembre	65.42	15.72	14.74	65.79	30.25	-6.65	0.35	0.08	1.59
2004	Enero	90.78	16.81	12.34	81.54	48.06	-36.27	0.18	0.36	2.09
	Febrero	66.22	12.49	7.37	61.51	30.72	-69.46	0.19	0.69	2.43
	Marzo	73.16	13.25	13.59	70.48	27.54	2.51	0.17	-0.03	1.80
	Abril	79.14	18.35	25.66	74.32	43.65	28.50	0.36	-0.40	1.95
	Mayo	87.82	15.33	21.98	74.94	45.11	30.24	0.14	-0.43	2.26
	Junio	93.64	13.10	34.69	66.18	68.96	62.23	0.34	-1.65	3.25
	Julio	83.06	18.29	21.12	71.36	62.18	13.38	0.42	-0.15	1.62
	Agosto	74.14	14.59	10.17	68.82	42.99	-43.48	0.31	0.43	1.98
	Septiembre	91.62	25.68	10.82	92.05	40.71	-137.34	0.35	1.37	2.59
	Octubre	76.93	21.07	9.68	79.24	26.69	-117.69	0.32	1.18	2.46
	Noviembre	90.35	25.28	8.68	91.18	29.46	-191.07	0.26	1.91	3.18

Tabla C.5. "Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones horarias filtradas en Sur"

Concentraciones Horarias Filtradas										
Sur		RMSE	$\overline{P}$	$\overline{O}$	σ_p	σ_o	NMD	IA	B_{NMBF}	E_{NMEF}
2003	Enero	39.32	10.61	19.51	38.80	43.48	45.63	0.74	-0.84	1.49
	Febrero	33.30	3.43	8.97	24.15	22.97	61.75	0.20	-1.61	3.03
	Marzo	35.99	9.11	21.58	29.29	33.30	57.76	0.63	-1.37	1.93
	Abril	92.74	6.33	43.70	27.95	86.37	85.52	0.37	-5.91	6.42
	Mayo	99.18	11.38	49.29	34.04	90.41	76.91	0.38	-3.33	3.96
	Junio	84.01	13.88	47.30	35.49	77.12	70.65	0.43	-2.41	2.99
	Julio	96.22	3.68	45.78	19.02	84.25	91.96	0.33	-11.44	12.11
	Agosto	82.43	5.82	37.11	25.37	73.45	84.32	0.32	-5.38	6.06
	Septiembre	50.79	12.78	28.82	37.85	48.13	55.66	0.59	-1.26	1.80
	Octubre	52.15	9.73	27.04	28.42	45.57	64.04	0.40	-1.78	2.29
	Noviembre	44.14	7.40	26.50	24.65	33.88	72.08	0.39	-2.58	3.18
	Diciembre	83.00	5.51	33.23	23.34	75.74	83.42	0.24	-5.03	5.68
2004	Enero	35.20	6.53	23.91	23.68	28.48	72.67	0.53	-2.66	3.16
	Febrero	33.15	5.42	9.75	26.85	24.52	44.38	0.39	-0.80	1.90
	Marzo	61.67	11.72	25.54	38.56	62.98	54.13	0.55	-1.18	1.93
	Abril	54.81	4.49	24.76	25.89	47.37	81.87	0.39	-4.51	5.44
	Mayo	79.48	5.53	41.47	26.35	69.74	86.66	0.42	-6.50	7.22
	Junio	102.90	7.61	62.35	30.60	91.81	87.79	0.48	-7.19	7.54
	Julio	84.38	11.14	45.53	33.21	78.50	75.53	0.46	-3.09	3.62
	Agosto	42.93	4.68	14.89	21.57	39.35	68.60	0.37	-2.18	3.07
	Septiembre	53.54	7.99	16.59	29.70	53.14	51.85	0.45	-1.08	1.95
	Octubre	35.78	5.44	13.78	26.78	31.95	60.54	0.53	-1.53	2.36
	Noviembre	55.60	6.01	15.68	24.80	49.40	61.70	0.17	-1.61	2.52

Tabla C.6. "Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones horarias filtradas en Puchuncaví"

Concentraciones Horarias Filtradas										
Puchuncaví		RMSE	$\overline{P}$	$\overline{O}$	σ_p	σ_o	NMD	IA	B_{NMBF}	E_{NMEF}
2003	Enero	21.39	5.06	13.73	10.29	21.82	63.12	0.55	-1.71	2.12
	Febrero	17.39	2.90	8.48	5.38	16.62	65.76	0.35	-1.92	2.23
	Marzo	28.74	4.08	13.91	9.13	29.15	70.70	0.42	-2.41	2.83
	Abril	41.90	5.62	25.04	10.34	39.20	77.54	0.40	-3.45	3.68
	Mayo	40.26	4.02	16.96	10.84	41.56	76.31	0.38	-3.22	3.52
	Junio	13.06	4.83	10.48	11.02	15.88	53.89	0.75	-1.17	1.46
	Julio	17.65	3.61	11.88	8.34	17.10	69.57	0.52	-2.29	2.55
	Agosto	22.45	4.09	13.66	8.36	21.99	70.08	0.45	-2.34	2.64
	Septiembre	28.98	4.50	20.36	9.09	26.64	77.90	0.46	-3.52	3.66
	Octubre	22.19	5.17	16.93	10.80	22.59	69.45	0.59	-2.27	2.49
	Noviembre	27.67	5.61	16.68	11.88	29.45	66.35	0.56	-1.97	2.24
	Diciembre	36.45	6.09	25.51	9.49	32.76	76.12	0.46	-3.19	3.43
2004	Enero	68.49	7.48	36.57	19.33	68.30	79.56	0.47	-3.89	4.11
	Febrero	38.90	4.74	23.95	9.96	35.70	80.21	0.44	-4.05	4.30
	Marzo	36.41	3.45	19.96	9.55	34.12	82.71	0.43	-4.78	5.23
	Abril	57.89	8.19	42.84	18.65	49.56	80.87	0.52	-4.23	4.42
	Mayo	46.54	2.81	20.35	11.62	46.77	86.20	0.41	-6.25	6.52
	Junio	74.37	5.48	31.82	12.95	71.45	82.78	0.31	-4.81	5.08
	Julio	35.30	3.60	16.95	10.16	35.45	78.75	0.41	-3.71	4.10
	Agosto	31.44	4.32	12.28	12.37	32.51	64.81	0.41	-1.84	2.25
	Septiembre	12.84	3.58	10.32	7.26	13.16	65.28	0.62	-1.88	2.06
	Octubre	21.74	7.90	19.63	10.27	19.86	59.77	0.52	-1.49	1.65
	Noviembre	14.00	8.86	15.36	9.57	12.85	42.31	0.57	-0.73	0.89

Tabla C.7. "Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones horarias filtradas en Valle Alegre"

Concentraciones Horarias Filtradas										
Valle Alegre		RMSE	$\overline{P}$	$\overline{O}$	σ_p	σ_o	NMD	IA	B_{NMBF}	E_{NMEF}
2003	Enero	8.50	5.24	6.85	9.27	5.98	23.53	0.63	-0.31	0.73
	Febrero	8.29	4.21	5.03	8.85	4.71	16.24	0.54	-0.19	0.69
	Marzo	8.35	3.88	4.34	9.25	5.23	10.55	0.59	-0.12	0.67
	Abril	8.94	4.60	8.00	10.54	8.43	42.54	0.76	-0.74	1.10
	Mayo	11.04	3.58	8.18	9.39	8.50	56.25	0.58	-1.29	1.70
	Junio	13.06	4.63	9.48	11.89	11.30	51.16	0.63	-1.05	1.49
	Julio	10.16	3.90	6.81	10.13	5.16	42.78	0.50	-0.75	1.34
	Agosto	8.48	2.48	5.22	7.53	6.00	52.55	0.54	-1.11	1.65
	Septiembre	11.63	4.30	9.51	10.06	12.74	54.77	0.72	-1.21	1.51
	Octubre	9.59	3.40	6.62	7.92	7.47	48.72	0.54	-0.95	1.37
	Noviembre	8.71	3.57	4.78	8.87	4.48	25.32	0.46	-0.34	0.84
	Diciembre	13.99	5.27	10.48	8.28	10.66	49.68	0.33	-0.99	1.24
2004	Enero	10.27	5.19	9.32	9.95	4.88	44.35	0.48	-0.80	1.14
	Febrero	9.55	2.86	4.77	8.80	5.34	40.10	0.42	-0.67	1.22
	Marzo	9.98	8.48	12.96	9.84	6.97	34.59	0.61	-0.53	0.71
	Abril	10.76	5.33	9.67	10.74	8.17	44.88	0.66	-0.81	1.12
	Mayo	10.43	1.96	1.42	10.68	4.02	-37.47	0.32	0.37	1.49
	Junio	9.99	3.32	4.67	11.21	6.73	28.91	0.63	-0.41	1.06
	Julio	10.43	2.42	6.78	7.49	8.22	64.39	0.52	-1.81	2.34
	Agosto	8.03	2.53	3.99	7.66	3.99	36.55	0.36	-0.58	1.32
	Septiembre	10.17	2.52	3.72	9.99	3.38	32.31	0.26	-0.48	1.42
	Octubre	13.42	4.73	8.99	11.88	11.25	47.39	0.61	-0.90	1.45
	Noviembre	20.46	6.01	10.45	15.35	22.39	42.49	0.65	-0.74	1.28

Tabla C.8. "Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones horarias filtradas en La Greda"

Concentraciones Horarias Filtradas										
La Greda		RMSE	$\overline{P}$	$\overline{O}$	σ_p	σ_o	NMD	IA	B_{NMBF}	E_{NMEF}
2003	Enero	42.67	10.07	8.12	44.35	15.13	-23.96	0.31	0.24	1.14
	Febrero	30.72	5.97	2.91	32.34	8.21	-104.93	0.28	1.05	1.62
	Marzo	53.74	13.58	14.02	54.86	58.23	3.14	0.71	-0.03	0.75
	Abril	39.15	9.72	14.00	34.78	25.93	30.58	0.41	-0.44	1.25
	Mayo	41.89	6.12	14.34	31.86	36.28	57.34	0.48	-1.34	2.20
	Junio	48.43	14.16	19.92	46.61	31.16	28.93	0.47	-0.41	1.19
	Julio	55.43	24.43	29.06	76.17	83.85	15.94	0.87	-0.19	0.75
	Agosto	64.77	24.07	26.77	75.54	77.82	10.08	0.79	-0.11	0.79
	Septiembre	55.57	26.92	31.65	76.08	74.70	14.95	0.85	-0.18	0.70
	Octubre	33.87	10.80	9.85	36.24	15.41	-9.61	0.43	0.10	0.88
	Noviembre	36.30	11.85	11.05	39.65	18.49	-7.22	0.49	0.07	0.77
	Diciembre	41.03	15.86	14.74	49.19	30.25	-7.58	0.67	0.07	0.75
2004	Enero	43.28	12.00	12.34	56.58	48.06	2.77	0.80	-0.03	0.91
	Febrero	39.38	8.36	7.37	41.85	30.72	-13.34	0.61	0.13	1.13
	Marzo	40.53	10.28	13.59	44.37	27.54	24.41	0.58	-0.32	1.07
	Abril	53.87	19.34	25.66	53.57	43.65	24.63	0.60	-0.33	0.95
	Mayo	48.65	14.26	21.98	49.42	45.11	35.11	0.67	-0.54	1.18
	Junio	76.01	18.34	34.69	56.51	68.96	47.14	0.52	-0.89	1.58
	Julio	45.60	20.10	21.12	60.66	62.18	4.82	0.84	-0.05	0.62
	Agosto	38.52	10.27	10.17	44.81	42.99	-0.97	0.76	0.01	0.80
	Septiembre	43.74	14.06	10.82	55.37	40.71	-29.92	0.75	0.30	0.81
	Octubre	43.28	14.59	9.68	50.77	26.69	-50.73	0.62	0.51	0.94
	Noviembre	34.25	11.29	8.68	43.05	29.46	-29.98	0.73	0.30	0.73

Tabla C.9. "Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones promedio de 24 horas modeladas en Sur"

Concentraciones Promedio de 24 horas Modeladas										
Sur		RMSE	$\overline{P}$	$\overline{O}$	σ_p	σ_o	NMD	IA	B_{NMBF}	E_{NMEF}
2003	Enero	22.55	7.19	23.76	8.83	14.46	69.75	0.46	-2.31	2.43
	Febrero	15.68	4.63	9.54	11.24	14.84	51.42	0.23	-1.06	2.54
	Marzo	22.68	8.71	22.00	18.29	18.75	60.40	0.45	-1.53	2.14
	Abril	52.22	3.69	43.73	19.81	41.03	91.57	0.42	-10.86	10.86
	Mayo	56.53	7.22	50.39	22.15	53.21	85.67	0.41	-5.98	6.32
	Junio	53.34	9.14	48.43	25.85	66.24	81.12	0.47	-4.30	4.46
	Julio	60.73	2.90	47.35	26.07	77.11	93.87	0.45	-15.31	15.36
	Agosto	47.14	4.89	37.06	28.87	83.59	86.80	0.44	-6.58	7.20
	Septiembre	34.15	7.20	29.73	30.77	88.06	75.80	0.41	-3.13	3.51
	Octubre	28.02	6.46	26.94	31.84	88.44	76.01	0.44	-3.17	3.25
	Noviembre	27.71	5.14	26.37	33.55	91.08	80.49	0.37	-4.13	4.42
	Diciembre	40.55	2.87	33.19	33.43	93.54	91.35	0.41	-10.56	10.56
2004	Enero	22.87	4.94	24.00	8.60	9.11	79.42	0.34	-3.86	4.13
	Febrero	11.57	5.84	9.86	12.50	12.73	40.76	0.46	-0.69	1.52
	Marzo	28.64	9.18	25.42	16.16	26.52	63.88	0.49	-1.77	2.12
	Abril	29.39	3.72	24.87	17.83	32.65	85.05	0.40	-5.69	5.86
	Mayo	58.91	4.03	44.65	19.00	51.69	90.98	0.43	-10.09	10.33
	Junio	73.55	4.05	62.77	20.56	70.32	93.55	0.46	-14.51	14.51
	Julio	49.48	8.82	46.26	23.82	75.47	80.93	0.43	-4.24	4.56
	Agosto	20.59	4.44	14.68	25.33	77.37	69.76	0.47	-2.31	2.74
	Septiembre	25.55	14.52	16.23	32.93	82.39	10.58	0.57	-0.12	1.11
	Octubre	19.38	3.29	13.77	32.90	82.61	76.11	0.44	-3.19	3.35
	Noviembre	28.19	6.55	15.90	34.52	87.57	58.78	0.26	-1.43	2.10

Tabla C.10. "Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones promedio de 24 horas modeladas en Puchuncaví"

Concentraciones Promedio de 24 horas Modeladas										
Puchuncaví		RMSE	$\overline{P}$	$\overline{O}$	σ_p	σ_o	NMD	IA	B_{NMBF}	E_{NMEF}
2003	Enero	20.78	2.37	20.71	1.61	10.43	88.55	0.42	-7.73	7.73
	Febrero	11.24	2.27	8.71	2.85	11.48	73.95	0.40	-2.84	3.71
	Marzo	49.98	3.08	35.81	4.39	39.77	91.40	0.43	-10.63	10.74
	Abril	26.48	3.63	24.63	5.64	43.47	85.25	0.45	-5.78	5.84
	Mayo	20.23	2.15	16.97	5.86	45.18	87.34	0.43	-6.90	6.90
	Junio	8.67	2.63	10.53	6.60	46.23	75.01	0.52	-3.00	3.00
	Julio	11.42	1.78	12.00	6.85	45.78	85.14	0.43	-5.73	5.73
	Agosto	14.34	1.94	13.90	7.03	46.58	86.01	0.46	-6.15	6.15
	Septiembre	21.19	1.70	20.20	7.28	48.64	91.61	0.42	-10.91	10.91
	Octubre	17.80	2.92	17.16	7.61	49.06	82.97	0.42	-4.87	4.95
	Noviembre	17.23	3.20	16.37	8.08	51.36	80.42	0.47	-4.11	4.14
	Diciembre	25.98	3.42	25.16	8.13	52.48	86.40	0.44	-6.35	6.35
2004	Enero	56.77	3.39	36.97	2.43	47.47	90.83	0.45	-9.90	9.97
	Febrero	26.13	2.59	23.59	3.43	51.80	89.04	0.46	-8.12	8.12
	Marzo	22.98	2.28	19.65	4.36	52.39	88.40	0.46	-7.62	7.80
	Abril	46.89	2.98	43.27	5.34	59.03	93.12	0.45	-13.53	13.53
	Mayo	25.09	1.58	20.13	5.51	60.80	92.17	0.48	-11.77	11.77
	Junio	41.76	2.54	31.67	5.90	68.79	91.98	0.41	-11.47	11.47
	Julio	20.24	2.17	17.16	6.12	69.14	87.35	0.48	-6.90	6.90
	Agosto	17.19	2.71	12.00	6.56	70.72	77.38	0.41	-3.42	3.53
	Septiembre	10.54	1.89	10.60	6.85	72.20	82.21	0.47	-4.62	4.62
	Octubre	17.17	4.44	19.55	7.55	71.41	77.30	0.39	-3.41	3.41
	Noviembre	11.94	4.86	15.30	8.54	72.81	68.25	0.38	-2.15	2.19

Tabla C.11. "Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones promedio de 24 horas modeladas en Valle Alegre"

Concentraciones Promedio de 24 horas Modeladas										
Valle Alegre		RMSE	$\overline{P}$	$\overline{O}$	σ_p	σ_o	NMD	IA	B_{NMBF}	E_{NMEF}
2003	Enero	5.81	4.19	8.18	3.77	3.64	48.79	0.52	-0.95	1.17
	Febrero	4.15	3.57	5.11	4.30	4.56	30.12	0.59	-0.43	0.93
	Marzo	4.54	4.31	4.48	5.98	5.43	3.77	0.56	-0.04	0.80
	Abril	6.23	2.79	7.90	7.81	7.61	64.68	0.70	-1.83	1.86
	Mayo	7.78	2.71	8.13	8.74	8.70	66.68	0.44	-2.00	2.38
	Junio	10.05	2.48	9.43	9.42	12.00	73.75	0.39	-2.81	2.87
	Julio	5.47	2.94	6.81	9.87	12.07	56.73	0.43	-1.31	1.54
	Agosto	6.46	3.10	5.10	11.01	12.50	39.18	0.30	-0.64	1.65
	Septiembre	9.46	2.45	9.90	11.64	14.74	75.21	0.57	-3.03	3.05
	Octubre	7.06	3.52	6.71	12.20	15.16	47.60	0.36	-0.91	1.59
	Noviembre	4.98	3.67	4.77	13.16	15.70	22.96	0.45	-0.30	1.11
	Diciembre	10.00	3.93	10.26	13.87	16.62	61.74	0.38	-1.61	1.92
2004	Enero	7.99	3.50	9.48	4.89	2.77	63.13	0.33	-1.71	2.09
	Febrero	6.18	3.09	4.83	6.37	5.22	36.08	0.35	-0.56	1.64
	Marzo	10.77	4.17	12.71	7.96	6.93	67.21	0.30	-2.05	2.41
	Abril	9.39	2.89	9.67	8.79	9.35	70.06	0.46	-2.34	2.76
	Mayo	3.52	2.73	1.35	9.12	9.38	-101.81	0.38	1.02	1.95
	Junio	3.36	2.29	4.60	9.85	10.14	50.30	0.77	-1.01	1.19
	Julio	7.02	1.48	6.68	10.03	10.95	77.87	0.47	-3.52	3.70
	Agosto	3.62	2.11	3.90	10.32	11.09	46.04	0.29	-0.85	1.44
	Septiembre	4.33	2.31	3.70	11.06	11.43	37.57	0.30	-0.60	1.40
	Octubre	7.91	4.11	8.87	12.14	12.08	53.71	0.42	-1.16	1.70
	Noviembre	10.95	4.95	10.70	13.98	15.45	53.69	0.50	-1.16	1.70

Tabla C.12. "Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones promedio de 24 horas modeladas en La Greda"

Concentraciones Promedio de 24 horas Modeladas										
La Greda		RMSE	$\overline{P}$	$\overline{O}$	σ_p	σ_o	NMD	IA	B_{NMBF}	E_{NMEF}
2003	Enero	23.05	14.56	8.29	24.69	6.78	-75.60	0.36	0.76	1.47
	Febrero	23.33	14.69	3.00	28.41	5.92	-389.81	0.15	3.90	4.47
	Marzo	36.13	28.06	13.77	43.32	23.34	-103.75	0.49	1.04	1.61
	Abril	26.93	15.40	13.83	51.40	25.83	-11.36	0.29	0.11	1.19
	Mayo	20.96	5.72	14.26	51.34	31.16	59.91	0.39	-1.49	2.21
	Junio	24.69	11.80	19.80	53.76	37.04	40.41	0.32	-0.68	1.28
	Julio	20.62	22.77	28.90	59.79	50.58	21.23	0.89	-0.27	0.69
	Agosto	27.27	21.15	26.87	64.27	58.54	21.29	0.66	-0.27	0.78
	Septiembre	26.60	27.03	32.70	73.72	70.31	17.33	0.85	-0.21	0.69
	Octubre	16.20	14.33	10.16	74.38	69.27	-41.02	0.36	0.41	1.09
	Noviembre	18.72	15.82	11.03	78.01	70.87	-43.36	0.40	0.43	1.22
	Diciembre	13.42	15.43	14.65	78.93	70.45	-5.34	0.76	0.05	0.71
2004	Enero	18.95	16.50	12.32	19.06	14.25	-33.88	0.59	0.34	1.16
	Febrero	16.41	12.25	7.41	23.75	18.38	-65.25	0.46	0.65	1.61
	Marzo	16.79	13.00	13.29	30.47	20.01	2.17	0.61	-0.02	1.03
	Abril	22.69	17.99	25.50	36.38	28.19	29.44	0.59	-0.42	0.89
	Mayo	27.29	15.06	21.94	40.77	35.42	31.33	0.50	-0.46	1.29
	Junio	44.15	13.48	35.00	44.08	49.54	61.49	0.34	-1.60	2.08
	Julio	24.60	17.96	21.35	49.51	58.82	15.92	0.78	-0.19	0.82
	Agosto	19.54	14.32	10.00	53.06	60.79	-43.15	0.58	0.43	1.24
	Septiembre	31.49	26.44	11.20	63.11	64.38	-136.07	0.59	1.36	1.65
	Octubre	19.50	20.69	9.58	65.62	64.28	-115.95	0.66	1.16	1.48
	Noviembre	25.75	24.79	8.60	70.38	66.63	-188.28	0.50	1.88	2.21

Tabla C.13. "Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones promedio de 24 horas filtradas en Sur"

Concentraciones Promedio de 24 horas Filtradas										
Sur		RMSE	$\overline{P}$	$\overline{O}$	σ_p	σ_o	NMD	IA	B_{NMBF}	E_{NMEF}
2003	Enero	13.18	14.11	23.76	8.27	14.46	40.62	0.69	-0.68	0.73
	Febrero	9.72	6.85	9.54	10.64	14.84	28.21	0.70	-0.39	0.91
	Marzo	10.10	17.20	22.00	15.21	18.75	21.80	0.81	-0.28	0.46
	Abril	47.48	7.66	43.73	19.00	41.03	82.49	0.46	-4.71	4.71
	Mayo	50.53	11.98	50.39	21.35	53.21	76.22	0.45	-3.21	3.40
	Junio	43.80	16.10	48.43	27.14	66.24	66.76	0.57	-2.01	2.09
	Julio	58.92	4.18	47.35	27.29	77.11	91.18	0.46	-10.34	10.37
	Agosto	43.62	7.34	37.06	30.70	83.59	80.19	0.49	-4.05	4.44
	Septiembre	29.10	10.72	29.73	32.29	88.06	63.96	0.57	-1.77	1.98
	Octubre	23.66	10.48	26.94	33.11	88.44	61.10	0.50	-1.57	1.61
	Noviembre	19.03	12.52	26.37	34.93	91.08	52.51	0.56	-1.11	1.17
	Diciembre	35.27	6.48	33.19	35.24	93.54	80.48	0.48	-4.12	4.12
2004	Enero	14.06	13.53	24.00	9.06	9.11	43.63	0.54	-0.77	0.82
	Febrero	7.68	7.34	9.86	11.72	12.73	25.57	0.71	-0.34	0.73
	Marzo	23.24	12.47	25.42	17.52	26.52	50.94	0.66	-1.04	1.26
	Abril	23.70	7.69	24.87	19.45	32.65	69.07	0.52	-2.23	2.30
	Mayo	55.04	6.47	44.65	20.58	51.69	85.52	0.47	-5.91	6.05
	Junio	72.16	5.23	62.77	22.07	70.32	91.66	0.47	-10.99	10.99
	Julio	46.54	11.87	46.26	25.08	75.47	74.34	0.46	-2.90	3.12
	Agosto	16.24	6.39	14.68	26.41	77.37	56.47	0.60	-1.30	1.54
	Septiembre	17.20	15.18	16.23	32.75	82.39	6.50	0.81	-0.07	0.67
	Octubre	15.61	6.09	13.77	33.13	82.61	55.76	0.59	-1.26	1.34
	Noviembre	25.54	7.03	15.90	34.50	87.57	55.78	0.30	-1.26	1.76

Tabla C.14. "Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones promedio de 24 horas filtradas en Puchuncaví"

Concentraciones Promedio de 24 horas Filtradas										
Puchuncaví		RMSE	$\overline{P}$	$\overline{O}$	σ_p	σ_o	NMD	IA	B_{NMBF}	E_{NMEF}
2003	Enero	19.81	3.52	20.71	2.80	10.43	83.00	0.44	-4.88	4.88
	Febrero	10.03	3.06	8.71	3.84	11.48	64.85	0.48	-1.85	2.37
	Marzo	48.91	3.81	35.81	5.14	39.77	89.37	0.44	-8.40	8.49
	Abril	25.04	4.79	24.63	6.40	43.47	80.54	0.47	-4.14	4.19
	Mayo	19.36	2.70	16.97	6.68	45.18	84.11	0.45	-5.29	5.30
	Junio	6.98	4.06	10.53	7.49	46.23	61.50	0.61	-1.60	1.60
	Julio	9.40	3.57	12.00	7.77	45.78	70.22	0.51	-2.36	2.36
	Agosto	13.62	2.55	13.90	7.96	46.58	81.63	0.48	-4.44	4.44
	Septiembre	20.64	2.15	20.20	8.24	48.64	89.37	0.45	-8.40	8.40
	Octubre	16.74	3.77	17.16	8.59	49.06	78.04	0.44	-3.55	3.61
	Noviembre	16.14	4.10	16.37	9.14	51.36	74.97	0.50	-2.99	3.02
	Diciembre	25.04	4.15	25.16	9.29	52.48	83.53	0.45	-5.07	5.07
2004	Enero	56.38	3.64	36.97	2.59	47.47	90.14	0.45	-9.14	9.20
	Febrero	25.50	3.05	23.59	3.66	51.80	87.07	0.47	-6.73	6.73
	Marzo	22.27	2.79	19.65	4.49	52.39	85.78	0.47	-6.03	6.17
	Abril	45.53	4.08	43.27	5.57	59.03	90.56	0.46	-9.59	9.59
	Mayo	24.75	1.81	20.13	5.79	60.80	91.00	0.49	-10.11	10.11
	Junio	41.51	2.72	31.67	6.16	68.79	91.40	0.42	-10.63	10.63
	Julio	19.85	2.46	17.16	6.38	69.14	85.66	0.49	-5.97	5.97
	Agosto	15.82	4.04	12.00	7.12	70.72	66.30	0.43	-1.97	2.03
	Septiembre	9.84	2.47	10.60	7.48	72.20	76.67	0.53	-3.29	3.29
	Octubre	13.94	7.34	19.55	8.18	71.41	62.47	0.47	-1.66	1.66
	Noviembre	8.15	8.39	15.30	9.60	72.81	45.16	0.58	-0.82	0.84

Tabla C.15. "Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones promedio de 24 horas filtradas en Valle Alegre"

Concentraciones Promedio de 24 horas Filtradas										
Valle Alegre		RMSE	$\overline{P}$	$\overline{O}$	σ_p	σ_o	NMD	IA	B_{NMBF}	E_{NMEF}
2003	Enero	2.46	6.44	8.18	3.18	3.64	21.22	0.87	-0.27	0.33
	Febrero	1.63	4.47	5.11	3.80	4.56	12.42	0.93	-0.14	0.27
	Marzo	2.47	4.41	4.48	4.72	5.43	1.55	0.82	-0.02	0.36
	Abril	3.08	5.44	7.90	6.81	7.61	31.17	0.91	-0.45	0.47
	Mayo	3.99	5.58	8.13	7.43	8.70	31.33	0.74	-0.46	0.53
	Junio	6.11	4.97	9.43	9.52	12.00	47.31	0.82	-0.90	0.92
	Julio	3.40	4.85	6.81	9.79	12.07	28.80	0.63	-0.40	0.50
	Agosto	2.71	4.13	5.10	10.15	12.50	19.01	0.78	-0.23	0.47
	Septiembre	7.73	3.87	9.90	11.52	14.74	60.87	0.71	-1.56	1.56
	Octubre	5.12	4.29	6.71	11.72	15.16	36.10	0.52	-0.56	0.86
	Noviembre	1.52	4.56	4.77	12.22	15.70	4.35	0.92	-0.05	0.26
	Diciembre	6.64	6.80	10.26	12.94	16.62	33.67	0.59	-0.51	0.62
2004	Enero	1.79	8.53	9.48	2.86	2.77	10.03	0.89	-0.11	1.11
	Febrero	3.03	4.00	4.83	4.25	5.22	17.04	0.81	-0.21	1.21
	Marzo	4.95	9.66	12.71	6.35	6.93	23.96	0.73	-0.32	1.32
	Abril	5.75	5.59	9.67	7.34	9.35	42.16	0.72	-0.73	1.73
	Mayo	0.96	1.77	1.35	7.41	9.38	-30.51	0.92	0.31	1.00
	Junio	1.81	3.36	4.60	8.15	10.14	26.88	0.92	-0.37	1.37
	Julio	5.78	2.53	6.68	8.39	10.95	62.04	0.55	-1.63	2.63
	Agosto	1.47	3.16	3.90	8.55	11.09	19.02	0.81	-0.23	1.23
	Septiembre	1.27	3.44	3.70	8.84	11.43	6.98	0.94	-0.08	1.08
	Octubre	2.66	7.37	8.87	9.59	12.08	16.93	0.90	-0.20	1.20
	Noviembre	6.97	7.42	10.70	12.00	15.45	30.69	0.81	-0.44	1.44

Tabla C.16. "Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones promedio de 24 horas filtradas en La Greda"

Concentraciones Promedio de 24 horas Filtradas										
La Greda		RMSE	$\overline{P}$	$\overline{O}$	σ_p	σ_o	NMD	IA	B_{NMBF}	E_{NMEF}
2003	Enero	3.13	9.01	8.29	7.51	6.78	-8.65	0.95	0.09	0.15
	Febrero	0.96	3.41	3.00	6.62	5.92	-13.74	0.97	0.14	0.15
	Marzo	9.01	16.38	13.77	23.55	23.34	-18.94	0.96	0.19	0.33
	Abril	8.42	15.44	13.83	27.46	25.83	-11.61	0.86	0.12	0.25
	Mayo	10.04	10.20	14.26	29.38	31.16	28.44	0.88	-0.40	0.65
	Junio	10.85	15.79	19.80	32.97	37.04	20.24	0.88	-0.25	0.48
	Julio	14.10	25.74	28.90	44.03	50.58	10.95	0.95	-0.12	0.40
	Agosto	14.98	25.15	26.87	51.66	58.54	6.41	0.92	-0.07	0.37
	Septiembre	14.00	28.94	32.70	62.30	70.31	11.50	0.96	-0.13	0.33
	Octubre	2.13	10.55	10.16	61.51	69.27	-3.86	0.95	0.04	0.12
	Noviembre	3.14	11.91	11.03	63.07	70.87	-7.92	0.96	0.08	0.16
	Diciembre	2.71	14.68	14.65	62.99	70.45	-0.24	0.98	0.00	0.13
2004	Enero	2.38	12.75	12.32	14.28	14.25	-3.45	0.99	0.03	0.10
	Febrero	6.90	8.36	7.41	17.44	18.38	-12.83	0.87	0.13	0.63
	Marzo	4.92	14.29	13.29	20.11	20.01	-7.51	0.94	0.08	0.21
	Abril	8.51	22.04	25.50	26.30	28.19	13.58	0.94	-0.16	0.25
	Mayo	10.87	20.66	21.94	32.20	35.42	5.80	0.93	-0.06	0.35
	Junio	35.35	19.34	35.00	35.59	49.54	44.74	0.46	-0.81	1.08
	Julio	14.33	19.12	21.35	43.79	58.82	10.45	0.94	-0.12	0.44
	Agosto	9.72	12.78	10.00	46.29	60.79	-27.80	0.89	0.28	0.64
	Septiembre	12.91	16.01	11.20	52.00	64.38	-42.98	0.93	0.43	0.51
	Octubre	3.14	11.05	9.58	52.49	64.28	-15.38	0.98	0.15	0.23
	Noviembre	6.55	11.82	8.60	55.16	66.63	-37.42	0.94	0.37	0.46

Tabla C.17. "Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones modeladas con aumento de velocidad de vientos en Sur"

Análisis de Sensibilidad Velocidad de Vientos Concentraciones Horarias Modeladas										
Sur		RMSE	$\overline{P}$	$\overline{O}$	σ_p	σ_o	NMD	IA	B_{NMBF}	E_{NMEF}
Velocidad del viento [m/s]	$v < 2$	48.23	5.99	23.91	38.02	28.48	0.60	0.49	-2.99	4.58
	$2 \leq v < 4$	48.23	5.99	23.91	38.02	28.48	0.60	0.49	-2.99	4.58
	$4 \leq v < 6$	39.67	3.38	23.91	21.91	28.48	0.71	0.53	-6.07	7.52
	$6 \geq v$	36.54	1.15	23.91	7.48	28.48	0.80	0.52	-19.71	20.44

Tabla C.18. "Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones modeladas con aumento de velocidad de vientos en Puchuncaví"

Análisis de Sensibilidad Velocidad de Vientos Concentraciones Horarias Modeladas										
Puchuncaví		RMSE	$\overline{P}$	$\overline{O}$	σ_p	σ_o	NMD	IA	B_{NMBF}	E_{NMEF}
Velocidad del viento [m/s]	$v < 2$	69.40	11.20	36.57	23.50	68.30	0.54	0.61	-2.27	3.01
	$2 \leq v < 4$	69.40	11.20	36.57	23.50	68.30	0.54	0.61	-2.27	3.01
	$4 \leq v < 6$	75.81	1.59	36.57	3.30	68.30	0.81	0.51	-21.93	22.28
	$6 \geq v$	76.98	0.40	36.57	1.07	68.30	0.84	0.51	-90.28	90.45

Tabla C.19. "Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones modeladas con aumento de velocidad de vientos en Valle Alegre"

Análisis de Sensibilidad Velocidad de Vientos Concentraciones Horarias Modeladas										
Valle Alegre		RMSE	$\overline{P}$	$\overline{O}$	σ_p	σ_o	NMD	IA	B_{NMBF}	E_{NMEF}
Velocidad del viento [m/s]	$v < 2$	29.29	8.59	9.32	28.92	4.88	0.08	0.29	-0.09	1.86
	$2 \leq v < 4$	29.29	8.59	9.32	28.92	4.88	0.08	0.29	-0.09	1.86
	$4 \leq v < 6$	11.97	2.22	9.32	8.38	4.88	0.76	0.50	-3.20	4.59
	$6 \geq v$	10.28	0.49	9.32	2.08	4.88	0.95	0.54	-17.87	18.10

Tabla C.20. "Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones modeladas con aumento de velocidad de vientos en La Greda"

Análisis de Sensibilidad Velocidad de Vientos Concentraciones Horarias Modeladas										
La Greda		RMSE	$\overline{P}$	$\overline{O}$	σ_p	σ_o	NMD	IA	B_{NMBF}	E_{NMEF}
Velocidad del viento [m/s]	$v < 2$	91.65	18.98	12.34	85.04	48.06	-0.39	0.40	0.54	2.15
	$2 \leq v < 4$	91.65	18.98	12.34	85.04	48.06	-0.39	0.40	0.54	2.15
	$4 \leq v < 6$	56.58	8.73	12.34	39.92	48.06	0.44	0.49	-0.41	2.05
	$6 \geq v$	48.37	3.18	12.34	14.52	48.06	0.89	0.38	-2.88	4.22

Tabla C.21. "Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones filtradas con aumento de velocidad de vientos en Sur"

Análisis de Sensibilidad Velocidad de Vientos Concentraciones Horarias Filtradas										
Sur		RMSE	$\overline{P}$	$\overline{O}$	σ_p	σ_o	NMD	IA	B_{NMBF}	E_{NMEF}
Velocidad del viento [m/s]	$v < 2$	36.86	7.53	23.91	27.31	28.48	0.53	0.67	-2.17	2.72
	$2 \leq v < 4$	36.86	7.53	23.91	27.31	28.48	0.53	0.67	-2.17	2.72
	$4 \leq v < 6$	34.57	5.66	23.91	19.83	28.48	0.61	0.66	-3.23	3.67
	$6 \geq v$	34.60	3.10	23.91	9.42	28.48	0.72	0.57	-6.71	6.86

Tabla C.22. "Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones filtradas con aumento de velocidad de vientos en Puchuncavi"

Análisis de Sensibilidad Velocidad de Vientos Concentraciones Horarias Filtradas										
Puchuncaví		RMSE	$\overline{P}$	$\overline{O}$	σ_p	σ_o	NMD	IA	B_{NMBF}	E_{NMEF}
Velocidad del viento [m/s]	$v < 2$	54.31	18.56	36.57	31.47	68.30	0.34	0.84	-0.97	1.18
	$2 \leq v < 4$	54.31	18.56	36.57	31.47	68.30	0.34	0.84	-0.97	1.18
	$4 \leq v < 6$	74.00	2.69	36.57	9.98	68.30	0.78	0.55	-12.59	12.73
	$6 \geq v$	76.08	0.88	36.57	6.42	68.30	0.83	0.53	-40.53	40.60

Tabla C.23. "Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones filtradas con aumento de velocidad de vientos en Valle Alegre"

Análisis de Sensibilidad Velocidad de Vientos Concentraciones Horarias Filtradas										
Valle Alegre		RMSE	$\overline{P}$	$\overline{O}$	σ_p	σ_o	NMD	IA	B_{NMBF}	E_{NMEF}
Velocidad del viento [m/s]	$v < 2$	12.41	6.13	9.32	12.52	4.88	0.34	0.59	-0.52	0.95
	$2 \leq v < 4$	12.41	6.13	9.32	12.52	4.88	0.34	0.59	-0.52	0.95
	$4 \leq v < 6$	8.38	4.31	9.32	6.61	4.88	0.54	0.72	-1.17	1.39
	$6 \geq v$	8.83	2.51	9.32	3.83	4.88	0.73	0.60	-2.71	2.73

Tabla C.24. "Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones filtradas con aumento de velocidad de vientos en La Greda"

Análisis de Sensibilidad Velocidad de Vientos Concentraciones Horarias Filtradas										
La Greda		RMSE	$\overline{P}$	$\overline{O}$	σ_p	σ_o	NMD	IA	B_{NMBF}	E_{NMEF}
Velocidad del viento [m/s]	$v < 2$	24.16	10.29	12.34	49.98	48.06	0.17	0.94	-0.20	0.69
	$2 \leq v < 4$	24.16	10.29	12.34	49.98	48.06	0.17	0.94	-0.20	0.69
	$4 \leq v < 6$	24.29	8.99	12.34	44.09	48.06	0.27	0.93	-0.37	0.97
	$6 \geq v$	31.86	5.67	12.34	25.14	48.06	0.54	0.80	-1.18	1.59

Tabla C.25. "Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones modeladas en distintas direcciones de vientos en Los Maitenes"

Análisis de Sensibilidad Dirección de Vientos Concentraciones Horarias Modeladas										
Los Maitenes		RMSE	$\overline{P}$	$\overline{O}$	σ_p	σ_o	NMD	IA	B_{NMBF}	E_{NMEF}
Dirección del viento Enero 2003	W-E	138.49	31.12	63.15	49.07	134.02	0.51	0.34	-1.03	1.99
	N-S	3.95	0	3.62	0	1.96	1	0.38	DIV 0	DIV 0
	NNW-SSE	6.53	1.76	4.82	3.86E-6	4.39	1	0.41	-2.73E6	2.73E6
	NW-SE	115.92	0.21	39.47	0.24	110.06	1	0.26	-187.37	187.39
	WNW-ESE	183.77	115.89	94.09	92.64	178.22	-0.23	0.38	0.23	1.25
	WSW-ENE	60.65	5E-4	22.81	1E-3	52.04	1	0.24	-4.3E4	4.3E4
	SW-NE	11.20	0	6.80	0	9.05	1	0.37	DIV 0	DIV 0
	SSW-NNE	9.62	0	5.53	0	8.03	1	0.33	DIV 0	DIV 0

Tabla C.26. "Parámetros estadísticos calculados para las concentraciones filtradas en distintas direcciones de vientos en Los Maitenes"

Análisis de Sensibilidad Dirección de Vientos Concentraciones Horarias Filtradas										
Los Maitenes		RMSE	$\overline{P}$	$\overline{O}$	σ_p	σ_o	NMD	IA	B_{NMBF}	E_{NMEF}
Dirección del viento Enero 2003	W-E	90.62	38.88	63.15	70.82	134.02	0.38	0.80	-0.62	1.08
	N-S	3.95	0	3.62	0	1.96	1	0.38	DIV 0	DIV0
	NNW-SSE	6.53	1.76	4.82	3.86E-6	4.39	1	0.41	-2.73E6	2.76E6
	NW-SE	115.92	0.38	39.47	1.23	110.06	1	0.25	-103.60	103.62
	WNW-ESE	132.57	98.28	94.09	86.17	178.22	-0.04	0.73	0.04	0.73
	WSW-ENE	60.65	5E-4	22.81	1E-3	52.04	1	0.24	-4.3E4	4.3E4
	SW-NE	11.20	0	6.80	0	9.05	1	0.37	DIV 0	DIV 0
	SSW-NNE	9.62	0	5.53	0	8.03	1	0.33	DIV 0	DIV 0