ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL

MODELACIÓN DE LA DISPERSIÓN DE LAS EMISIONES DE SO_2 Y NO_x DE LAS TERMOELÉCTRICAS DE LA CIUDAD DE QUITO EN EL SOFTWARE CALPUFF.

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MÁSTER (MSc) EN INGENIERÍA AMBIENTAL

AUTOR: ING. SORAYA ELIZABETH RUIZ REINOSO

sorayaruizr@gmail.com

DIRECTOR: ING. MSc. MARCELO MUÑOZ

marcelo.munoz@epn.edu.ec

Quito, Octubre 2013

DECLARACIÓN

Yo Soraya Elizabeth Ruiz Reinoso, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

_____

Ing. MSc. Soraya Ruiz Reinoso

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Soraya Elizabeth Ruiz Reinoso, bajo mi supervisión.

Ing. MSc.Marcelo Muñoz
DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Dejo constancia de mi profundo agradecimiento al Ingeniero Marcelo Muñoz, por sus enseñanzas durante la carrera, y por apoyarme en el desarrollo de la tesis.

Así también al Profesor Héctor Jorquera, de la Pontificia Universidad Católica de Chile, sin su ayuda no habría sido posible modelar este tema, por facilitarme el uso del programa, pero sobre todo por estar siempre dispuesto a ayudarme ante cualquier duda.

Mi más especial agradecimiento a la señora Sonia Almeida. Ella ha sido mi apoyo constante en todo momento en Quito, en mi caso al estar lejos, sin ella no habría sido posible culminar mi trabajo.

DEDICATORIA

Al tesoro más grande de mi vida.
Mi motivación, mi fuerza, mi todo. A Benjamín.
A mi madre, Yolanda. Por todo su apoyo.
A mi esposo, Lucio. Por su compañía.

CONTENIDO

Declaración II
Certificación III
Agradecimientos IV
Dedicatoria V
Contenido VI
Índice de Tablas IX
Índice de Figuras XI
Resumen XIII
Abstract XIV
Presentación XV
Capítulo 1. Objetivos 1
1.1 Objetivo General. 1
1.2 Objetivos Específicos. 1
1.3 Alcance. 1
Capítulo 2. Revisión Bibliográfica 3
2.1 Antecedentes. 3
2.2 Marco Legal Aplicable al Funcionamiento de Termoeléctricas. 7
2.3 Descripción de las Plantas Termoeléctricas en la Ciudad de Quito. 9
2.3.1 Central Termoeléctrica Guangopolo. 9
2.3.2 Central Termoeléctrica Santa Rosa. 11
2.3.3 Central Termoeléctrica Gualberto Hernández. 12
2.3.4 Central Termoeléctrica Luluncoto. 14
2.4 La Calidad del Aire 15
2.4.1 Vigilancia y Evaluación de la Calidad del Aire. 16
2.5 Modelo a ser utilizado 20
2.5.1 Modelo Meteorológico CALMET 21
2.5.2 Modelo de Dispersión CALPUFF 25
2.5.3 Justificación de la Selección del Modelo 27
2.6 Emisiones derivadas de la Producción de Energía en Centrales Termoeléctricas 29

2.6.1 Generación de Contaminantes Atmosféricos en Centrales Termoeléctricas… 30
2.7 Descripción de la Zona de Estudio. 37
2.8 Climatología General de la Zona de Estudio. 40
Capítulo 3. Metodología. Aplicación de los Modelos 41
3.1 Zona de Aplicación del Modelo Calmet. 41
3.1.1 Selección del Período de Simulación. 41
3.1.2 Selección del Dominio de Modelación. 41
3.2 Meteorología 42
3.2.1 Meteorología Superficial. 42
3.2.2 Meteorología en Altura. 44
3.3 Meteorología de la Ciudad de Quito 45
3.3.1 Velocidad y Dirección del Viento. 47
3.3.2 Temperatura. 54
3.3.3 Precipitación. 55
3.3.4 Radiación Solar. 56
3.3.5 Humedad Relativa. 56
3.3.6 Presión Atmosférica. 57
3.4 Meteorología en Altura 57
3.4.1 Velocidad del Viento. 57
3.4.2 Dirección del Viento. 57
3.4.3 Temperatura. 59
3.5 Datos Geofísicos 59
3.6 Aplicación del Modelo Calpuff. 64
3.6.1 Selección del Período de Simulación. 64
3.6.2 Selección del Dominio de Modelación. 64
3.6.3 Receptores. 64
3.6.4 Contaminantes a Modelar 65
3.6.5 Emisiones Ingresadas 65
3.6.6 Mecanismo Químico Simplificado. 71
3.6.7 Resultados del Modelo de Dispersión 72
Capítulo 4. Resultados de la Modelación de Dispersión de Contaminantes 73

4.1 Introducción 73

4.2 Resultados de la Modelación de Calidad del Aire por funcionamiento de Termoeléctricas 73

4.2.1 Concentraciones de Gases 73

4.2.2 Concentraciones de Partículas Secundarias 80

Capítulo 5. Analísis de Resultados y Discusión 84

5.1 Discusión de Resultados 84

5.2 Análisis Estadístico. 86

5.2.1 Análisis de la modelación de NO_2 87

5.2.2 Análisis de la modelación de SO_2 90

Conclusiones y Recomendaciones 93

Referencias Bibliográficas 98

Anexos 101

Anexo A . Análisis de la Representación Meteorológica Superficial para la Ciudad de Quito. Año 2006 102

Anexo B. Análisis Estadístico de un Modelo de Dispersión. 110

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Empresas generadoras de energía eléctrica en Quito 5
Tabla 2.2. Unidades operativas en cada una de las empresas termoeléctricas en Quito y su potencia..... 5
Tabla 2.3. Consumo anual de combustibles de las empresas termoeléctricas en Quito, año 2009..... 6
Tabla 2.4. Marco legal aplicable a las empresas termoeléctricas en Quito..... 7
Tabla 2.5. Valores máximos permisibles de emisiones al aire para fuentes fijas de combustión..... 8
Tabla 2.6. Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire. 15
Tabla 2.7. Información de entrada para el CALMET 24
Tabla 3.1. Ubicación de las estaciones de monitoreo superficiales. 43
Tabla 3.2. Escenarios meteorológicos considerados. 46
Tabla 3.3. Escala de *Beaufort* para la fuerza de los vientos 47
Tabla 3.4. Parámetros superficiales, calculados por defecto a partir del tipo de uso de suelo..... 62
Tabla 3.5. Ubicación de las estaciones de monitoreo de calidad del aire. 65
Tabla 3.6. Emisiones del inventario de emisiones de Quito año 2009. 66
Tabla 3.7. Energía bruta producida por cada unidad de las termoeléctricas operativas en Quito. 66
Tabla 3.8. Ubicación geográfica de las unidades en cada una de las centrales termoeléctricas..... 68
Tabla 3.9. Características físicas de las chimeneas..... 69
Tabla 3.10. Emisiones en ton/año..... 70
Tabla 4.1. Estimación de concentraciones de material particulado secundario en receptores puntuales (máxima horaria)..... 81
Tabla 4.2. Estimación de concentraciones en receptores puntuales y comparación con norma de calidad del aire. 82
Tabla 5.1. Análisis estadístico de los resultados de NO_2 del modelo de dispersión aplicado a Quito. 87

Tabla 5.2. Análisis estadístico de los resultados de SO_2 del modelo de dispersión aplicado a Quito. 90

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1. VISTA SATELITAL DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA GUANGOPOLO…….. 10
FIGURA 2.2. VISTA SATELITAL DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA SANTA ROSA. ……11
FIGURA 2.3. VISTA SATELITAL DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA GUALBERTO HERNÁNDEZ. . ……..13
FIGURA 2.4. VISTA SATELITAL DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA LULUNCOTO……14
FIGURA 2.5. CONEXIÓN ENTRE LOS MÓDULOS DE UN MODELO DE DISPERSIÓN Y LA GESTIÓN DE CALIDAD DEL AIRE…… 20
FIGURA 2.6. DIAGRAMA DE LOS ELEMENTOS DEL PROGRAMA DE MODELACIÓN METEOROLÓGICA CALMET (INDICA ÚNICAMENTE LOS PROCESOS UTILIZADOS EN ESTE TRABAJO)…… 23
FIGURA 2.7. DIAGRAMA DE LOS ELEMENTOS DEL MODELO DE DISPERSIÓN CALPUFF (INDICA ÚNICAMENTE LOS PROCESOS UTILIZADOS EN LA PRESENTE TESIS)…… 25
FIGURA 2.8. MAPA TOPOGRÁFICO DE LA HOYA DE QUITO Y SUS ALREDEDORES…… 38
FIGURA 3.1. GRILLA METEOROLÓGICA PARA LA MODELACIÓN DEL CALMET EN QUITO……42
FIGURA 3.2. IMAGEN SATELITAL CON LA UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS SUPERFICIALES…… 43
FIGURA 3.3. IMAGEN SATELITAL CON LA UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS SUPERFICIALES Y LA GRILLA DE METEOROLOGÍA EN ALTURA…… 44
FIGURA 3.4. ROSA DE LOS VIENTOS ANUAL PARA TODO EL DÍA, ESTACIÓN COTOCOLLAO, AÑO 2006……48
FIGURA 3.5. ROSA DE LOS VIENTOS ANUAL PARA TODO EL DÍA, ESTACIÓN CARAPUNGO, AÑO 2006…… 49

FIGURA 3.6. ROSA DE LOS VIENTOS ANUAL PARA TODO EL DÍA, ESTACIÓN BELISARIO, AÑO 2006…… 50
FIGURA 3.7. ROSA DE LOS VIENTOS ANUAL PARA TODO EL DÍA, ESTACIÓN EL CAMAL, AÑO 2006……51
FIGURA 3.8. ROSA DE LOS VIENTOS ANUAL PARA TODO EL DÍA, ESTACIÓN TUMBACO, AÑO 2006…… 52
FIGURA 3.9. ROSA DE LOS VIENTOS ANUAL PARA TODO EL DÍA, ESTACIÓN LOS CHILLOS, AÑO 2006…… 53
FIGURA 3.10. PERFIL ANUAL DE VELOCIDAD DE VIENTOS PROMEDIO DE TODAS LAS ESTACIONES EN QUITO…… 53
FIGURA 3.11. PERFIL DE TEMPERATURA MÁXIMA, MÍNIMA Y PROMEDIO MENSUAL EN LA CIUDAD DE QUITO PARA EL AÑO 2006……. ……...54
FIGURA 3.12. PERFIL MEDIO DIARIO DE TEMPERATURAS EN LAS SEIS ESTACIONES DE MONITOREO EN QUITO PARA EL AÑO 2006. ……...55
FIGURA 3.13. PRECIPITACIÓN MENSUAL EN QUITO AÑO 2006…….. 56
FIGURA 3.14. VELOCIDAD DEL VIENTO A DISTINTOS NIVELES DE ALTURA…….
…….. 58
FIGURA 3.15. DIRECCIÓN DEL VIENTO A DISTINTOS NIVELES DE ALTURA…… 58
FIGURA 3.16. TEMPERATURA A DISTINTOS NIVELES DE ALTURA…… 59
FIGURA 3.17. CURVAS DE NIVEL PARA LA GRILLA DE MODELACIÓN CORRESPONDIENTE A QUITO…… 61
FIGURA 3.18. MAPA DE USOS DE SUELO PARA LA GRILLA DE MODELACIÓN CORRESPONDIENTE A QUITO…… 63
FIGURA 3.19.REPRESENTACIÓN DE LAS FUENTES Y LOS RECEPTORES PUNTUALES…… 71
FIGURA 4.1. CONCENTRACIÓN ANUAL DE NO_2 SIMULADA POR EL MODELO CALPUFF, AÑO 2009…… 74
FIGURA 4.2. CONCENTRACIÓN HORARIA DE NO_2 SIMULADA POR EL MODELO CALPUFF, AÑO 2009.……75
FIGURA 4.3. ZONA DE EXCEDENCIA DE LA NORMA HORARIA DE NO_2 SIMULADA POR EL MODELO CALPUFF, AÑO 2009…….. 76

FIGURA 4.4. CONCENTRACIÓN ANUAL DE NO SIMULADA POR EL MODELO CALPUFF, AÑO 2009…….. 77
FIGURA 4.5. CONCENTRACIÓN HORARIA DE NO SIMULADA POR EL MODELO CALPUFF, AÑO 2009.……78
FIGURA 4.6. CONCENTRACIÓN ANUAL DE SO_2 SIMULADA POR EL MODELO CALPUFF, AÑO 2009…… 79
FIGURA 4.7. MÁXIMA CONCENTRACIÓN DIARIA DE SO_2 SIMULADA POR EL MODELO CALPUFF, AÑO 2009.……80
FIGURA 5.1. ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL ENTRE CONCENTRACIONES SIMULADAS Y OBSERVADAS DE NO_2…… 89
FIGURA 5.2. ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL ENTRE CONCENTRACIONES SIMULADAS Y OBSERVADAS DE SO_2…… 91

RESUMEN

La presente memoria constituye un esfuerzo orientado a aplicar un modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos en la ciudad de Quito, para determinar el impacto acumulativo a la calidad del aire de la ciudad debido a la producción de energía eléctrica con plantas termoeléctricas.

La metodología aplicada permitió modelar las emisiones de SO_2 y NO_x expresados como NO_2, y al ingresar datos de monitoreo de ozono, se consiguió hacer una simulación con mecanismo químico simplificado que arrojó las concentraciones de contaminantes secundarios como nitratos y sulfatos, los cuales aportan en su totalidad al material particulado $PM_{2.5}$ tan nocivo para la salud.

Además se realizó un análisis estadístico de los resultados de la modelación, todo de acuerdo a las recomendaciones de la EPA.

Entre los principales resultados obtenidos se puede destacar que el receptor El Camal, es el que presenta la máxima concentración horaria de dióxido de nitrógeno, con un valor de 715.11 $\mu g/m^3$ y el máximo valor promedio anual de 11.53 $\mu g/m^3$. El receptor Los Chillos es el que presenta el mayor valor de concentración de dióxido de azufre, siendo su valor máximo diario de 70,39 $\mu g/m^3$ y el promedio anual de 4.02 $\mu g/m^3$. El receptor Los Chillos es el que tiene la concentración máxima horaria de partículas secundarias equivalentes a $PM_{2.5}$ con un valor de 59.77 $\mu g/m^3$, y el receptor Carapungo presenta un valor también alto de concentración de $PM_{2.5}$, con 43.20 $\mu g/m^3$.

ABSTRACT

The main goal of this Thesis is to apply atmospheric dispersion modeling to determine the cumulative impact in the air quality of Quito due to the electric energy production with power plants.

The applied methodology allowed to model the emissions of SO_2 y NO_x, expressed like NO_2, and including ozone monitoring, we could run a simulation with chemical transformation, to get the concentration of nitrates and sulfates, both of them contributes to fine particulate matter ($PM_{2.5}$).

In addition, we made an statistic analysis to the results of the simulation.

Between the most important results we got, we can stand out that the receptor El Camal presents the maximum hourly concentration of NO_2, with a value of 715.11 $\mu g/m^3$ and the maximum annual concentration of 11.53 $\mu g/m^3$. The receptor, Los Chillos appears with the maximum daily concentration of SO_2 70,39 $\mu g/m^3$ and an annual mean of 4.02 $\mu g/m^3$. Los Chillos also presents the maximum hourly concentration of $PM_{2.5}$ with a value of 59.77 $\mu g/m^3$, and the receptor Carapungo shows also a high value of concentation of $PM_{2.5}$, 43.20 $\mu g/m^3$.

PRESENTACIÓN

La calidad del aire es un tema cada vez más relevante en el manejo ambiental de las ciudades.Así, por ejemplo, el objetivo principal del Plan Nacional de la Calidad del Aire de Ecuador es el de alcanzar una gestión ambiental adecuada de la calidad del recurso aire para proteger la salud humana, los recursos naturales y el patrimonio cultural. Entre otros programas que forman parte del Plan, en el Programa de Control y Vigilancia de la Calidad del Aire se señala el proyecto: 'Desarrollo de Modelos Predictivos de Calidad del Aire'.

En ese contexto, el siguiente trabajo presenta una metodología para la modelación de la dispersión de las emisiones de fuentes puntuales, específicamente de termoeléctricas.

Se ha seleccionado un modelo de dispersión avanzado de tipo *puff*, que combina el enfoque Gaussiano y Lagrangiano de dispersión a la vez. Así se calcula una trayectoria por cada *puff* emitido, las emisiones continuas se representan por muchos *puffs* y se pueden modelar muchas fuentes diversas al mismo tiempo, se puede incorporar procesos químicos y físicos (depositación sobre el suelo).

La intención del autor es determinar por primera vez el impacto acumulativo a la calidad del aire ambiente debido a la producción de energía eléctrica con plantas termoeléctricas en la ciudad de Quito, y dejar sentado un precedente del uso de este tipo de herramientas en la evaluación ambiental de nuevos proyectos de este tipo.

CAPÍTULO 1.

OBJETIVOS.

1.1 OBJETIVO GENERAL.

Aplicar el modelo de dispersión CALPUFF para evaluar el impacto de las termoeléctricas en la concentración de los contaminantes primarios SO_2 y NO_x en la ciudad de Quito el año 2009.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

i) Realizar la modelación de las emisiones de SO_2 y NO_x de las termoeléctricas de la ciudad de Quito al año 2009.

ii) Estimar las concentraciones de SO_2 y NO_x producto de la operación de las termoeléctricas en la ciudad de Quito y determinar su impacto a la calidad del aire ambiente.

iii) Categorizar espacialmente los resultados para una visión de las zonas más afectadas de la ciudad.

1.3 ALCANCE.

Se limitará la investigación a las termoeléctricas ubicadas en el Distrito Metropolitano de Quito que se encuentran en funcionamiento y hayan entregado su reporte de emisiones a la entidad de seguimiento ambiental correspondiente. El período de análisis será el año 2009 para la modelación de la dispersión de contaminantes, considerando que hasta la fecha el último inventario de emisiones

publicado por la Ex-Corpaire (Corporación para el Mejoramiento del Aire de Quito) corresponde al año 2009. Se incluirán en el análisis los contaminantes SO_2, NO_x y se determinarán los contaminantes secundarios sulfatos y nitratos.

CAPÍTULO 2.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

2.1 ANTECEDENTES.

LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A ESCALA MUNDIAL.

La generación de energía eléctrica en el mundo depende fuertemente de la quema de combustibles fósiles. Por ejemplo, según la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés), de los 20132 TWh que se produjeron mundialmente en el año 2009, el 66.8% se generó en centrales térmicas a través de la combustión de gas natural, derivados del petróleo y carbón; el 13.4%, en centrales nucleares; el 16.5%, en hidroeléctricas, y el 3.3% mediante otras fuentes de energía, incluidas la geotermia, la solar, la eólica y la biomasa (IEA, 2009[1]).

A nivel mundial, la participación de los combustibles fósiles en la generación eléctrica es alta: 41% de la matriz es carbón, 21% gas natural y 5% petróleo. (International Energy Agency, 2011)[2]. El mayor problema de la dependencia fósil es el impacto ambiental en los procesos de transformación a otras formas de energía.

LA ENERGÍA ELÉCTRICA EN ECUADOR.

La matriz eléctrica ecuatoriana está conformada por los siguientes sistemas de generación: El Sistema Nacional Interconectado (S.N.I.) y el Sistema No Incorporado (No Inc.)

---

[1] http://www.iea.org/stats/electricitydata.asp?COUNTRY_CODE=29

[2] International Energy Agency (IEA). (2011). *2011 Key World Energy Statistics.*

Del Boletín Estadístico Sector Eléctrico Ecuatoriano 2010(Consejo Nacional de Electricidad CONELEC, 2011) se desprende que el S.N.I. cuenta con una capacidad instalada de generación de 4387 MW y el No Inc. Cuenta con una capacidad instalada de 754.86 MW.

El Ecuador cuenta con 2.346,13 MW de potencia instaladay 2.311,01 MW de potencia efectiva. De la potencia instalada el 54,38 % corresponde a la Energía No Renovable (Térmica MCI, Térmica Turbogas, Térmica Turbovapor).

Las centrales de generación térmica utilizan como fuente de energía primaria diferentes tipos de combustible, especialmente aquellos derivados del petróleo. Sin embargo se ha incluido el consumo de bagazo de caña, que aunque se la considera como una fuente de energía renovable, se combustiona para producir energía eléctrica. Se indica que los combustibles más utilizados en el 2010, a nivel nacional, fueron el Diesel 2[3](201.09 mill gal) y el Fuel Oil[4] (206.10 mill gal).

EL SECTOR ELÉCTRICO EN QUITO.

En la TABLA 2.1se detallan las potencias nominal y efectiva de cada una de las empresas del sector eléctrico que se ubican en la ciudad de Quito.

[3] Diesel es producido de petróleo y es parecido al gasóleo calefacción.

[4] El Fuel Oil es una fracción del petróleo que se obtiene como residuo en la destilación fraccionada. De aquí se obtiene entre un 30 y un 50% de esta sustancia. Es el combustible más pesado de los que se puede destilar a presión atmosférica. Está compuesto por moléculas con más de 20 átomos de carbono, y su color es negro. El Fuel Oil se usa como combustible para plantas de energía eléctrica, calderas y hornos.

TABLA 2.1. EMPRESAS GENERADORAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN QUITO

Tipo de Empresa	Empresa	Sistema	Tipo de Central	Provincia	# Centrales	Potencia Nominal (MW)	Potencia Efectiva (MW)
Generadora	CELEC – Termopichincha	S.N.I.	Térmica	Pichincha	2	68.82	67.80
	EMAAP-Q	S.N.I.	Hidráulica	Pichincha	3	23.36	22.94
Distribuidora	E.E.Q.	S.N.I.	Hidráulica	Pichincha	5	96.88	96.88
			Térmica	Pichincha	2	43.39	39.10

Elaborado: Soraya Ruiz R., a partir de (Consejo Nacional de Electricidad CONELEC, 2010)

En la TABLA 2.2se detallan las unidades que tiene cada una de las empresas termoeléctricas que se ubican en la ciudad de Quito.

TABLA 2.2. UNIDADES OPERATIVAS EN CADA UNA DE LAS EMPRESAS TERMOELÉCTRICAS EN QUITO Y SU POTENCIA.

Empresa	Central	Térmica MCI		Térmica Turbogas		Unidad	Potencia Efectiva (MW)
		Potencia Nominal (MW)	Potencia Efectiva (MW)	Potencia Nominal (MW)	Potencia Efectiva (MW)		
CELEC - Termopichincha	Guangopolo	17.52	16.80			U1	5.20
						U3	5.10
						U4	5.10
						U7	1.40
	Santa Rosa			51.30	51.00	TG1	17.00
						TG2	17.00
						TG3	17.00
E.E.Q.	Gualberto Hernández	34.32	31.20			U1	5.20
						U2	5.20
						U3	5.20
						U4	5.20
						U5	5.20
						U6	5.20
	Luluncoto	9.07	7.90			U1	2.85
						U2	2.30
						U3	2.75

Elaborado: Soraya Ruiz R., a partir de (Consejo Nacional de Electricidad CONELEC, 2010)

USO DE COMBUSTIBLES PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN QUITO.

En laTabla 2.3 se detalla el consumo anual de combustibles por parte de cada una de las termoeléctricas instaladas en la ciudad de Quito, reportado al año 2009.

TABLA 2.3. CONSUMO ANUAL DE COMBUSTIBLES DE LAS EMPRESAS TERMOELÉCTRICAS EN QUITO, AÑO 2009.

Empresa	Unidad	Potencia Efectiva (MW)	Consumo de combustible		
			Diesel 2 (miles gal)	Residuo (miles gal)	Fuel oil (miles gal)
Guangopolo	U1	5.20	625.2	5554.34	
	U3	5.10	570.5	6886.19	
	U4	5.10	583.15	6167.48	
	U6	5.20	461.31	4219.34	
	U7	1.40	106.58	1098.86	
Santa Rosa	TG1	17.00	10085.56		
	TG2	17.00	13220.94		
	TG3	17.00	No reporta		
Gualberto Hernández	U1	5.20	1333582.96		13421.62
	U2	5.20	2123359.55		21370.19
	U3	5.20	1933792.82		19462.33
	U4	5.20	1997579.53		20104.30
	U5	5.20	1790890.97		18024.12
	U6	5.20	2023329.16		20363.45
Luluncoto	U1	2.85	7676.91		623467.43
	U2	2.30	No reporta consumo		No reporta consumo
	U3	2.75	10468.09		850147.57

Elaborado: Soraya Ruiz R., a partir de (Consejo Nacional de Electricidad CONELEC, 2010)

2.2 MARCO LEGAL APLICABLE AL FUNCIONAMIENTO DE TERMOELÉCTRICAS.

La legislación ambiental exige la determinación de los impactos a la calidad del aire ambiente producidos por las fuentes fijas de combustión, así como parte de la evaluación de impacto ambiental como también para verificar el cumplimiento de los límites máximos permitidos por sus normas técnicas. El Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente (TULSMA) incluye dentro de sus artículos el siguiente: Libro VI. Anexo 3: Numeral 4.1.4.2: “Las fuentes fijas significativas nuevas, o fuentes existentes remodeladas o modificadas sustancialmente, como parte integral del estudio de impacto ambiental requerido, deberán evaluar su impacto a la calidad del aire mediante el uso de modelos de dispersión”.

Así mismo, en el Reglamento Ambiental para Actividades Eléctricas expresamente indica en el artículo 15, literal a) Las emisiones se mantendrán por debajo de los límites permisibles establecidos en el reglamento que determina las normas generales de emisión para fuentes fijas de combustión y los métodos generales de medición, … La dispersión que se produzca y correspondiente concentración de contaminantes se mantendrán por debajo de los límites establecidos en el Reglamento Sobre Normas de Calidad del Aire, publicado en el Registro Oficial 726 del 15 de julio de 1991, y su método de predicción será a través de modelación matemática”.

En el siguiente cuadro (Tabla 2.4), se resume el marco legal aplicable a la actividad de generación de energía termoeléctrica.

TABLA 2.4. MARCO LEGAL APLICABLE A LAS EMPRESAS TERMOELÉCTRICAS EN QUITO.

NORMA LEGAL	ARTICULO
Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria, Libro VI. Anexo 3 .	Numeral 4.1.4.2
Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria, Libro VI. Anexo 4 .	Numeral 4.1.2.1

TABLA 2.4CONTINUACIÓN

Reglamento Ambiental para Actividades Eléctricas, Capítulo III.	Art. 15
Ordenanza 146 del Distrito Metropolitano de Quito. Normas Técnicas de emisiones y descargas.	Art. 7. Numeral 3.6 y Numeral 5.2

Elaborado: Soraya Ruiz R.

En el Numeral 3.6 del Art. 7. De la Ordenanza 146 del Distrito Metropolitano de Quito se menciona expresamente: “Todos los regulados que dispongan de fuente fija están obligados a presentar anualmente en el mes de Noviembre los resultados de las caracterizaciones físico – químicas de las emisiones a la atmósfera ante las Entidades de Seguimiento…”. A continuación se indican los valores máximos permisibles de emisiones según dicha ordenanza.

TABLA 2.5. VALORES MÁXIMOS PERMISIBLES DE EMISIONES AL AIRE PARA FUENTES FIJAS DE COMBUSTIÓN.

CONTAMINANTE EMITIDO	COMBUSTIBLE UTILIZADO	UNIDADES [1]	VALORES MÁXIMOS
Partículas	Sólido*	mg/Nm^3	200
	Bunker	mg/Nm^3	200
	Diesel	mg/Nm^3	150
	Gaseoso	No aplicable	No aplicable
Óxidos de Nitrógeno	Sólido*	mg/Nm^3	900
	Bunker	mg/Nm^3	700
	Diesel	mg/Nm^3	500
	Gaseoso	mg/Nm^3	140
Dióxido de Azufre	Sólido*	mg/Nm^3	No aplicable
	Bunker	mg/Nm^3	1650
	Diesel	mg/Nm^3	1650
	Gaseoso	No aplicable	No aplicable

TABLA 2.5CONTINUACION

Monóxido de Carbono	Sólido*	mg/Nm^3	1800
	Bunker	mg/Nm^3	300
	Diesel	mg/Nm^3	250
	Gaseoso	mg/Nm^3	100

Notas: [1] mg/Nm^3: miligramos por metro cúbico de gas, a condiciones normales, mil trece milibares de presión (1013 mbar) y temperatura de 0 °C, en base seca y corregidos a 7% de oxígeno. ***** Sólidos sin contenido de azufre.

Fuente: Cap.III de la Ordenanza 146 del DMQ.

2.3 DESCRIPCIÓN DE LAS PLANTAS TERMOELÉCTRICAS EN LA CIUDAD DE QUITO.

En este epígrafe se pretende hacer una breve reseña de cómo es la configuración de cada una de estas centrales y en dónde están localizadas.

2.3.1 CENTRAL TERMOELÉCTRICA GUANGOPOLO.

2.3.1.1 Descripción General

La central inició su operación de generación termoeléctrica en abril de 1977, contando con una potencia instalada de 31.2MW, distribuida en 6 unidades marca Mitsubishi MAN con capacidad unitaria de 5.2 MW.[5]

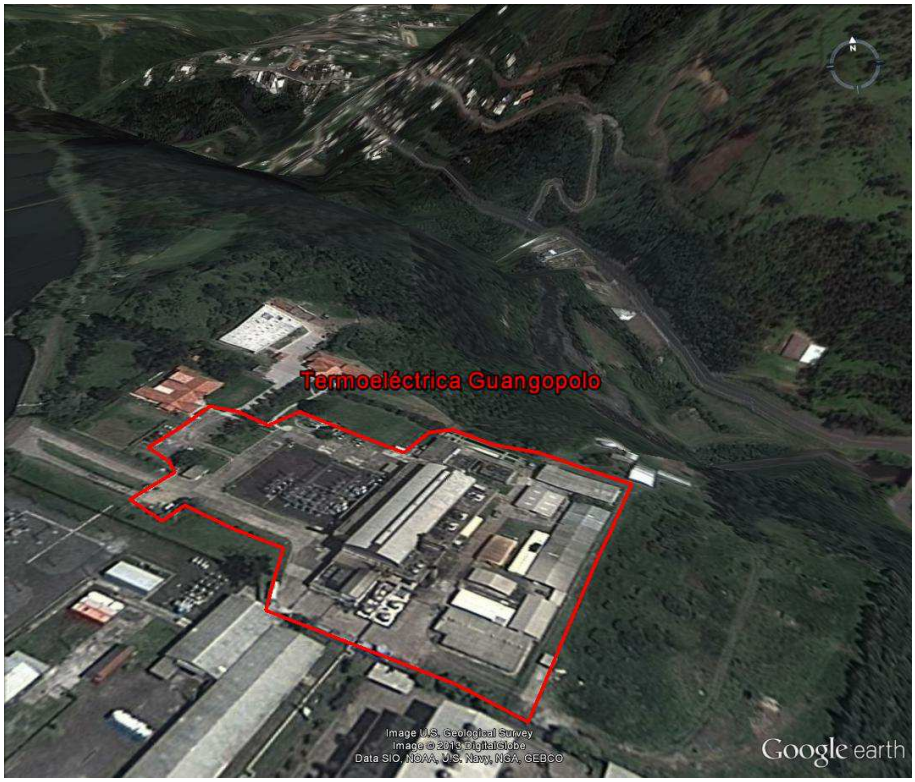
En agosto de 2006, se inicia una nueva etapa de crecimiento para TERMOPICHINCHA S.A, con la instalación de una unidad de 1.8 MW marca Wartsila, para una potencia total instalada de 33 MW.

[5] Tomado de: http://www.termopichincha.com.ec/index.php/generacion/guangopolo

Las unidades de generación de la Central para su operación utilizan residuo de la Refinería Shushufindi.

La producción de la Central se entrega al Sistema Nacional Interconectado a través de la Subestación Vicentina.

FIGURA 2.1. VISTA SATELITAL DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA GUANGOPOLO.



Fuente: Google Earth

2.3.1.2 Lugar Geográfico

La Central Termoeléctrica Guangopolo se encuentra ubicada en el Valle de los Chillos, Provincia de Pichincha, en el sector de la Armenia, cercano al reservorio de Guangopolo (verFigura 2.1).

2.3.2 CENTRAL TERMOELÉCTRICA SANTA ROSA.

2.3.2.1 Descripción General

La central inició su operación en marzo de 1981. Cuenta con una potencia instalada de 51MW, distribuida en 3 turbinas que funcionan como generadores. La potencia nominal de cada generador es 17 MW. Dos de las tres unidades de generación operan como Compensadores Sincrónicos. La energía reactiva generada es entregada al Sistema Nacional Interconectado. La Central utiliza para su operación diesel. La Central es utilizada principalmente en las horas de mayor demanda de energía y durante las épocas de estiaje de las Centrales Hidroeléctricas. Se conecta al Sistema Nacional Interconectado a través de la subestación Santa Rosa.[6]

FIGURA 2.2. VISTA SATELITAL DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA SANTA ROSA.

Fuente: Google Earth

[6] Tomado de: http://www.termopichincha.com.ec/index.php/generacion/santa-rosa

2.3.2.2 Lugar Geográfico

La central se encuentra ubicada al sur de la ciudad de Quito, en el km. 17½ de la Panamericana Sur, sector de Cutuglahua, como se puede ver enla Figura 2.2.

2.3.3 CENTRAL TERMOELÉCTRICA GUALBERTO HERNÁNDEZ.

2.3.3.1 Descripción General

La central cuenta con una potencia instalada de 34.2 MW. Actualmente existen seis unidades motor-generador instaladas dentro de la planta. Cuatro de los seis motores se encuentran en funcionamiento continuo, los dos restantes son unidades que se ponen en marcha únicamente en emergencias o para dar mantenimiento a las demás.El voltaje de generación es de 6.6 KV, el mismo que es elevado a 138 KV para sincronizarse a la Subestación Vicentina y de ahí al sistema interconectado.(Calderón & Pachacama, 2011)

Los combustibles utilizados por los motores de las unidades generadoras son Diesel y Crudo reducido (búnker). En la etapa de arranque, el combustible diesel es inyectado a las unidades motoras durante un período de cuatro horas. Luego de haber alcanzado las condiciones óptimas de funcionamiento el diesel es reemplazado por una mezcla de 92% de Crudo Reducido y 8% de Diesel, la misma que es inyectada a los motores a una temperatura de 70°C, siendo de esta manera el combustible principal consumido durante el funcionamiento.

En período de estiaje de las centrales hidroeléctricas, las centrales térmicas operan para cubrir la demanda base del país y el resto del tiempo es programado para cubrir la demanda en horas pico y por requerimiento de energía reactiva.

2.3.3.2 Lugar Geográfico

La central Térmica Gualberto Hernández se encuentra ubicada en la provincia de Pichincha en el sector de Guangopolo en el Valle de los Chillos, como se puede ver en la Figura 2.3.

FIGURA 2.3. VISTA SATELITAL DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA GUALBERTO HERNÁNDEZ.

Fuente: Google Earth

2.3.4 CENTRAL TERMOELÉCTRICA LULUNCOTO.

2.3.4.1 Descripción General

La central cuenta con una potencia instalada de 9.0 MW. (Empresa Eléctrica Quito). Es una central térmica con motores de combustión interna.

2.3.4.2 Lugar Geográfico

La central está ubicada en el sector sur del DMQ, en la Parroquia Chimbacalle, en el barrio Luluncoto (verFigura 2.4).

FIGURA 2.4. VISTA SATELITAL DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA LULUNCOTO.

Fuente: Google Earth

2.4 LA CALIDAD DEL AIRE

El concepto de calidad del aire corresponde a un conjunto de normas y disposiciones de mayor o menor vinculación desde el punto de vista legislativo, y que definen un umbral entre el aire limpio y el aire contaminado.

Para cada contaminante criterio[7] se establecen normas, cuyo objeto principal es preservar la salud de las personas, la calidad del aire ambiente, el bienestar de los ecosistemas y del ambiente en general. Para cumplir con ese objetivo, la norma establece los límites máximos permisibles de contaminantes en el aire ambiente a nivel del suelo.

Esta norma fue revisada y modificada, para disminuir los límites máximos permitidos, así se establece la reforma al Anexo 4 del Libro VI del TULSMA, en el Registro Oficial del 7 de junio de 2011. En la Tabla 2.6 se resumen los contaminantes normados.

TABLA 2.6. NORMA ECUATORIANA DE CALIDAD DEL AIRE.

CONTAMINANTE	MÁXIMO PERMITIDO ($\mu g/m^3$) [1]	PERÍODO DE EVALUACIÓN	FORMA DE VERIFICACIÓN
Material Particulado menor a 10 micrones (MP10)	50	Promedio aritmético de 1 año	Verificación directa
	100	Máximo diario (24 horas)	Percentil 98 de valores de un año
Material Particulado menor a 2.5 micrones (PM2.5)	15	Promedio aritmético de 1 año	Verificación directa
	50	Máximo diario (24 horas)	Percentil 98 de valores de un año
Dióxido de Azufre (SO_2)	125	Máximo diario (24 horas)	Verificación directa
	60	Promedio aritmético de 1 año	Verificación directa

[7] Monóxido de carbono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, ozono y material particulado.

TABLA 2.6CONTINUACIÓN

Monóxido de Carbono (CO)	10000	Máximo en 8 horas	No más de una vez al año
	30000	Máximo horario	No más de una vez al año
Ozono (O_3)	100	Máximo en 8 horas	No más de una vez al año
Dióxido de nitrógeno (NO_2)	40	Promedio aritmético de 1 año	Verificación directa
	200	Máximo horario	Verificación directa

Notas: [1] $\mu g/m^3$: microgramos por metro cúbico de gas, valores sujetos a condiciones de referencia de 25°C y 760 mmHg.

Elaborado: Soraya Ruiz R. a partir de Anexo 4 del Libro VI del TULSMA.

2.4.1 VIGILANCIA Y EVALUACION DE LA CALIDAD DEL AIRE (Flores, 2002)

La vigilancia de la calidad del aire es el conjunto de sistemas y procedimientos utilizados para evaluar la presencia de agentes contaminantes en la atmósfera, así como la evolución de sus concentraciones en el tiempo y el espacio, con el fin de prevenir y reducir los efectos que pueden causar sobre la salud y el medio ambiente.

Las tres herramientas principales de evaluación de la calidad del aire son:

a. Monitoreo
b. Modelos de dispersión
c. Inventarios de emisiones

El propósito final del monitoreo no es simplemente recopilar datos, sino proporcionar la información requerida por la autoridad competente para que tomen decisiones fundamentadas en lo que respecta a la gestión de la calidad del aire. Sin embargo, el monitoreo presenta limitaciones.

Desde el punto de vista de la dispersión de contaminantes, la modelación se utiliza para saber, entre otras cosas, cómo cambia en el tiempo y el espacio la concentración de un contaminante, a objeto de predecir y analizar la calidad del aire. En vista de que este es el tema central de esta tesis, a continuación se profundiza en este punto.

Un inventario de emisiones es básicamente una herramienta que presenta una estimación de todos los contaminantes de interés emitidos a la atmósfera por las diversas actividades que realizan los habitantes en un área geográfica y en un período determinado. Los inventarios de emisiones están integrados por:a)Fuentes de punto (industrias),b) Fuentes móviles (vehículos automotores que circulan por calles y carreteras),c)Fuentes de área (comercios, servicios, casas habitación y vehículos automotores que no circulan por carreteras), yd) Fuentes naturales (erosión de suelo y emisiones biogénicas, entre otras).

Los contaminantes incluidos en un inventario de emisiones están determinados por el propósito que cumple dicho inventario, ya sea conocer el origen de la mala calidad en una zona urbana o conocer el origen de las emisiones que causan el cambio climático global.

2.4.1.1 Modelos de Dispersión Atmosféricos.

La atmósfera es un sistema reactivo extremadamente complejo, en el cual ocurren numerosos procesos físicos y químicos simultáneamente; las concentraciones de especies químicas en la atmósfera están controladas por cuatro tipos de procesos (Jacob, 1999):

- Emisiones: ya sean estas antropogénicas, biogénicas, o por procesos naturales no–biogénicos (por ejemplo erosión eólica).
- Química: reacciones en la atmósfera que pueden llevar a la formación y remoción de especies.
- Transporte: los vientos transportan especies atmosféricas lejos de su punto de origen.

- Depositación: Todo el material en la atmósfera es eventualmente depositado sobre la superficie de la tierra. Esta puede ser, “depositación seca”, que implica reacción directa o absorción sobre la superficie de la tierra, y “depositación húmeda”, que involucra remoción por precipitación.

Además hay que considerar el receptor, donde se detecta el efecto nocivo de las emisiones. Las mediciones ambientales dan en sí tan sólo una instantánea de las condiciones atmosféricas en un sitio y tiempo particulares. Además, la comprensión de los procesos atmosféricos individuales no implica el entendimiento del sistema por completo. De esta manera, los modelos matemáticos proveen el marco necesario para la integración de nuestro entendimiento de los procesos atmosféricos individuales ya descritos y el estudio de sus interacciones (Seinfeld & Pandis, 2006).

Un modelo de transporte químico es en general un modelo numérico computacional que simula la química en conjunto con el transporte turbulento atmosférico. Estos modelos se enfocan en los balances y flujos de una o más especies químicas.

Los modelos de transporte químico se pueden clasificar de acuerdo a la metodología y a las especies de interés que analizan. Según Jacob (Jacob, 1999), los modelos más simples utilizados en la investigación de la química atmosférica se pueden clasificar como: modelos de caja (*box models*) y modelos de paquetes (*puff models*). Estos dos modelos, representan respectivamente las aplicaciones más simples de los enfoques Eulerianos y Lagrangianos para obtener soluciones aproximadas a la ecuación de continuidad, que es la meta central de la química atmosférica para entender cuantitativamente cómo dependen las concentraciones de las especies de los procesos antes mencionados.

En general, los modelos de “paquetes” de aire o de "*puffs*" consideran la variación temporal de las emisiones, al representar la emisión de cada fuente puntual como un conjunto de paquetes de contaminantes ("*puffs*"), los cuales son transportados por el campo de vientos imperantes, se expanden al mezclarse con el aire que los rodea y en su interior se considera también las reacciones químicas más

importantes. El modelo le sigue la pista a los distintos paquetes de contaminantes en su viaje por el dominio computacional, así que también se puede describir como un modelo de ‘trayectorias’. Se pueden modelar varios contaminantes en forma simultánea y las reacciones químicas también se pueden incorporar de manera simplificada. Los algoritmos incorporan mecanismos de crecimiento del *puff* a lo largo de la trayectoria y también mecanismos de depositación seca y húmeda. Estos modelos son particularmente mejores que los modelos Gaussianos cuando se presentan situaciones de calmas (vientos muy débiles) o de recirculaciones del viento, lo que hace que se produzcan acumulaciones de contaminantes en algunas zonas, eventualmente produciéndose altos impactos localizados. Estos modelos de *puffs* requieren información detallada de campos de vientos, para lo cual se requiere disponer de datos de varias estaciones meteorológicas en forma simultánea, sobre todo si el terreno es complejo o hay cercanía de cuerpos de agua. Además se requiere disponer de información meteorológica en altura para poder definir la altura de la capa de mezclado, parámetro muy importante en definir la magnitud de los impactos, y que cambia a lo largo del día, alcanzando su máximo cuando se alcanzan las máximas temperaturas ambientales en la tarde, y que alcanza un valor muy bajo de noche, particularmente cerca del amanecer, cuando se producen las mínimas de temperatura superficial.(Jorquera, 2008)

Los modelos de dispersión, en función del enfoque del tratamiento de la contaminación atmosférica que se desee, pueden ser de tipo determinístico o de tipo estadístico. Los primeros simulan los fenómenos físicos entre el foco emisor y el receptor, mientras que los segundos establecen una relación entre concentraciones y emisiones, registradas en el pasado, que se extrapola a condiciones futuras semejantes.

Entre los modelos estadísticos se pueden nombrar los siguientes: distribuciones estadísticas de la concentración, análisis de series temporales, métodos mixtos determinístico – estadísticos, y modelos receptor.

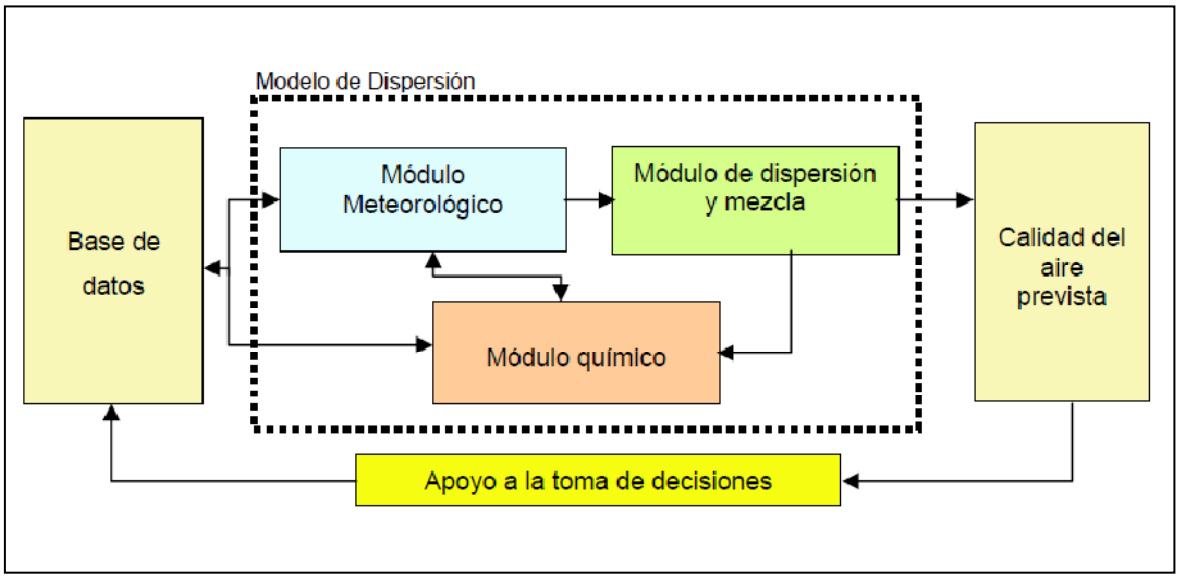
2.5 MODELO A SER UTILIZADO.

Para el desarrollo del presente tema de investigación se seleccionó un modelo tipo *puff*, conocido comercialmente como CALPUFF View©, desarrollado por *Lakes Environmental Software*, y que es una interfaz de Windows para el modelo de dispersión CALPUFF recomendado por la *Environmental Protection Agency* (EPA) de Estados Unidos.

De manera general, se puede decir que describe la composición de uno o más elementos de fluido (*puffs*), moviéndose con el flujo. Un elemento de fluido se define como un volumen de aire de dimensiones suficientemente pequeñas tal que todos los puntos dentro de este, son transportados por el flujo con la misma velocidad; pero suficientemente grande como para contener una agrupación estadísticamente significativa de moléculas. (Jacob, 1999)

De manera simplificada el modelo de dispersión, contiene o se comunica con varios otros modelos y/o bases de datos, como se muestra en la siguiente figura.

FIGURA 2.5. CONEXIÓN ENTRE LOS MÓDULOS DE UN MODELO DE DISPERSIÓN Y LA GESTIÓN DE CALIDAD DEL AIRE.



Fuente: Tomado de (Bustos, 2004)

El sistema de Modelación CALPUFF incluye tres componentes principales: CALMET, CALPUFF y CALPOST. El manual del usuario está disponible en la web. (A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model, 2000.a).

CALPUFF es un modelo de transporte y dispersión que mueve por advección[8] los "*puffs*" de material emitido de las fuentes modeladas, simulando procesos de dispersión y transformación a lo largo del camino. Para eso usa los campos meteorológicos generados por el modelo CALMET, las variaciones espaciales y temporales en los campos meteorológicos seleccionados son explícitamente incorporadas en la distribución resultante de "*puffs*" en todo el período de simulación. Los archivos primordiales de salida del CALPUFF contienen concentraciones horarias evaluadas en un receptor seleccionado (o en múltiples receptores).

CALPOST, que es usado para procesar los archivos de salida del CALPUFF, produciendo tabulaciones que resumen los resultados de la simulación, identificando por ejemplo la concentración horaria más alta obtenida en cada receptor.

2.5.1 MODELO METEOROLÓGICO CALMET.

En términos muy simples, CALMET es un modelo meteorológico que desarrolla campos de viento y temperatura horarios sobre un dominio de modelación de grilla tridimensional. Ese sistema de grillas consiste en NZ niveles verticales de NX por NY celdas cuadradas horizontales (Scire, Robe, Fernau, & Yamartino, 2000).

Este modelo, incluye un generador de campos de viento, que contiene análisis objetivos y tratamientos parametrizados de los flujos ascendentes, efectos cinématicos de terreno, efectos de bloqueo de terreno, procedimientos de

[8]Advección: (meteorología) Transporte de las propiedades de una masa de aire producido por el campo de velocidades de la atmósfera. Por lo general este término es referido al transporte horizontal en superficie de propiedades como temperatura, presión y humedad.

minimización de la divergencia, y un modelo micrometeorológico para capas límite sobre tierra y sobre agua.

El modelo meteorológico CALMET combina las observaciones superficiales y en altura (radiosondeo y/o modelo meteorológico) disponibles en la zona de estudio, generando así un campo de vientos tridimensional requerido para simular la dispersión y depositación de los contaminantes emitidos en la zona del proyecto (Quito).

CALMET considera de manera explícita los flujos de aire inducidos por las pendientes del terreno, y también los efectos convectivos y de bloqueo del flujo inducidos por la topografía. CALMET realiza además un proceso de minimización de la divergencia del campo de vientos generado, de manera de garantizar conservación de la masa en el dominio modelado.

El modelo CALMET utiliza ecuaciones de diagnóstico micro-meteorológico, basadas en el balance de energía superficial, para simular las capas límites superficiales de vientos a baja altura sobre el suelo, las que son especialmente críticas en condiciones de estabilidad atmosférica.

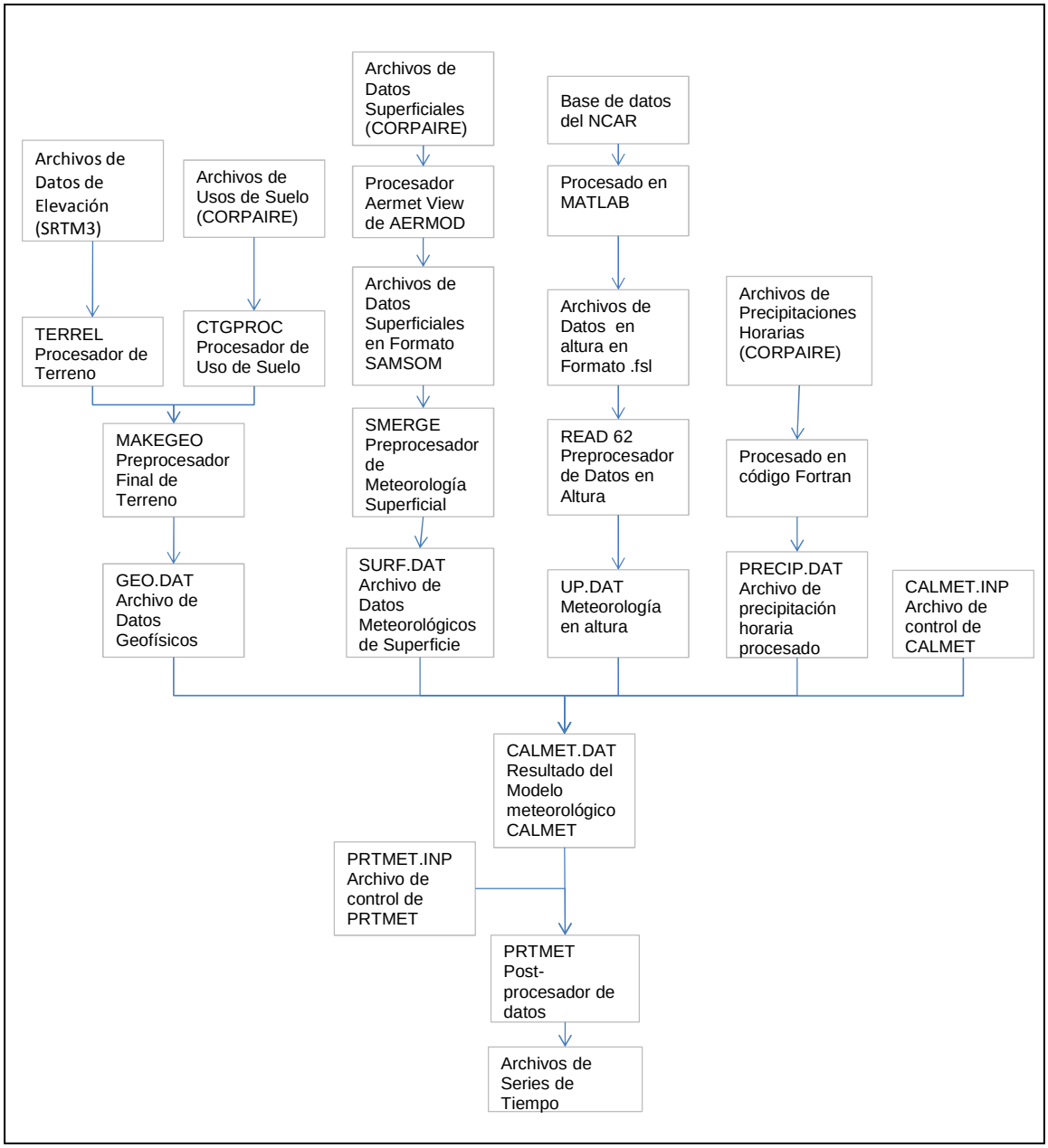
CALMET además mejora los resultados obtenidos de modelos del tiempo como el MM5, modificando los vientos de acuerdo a la topografía detallada del dominio modelado. Esta funcionalidad de CALMET se debe a que normalmente los resultados de los modelos del tiempo se obtienen con una resolución horizontal de 4, 6 o 10 km, mientras que los detalles topográficos son de dimensiones mucho menores (algunos cientos de metros por ejemplo).

CALMET cuenta con una larga lista de programas preprocesadores diseñados como interfaz del modelo con la información meteorológica y geofísica disponible en los distintos medios, la cual se encuentra normalmente en un formato distinto al requerido por el CALPUFF; y genera un archivo denominado CALMET.DAT el cual es utilizado como entrada de datos meteorológicos para CALPUFF.

Datos de entrada necesarios para el CALMET

Una vista general de todos estos requerimientos, se puede observar en el diagrama de flujo de la Figura 2.6.

FIGURA 2.6. DIAGRAMA DE LOS ELEMENTOS DEL PROGRAMA DE MODELACIÓN METEOROLÓGICA CALMET (INDICA ÚNICAMENTE LOS PROCESOS UTILIZADOS EN ESTE TRABAJO).



Fuente: Soraya Ruiz R. a partir de (Scire, Robe, Fernau, & Yamartino, 2000)

A continuación se resumen los requerimientos de datos de entrada del CALMET, en otras palabras, toda la información necesaria para ingresar al modelo.

TABLA 2.7. INFORMACIÓN DE ENTRADA PARA EL CALMET

Meteorología Superficial [a]	**Meteorología en altura** [b]	**Datos geofísicos** [c]
Velocidad de vientos	Velocidad de vientos	Elevaciones de terreno
Dirección de vientos	Dirección de vientos	Categorías de uso de suelos
Temperatura	Temperatura	Longitud de Rugosidad superficial (opcional)
Cobertura de nubes	Presión	Albedo (opcional)
Altura de nubes	Elevación	Razón de Bowen (opcional)
Presión superficial		Constante del flujo de calor superficial (opcional)
Humedad relativa		Flujo de calor antropogénico (opcional)
Precipitaciones		Índice de vegetación (opcional)

[a] Observaciones horarias. [b] Se necesitan como mínimo dos datos al día. [c] Campos grillados.

Elaborado: Soraya Ruiz R. a partir de (Scire, Robe, Fernau, & Yamartino, 2000)

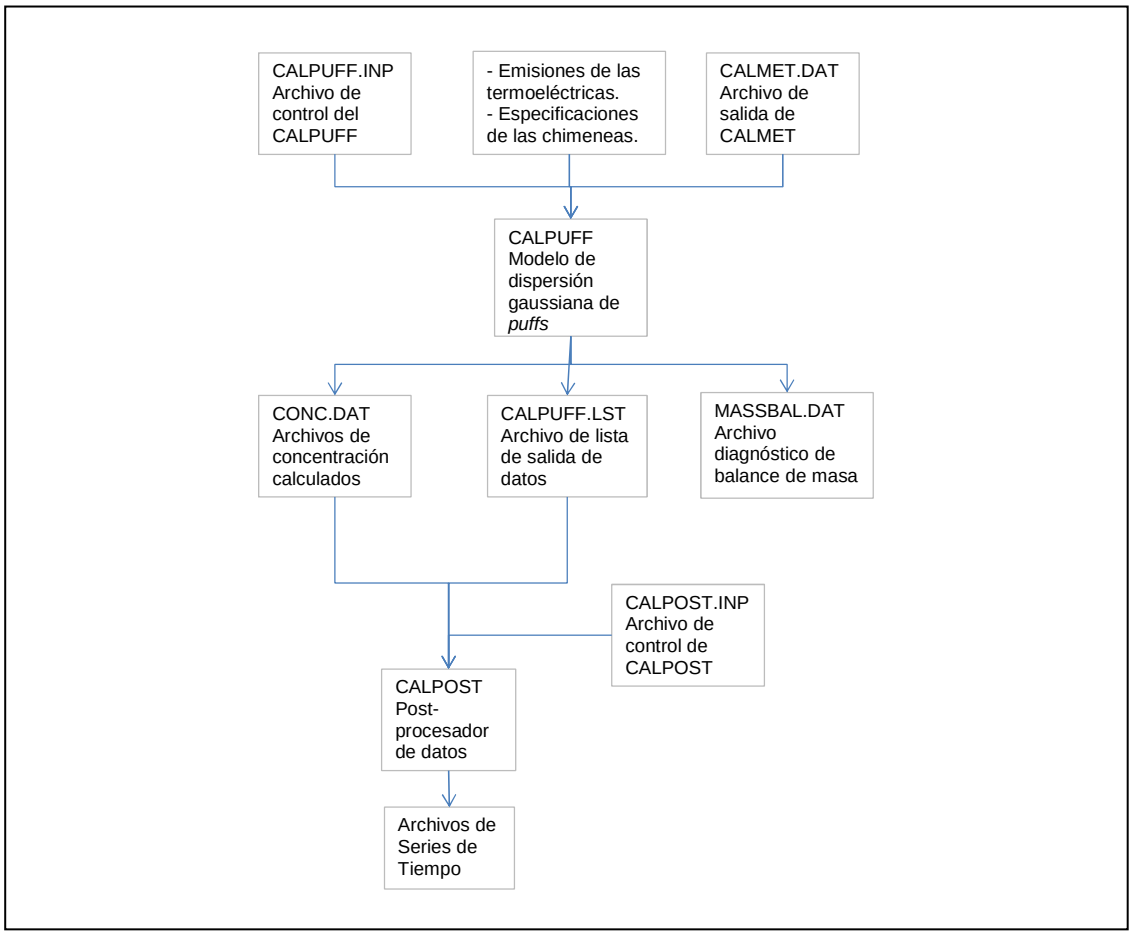
Como se observa en la TABLA 2.7, los coeficientes opcionales, en caso de no ser definidos expresamente por el usuario, son estimados por el programa dependiendo de la categoría de uso de suelos del dominio de modelación.

Es importante señalar que los valores que no existen de temperatura, cobertura de nubes, altura de nubes, presión barométrica y humedad relativa, en las estaciones superficiales son internamente reemplazados por valores de la estación más cercana que tenga datos medidos. Luego, es necesario que exista un valor válido de cada parámetro disponible al menos en una estación, para cada hora de la corrida.

2.5.2 MODELO DE DISPERSIÓN CALPUFF.

En la Figura 2.7, se puede observar de forma simple como es la configuración del modelo CALPUFF.

FIGURA 2.7. DIAGRAMA DE LOS ELEMENTOS DEL MODELO DE DISPERSIÓN CALPUFF (INDICA ÚNICAMENTE LOS PROCESOS UTILIZADOS EN LA PRESENTE TESIS)



Elaborado: Soraya Ruiz R. a partir de (Scire, Robe, Fernau, & Yamartino, 2000)

En primer lugar, se parte con el resultado del modelo meteorológico CALMET. Posteriormente se ejecuta el modelo CALPUFF a través de una interfaz gráfica amigable. En esta etapa, se debe ingresar la información de las fuentes (sean estas puntuales, de área, de volumen) con sus respectivas emisiones (constantes o variables en el tiempo); la ubicación de los receptores, etc. A su vez los

resultados del modelo CALPUFF pueden analizados con el post procesador CALPOST.

Entrando más en detalle sobre el modelo CALPUFF se puede decir que es un modelo Lagrangiano de dispersión tipo *puff* en estado no estacionario, multicapa y multiespecies; el cual puede simular los efectos de las variaciones meteorológicas en tiempo y en espacio sobre el transporte de contaminantes, la transformación de éstos y su remoción. CALPUFF tiene las opciones de remoción química, depositación seca y húmeda, algoritmos de terreno complejo, fumigación de la pluma y otros efectos.

La ecuación básica para la contribución de un *puff* en un receptor es (Scire, Strimaitis, & Yamartino, 2000.a):

$$C = \frac{Q}{2\pi\sigma_x\sigma_y} g \exp\left[-d_a^2 / \left(2\sigma_x^2\right)\right] \exp\left[-d_c^2 / \left(2\sigma_y^2\right)\right] \qquad \textbf{(2.1)}$$

$$g = \frac{2}{(2\pi)^{1/2}\sigma_z} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp\left[-\left(H_e + 2nh\right)^2 / \left(2\sigma_z^2\right)\right] \qquad \textbf{(2.2)}$$

donde

C es la concentración a nivel del suelo (g/m^3),

Q es la masa de contaminante en el *puff* (g),

σ_x es la desviación estándar de la distribución Gaussiana en dirección paralela al viento (m),

σ_y es la desviación estándar de la distribución Gaussiana en dirección contraria al viento (m),

σ_z es la desviación estándar de la distribución Gaussiana en la dirección vertical (m),

d_a es la distancia desde el centro del *puff* al receptor en dirección paralela al viento (m),

d_c es la distancia desde el centro del *puff* al receptor en dirección contraria al viento (m),

g es el término vertical (m) de la ecuación Gaussiana,

H_e es la altura efectiva sobre el suelo del centro del *puff*; y,

h es la altura de la capa de mezcla (m).

n número de puff

Cada *puff* es seguido en su trayectoria por el dominio de modelación, evaluándose su tamaño, ubicación, concentración de contaminantes, etc. a medida que es transportado por los campos de vientos. La concentración de contaminantes en un receptor dado se evalúa agregando las contribuciones de todos los *puffs* cercanos, usando las dos ecuaciones anteriores.

2.5.3 JUSTIFICACIÓN DE LA SELECCIÓN DEL MODELO.

Esta tesis no pretende ser un manual de uso del programa empleado, sino hacer referencia al tipo de herramienta que está disponible para hacer este tipo de modelaciones.

Entonces, vamos a ampliar las razones por las que se escogió emplear este modelo:

- En primer lugar este modelo está ampliamente recomendado por la US-EPA (*Enivronmental ProtectionAgency* de Estados Unidos).
- Se considera que hay suficientes antecedentes de monitoreo ambiental de gases y partículas en el país (existen observaciones válidas).
- Se considera que la información meteorológica superficial disponible es suficiente para construir campos de viento para modelar adecuadamente la dispersión.
- Existe información de meteorología en altura válida.
- Se supone que el modelo de dispersión ha sido validado, por lo que es una herramienta confiable para generar concentraciones simuladas en una zona de terreno complejo como lo es Quito. Además este modelo permite considerar el transporte de contaminantes a largo alcance, terreno

complejo, formación de contaminantes secundarios, depositación seca y húmeda, transformación química, entre otras.[9]

Otra de las razones es que este modelo es empleado en otros países, para todo tipo de estudios de impacto ambiental. Así ampliaremos cual es la utilidad que se le da en otros países.

Por ejemplo, en Chile, se aprobó una nueva norma de emisión para centrales termoeléctricas, y para ello en el anteproyecto se realizó un estudio de relación costo-beneficio, en el cual se evalúan los costos privados asumidos por los generadores eléctricos y los beneficios que se verán en la salud de la población a causa de la disminución de contaminantes a la atmósfera, además se estudió si los límites de emisión son adecuados a la realidad nacional de ese país. Como parte de ese estudio se realizó una modelación en CALPUFF para estimar el impacto en la calidad del aire de las emisiones de todas las termoeléctricas de Chile.

En Chile también, el método utilizado para la medición de contaminantes emitidos a la atmósfera y que cuenta con la aprobación del organismo gubernamental SEA "Sistema de Evaluación Ambiental" para la construcción y posterior operación de centrales termoeléctricas, es a través de la modelación de la dispersión de las emisiones atmosféricas, esta modelación entrega los resultados de la dispersión de las emisiones de dióxido de nitrógeno (NO_2), dióxido de azufre (SO_2), material particulado respirable (PM_{10}) y monóxido de carbono (CO) provenientes de centros de generación de emisiones[10].

[9] http://www.weblakes.com/products/calpuff/

[10] http://www.sea.gob.cl/

En Colombia, se creó un manual de diseño de sistemas de vigilancia de la calidad del aire, en el que explícitamente se señala la utilización de programas Aermod o CALPUFF para la modelación de contaminantes atmosféricos.[11]

En México, atendiendo a la necesidad de proveer de información técnica y científica para sustentar la toma de decisiones en materia de política y normatividad ambiental, la Dirección de Investigación de Calidad del Aire (DICA) ha realizado varios proyectos en algunas termoeléctricas del país encaminados a estimar los impactos en salud de las emisiones y a cuantificarlos monetariamente. Entre ellos la "Comparación de modelos de dispersión de emisiones provenientes de fuentes fijas", donde se analizan los software utilizados en ese país, ISCST3 y CALPUFF.[12]

2.6 EMISIONES DERIVADAS DE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA EN CENTRALES TERMOELÉCTRICAS

El tipo y la cantidad de las emisiones contaminantes derivadas de la generación de energía eléctrica dependen del tipo de energético primario empleado y de la tecnología de conversión. Para los propósitos de esta tesis son de interés particular las emisiones a la atmósfera provenientes de las plantas termoeléctricas que utilizan combustóleo y diesel.(Zuk, Garibay, Iniestra, López, Rojas, & Laguna, 2006)

---

[11] Tomado de: http://www.minambiente.gov.co/documentos/normativa/ambiente/resolucion/res_2154_021110_manual_diseno.pdf

[12] http://www.inecc.gob.mx/dica/580-calaire-termos2

2.6.1 GENERACIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS EN CENTRALES TERMOELÉCTRICAS.

Una central termoeléctrica es una instalación industrial empleada para la generación de electricidad a partir de la energía liberada en forma de calor, normalmente mediante la combustión de algún combustible fósil. El calor se emplea para producir vapor; éste, a su vez, mueve una turbina acoplada a un generador que, finalmente, produce la energía eléctrica.

Dentro del proceso de generación de energía eléctrica ocurren emisiones de contaminantes a la atmósfera durante las operaciones de manejo y transporte de combustible en tuberías, el almacenamiento del combustible en tanques, y el proceso de combustión en sí mismo. Sin embargo, se hace referencia a las emisiones producidas durante la combustión, por su gran volumen y potencial de impacto en la calidad del aire a escalas local y regional. El proceso de combustión se define como la oxidación rápida de sustancias (llamadas combustibles) por la aplicación de calor. En las centrales termoeléctricas, este proceso se lleva a cabo en calderas de gran capacidad. Los combustibles que se utilizan comúnmente en estos procesos son carbón, combustóleo y gas natural, aunque puede llegar a usarse también diesel, madera, gas licuado de petróleo (LP) o gases de proceso.

Cuando la combustión de hidrocarburos es completa, se producen dióxido de carbono (CO_2) y agua. Sin embargo, normalmente existe una porción de estos materiales que no es combustible o lo es sólo parcialmente y, por lo tanto, se generan sustancias como el monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos parcialmente oxidados. Adicionalmente, los combustibles pueden contener otras sustancias que al oxidarse producen contaminantes atmosféricos, como las partículas, los óxidos de azufre (SO_2 y SO_3), los NO_X, el ácido clorhídrico, sustancias organohalogenadas como las dioxinas y los furanos, el formaldehído y compuestos orgánicos policíclicos. Algunas de las “impurezas” de los combustibles también son emitidas después de la combustión, como por ejemplo, los metales pesados –mercurio, arsénico y cadmio–que se encuentran de manera natural en el carbón. La generación de estas emisiones depende principalmente del tipo de combustible, caldera y quemador de que se trate, de la configuración

de la caldera y de las condiciones de operación de la misma. Asimismo, la cantidad emitida varía a lo largo del año, dependiendo, entre otras cosas, de la intensidad de su uso. Cabe mencionar que algunos contaminantes se forman por la temperatura del proceso, y no solamente la quema incompleta del combustible. Por ejemplo, una fracción importante de los NO_x emitidos se forma de reacciones a altas temperaturas entre el nitrógeno y el oxígeno que existen en el aire. Es posible que no todos los contaminantes se emitan siempre que se utiliza cada combustible. Por ejemplo, en el caso del gas natural predominan las emisiones de NO_x e hidrocarburos no quemados; en el caso del carbón, las principales emisiones son de SO_2, partículas, NO_x, y metales pesados, dependiendo de su composición y lugar de origen. En lo que respecta al combustóleo, las principales emisiones asociadas con su combustión son las de SO_2, NO_x y partículas; cabe mencionar que este combustible es un producto residual de la refinación del petróleo, y su calidad depende de la calidad del petróleo crudo del que provenga. En Ecuador el crudo Oriente contiene 1.5 % en peso de azufre.(CEPAL, 2012).

A continuación se hace una breve descripción de los diferentes orígenes y de la importancia de los principales contaminantes atmosféricos generados en una planta termoeléctrica.

2.6.1.1 Dióxido de Azufre

El dióxido de azufre (SO_2) es un contaminante cuyo origen puede ser natural o antropogénico. La fuente natural de SO_2 es principalmente la actividad volcánica, mientras que la quema de combustibles que contienen azufre es la actividad humana que origina este contaminante en mayor cantidad, aunque existen otros procesos industriales –como algunas operaciones de refinación de petróleo– que también lo generan. El SO_2 es además precursor de otros contaminantes, como el trióxido de azufre (SO_3), el ácido sulfúrico (H_2SO_4) y los sulfatos, que contribuyen a la concentración de partículas suspendidas en la atmósfera y a la formación de la llamada “lluvia ácida”. (Zuk, Garibay, Iniestra, López, Rojas, & Laguna, 2006)

Las emisiones de SO_2 provenientes del uso de combustibles fósiles son directamente proporcionales a la cantidad de combustible utilizado y a su contenido de azufre, y por lo general son independientes del tipo y la configuración del equipo de combustión. En promedio, se considera que más del 95% del azufre presente en el combustible se transforma en SO_2, mientras que del 1% al 5% se oxida hasta formar SO_3 o sulfatos (EPA, 1998). En Ecuador, el búnker que se utiliza en la generación de energía eléctrica contiene 1.5 % en peso de azufre, mientras que el diesel 2 tiene una concentración en peso de azufre del 0.7%.(Instituto Ecuatoriano de Nomalización, 2012)

Efectos sobre la salud

La concentración de SO_2 en períodos promedio de 10 minutos no debería superar los 500 µg/m^3. Los estudios indican que un porcentaje de las personas con asma experimenta cambios en la función pulmonar y síntomas respiratorios tras períodos de exposición al SO_2 de tan sólo 10 minutos.

El SO_2 puede afectar al sistema respiratorio y las funciones pulmonares, y causar irritación ocular. La inflamación del sistema respiratorio provoca tos, secreción mucosa y agravamiento del asma y la bronquitis crónica; asimismo, aumenta la propensión de las personas a contraer infecciones del sistema respiratorio. Los ingresos hospitalarios por cardiopatías y la mortalidad aumentan en los días en que los niveles de SO_2 son más elevados. Varias especies animales, incluyendo el hombre, responden al dióxido de azufre mediante constricción bronquial. (OMS, 2006)

Efectos en la agricultura

Concentraciones elevadas de SO_2 y largos tiempos de exposición pueden causar daños severos a las plantas. Los daños agudos parecen estar causados por la absorción rápida del SO_2. El tejido dañado de la planta se caracteriza, primeramente por la apariencia seca y blanqueada, seguida por una decoloración café-rojiza. Los manzanos, perales, pinos y otros árboles son especialmente susceptibles al daño crónico; como también lo son la mayoría de las plantas usadas en la horticultura, la alfalfa, la cebada y el algodón. (Zaror Zaror, 2000)

2.6.1.2 Óxidos de Nitrógeno

Los NO_x se refieren a la suma del óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO_2). Estos compuestos existen naturalmente en la atmósfera como resultado de la descomposición bacteriana de compuestos nitrogenados, y de las tormentas eléctricas. Por otro lado, entre las principales fuentes antropogénicas de generación de NO_x se encuentran los vehículos automotores y los procesos de combustión en la industria. Por esta razón, generalmente las concentraciones de NO_x que se observan en áreas urbanas pueden ser de 10 a 100 veces mayores que aquellas que se encuentran en áreas rurales. Los NO_x también son precursores de lluvia ácida, ozono (O_3) y partículas secundarias.

En general, se considera que más del 90% de los NO_x emitidos por los equipos de combustión que utilizan combustibles fósiles son óxido nítrico (NO). Las emisiones de NO_x producidas durante la combustión en centrales termoeléctricas dependen principalmente de las condiciones de operación y la configuración de la caldera. Los NO_x pueden formarse a través de tres mecanismos principales: la conversión del nitrógeno presente en el combustible; la oxidación del nitrógeno molecular presente en el aire de combustión (conocido como "NO_x térmico"); y la reacción de los hidrocarburos presentes en el combustible con el nitrógeno del aire. De éstos, el mecanismo predominante, tratándose de combustibles pesados como el combustóleo, es el primeramente mencionado. En este caso, el nitrógeno presente en el combustible es responsable de hasta el 50% del total de emisiones de NO_x. Normalmente, entre el 20% y el 90% del nitrógeno presente en el combustible se convierte en NO_x. Los factores que influyen en la emisión de NO_x en este tipo de procesos son los siguientes: (1) la temperatura máxima de combustión; (2) la concentración de nitrógeno en el combustible; (3) la concentración de oxígeno; (4) el tiempo de exposición a la temperatura máxima. Por esta última razón, debido a que los equipos de mayor capacidad operan a temperaturas más elevadas, generalmente sus emisiones de NO_x son más importantes. Asimismo, las emisiones por unidad de combustible consumido en calderas con quemadores tangenciales son menores que aquellas producidas por

calderas con quemadores horizontales. (Zuk, Garibay, Iniestra, López, Rojas, & Laguna, 2006)

Efectos sobre la salud

En concentraciones de corta duración superiores a 200 mg/m^3, es un gas tóxico que causa una importante inflamación de las vías respiratorias. (OMS, 2006)

Estudios epidemiológicos han revelado que los síntomas de bronquitis en niños asmáticos aumentan en relación con la exposición prolongada al NO_2. La disminución del desarrollo de la función pulmonar también se asocia con las concentraciones de NO_2 registradas (u observadas) actualmente en ciudades europeas y norteamericanas.

Efectos comunes del SO_2 y NO_x

En combinación con el agua, el SO_2 se convierte en ácido sulfúrico, que es el principal componente de la lluvia ácida que causa la deforestación.

Las precipitaciones ácidas sobre las aguas superficiales pueden afectar su calidad, particularmente en aquellos casos de altas tasas de emisión. La lluvia ácida (pH 4-6), formada por la absorción de óxidos de azufre y de nitrógeno, puede afectar seriamente las tierras forestales y de cultivo, al bajar el pH del suelo, inhibiendo o destruyendo los microorganismos y la flora existente.

En ciertos casos, los efectos trascienden las fronteras. Por ejemplo, las emisiones de SO_x y NO_x provenientes de las centrales termoeléctricas británicas (en base a carbón mineral) han tenido efectos desastrosos sobre los bosques y terrenos agrícolas escandinavos, debido a la lluvia ácida generada. (Zaror Zaror, 2000)

2.6.1.3 Partículas suspendidas

Las partículas suspendidas son una mezcla compleja de materiales sólidos y líquidos, que pueden variar significativamente en tamaño, forma y composición,

dependiendo fundamentalmente de su origen. Su tamaño varía desde 0.005 hasta 100 micras (μm) de diámetro aerodinámico, esto es, desde unos cuantos átomos hasta el grosor de un cabello humano. Las partículas suspendidas se clasifican según su tamaño en las siguientes fracciones: partículas suspendidas totales (PST), que tienen un diámetro aerodinámico menor a 100 μm; las partículas “inhalables” (PM_{10}), fracción con un diámetro aerodinámico menor a 10 μmque reúnen la fracción traqueobronquial; las partículas “finas”, con diámetro aerodinámico menor a 2.5 μm ($PM_{2.5}$) que reúnen la fracción respirable; y, por último, las partículas “ultrafinas”, con diámetro aerodinámico menor a 1 μm (PM_1). Cabe mencionar que con base en su origen también se clasifican en primarias y secundarias; así, las partículas primarias se encuentran en la atmósfera tal como fueron emitidas por la fuente y, aquellas que se forman como producto de procesos y reacciones químicas entre SO_2, NO_x y otras moléculas reactivas, son las partículas secundarias. Las fuentes de emisión de las partículas al ambiente pueden ser naturales –como tormentas de arena, actividad volcánica, incendios forestales, erosión de suelos, etcétera– o antropogénicas –como procesos metalúrgicos a altas temperaturas, procesos de molienda o procesos de combustión. En general, la emisión de partículas por la quema de combustibles pesados en la producción de energía eléctrica depende de qué tan completa sea la combustión y del contenido de ceniza en el combustible. En el caso del combustóleo, el contenido de azufre es determinante para la emisión de partículas; el alto contenido de azufre se relaciona con mayor viscosidad y contenido de cenizas, lo que dificulta la atomización del combustible, provocando una combustión incompleta.

La carga es otro factor que afecta a la emisión de partículas en este tipo de procesos. Al utilizar una caldera al 50% de la capacidad nominal del equipo, las emisiones de partículas pueden reducirse entre un 30 y un 40%. Sin embargo, al reducir la carga hasta aproximadamente el 30% de su capacidad nominal, se dificulta el control de la combustión y las emisiones de partículas pueden incrementarse significativamente. (Zuk, Garibay, Iniestra, López, Rojas, & Laguna, 2006)

Efectos sobre la salud

El material particulado afecta a más personas que cualquier otro contaminante y sus principales componentes son los sulfatos, los nitratos, el amoníaco, el cloruro sódico, el carbón, el polvo de minerales y el agua. Las $PM_{2.5}$ suponen mayor peligro, porque al inhalarlas, pueden alcanzar las zonas periféricas de los bronquiolos y alterar el intercambio pulmonar de gases. (OMS, 2006)

Los efectos del PM sobre la salud se producen a los niveles de exposición a los que está sometida actualmente la mayoría de la población urbana y rural de los países desarrollados y en desarrollo. Según la OMS (2006), la exposición crónica a las partículas aumenta el riesgo de enfermedades cardiovasculares y respiratorias, así como de cáncer de pulmón.

Se ha comprobado que, incrementos diarios en PM, corresponden a incremento en muertes y hospitalizaciones por enfermedades de vías respiratorias y muerte cardiovascular 1 o 2 días después. Vivir en un área contaminada por partículas, incrementa la incidencia enfermedad pulmonar obstructiva crónica y cáncer de pulmón, así como enfermedades cardiovasculares. (Donaldson, MacNee, & Stone, 2006)

La mortalidad en ciudades con niveles elevados de contaminación supera entre un 15% y un 20% la registrada en ciudades más limpias. Incluso en la UE, la esperanza de vida promedio es 8,6 meses inferior debido a la exposición a $PM_{2.5}$ generadas por actividades humanas.

Los resultados parecen indicar que los riesgos para la salud asociados con exposiciones breves al PM_{10} probablemente son semejantes en las ciudades de los países desarrollados y en desarrollo, con un aumento de la mortalidad de alrededor del 0,5% por cada incremento de 10 $\mu g/m^3$ en la concentración diaria.

Efectos sobre la agricultura

Existe poca información respecto al efecto del material particulado sobre la vegetación. Algunos investigadores han señalado que el polvo puede bloquear los poros de las hojas y disminuir la fotosíntesis. También se ha identificado varias

substancias presentes en las partículas que causan daño a las plantas, tales como, por ejemplo, los fluoruros y compuestos ácidos. (Zaror Zaror, 2000)

2.7 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.

El Ecuador está situado al noroeste de América del Sur, entre la latitud 01°20’ N y 05° S y desde el Océano Pacífico hasta la parte oriental de la planicie amazónica.

El territorio del Ecuador está dividido en tres regiones naturales claramente definidas entre sí, ya sea por la topografía, clima, vegetación y población. Estas regiones son Costa, Sierra y Oriente.

La región de la Sierra está atravesada por la Cordillera de los Andes que la recorre de norte a sur. En la Sierra las altitudes varían desde los 1,200 a los 6,000 metros. La cordillera se divide en dos sistemas paralelos: cordilleras Oriental y Occidental, separadas por una llanura longitudinal que está dividida en varios valles por nudos transversales. (Blandín Landívar, 1976) .

Precisamente, la ciudad de Quito, está ubicada sobre la llamada Hoya de Quito, por la ciudad principal que allí se encuentra, o de Guayllabamba, por el río mayor que la riega, y constituye la parte andina de la provincia de Pichincha. Situada en las laderas orientales del volcán activo Pichincha, en la parte occidental de los Andes, la meseta de Quito se vincula directamente, por el sur, con el valle de Machachi; por el este–sureste, con el de los Chillos; por el este–noreste, con el de Cumbayá – Tumbaco –Puembo; por el noreste, con el de Cayambe y por el norte con los valles subtropicales de Puéllaro y Perucho y la zona de San José de Minas.(Terán, 1962)

FIGURA 2.8. MAPA TOPOGRÁFICO DE LA HOYA DE QUITO Y SUS ALREDEDORES.

Fuente: Soraya Ruiz R. a partir de http://maps.google.com/

En el centro de la hoya, el cerro Haló sirve de separación al valle de los Chillos con el de Cumbayá – Tumbaco – Puembo. En la mitad del sur de la hoya, el ramal que une al Pasochoa con el Rumiñahui separa el valle de Machachi de la hoyada de los ríos Pita – Pedregal – Guapal, perteneciente al Valle de los Chillos.

El río Guayllabamba separa la zona de Pomasqui – San Antonio de Pichincha (“Mitad del Mundo”) del valle de Puembo y del peldaño de Malchinguí – Tabacundo; y su afluente Pisque hace de frontera entre el valle de Puembo – Yaruquí y la planicie aledaña de El Quinche con el valle de Cayambe y las faldas del Mojanda donde están Tabacundo y Malchinguí.

En la misma dirección de la cordillera y del cauce del río San Pedro– Guayllabamba, corre de sur a norte un ramal secundario formado por las lomas de Puengasí, Monjas, Itchimbía, Guangüiltagua, Catequilla, roto solamente por el abra del río Machángara y por las quebradas tributarias del Batán chico y Molinohuayco.

La meseta de Quito es un alargado y estrecho altiplano que se extiende por aproximadamente 50 km entre sus extremos sur (cuesta de Santa Rosa, al pie del Atacazo, que le comunica con el valle de Machachi) y norte (San Antonio de Pichincha, junto al Pululagua), por apenas 4 km de ancho.

Este altiplano se encuentra dividido en dos grandes segmentos por el Panecillo: al sur se extiende la planicie de Turubamba – Guajaló – Chillogallo, y al norte, el cuenco de Quito y la planicie de Iñaquito – Cotocollao, que luego desciende al valle de Pomasqui – San Antonio de Pichincha. Hacia el Oriente, en el abra del Machángara, está la hoyada de Guápulo, en el sitio en donde este río, que bordea por el este la ciudad de Quito, rompe los lomeríos de Lumbisí – Guangüiltagua; y los peldaños de Nayón, Zámbiza, Carapungo y Chinguiltina, a cuyos pies corre el Guayllabamba. De estos dos grandes segmentos, el del sur es más alto, frío y húmedo (ejemplo, Cotocollao) y el del norte, más bajo, cálido y seco, ya en pleno sector equinoccial (ejemplo, San Antonio de Pichincha).

El Panecillo se eleva aproximadamente 200 m sobre el valle de Quito, al que limita por el sur; al norte le limita la loma de San Juan; al este, el Itchimbía y al Oeste, el Pichincha, desde el cual bajan numerosas quebradas de drenaje natural (hoy en buena parte canalizadas y recubiertas con relleno por la acción municipal) a desembocar en el Machángara.

Como se puede deducir entonces, la ciudad de Quito se ubica en una meseta de terreno irregular y esa variabilidad de elevaciones afecta los campos de vientos. Las alturas de la cuenca de Quito varían mucho de un lugar a otro: 2,818 msnm en el Observatorio Astronómico; 2,814 msnm en la Plaza de la Independencia; 2,818 en el Aeropuerto; pero hacia el Sur, Chimbacalle está a 2,834; La Magdalena, a 2,821 y Chillogallo a 2,816. Las gradas de descenso hacia el Este se encuentran a estas altitudes: Chingüiltina, a 2,706; Guápulo a 2,702; Carapungo a 2,671; Llano Chico a 2,660; Nayón a 2,620 y Zámbiza a 2,600. Más abajo aún están Pomasqui (2,460) y San Antonio de Pichincha (2,397 msnm). Sin embargo, en San Juan, el Itchimbía y el Panecillo hay gente que vive a 2,900 y en las laderas del Pichincha a 3,000 msnm.(Terán, 1962)

2.8 CLIMATOLOGÍA GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO.

La región interandina presenta una gran variedad de climas debido a su caprichosa topografía, su situación y orientación y la influencia del Litoral o del Oriente. Entre los climas templados se distinguen los del tipo CF Húmedos, o Climas templado lluviosos, Quito se encuentra dentro de esta clasificación, según la clasificación climática de Koeppen, donde las temperaturas son casi uniformes, variando muy poco, como máximo 1°C.(Blandín Landívar, 1976)

Como el Ecuador se encuentra en la Zona Ecuatorial Intertropical, el régimen general de sus vientos sigue las direcciones permanentes de esta zona NE al N, y SE al S; pero debido a la topografía de la Región Interandina los cambios se deben a estas irregularidades topográficas; por lo tanto desempeña un papel importante la cordillera andina. En la zona donde se ubica Quito, los vientos cambian dentro del semicírculo (N–NE–S) con una tendencia hacia el S y SE.(Nieuwolt, 1977)

CAPÍTULO 3.

METODOLOGÍA. APLICACIÓN DE LOS MODELOS.

3.1 ZONA DE APLICACIÓN DEL MODELO CALMET.

3.1.1 SELECCIÓN DEL PERÍODO DE SIMULACIÓN.

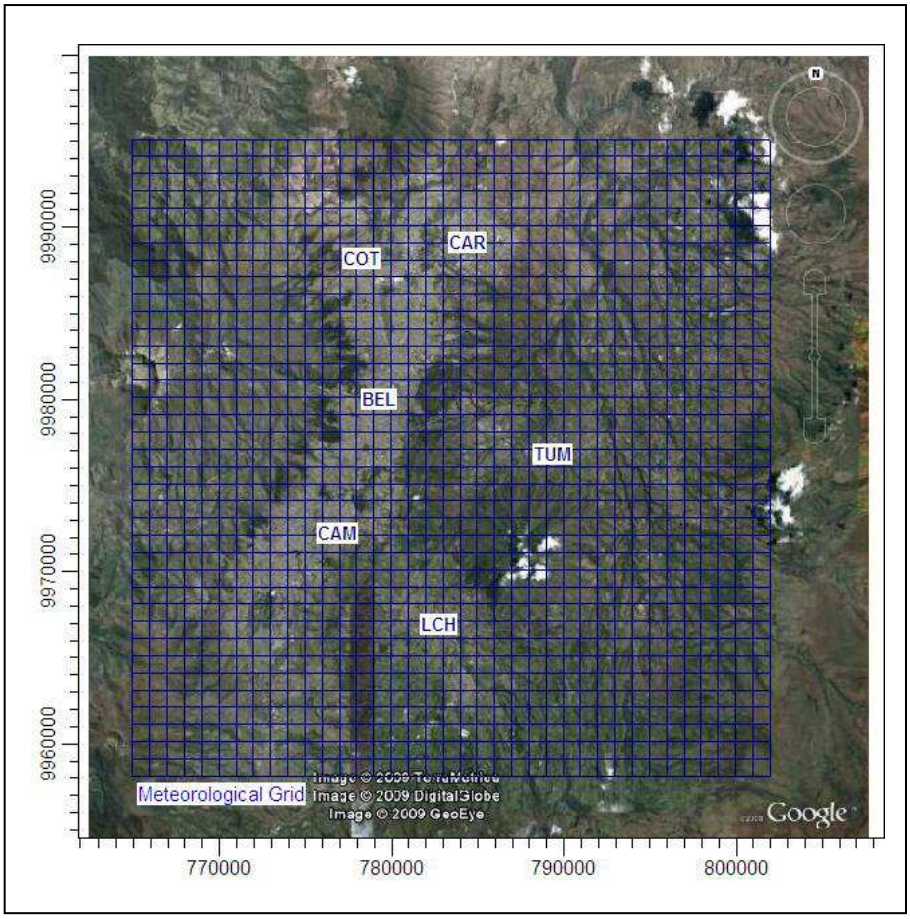
Se corre el sistema CALMET para el año 2006 completo, es decir la hora 1 del 1 de enero, hasta la hora 23 del 31 de diciembre.Esto por cuanto es el año con mejor disponibilidad de datos, evitando la aparición de *missing values* y porque se dispone también de meteorología en altura para ese año.

3.1.2 SELECCIÓN DEL DOMINIO DE MODELACIÓN.

Se aplica el modelo a una zona de 37×37 km^2, que abarca los tres valles del Distrito Metropolitano de Quito, exceptuando la zona que queda sobre la línea equinoccial.

Como se observa en laFIGURA 3.1, el área modelada corresponde a un sistema de 37×37 grillas, la que tiene como origen el punto en coordenadas UTM (Unidades Transversales de Mercator) 765 (Km) UTM–E y 9,958 (Km) UTM–N. Esta área pertenece a la Zona UTM 17 y zona horaria GMT – 5:00 (*Greenwich Mean Time*).

FIGURA 3.1. GRILLA METEOROLÓGICA PARA LA MODELACIÓN DEL CALMET EN QUITO.



Elaborado: Soraya Ruiz R. en Calpuff View.

3.2 METEOROLOGÍA

3.2.1 METEOROLOGÍA SUPERFICIAL.

La recopilación de información meteorológica que incluya las variables meteorológicas necesarias para una modelación adecuada de campos de vientos es fundamental. Esta es una ventaja en la ciudad de Quito, puesto que se cuenta con la REMET (Red Meteorológica de Quito), que opera seis estaciones de monitoreo meteorológico superficial.

La Tabla 3.1entrega la ubicación en coordenadas UTM de las estaciones meteorológicas superficiales, pertenecientes a la red de estaciones operadas por la REMET utilizadas en este modelo; y se pueden observar en laFigura 3.2.

TABLA 3.1. UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES DE MONITOREO SUPERFICIALES.

ID	Nombre	Coordenadas Cartesianas UTM	
		E (km)	N (km)
COT	Cotocollao	778.585	9,988.076
CAR	Carapungo	784.154	9,989.120
BEL	Belisario	779.389	9,980.085
CAM	El Camal	777.160	9,972.341
TUM	Tumbaco	789.413	9,976.765
LCH	Los Chillos	782.728	9,966.808

Elaborado: Soraya Ruiz R.

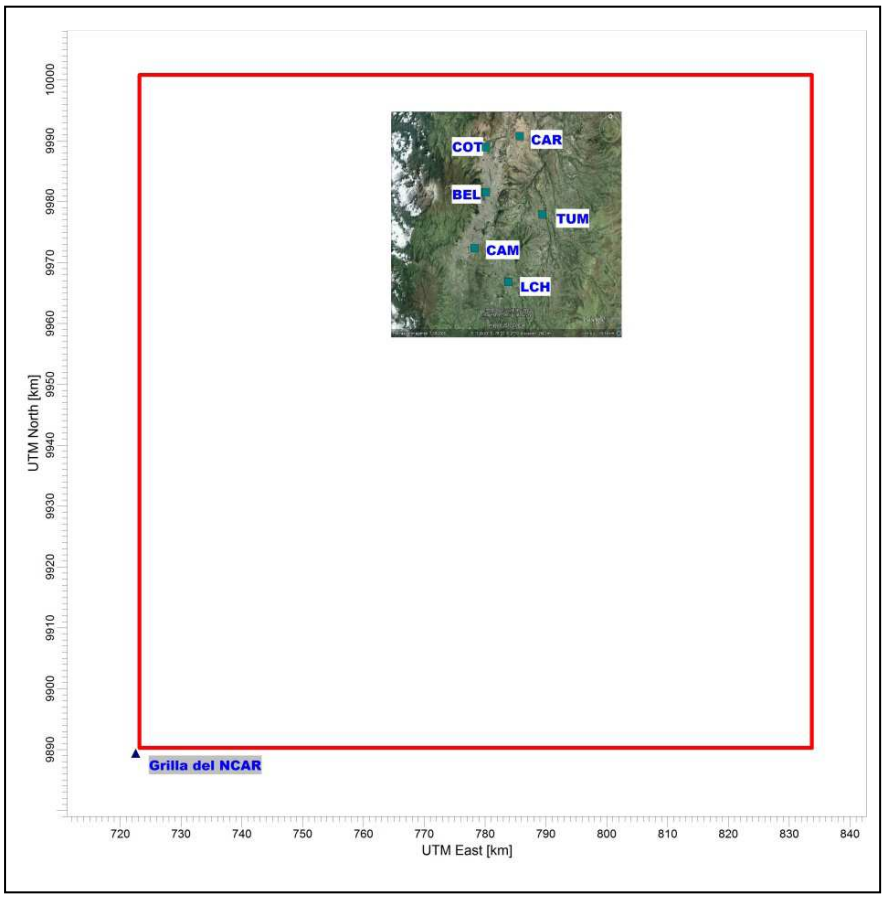
FIGURA 3.2. IMAGEN SATELITAL CON LA UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS SUPERFICIALES.

Elaborado: Soraya Ruiz R. en Calpuff View.

3.2.2 METEOROLOGÍA EN ALTURA.

La información de este tipo de datos es indispensable para una adecuada modelación de la dispersión,uno de los requerimientos del modelo meteorológico CALMET es tener al menos dos mediciones diarias de meteorología en altura.

FIGURA 3.3. IMAGEN SATELITAL CON LA UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS SUPERFICIALES Y LA GRILLA DE METEOROLOGÍA EN ALTURA.



Elaborado: Soraya Ruiz R. a partir de Calpuff View

Es por esto que luego de una exhaustiva búsqueda bibliográfica, la información de meteorología en altura para el año 2006 será construida a partir de la base de datos del GDAS (*Global Data Assimilation System)* del NCAR (*National Center for*

Atmospheric Research)[13], datos generados por el modelo global NCEP (*National Center for Environmental Prediction,* EEUU)cada 6 horas[14], y que permiten extraer las variables de vientos, temperatura, presión, etc. necesarios para construir un radiosondeo en un punto geográfico dado . Las coordenadas de inicio de la grilla de 1 grado x 1 grado son 0.00 S y 79.00 W.

En la Figura 3.3 se entrega la ubicación de la grilla de meteorología en altura, que abarca toda la zona de modelación del CALMET.

3.3 METEOROLOGÍA DE LA CIUDAD DE QUITO

Para la obtención de buenos resultados en la modelación meteorológica es necesario que los datos sean coherentes tanto entre sí como acordes a la época del año que se modela.

En las siguientes secciones (3.3.1-3.3.6), se describe el análisis de los datos meteorológicos del año 2006 proporcionados por la REMET, el cual se realizó como una verificación previa de los datos a ser ingresados en el modelo CALMET, para evitar la presencia de datos incoherentes o que se escapan del resto de la muestra.

Hay que señalar que se seleccionaron los datos del año 2006, puesto que es el año con monitoreo meteorológico que contiene menos datos faltantes (*missing values*), lo cual perjudicaba el desempeño del modelo CALMET.

---

[13] Disponibles en: http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/index.html#sfol-fw

[14] Este tipo de información se genera mediante la aplicación de modelos globales del tiempo, los cuales incorporan toda la información meteorológica global disponible, por lo que se parecen a WRF (*Weather Research and Forecasting Model*), sólo que son globales y poseen menor resolución espacial, 0.5° en ambas direcciones horizontales.

3.3.1 VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DEL VIENTO.

En esta sección seprocede a analizar los siguientes escenarios meteorológicos mostrados en la Tabla 3.2.

TABLA 3.2. ESCENARIOS METEOROLÓGICOS CONSIDERADOS.

Escenario	Período
Anual	2006-1-1-1:00 – 2007-1-1-23:00
Día	8:00 – 19:00
Noche	20:00 – 23:00
Madrugada	00:00 – 7:00

Elaborado: Soraya Ruiz R.

Para cada uno de los escenarios se entregan las rosas de los vientos y gráficos de distribución de frecuencias de vientos.

En las siguientes secciones (3.3.1.1 – 3.3.1.6) se presentan las rosas de los vientos representativas para cada una de las estaciones meteorológicas, graficadas según la escala de *Beaufort*y se incluye su respectivo análisis.

TABLA 3.3. ESCALA DE *BEAUFORT* PARA LA FUERZA DE LOS VIENTOS

Velocidad (m/s)	Denominación
0 - 0.2	Calma[15]
0.3 - 1.5	Ventolina
1.6 - 3.3	Brisa muy débil
3.4 - 5.4	Brisa débil, flojo
5.5 - 7.9	Bonacible, brisa
8.0 - 11.0	Brisa fresca
>11.1	Brisa fuerte

Elaborado: Soraya Ruiz R.[16]

3.3.1.1 Estación Cotocollao.

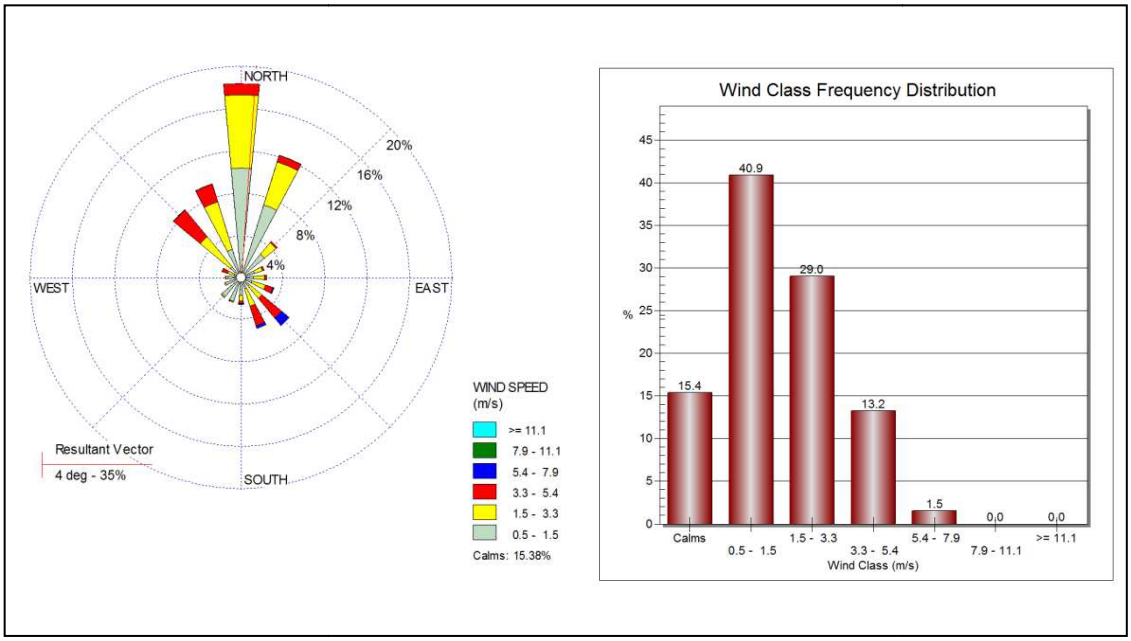
Como se observa en laFigura 3.4, en el caso de la estación Cotocollao predominan los vientos del N, con un 40.9% de frecuencia entre 0.5 – 1.5 m/s. Con una velocidad media de 1.67 m/s y una frecuencia de calmas de 15.38%.

Durante el día los vientos predominantes son del norte con una velocidad promedio de 2.54 m/s, y un 48.7% de frecuencia entre 1.5 y 3.3 m/s, calificados como brisa muy débil según la escala de *Beaufort*; tan sólo en la madrugada surgen vientos de la dirección SW (ver Anexo A-1,Figura A.1), observándose ventolinas (0.7 m/s de velocidad media), donde el 58.4% de las veces está entre 0.5 a 1.5 m/s.

[15] Para el caso de Calmet, el programa considera como calmas a todos los vientos menores a 0.5 m/s.

[16] Tomado de: http://www.infonavis.com/Informacion/Escalas.aspx

FIGURA 3.4. ROSA DE LOS VIENTOS ANUAL PARA TODO EL DÍA, ESTACIÓN COTOCOLLAO, AÑO 2006.



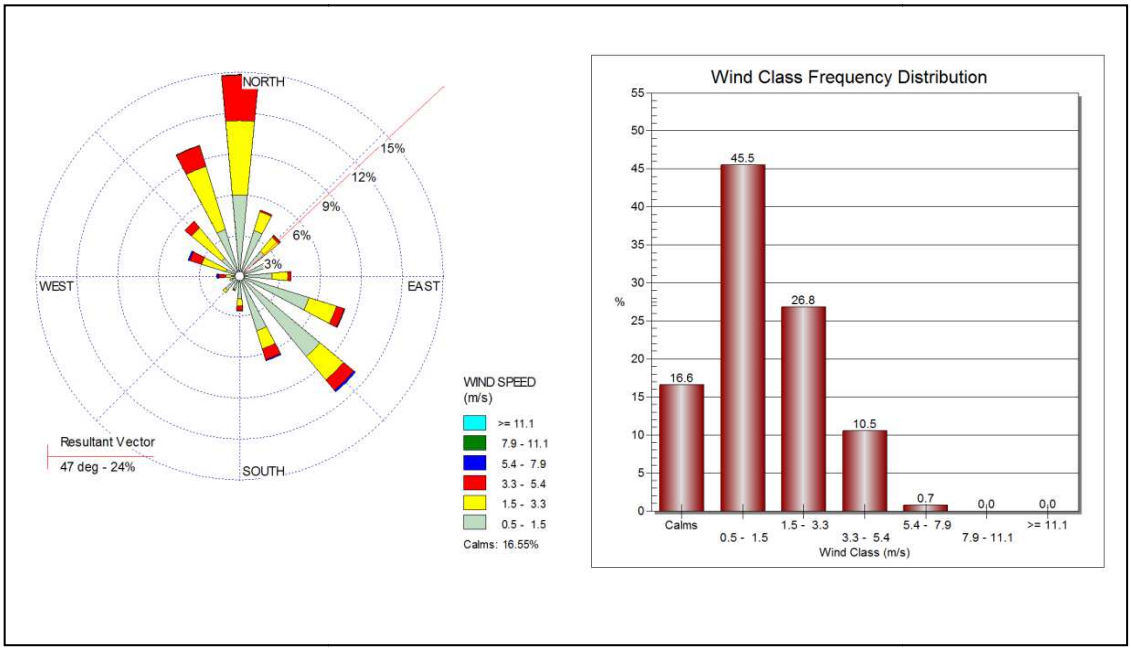
Elaborado: Soraya Ruiz R. en WRFPLOT View.

3.3.1.2 Estación Carapungo.

En la estación Carapungo se puede decir que predominan los vientos del N y ESE (Figura 3.5), con un 45.5% de frecuencia entre 0.5 – 1.5 m/s. Con una velocidad media de 1.49 m/s y una frecuencia de calmas de 16.55%.

Profundizando el análisis, durante el día (ver Anexo A-1,Figura A.2) los vientos vienen del N con una mayor intensidad y una velocidad media de 2.22 m/s, con un 43.5% de frecuencia entre 1.5 y 3.3 m/s; en la noche predominan los vientos N y NNW, con una velocidad media de 0.99 m/s; mientras que en la madrugada los vientos vienen del ESE (0.64 m/s de velocidad media), donde el 61.8% de las veces está entre 0.5 a 1.5 m/s.

FIGURA 3.5. ROSA DE LOS VIENTOS ANUAL PARA TODO EL DÍA, ESTACIÓN CARAPUNGO, AÑO 2006.



Elaborado: Soraya Ruiz R. en WRFPLOT View.

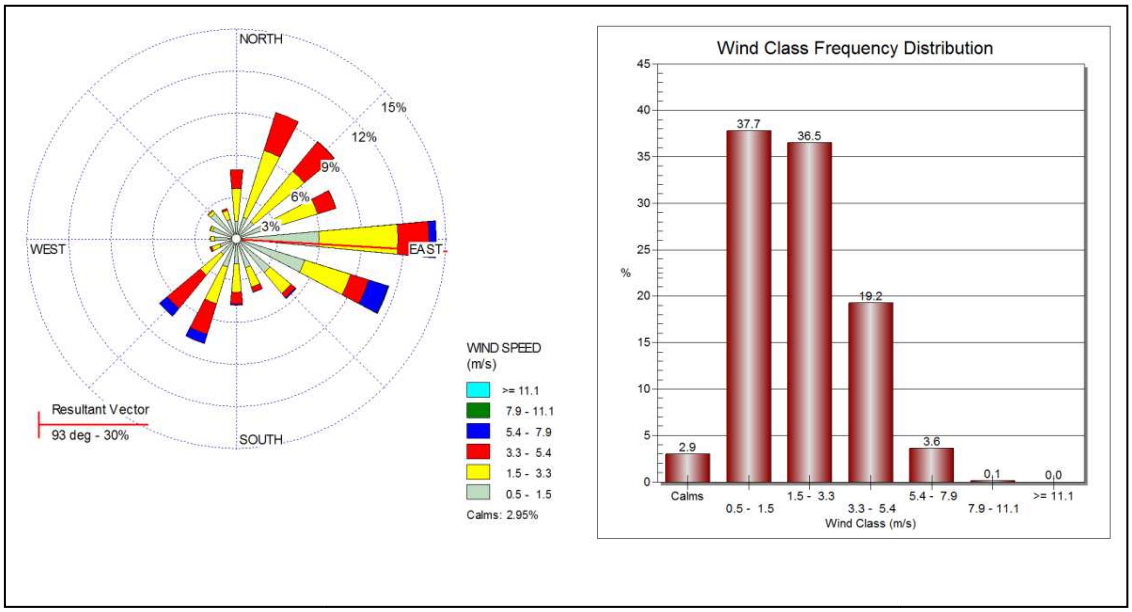
3.3.1.3 Estación Belisario.

En la estación Belisario se puede decir que predominan los vientos del E (Figura 3.6), con un 37.7% de frecuencia entre 0.5 – 1.5 m/s y un 36.5% de frecuencia entre 1.5 – 3.3%. Con una velocidad media de 2.24 m/s y una frecuencia de calmas de 2.95%.

Analizando la estación Belisario se observa que predominan los vientos del E durante día y noche, tan sólo en la madrugada (ver Anexo A-1,Figura A.3) vienen vientos de la dirección SW; la intensidad es mayor durante el día con una velocidad media de 2.97 m/s, y una frecuencia de vientos de 50.9% entre 1.5 y 3.3 m/s y 30.1% entre 3.3 y 5.4 m/s, es decir brisa débil; durante la madrugada los vientos son más suaves (1.45 m/s de velocidad media), donde el 66.6% de las veces está entre 0.5 a 1.5 m/s. En esta estación es claro el predominio delos vientos anabáticos (vientos que durante el día ascienden por las ladera del Pichincha)con altas velocidades, y de los vientos catabáticos (vientos que

durantela noche descienden por las laderas del Pichincha) a menores velocidades.

FIGURA 3.6. ROSA DE LOS VIENTOS ANUAL PARA TODO EL DÍA, ESTACIÓN BELISARIO, AÑO 2006.



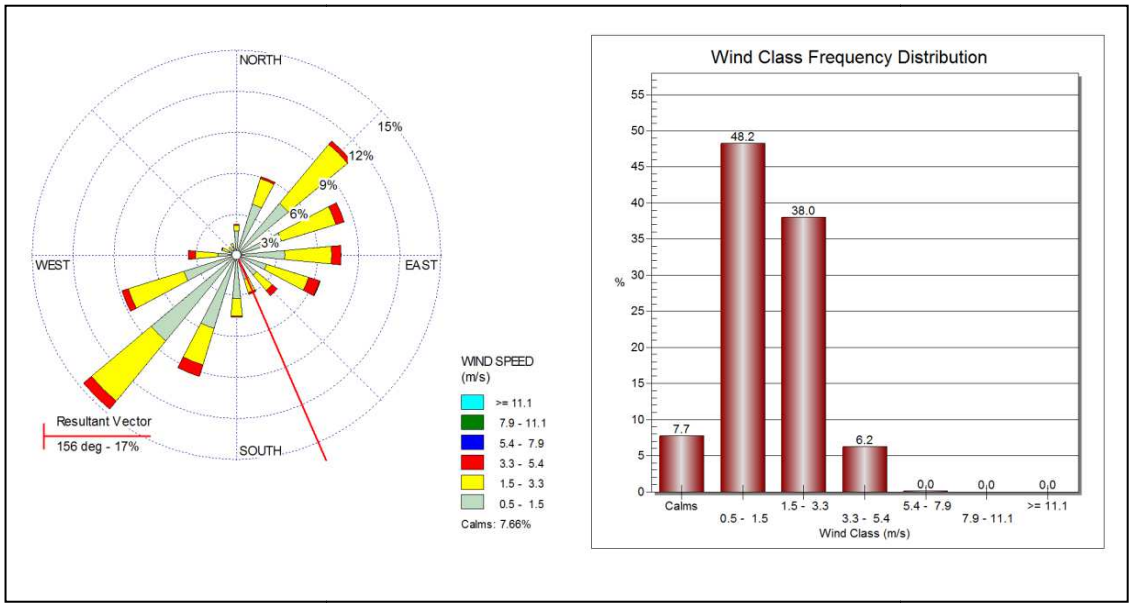
Elaborado: Soraya Ruiz R. en WRFPLOT View.

3.3.1.4 Estación El Camal.

En la estación El Camal, que se encuentra al sur de la ciudad, predominan vientos transversales tanto del NE como del SW (Figura 3.7), con un 48.2% de frecuencia entre 0.5 – 1.5 m/s y un 38.0% de frecuencia entre 1.5 – 3.3%. Con una velocidad media de 1.54 m/s y una frecuencia de calmas de 7.66%.

La estación El Camal, presenta vientos predominantes del SW y NE durante día y noche y en la madrugada principalmente vientos de la dirección SSW (Anexo A-1,Figura A.4). Nuevamente en el día se tiene una mayor intensidad con una velocidad media de 2.06 m/s, y una frecuencia de vientos de 58.4 % entre 1.5 y 3.3 m/s; durante la madrugada los vientos son más suaves (0.91 m/s de velocidad media), donde el 69.5% de las veces está entre 0.5 a 1.5 m/s.

FIGURA 3.7. ROSA DE LOS VIENTOS ANUAL PARA TODO EL DÍA, ESTACIÓN EL CAMAL, AÑO 2006.



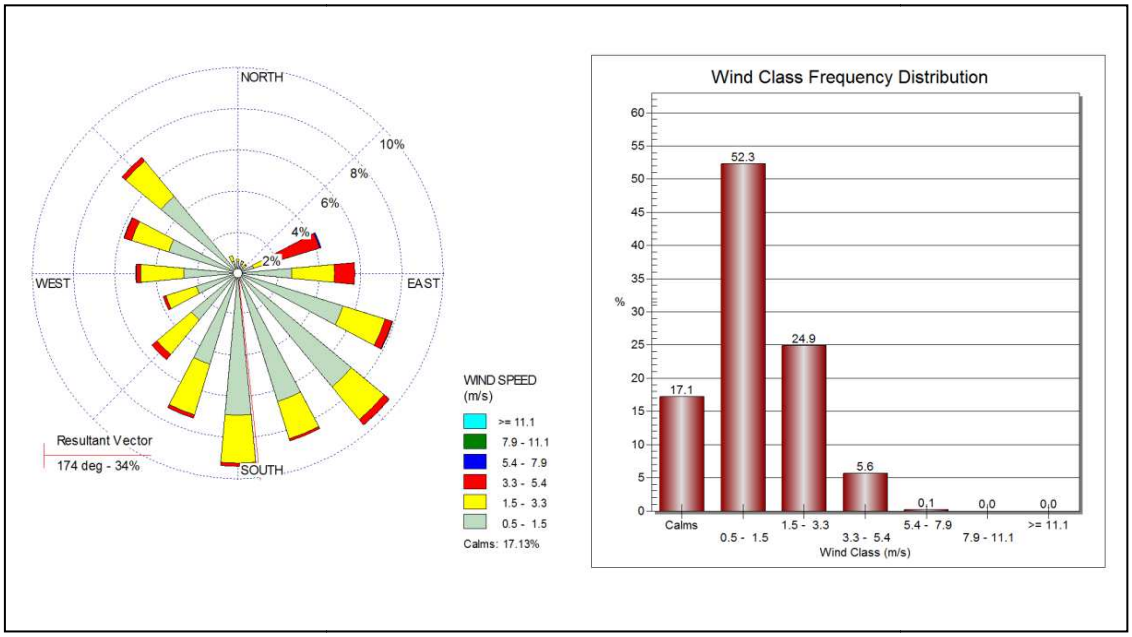
Elaborado: Soraya Ruiz R. en WRFPLOT View.

3.3.1.5 Estación Tumbaco.

En la estación Tumbaco, que representa a uno de los valles orientales de la ciudad de Quito, predominan vientos del sur (Figura 3.8), con un 52.3% de frecuencia entre 0.5 – 1.5 m/s y un 24.9% de frecuencia entre 1.5 – 3.3%. Con una velocidad media de 1.23 m/s y una frecuencia de calmas de 17.13%.

En la estación Tumbaco durante el día predominan vientos del sur, con velocidades que van desde 0.5 – 3.3, que entre las dos presentan un frecuencia de 82.9% y una velocidad media mayor de 1.77 m/s en el día. En la noche se desarrolla una componente NW, con velocidades de 0.5-1.5 con un 64.4% de frecuencia. (ver Anexo A-1,Figura A.5).

FIGURA 3.8. ROSA DE LOS VIENTOS ANUAL PARA TODO EL DÍA, ESTACIÓN TUMBACO, AÑO 2006.



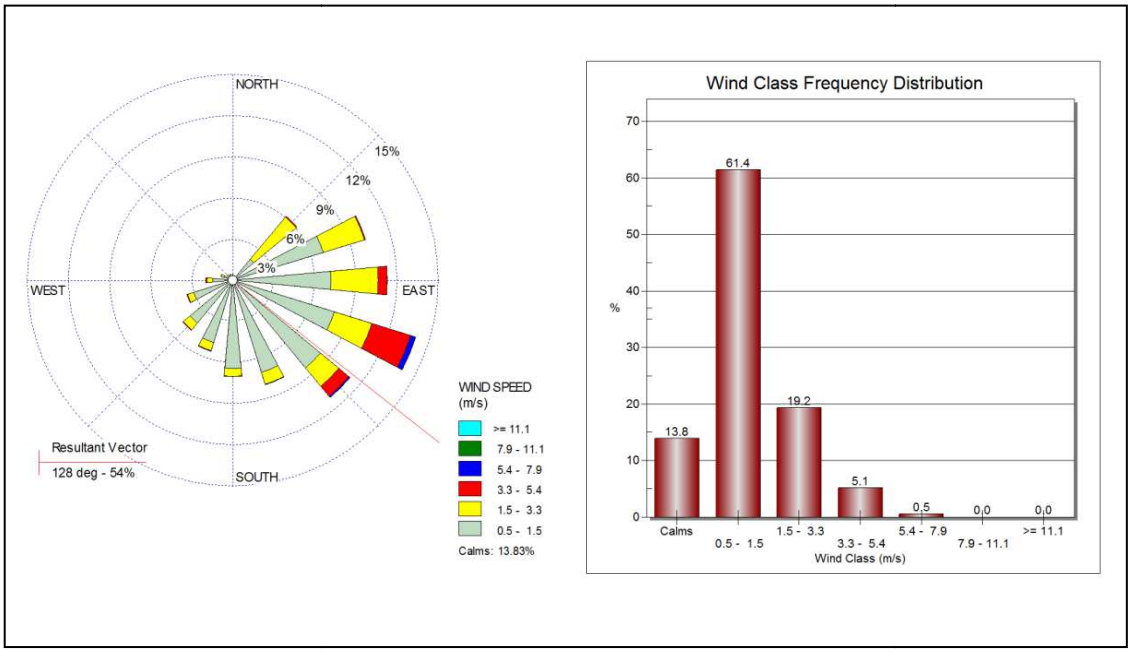
Elaborado: Soraya Ruiz R. en WRFPLOT View.

3.3.1.6 Estación Los Chillos.

La estación Los Chillos está en el valle del mismo nombre, al sur oriente de la ciudad de Quito. En esta predominan vientos SE (Figura 3.9), con un 61.4% de frecuencia entre 0.5 – 1.5 m/s y un 19.2% de frecuencia entre 1.5 – 3.3%. Con una velocidad media de 1.18 m/s y una frecuencia de calmas de 13.83%.

En esta estación de monitoreo se observa que predominan los vientos del SE durante día y madrugada, tan sólo en la noche vienen vientos de la dirección NE (ver Anexo A-1,Figura A.6); siendo la intensidad mayor durante el día con una velocidad media de 1.74 m/s, y una frecuencia de vientos de 49.6% entre 0.5 – 1.5 m/s y 36.4% entre 1.5 y 3.3 m/s; durante la madrugada los vientos son más suaves (0.51 m/s de velocidad media), donde el 68.1% de las veces está entre 0.5 a 1.5 m/s.

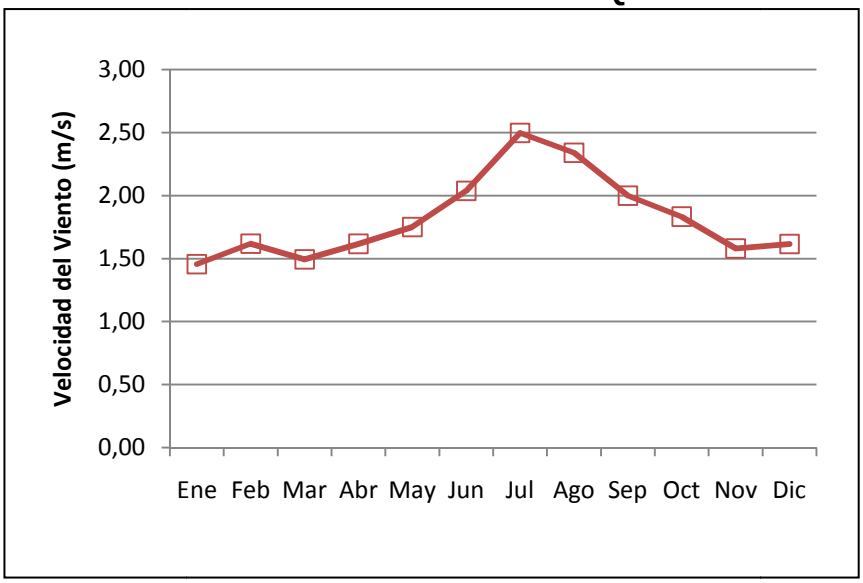
FIGURA 3.9. ROSA DE LOS VIENTOS ANUAL PARA TODO EL DÍA, ESTACIÓN LOS CHILLOS, AÑO 2006.



Elaborado: Soraya Ruiz R. en WRFPLOT View.

Para completar el análisis de los vientos, se muestra el perfil de viento promedio del año 2006 (Figura 3.10), el cual presenta su máximo durante los meses de julio y agosto.

FIGURA 3.10. PERFIL ANUAL DE VELOCIDAD DE VIENTOS PROMEDIO DE TODAS LAS ESTACIONES EN QUITO.

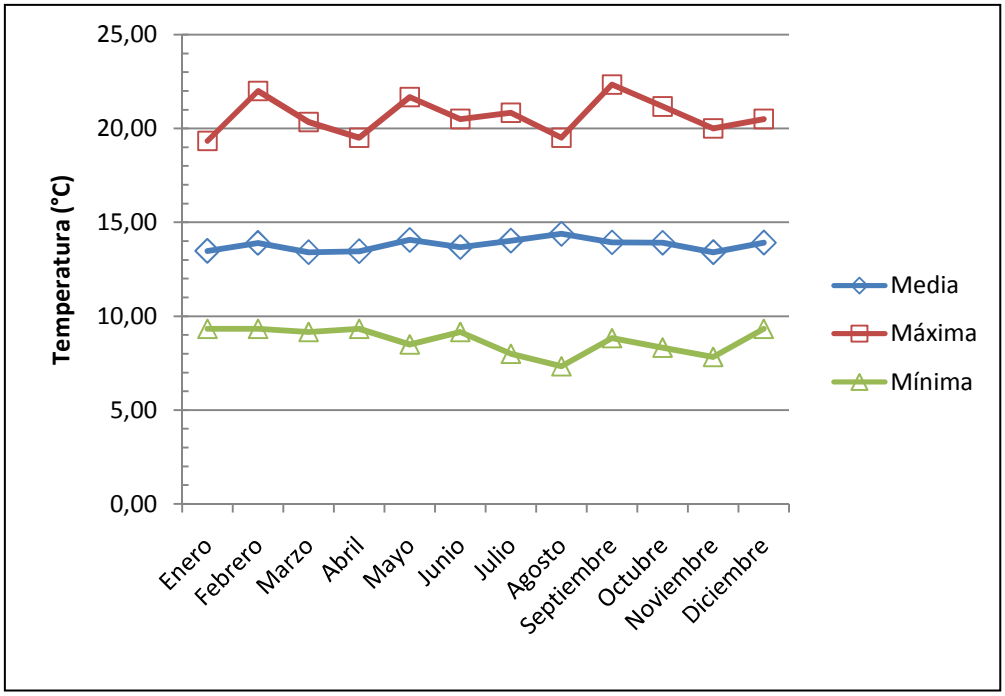


Elaborado: Soraya Ruiz R.

3.3.2 TEMPERATURA.

En cuanto a la temperatura se refiere, como se puede apreciar en laFigura 3.11, hay muy poca variación media mensual y la temperatura máxima promedio anual se presenta durante el mes de Agosto.

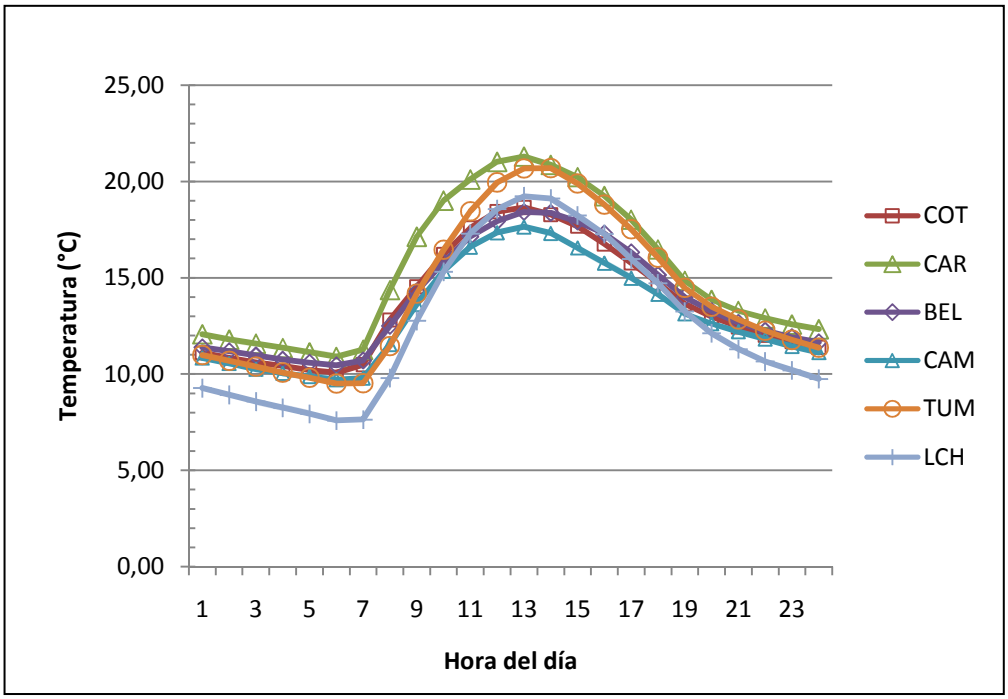
FIGURA 3.11. PERFIL DE TEMPERATURA MÁXIMA, MÍNIMA Y PROMEDIO MENSUAL EN LA CIUDAD DE QUITO PARA EL AÑO 2006.



Elaborado: Soraya Ruiz R.

La temperatura posee una variación durante el día característica del forzamiento por calentamiento y enfriamiento superficial, con valores que oscilan entre 9 °C y 21.5 °C, pudiendo llegar desde 6 ° hasta 23 °C, como se puede observar en la Figura 3.12.

FIGURA 3.12. PERFIL MEDIO DIARIO DE TEMPERATURAS EN LAS SEIS ESTACIONES DE MONITOREO EN QUITO PARA EL AÑO 2006.

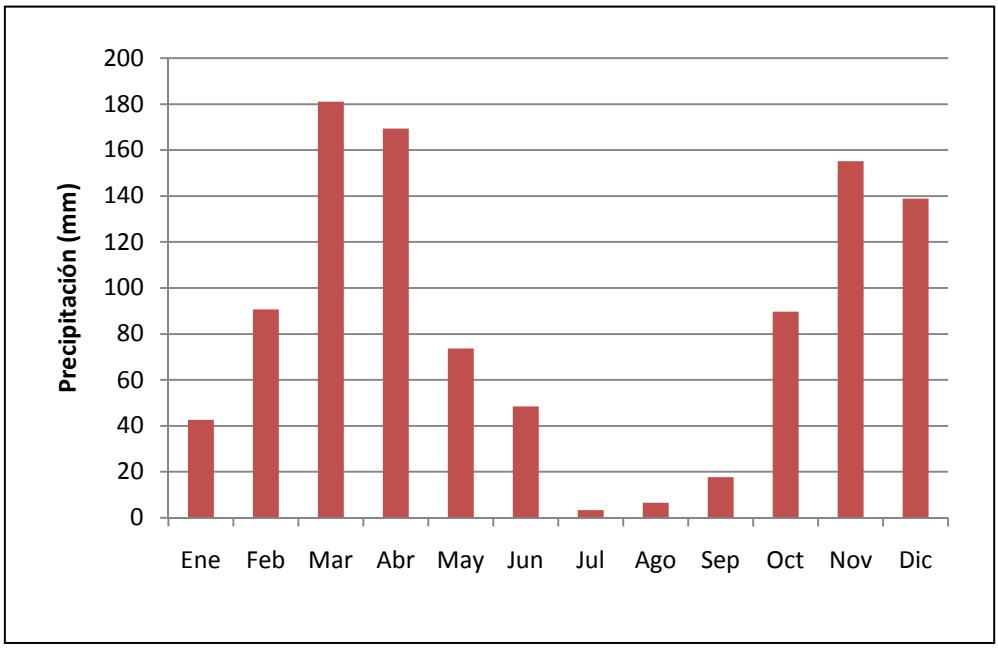


Elaborado: Soraya Ruiz R.

3.3.3 PRECIPITACIÓN.

Al graficar el perfil mensual de precipitación promedio de todas las estaciones de Quito, se diferencian dos estaciones lluviosas al año, de febrero a mayo y de octubre a diciembre. La estación que registra mayores precipitaciones anuales es El Camal (1498 mm/año), y la que menores precipitaciones presenta es Carapungo (707 mm/año). Para ver los perfiles mensuales de precipitación de cada estación ir al Anexo A-2.

FIGURA 3.13. PRECIPITACIÓN MENSUAL EN QUITO AÑO 2006.



Elaborado: Soraya Ruiz R.

3.3.4 RADIACIÓN SOLAR.

Quito, por estar ubicada en la línea ecuatorial, tiene altos niveles de radiación solar, y coherentemente los mayores valores se registran al medio día. Carapungo registra el mayor valor medio de radiación solar, 783 W/m^2; en tanto que El Camal registra el menor valor medio, 485 W/m^2.

3.3.5 HUMEDAD RELATIVA.

En cuanto al porcentaje de humedad relativa la estación Tumbaco es la que tiene el mayor promedio anual con 83%, seguida por la estación Cotocollao con 81.7%, y la estación con menor humedad ambiental es Belisario con 70.3%. Las otras estaciones están en un rango de 76 a 79% de HR.

3.3.6 PRESIÓN ATMOSFÉRICA.

La presión barométrica en las estaciones urbanas (COT, CAR, BEL, CAM) oscila alrededor de 723 a 745 mbar. En los valles orientales (TUM y LCH) esta es mayor entre 758 a 772 mbar. Las diferencias se explican por las distintas elevaciones de terreno, ver FIGURA 3.17.

3.4 METEOROLOGÍA EN ALTURA

A continuación se presenta un resumen de los datos en altura, obtenidos de datos del NCARingresados al modelo. Se acostumbra analizar las variables temperatura, velocidad y dirección del viento

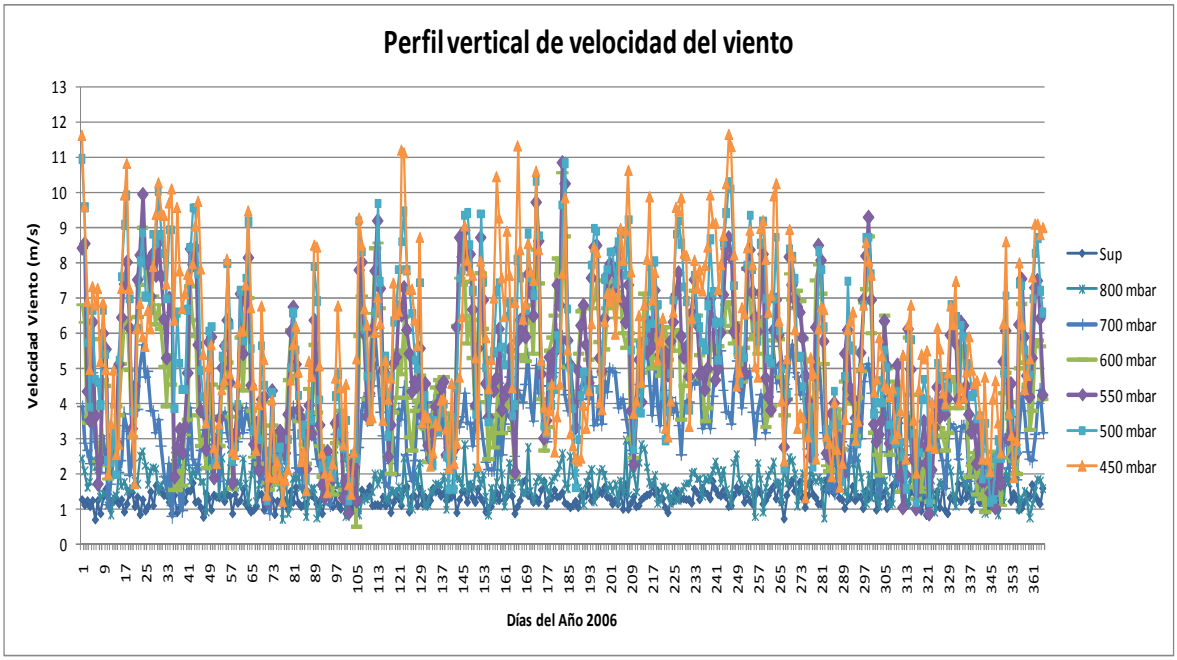
3.4.1 VELOCIDAD DEL VIENTO.

Se promedian los datos para cada día obtenidos a partir del archivo .fsl explicado en la sección 3.2.2. Se tienen datos para 17 niveles de presión, y para cada altura z (en m). Al analizar el ciclo diario de un perfil vertical de velocidad del viento, se observa que a mayor altura la velocidad del viento aumenta (Ver Figura **3.14**.)

3.4.2 DIRECCIÓN DEL VIENTO.

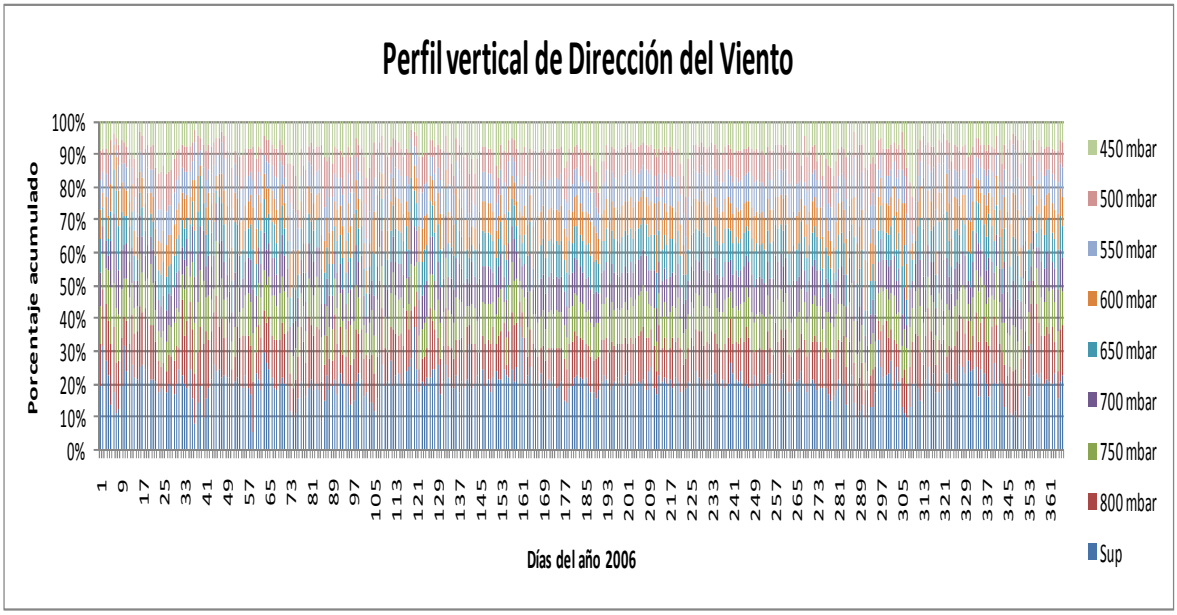
La dirección del viento es muy disímil para cada nivel vertical de alturas, como se observa en la Figura 3.15. Siendo 250° la dirección preponderante a nivel superficial, y 105° la dirección preponderante en el nivel más alto (a 450 mbar).

FIGURA 3.14. VELOCIDAD DEL VIENTO A DISTINTOS NIVELES DE ALTURA.



Elaborado: Soraya Ruiz R., a partir de datos del NCAR.

FIGURA 3.15. DIRECCIÓN DEL VIENTO A DISTINTOS NIVELES DE ALTURA.

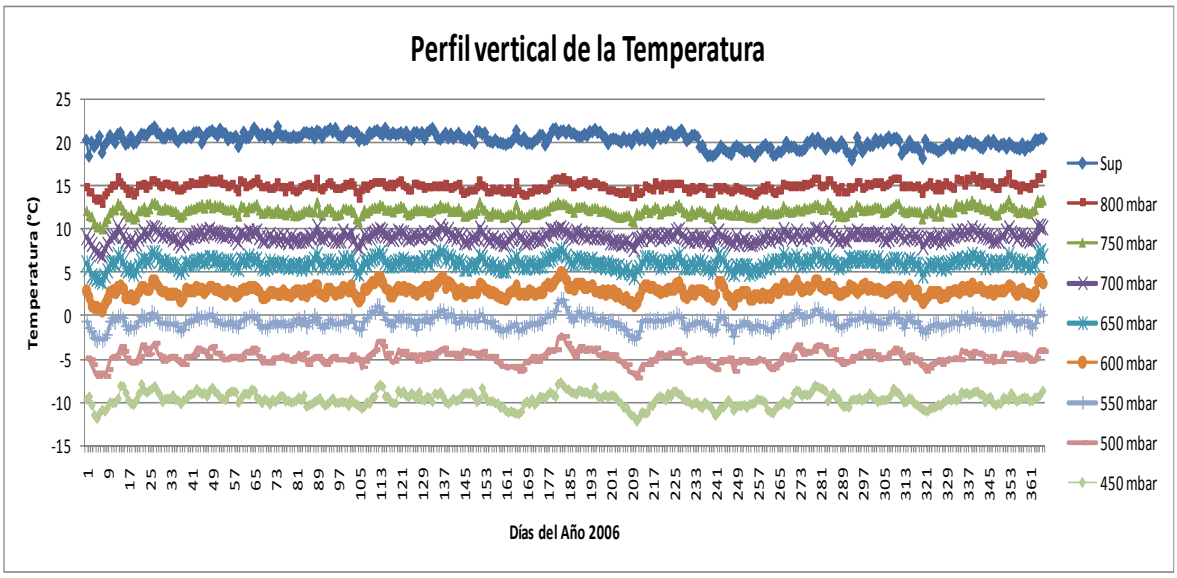


Elaborado: Soraya Ruiz R.,a partir de datos del NCAR.

3.4.3 TEMPERATURA.

La temperatura está directamente relacionada con la altura, así vemos que a mayor altura en el perfil vertical, la temperatura disminuye. Así en el perfil de 450 mbar la temperatura promedio es de -9.66 °C.

FIGURA 3.16. TEMPERATURA A DISTINTOS NIVELES DE ALTURA.



Elaborado: Soraya Ruiz R., a partir de datos del NCAR.

3.5 DATOS GEOFÍSICOS

Se creó un archivo de datos geofísicos (GEO.DAT) utilizando los preprocesadores de CALMET: TERREL, CTGPROC y MAKEGEO. Esto se explica a continuación.
TERREL es un preprocesador de terreno el cual procesa la localización de datos de elevación de suelos a través de bases de datos digitalizadas. Se obtuvo un archivo tipo *3-arc second* del sitio WWW del USGS[17] (EEUU, *United States Geological Survey*), que es la versión 2.1 del *Shuttle Radar Topography Mission*

[17]Disponible en: http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/SRTM3/South_America/

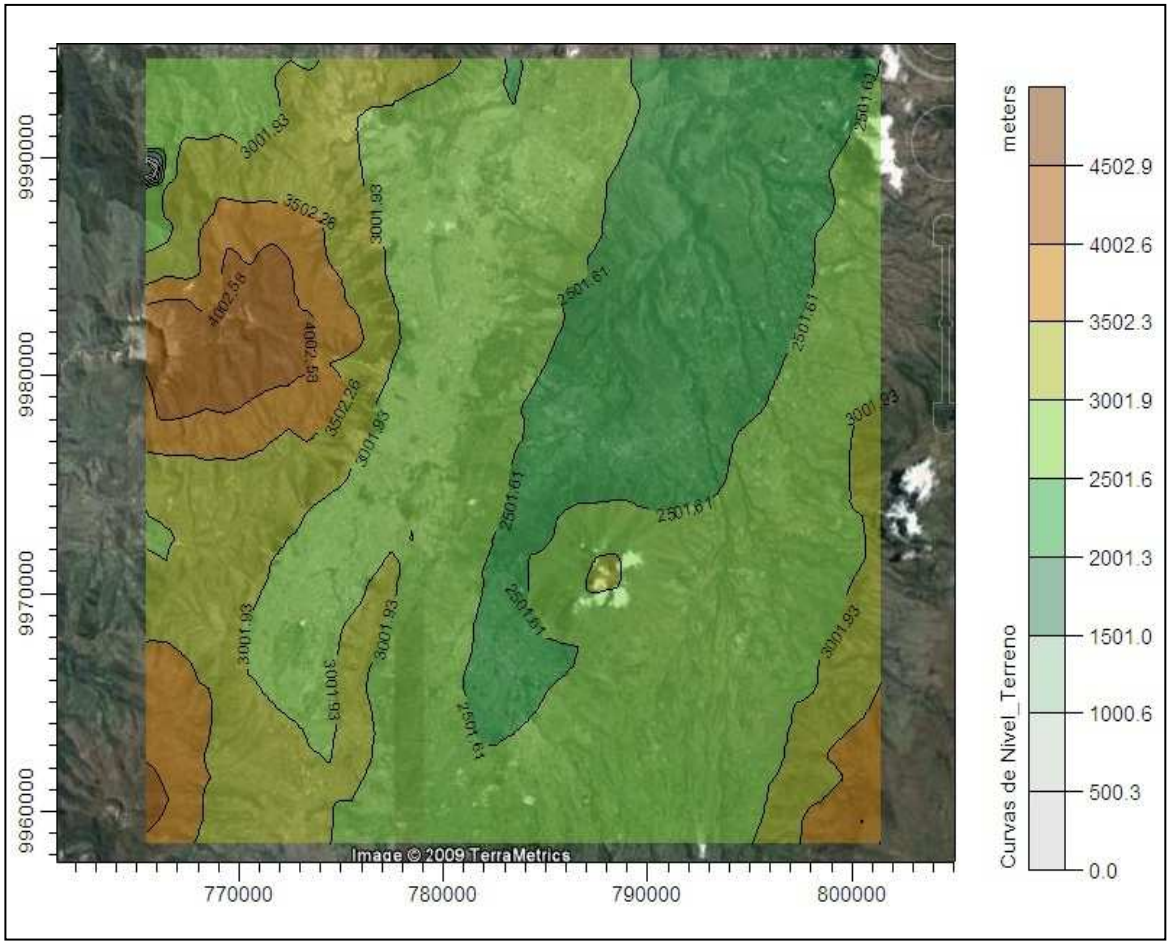
(SRTM), correspondiente a Sudamérica; se descargaron 4 paños*:* N00W078, N00W079, S01W078 y S01W079. El preprocesador entrega un archivo TERREL.OUT el cual consiste en una grilla de elevaciones. En este caso se configuró el preprocesador para que entregara la grilla perteneciente a la zona de la región que se pretende modelar. Este archivo de salida es utilizado como entrada en el preprocesador MAKEGEO.

CTGPROC es un preprocesador que lee datos de usos de suelos. Se obtuvo un mapa de uso de suelos (en formato *shapefile)* elaborado por la CORPAIRE, el que se usó como archivo de entrada para el CTGPROC. Con este se creó un archivo de salida CTGPROC.LST, el que es una grilla de usos de suelo. Este archivo también es utilizado como entrada en el preprocesador MAKEGEO.

MAKEGEO es el preprocesador final de terreno, el cual usa como archivos de entrada los archivos generados por los dos preprocesadores anteriores más un archivo de control MAKEGEO.INP. Un valor opcional para cada parámetro de superficie es proporcionado por el usuario en este archivo de control. Con este preprocesador se creó el archivo GEO.DAT, el cual es un archivo que contiene un grillado con elevaciones y datos de características de los suelos. De los datos del archivo GEO.DAT se grafican a continuación las elevaciones y usos de suelo generados para Quito.

Como se puede ver en la FIGURA 3.17, la mancha urbana donde se ubica la ciudad de Quito, está entre los 2,500 a 3,000 msnm, lo cual es consistente con lo conocido de Quito. Además se aprecia la complejidad de la topografía de la grilla de modelación.

FIGURA 3.17. CURVAS DE NIVEL PARA LA GRILLA DE MODELACIÓN CORRESPONDIENTE A QUITO.



Elaborado: Soraya Ruiz R. a partir de archivo GEO.DAT del CALMET

Los parámetros geofísicos, fueron estimados por el programa dependiendo de la categoría de uso de suelos del dominio de modelación ingresados en el CTGPROC.LST.

TABLA 3.4. PARÁMETROS SUPERFICIALES, CALCULADOS POR DEFECTO A PARTIR DEL TIPO DE USO DE SUELO

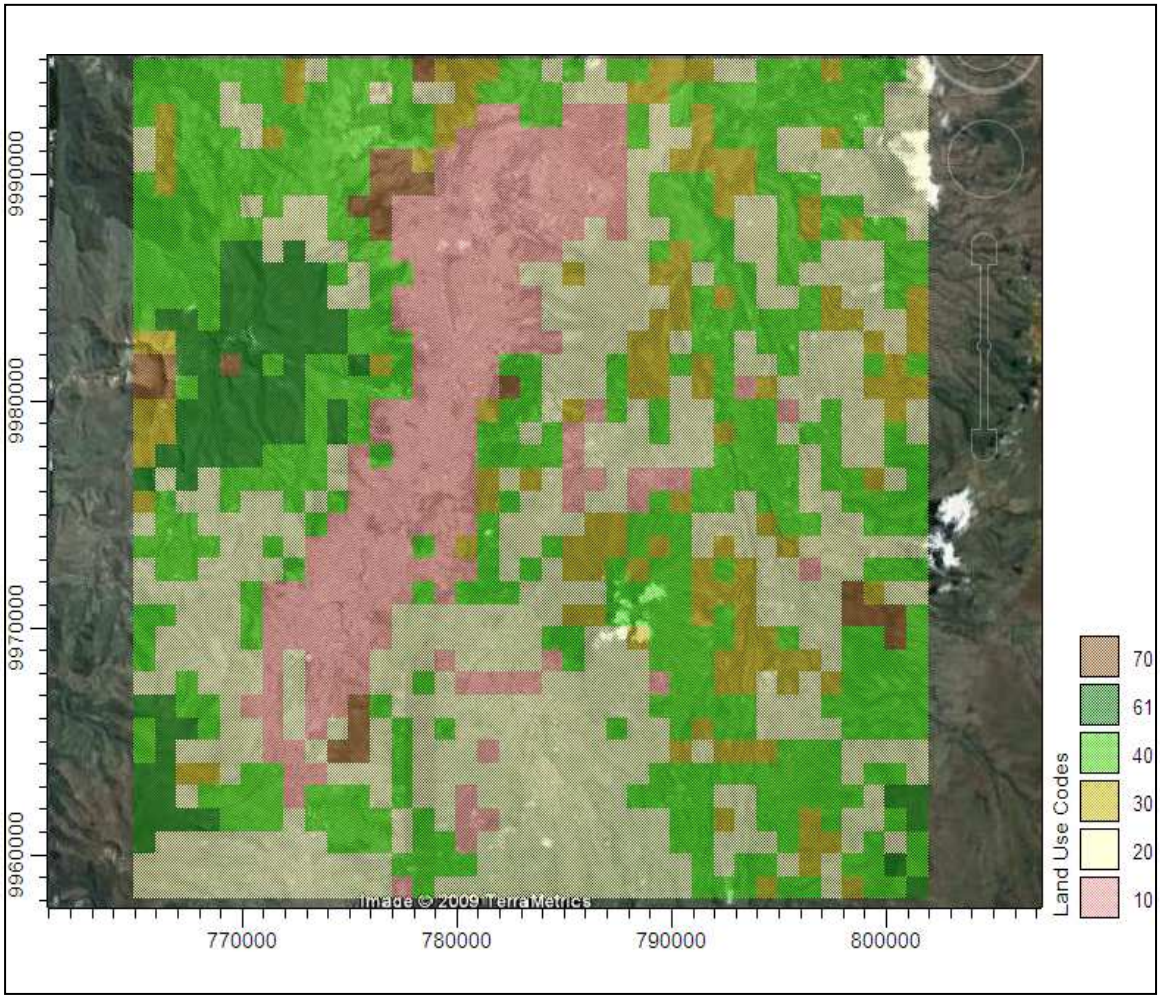
Categoría USGS de entrada	Sub-categoría	z0 * (m)	Albedo (0 a 1)	Tasade Bowen	Constante de Flujo de calor superficial	Flujo de calor antro-pogénico	Índice de vege-tación	Categoríade uso de suelo de salida
11	Urbano residencial	1	0.18	1.5	0.25	0	0.2	10
21	Tierra de cultivo y pastos	0.25	0.15	1	0.15	0	3	20
22	Ornamental y horticultura	0.25	0.15	1	0.15	0	3	20
24	Otros usos agrícolas	0.25	0.15	1	0.15	0	3	20
31	Veg. nativa herbácea	0.05	0.25	1	0.15	0	0.5	30
32	Veg. Nativa arbustiva	0.05	0.25	1	0.15	0	0.5	30
33	Veg. Nativa mixta	0.05	0.25	1	0.15	0	0.5	30
42	Bosque de hoja perenne	1	0.1	1	0.15	0	7	40
43	Bosque mixto	1	0.1	1	0.15	0	7	40
61	Vegetación de páramo	1	0.1	0.5	0.25	0	2	61
74	Aforamientos rocosos	0.05	0.3	1	0.15	0	0.05	70
76	Áreas de transición	0.05	0.3	1	0.15	0	0.05	70

*z0= Longitud de rugosidad superficial.

Elaborado: Soraya Ruiz R. a partir de CALMET

A continuación se presenta una figura del mapa de uso de suelo generado para el CALMET por el procesador CTGPROC, como se describió en la sección 3.5.

FIGURA 3.18. MAPA DE USOS DE SUELO PARA LA GRILLA DE MODELACIÓN CORRESPONDIENTE A QUITO.



Elaborado: Soraya Ruiz R. a partir de archivo LULC del CALMET

Los códigos de usos de suelo que utiliza CALMET corresponden a las categorías de clasificación común del USGS. El número 10 corresponde a sector urbano, el 20 al sector agricultora, el 30 atierras con vegetación nativa, el 40 a zona forestal, el 61 a vegetación de páramo y el 70 a zona de canteras o aforamientos rocosos. Se puede ver que la zona urbana está rodeada de vegetación y zonas agrícolas.

3.6 APLICACIÓN DEL MODELO CALPUFF.

3.6.1 SELECCIÓN DEL PERÍODO DE SIMULACIÓN.

Se corre el modelo de dispersión de contaminantes CALPUFF para el año 2009 completo, es decir la hora 1 del 1 de enero, hasta la hora 23 del 31 de diciembre.Se seleccionó este año, porque es el último inventario de emisiones que ha publicado la Secretaría de Ambiente de Quito[18] para el DMQ.

3.6.2 SELECCIÓN DEL DOMINIO DE MODELACIÓN.

Se aplica el modelo a la misma área definida en CALMET, ver sección 3.1.2.

3.6.3 RECEPTORES.

Se definieron dos tipos de receptores, de grilla y puntuales. Para los receptores de grilla se definió una grilla rectangular de número de celdas igual al dominio de modelación meteorológica, distantes 1 km entre sí. Los receptores puntuales se definieron considerando las 6 estaciones de monitoreo de la REMMAQ(Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito) que son las mismas de la red de monitoreo meteorológico REMETy tres adicionales de monitoreo de calidad del aire. Estos puntos serán ingresados como receptores de las plumas de emisión modeladas.

[18] Disponible en: http://190.152.144.74/paginas/articulos.html. Página web de la Secretaría de Ambiente.

TABLA 3.5. UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES DE MONITOREO DE CALIDAD DEL AIRE.

# de Monitor	ID	Nombre	Coordenadas Cartesianas UTM		Monitoreo Automático de Contaminantes			
			E (km)	N (km)	O_3	NO_x	SO_2	$PM_{2.5}$
1	COT	Cotocollao	778.585	9,988.076	x	x	x	x
2	CAR	Carapungo	784.154	9,989.120	x	x	x	x
3	JIP	Jipijapa	780.503	9,982.298		x	x	x
4	BEL	Belisario	779.389	9,980.085	x	x	x	x
5	CEN	Centro	777.160	9,975.660	x	x	x	x
6	CAM	El Camal	777.160	9,972.341	x	x	x	x
7	GUA	Guamaní	772.548	9,963.399	x	x		
8	TUM	Tumbaco	789.413	9,976.765	x		x	
9	LCH	Los Chillos	782.728	9,966.808	x			

Elaborado: Soraya Ruiz R.

3.6.4 CONTAMINANTES A MODELAR.

Se estimarán las concentraciones de SO_2 y NO_x expresado como NO_2. En base a las emisiones de SO_2 y NO_2 se obtienen las concentraciones de sulfatos y nitratos respectivos. Según la literatura revisada seasumirá como material particulado fino$PM_{2.5}$ secundario el 100% de la concentración de sulfatos y nitratos obtenidos en la modelación.

3.6.5 EMISIONES INGRESADAS.

Se requieren las emisiones de las cuatro termoeléctricas consideradas en el estudio, estas se pueden determinar a partir de factores de emisión y el consumo de combustible para el año analizado.

Cabe destacar que para el modelo se requieren los parámetros de caracterización de cada una de las chimeneas que serán consideradas como fuentes puntuales de emisión. Es aquí donde ha estado el cuello de botella para la elaboración de esta tesis, puesto que la información ha sido muy difícil obtener.

Por tanto, lo que se ha hecho es modelar las emisiones que están publicadas en el inventario de emisiones del 2009. En base a esas emisiones totales y considerando la energía bruta en MWh producida por cada una de las unidades de las termoeléctricas se ha distribuido la emisión para cada chimenea.

TABLA 3.6. EMISIONES DE FUENTES PUNTUALES: TERMOELÉCTRICAS, DEL INVENTARIO DE EMISIONES DE QUITO AÑO 2009.

Termoeléctrica	CO (ton/año)	NO_x * (ton/año)	SO_2 (ton/año)	$PM_{2.5}$ (ton/año)
Santa Rosa	356.86	1,343.49	190.48	20.11
Guangopolo	260.99	2,398.81	731.52	23.43
Gualberto Hernandez	367.79	3,380.47	1,030.89	33.02
Luluncoto	80.81	304.22	185.92	4.55

(*) Se considera que el 90% de los NO_x son NO y el 10% NO_2.(Zuk, Garibay, Iniestra, López, Rojas, & Laguna, 2006)

Elaborado: Soraya Ruiz R.

TABLA 3.7. ENERGÍA BRUTA PRODUCIDA POR CADA UNIDAD DE LAS TERMOELÉCTRICAS OPERATIVAS EN QUITO.

Estación Termoeléctrica	Unidad	Energía Bruta (MWh)
Gualberto Hernández	1	22,330.46
	2	35,555.04
	3	32,380.8
	4	33,448.89
	5	29,987.95
	6	33,880.06

TABLA 3.7 CONTINUACIÓN

Luluncoto	U1	2,392.9
	U3	3,262.91
Guangopolo	U1	32,138.49
	U2	-
	U3	38,511.53
	U4	34,458.41
	U5	-
	U6	24,062.09
	U7	3,940.1
Santa Rosa	TG1	29,994.15
	TG2	38,894.73
	TG3	-

(-) No estuvo en operación ese año.

Elaborado: Soraya Ruiz R.

3.6.5.1 Descripción de las fuentes emisoras

Ubicación de las fuentes

A continuación se presentan las coordenadas UTM que indican la localización de las distintas fuentes consideradas al momento de realizar la modelación de calidad del aire, que incluyen 4 centrales termoeléctricas y cada una de las unidades que han estado operativas durante el año 2009. En cuanto a las elevaciones, éstas son las obtenidas desde la topografía digital.

TABLA 3.8. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS UNIDADES EN CADA UNA DE LAS CENTRALES TERMOELÉCTRICAS.

Estación Termoeléctrica	Unidad	Elevación sobre el nivel del mar (m)	Coordenadas Cartesianas UTM*	
			E (m)	N (m)
Gualberto Hernández	U1.	2,466.51	783,777.52	9,969,913.89
	U2.	2,465.87	783,770.98	9,969,903.54
	U3	2,465.44	783,766.84	9,969,896.76
	U4	2,465.07	783,763.4	9,969,891.41
	U5.	2,464.69	783,759.58	9,969,885.88
	U6	2,464.31	783,756.22	9,969,880.42
Guangopolo	1.	2,466.1	783,757	9,969,986
	3.	2,466.23	783,759	9,969,989
	4.	2,467.4	783,771.02	9,970,005.23
	6.	2,467.62	783,774.48	9,970,012.55
	7.	2,468.05	783,781.84	9,970,025.51
Luluncoto	1.	2,864.45	777,704.37	9,973,621.07
	3.	2,864.91	777,712.24	9,973,612.79
Santa Rosa	TG1	3,047.5	773,778.35	9,959,800.11
	TG2	3,051.16	773,786.14	9,959,782.94

(*) Datum: WGS 84, Huso 17.

Elaborado: Soraya Ruiz R.

Variables de las unidades operativas

Se describe las características técnicas de cada una de las chimeneas ingresadas al modelo. Hay que destacar que se contaba con información de una o dos chimeneas de cada una de las termoeléctricas, proporcionado por la Corpaire dentro del marco de otra tesis elaborada por la autora, lo que se hizo fue

extrapolar esta información, complementarla con datos de otras tesis y a partir de observaciones visuales y de Google Earth.

TABLA 3.9. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LAS CHIMENEAS.

Estación Termoeléctrica	Unidad	Altura	Diámetro	Velocidad de salida	Temperatura de salida
		(m)	(m)	(m/s)	(K)
Gualberto Hernández	U1.	18	0.65	58.52	714
	U2.	11.25	0.76	55.61	714
	U3	11.25	0.76	55.61	714
	U4	11.25	0.76	55.71	701
	U5.	11.25	0.76	55.61	714
	U6	11.25	0.76	58.52	728
Guangopolo	1	18	0.76	56.61	613
	3	18	0.76	56.61	613
	4	18	0.76	56.61	613
	6	18	0.76	56.61	613
	7	14.66	0.5	56.61	613
Luluncoto	1	14.32	1.74	50	700
	3	14.32	1.74	50	700
Santa Rosa	TG1	15	1.5	50	700
	TG2	15	1.5	50	700

Elaborado: Soraya Ruiz R., a partir de (Calderón & Pachacama, 2011). (Corporación para el Mejoramiento del Aire CORPAIRE, 2006). (Google Earth).

Ahora, se tienen las tasas de emisión anual de cada una de las unidades de las termoeléctricas, se modelan entonces cada una de las chimeneas individualmente.

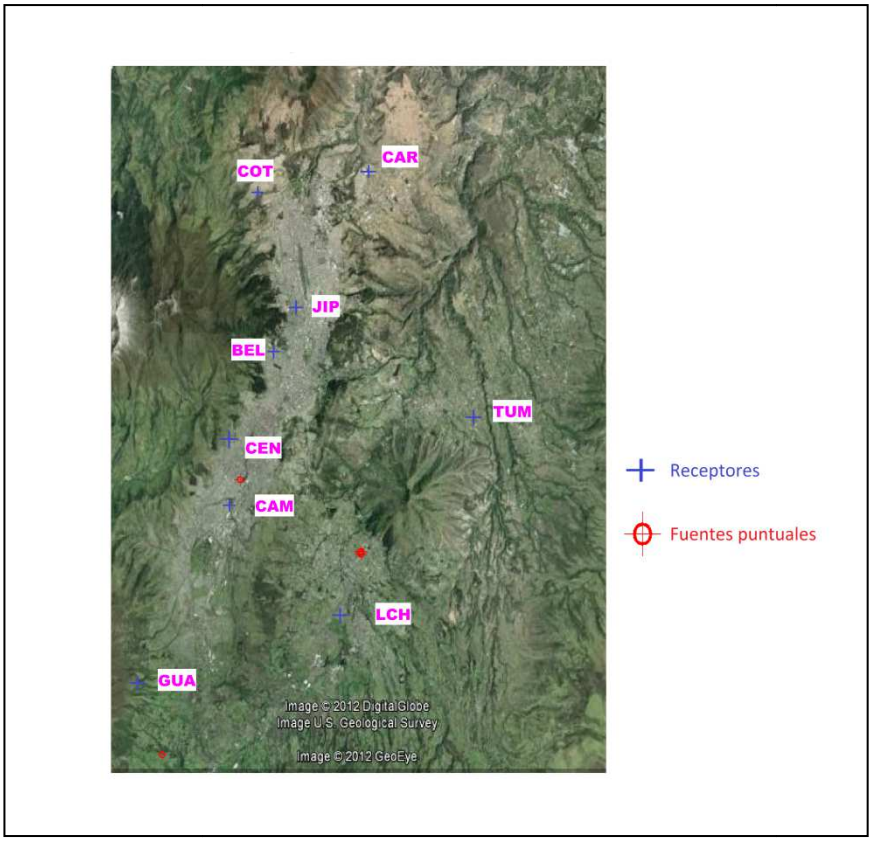
TABLA 3.10. EMISIONES EN TON/AÑO.

Estación Termoeléctrica	Unidad	SO_2	NO	NO_2
Gualberto Hernández	U1.	122.72	362.179	40.242
	U2.	195.397	576.669	64.074
	U3	177.952	525.186	58.354
	U4	183.822	542.51	60.279
	U5.	164.802	486.376	54.042
	U6	164.802	549.503	61.056
Guangopolo	1	176.621	521.256	51.917
	3	211.645	624.621	69.402
	4	189.37	558.883	62.098
	6	132.236	390.264	43.363
	7	21.653	63.905	7.101
Luluncoto	1	78.66	115.84	12.871
	3	107.26	157.958	17.551
Santa Rosa	TG1	82.935	526.459	58.495
	TG2	107.545	682.682	75.854

Elaborado: Soraya Ruiz R.

Al observar en el área de modelación, las fuentes puntuales se encuentran todas al sur de la ciudad de Quito, específicamente en uno de los valles, que es el sector de Guangopolo, donde se encuentran 2 estaciones termoeléctricas colindantes. Así, considerando la dirección del viento, los receptores principales que reciben directamente el impacto de las emisiones son Camal, Los Chillos y Guamaní.

FIGURA 3.19.REPRESENTACIÓN DE LAS FUENTES Y LOS RECEPTORES PUNTUALES.



Elaborado: Soraya Ruiz R. a partir de Calpuff View.

No se ingresó ningún perfil horario, se modeló considerando emisión uniforme durante el año debido a la falta de información.

3.6.6 MECANISMO QUÍMICO SIMPLIFICADO.

La corrida del modelo CALPUFF se realizó en general utilizando todos los parámetros correspondientes a los valores sugeridos por la US EPA. El modelo se corrió considerando el mecanismo de transformación química MESOPUFF II. Para poder aplicar el mecanismo de trasformación química, se contaba con los valores por *default* de ozono de 80 ppbv y la concentración de *background* de amoníaco de 10 ppb. Sin embargo, en la literatura revisada (Levy, Spengler,

Hlinka, Sullivan, & Moon, 2002), se señala que la concentración de amoníaco estaría siendo sobreestimada (particularmente para zonas urbanas y forestales); y se hizo un análisis de sensibilidad al considerar el valor de *background* de amoníaco de 10 ppb y de 1 ppb, encontrándose que a causa de la reacción preferencial entre el amoníaco y los sulfatos, una menor concentración de amoníaco tiende a disminuir las concentraciones de nitrato particulado antes de afectar las concentraciones de sulfato particulado. Así, en ese estudio, se encontró que variando el *background* de amoníaco de 10 a 1 ppb, se disminuyeron los impactos de nitrato en alrededor de 30%.

Se consultó también un Estudio de Impacto Ambiental(Estudio de Impacto Ambiental de la Unidad 5. Central Térmica Guacolda. Anexo 5.1. Emisiones y Calidad del Aire.)de una central térmica en Chile y se encontraron concentraciones ambientales esperadas referentes a amoníaco debido a su operación, siendo este valor de una concentración máxima horaria de 2.5 $\mu g/m^3$ (3.3 ppb).

En el caso de Quito, no se encontraron valores monitoreados de amoníaco, así que se consideró prudente dejar el valor por *default* del CALPUFF de 10 ppb.

En lo referente a ozono se cuenta con monitoreo continuo de este contaminante, así que se ingresó un archivo horario con datos de todo el año 2009 con las concentraciones de ozono correspondientes a 8 estaciones de monitoreo de la REMMAQ(ver Tabla 3.5.).

3.6.7 RESULTADOS DEL MODELO DE DISPERSIÓN.

Se realizó una corrida del modelo de dispersión. Se obtuvieron datos horarios (8759 horas) de concentración de NO_x y SO_2 en $\mu g/m^3$, esto para cada uno de los 9 receptores puntuales ingresados, además para una grilla de dispersión como se explicó en la sección 3.6.3.

CAPÍTULO 4.
RESULTADOS DE LA MODELACIÓN DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES.

4.1 INTRODUCCIÓN

En esta sección se presentan los resultados de la aplicación del modelo de dispersión CALPUFF en el Distrito Metropolitano de Quito.

Dados los requerimientos de la tesis planteada, de modelar un área de 1369 km^2que incluya la mayor parte del DMQ, el modelo CALPUFF resulta ser una clara elección, adecuada en términos de los requerimientos de información y la capacidad de representación de los fenómenos de transporte, dispersión, transformación química y depositación superficial de contaminantes, especialmente en el caso de la formación de nitritos y nitratos, que son considerados como material particulado $PM_{2.5}$, lo anterior considerando una alta resolución espacial para resolver la topografía dela zona.

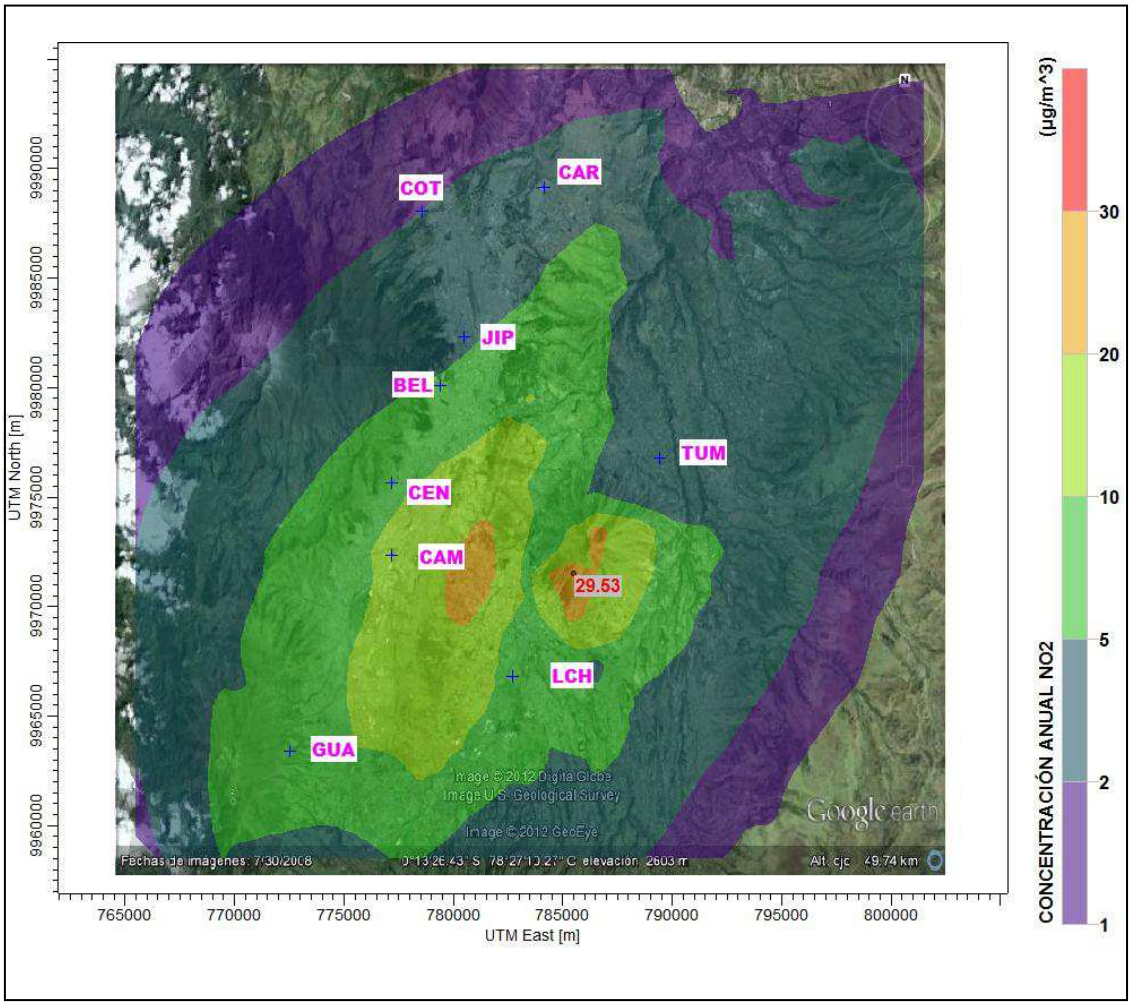
4.2 RESULTADOS DE LA MODELACIÓN DE CALIDAD DEL AIRE POR FUNCIONAMIENTO DE TERMOELÉCTRICAS

4.2.1 CONCENTRACIONES DE GASES

Con respecto a la dispersión del NO_2, la siguiente figura muestra la simulación del promedio de concentración anual del NO_2 para el año 2009. Notar que la escala de las concentraciones no es lineal, para permitir apreciar la variabilidad de los impactos en el DMQ que predice el modelo CALPUFF, los que cambian de niveles muy bajos cercanos a 1 $\mu g/m^3$ en las afueras de la ciudad, y valores

cercanos a 30 µg/m^3 que se ubican en dos zonas, al este y oeste de la localización de las 2 centrales termoeléctricas de la zona de Guangopolo; el punto de máximo impacto está ubicado en las coordenadas 785.500 E (km) y 9971.500N (km) correspondiente al cerro Haló, que separa el valle de los Chillos con el valle de Tumbaco, con un valor promedio máximo anual de 29.53 µg/m^3.

FIGURA 4.1.CONCENTRACIÓN ANUAL DE NO_2 SIMULADA POR EL MODELO CALPUFF, AÑO 2009.

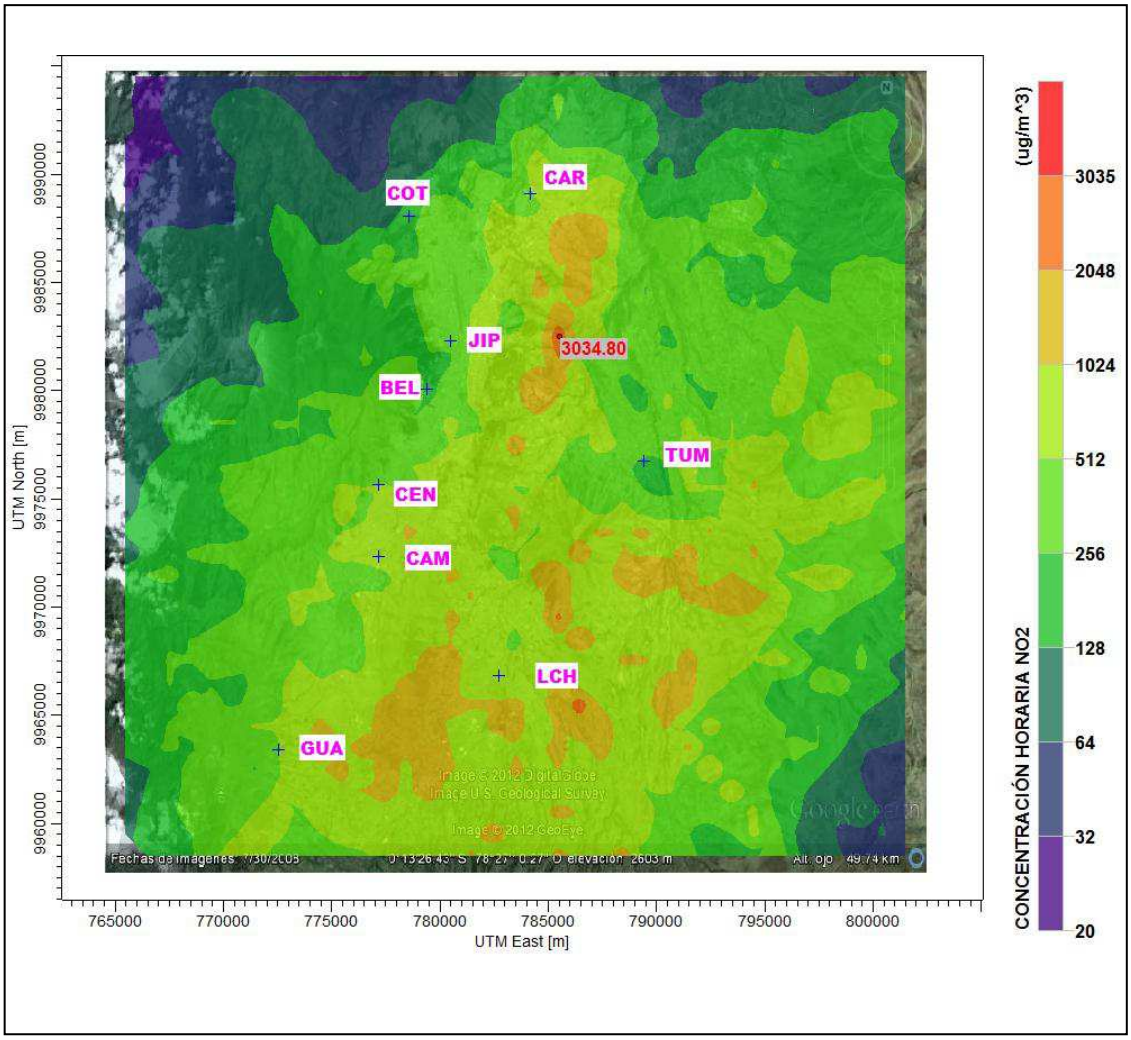


Elaborado: Soraya Ruiz R. a partir de Calpuff View.

La siguiente figura muestra la simulación del promedio horario de NO_2 para el 2009. La forma de la zona de impactos es bastante diferente a la del promedio anual, pues el promedio horario representa directamente la influencia de la

dirección de los vientos y la concentración de ozono en la ciudad de Quito. Es así como se evidencia la reactividad que sufre la emisión de las chimeneas de las termoeléctricas, cuyos NO_X en un 90% corresponden a NO y 10% a NO_2. Por la transformación química y el transporte entonces la concentración de NO_2 en el ambiente a mayor distancia del punto de emisión es mayor que la del NO.

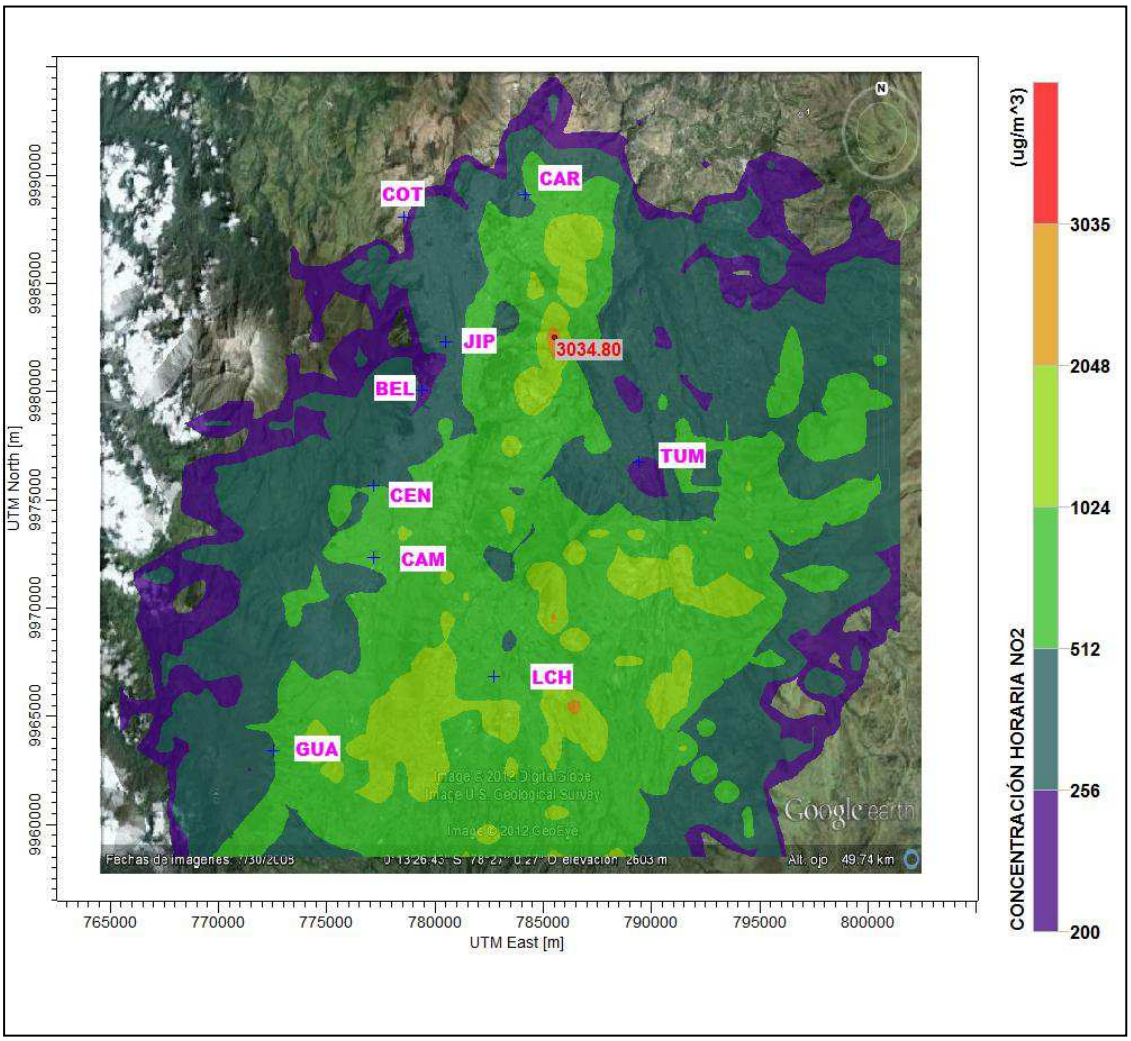
FIGURA 4.2.CONCENTRACIÓN HORARIA DE NO_2 SIMULADA POR EL MODELO CALPUFF, AÑO 2009.



Elaborado: Soraya Ruiz R. a partir de Calpuff View.

La siguiente figura representa la zona de excedencia para la norma horaria de NO_2 (200 µg/m^3), donde se aprecia que prácticamente toda la mancha urbana del DMQ excede ese valor. El punto de máximo impacto está ubicado en las coordenadas 785.500 E (km) y 9982.500 N (km) correspondiente a un barrio al lado este de la Av. Simón Bolívar cercano a Zámbiza, con un valor de 3034.8 µg/m^3.

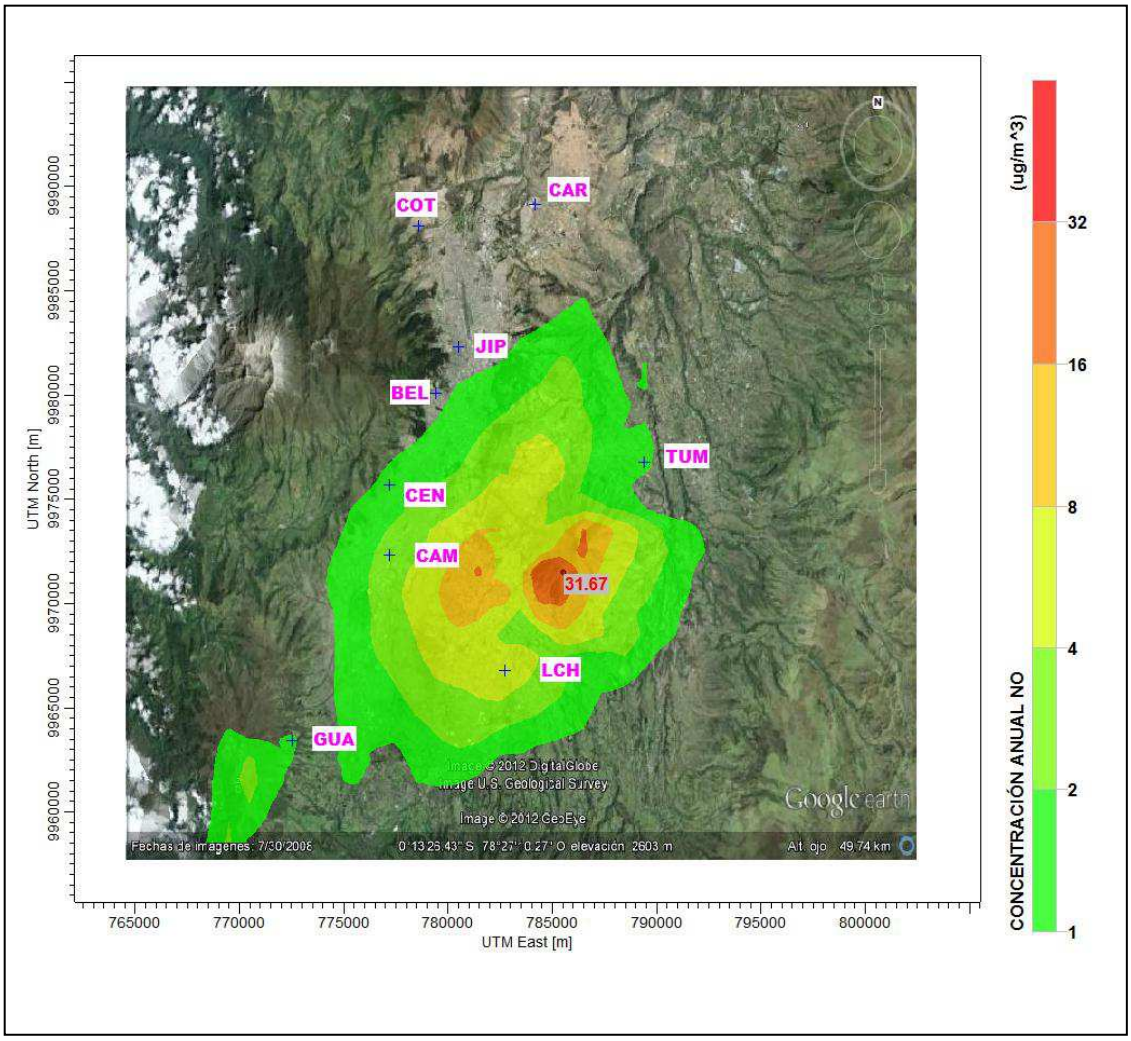
FIGURA 4.3.ZONA DE EXCEDENCIA DE LA NORMA HORARIA DE NO_2 SIMULADA POR EL MODELO CALPUFF, AÑO 2009.



Elaborado: Soraya Ruiz R. a partir de Calpuff View.

A continuación se hace un análisis de la dispersión del NO, puesto que así se puede observar que la concentración de NO es preponderante si el punto de emisión está más cercano.

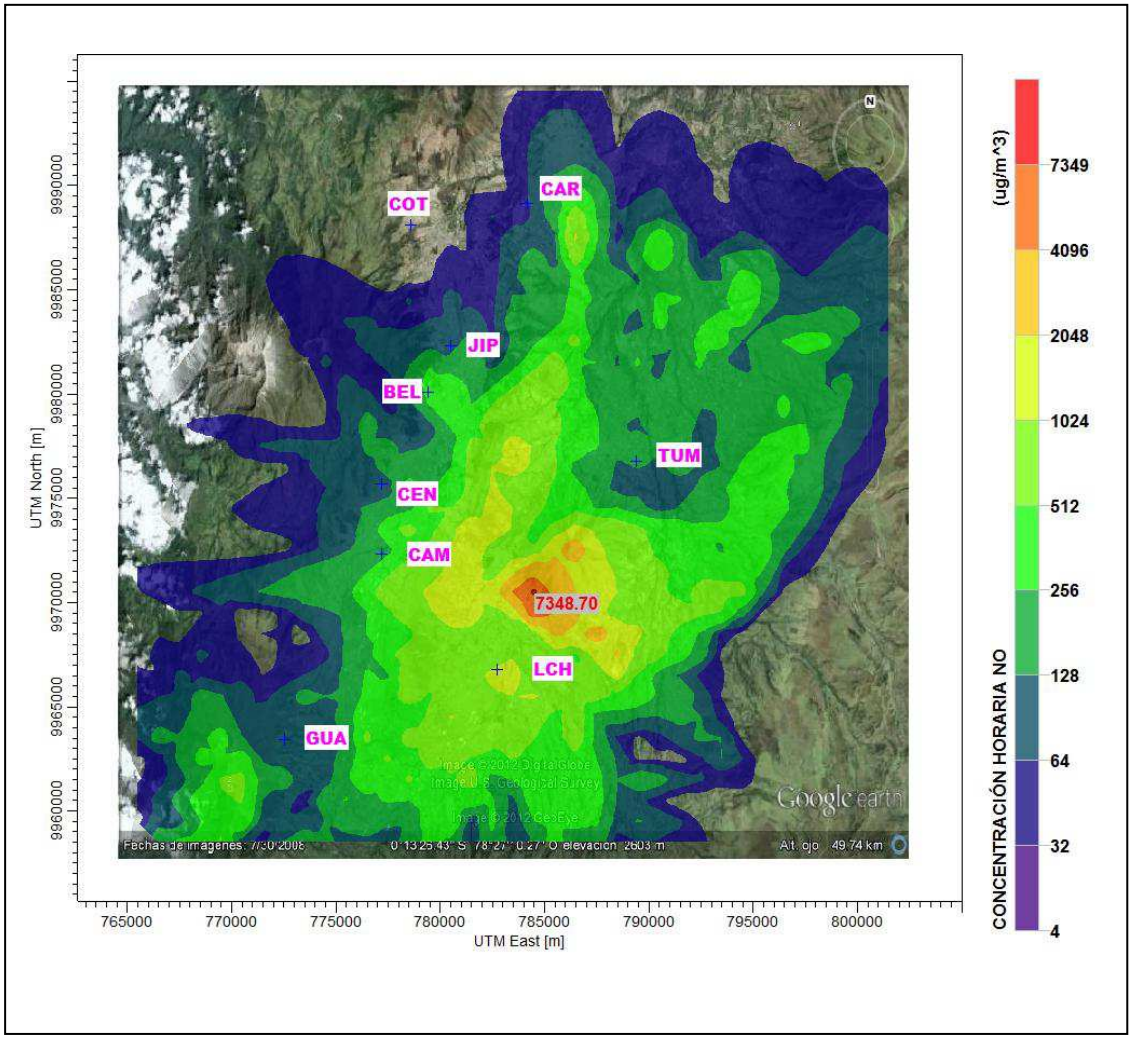
FIGURA 4.4.CONCENTRACIÓN ANUAL DE NO SIMULADA POR EL MODELO CALPUFF, AÑO 2009.



Elaborado: Soraya Ruiz R. a partir de Calpuff View.

El mapa de dispersión horaria del NO evidencia que la concentración está bastante relacionada con la cercanía al punto de emisión. Así el punto de mayor impacto determinado por la simulación del CALPUFF se localiza en las coordenadas 784.500 E (km) y 9970.500 S (km), con un valor de 7348.7 µg/m^3.

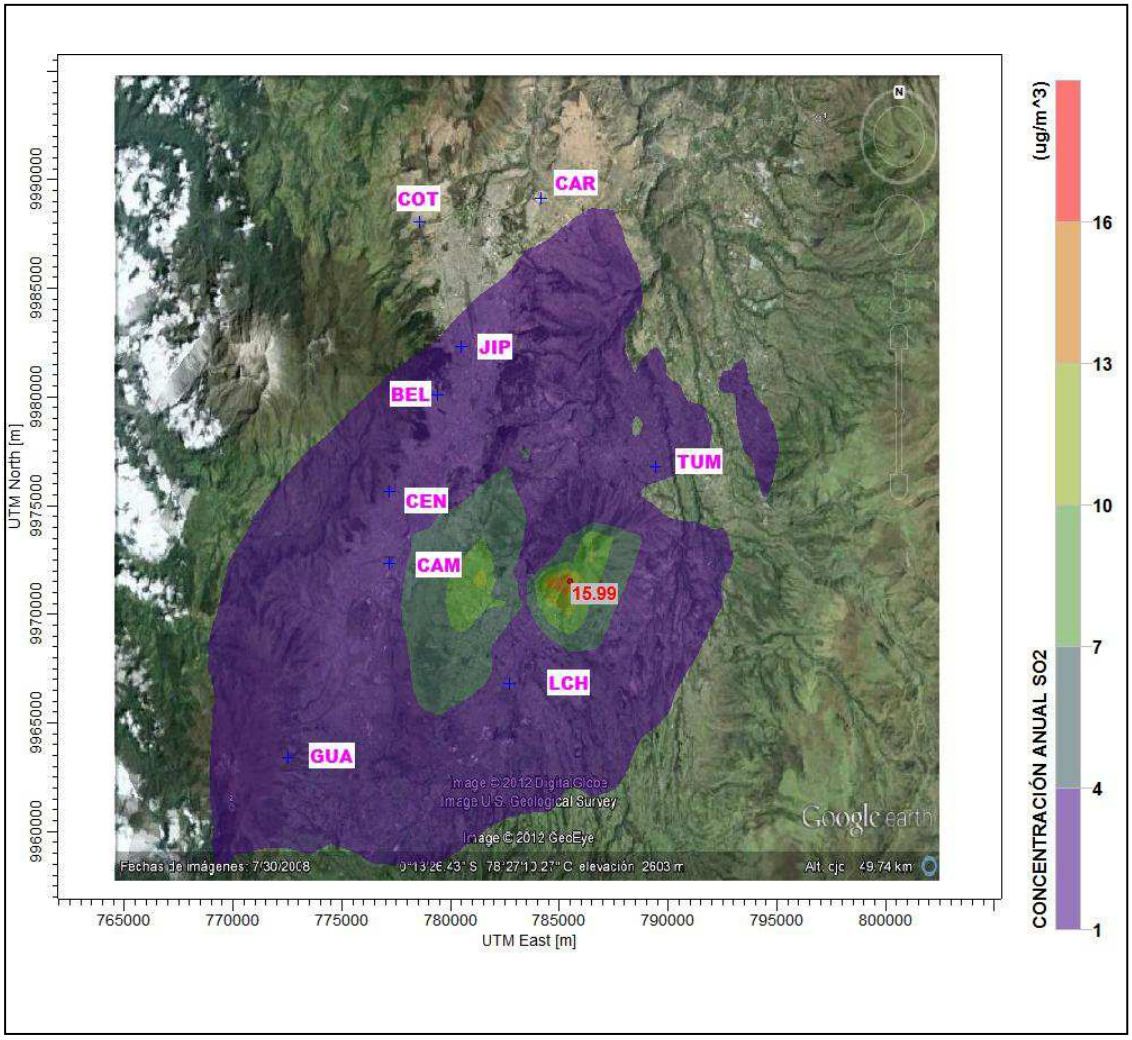
FIGURA 4.5. CONCENTRACIÓN HORARIA DE NO SIMULADA POR EL MODELO CALPUFF, AÑO 2009.



Elaborado: Soraya Ruiz R. a partir de Calpuff View.

Las siguientes figuras muestran respectivamente, las simulaciones del promedio anual y diario para el SO_2. Para el promedio aritmético de la concentración anual se aprecia que se cumple ampliamente con la normativa vigente de 60 µg/m^3.

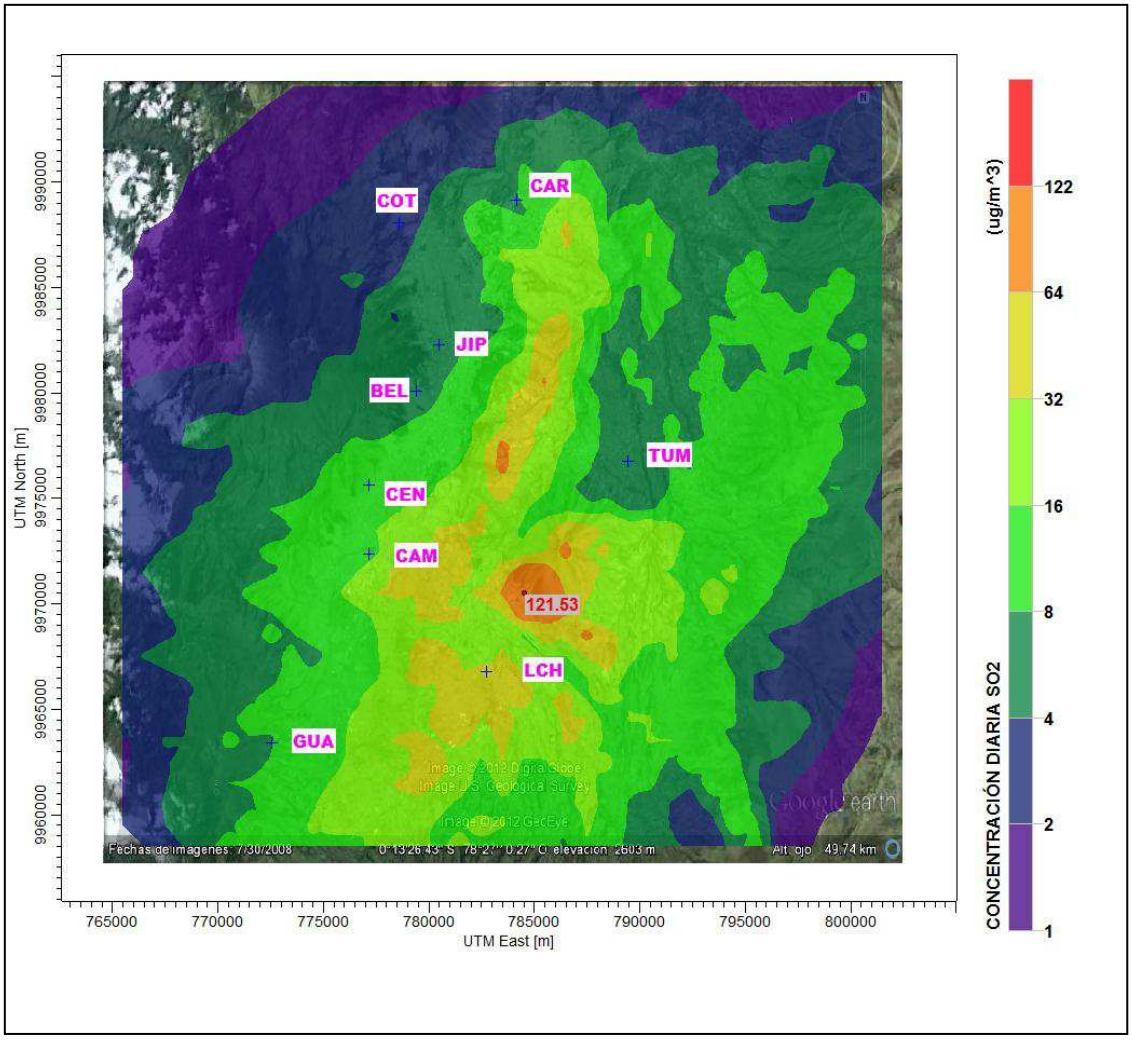
FIGURA 4.6.CONCENTRACIÓN ANUAL DE SO_2 SIMULADA POR EL MODELO CALPUFF, AÑO 2009.



Elaborado: Soraya Ruiz R. a partir de Calpuff View.

En el caso de la concentración promedio diaria se aprecia que se cumple con la normativa vigente, pero en algunas zonas los valores son cercanos al límite que es de 125 µg/m^3. La máxima concentración promedio de 24 horas fue de 121.53 µg/m^3, el punto de máximo impacto se encuentra dentro del área de emisión de las 2 principales termoeléctricas en el sector de Guangopolo.

FIGURA 4.7.MÁXIMA CONCENTRACIÓN DIARIA DE SO_2 SIMULADA POR EL MODELO CALPUFF, AÑO 2009.



Elaborado: Soraya Ruiz R. a partir de Calpuff View.

4.2.2 CONCENTRACIONES DE PARTÍCULAS SECUNDARIAS

El modelo de dispersión CALPUFF permite estimar las concentraciones de las siguientes especies: sulfatos ($SO_4^=$), nitratos (NO_3^-) y ácido nítrico (HNO_3). Los sulfatos y nitratos tienden a combinarse con el ion amonio en ambientes ricos en amoníaco y formar sales más estables que son capaces de absorber agua y convertirse en los llamados “aerosoles”. En ausencia del amoníaco y debido a sus propiedades ácidas se conocen como precursores de la lluvia ácida, siendo su efecto más notorio la acidificación de los cuerpos de agua cercanos. Estas

partículas (aerosoles) tiendena ser muy pequeñas, permanecen suspendidas mucho tiempo y pueden tener efectos adversos en la salud y en la visibilidad. Por lo tanto, si bien no se cuenta con una norma específica para sulfatos, éstos se consideran contaminantes secundarios pertenecientes a la fracción de partículas menos a 2.5 micras ($PM_{2.5}$).(Instituto Nacional de Ecología, 2003)

En esta sección se reporta la concentración de partículas secundarias, como la suma de nitratos y sulfatos.

TABLA 4.1. ESTIMACIÓN DE CONCENTRACIONES SIMULADAS DE MATERIAL PARTICULADO SECUNDARIO EN RECEPTORES PUNTUALES (MÁXIMA HORARIA).

Receptor puntual	Sulfatos (µg/m^3)	Nitratos (µg/m^3)	Total como $PM_{2.5}$ (µg/m^3)	Valor monitoreo (media anual) (µg/m^3)
JIP	0.68	12.03	12.71	16.38
COT	1.00	13.84	14.84	17.03
CAR	1.01	42.19	43.20	18.37
BEL	1.20	11.20	12.40	18.04
CAM	1.32	18.59	19.91	22.50
TUM	0.80	10.90	11.70	No mide
LCH	2.07	57.70	59.77	No mide
CEN	1.26	15.09	16.35	18.48
GUA	1.22	24.90	26.12	No mide

Elaborado: Soraya Ruiz R.

La estación Los Chillos seguida por la estación Carapungo, son las que presentan un mayor impacto por la concentración de material particulado secundario, con valores de 59.77 µg/m^3 y 43.20 µg/m^3 respectivamente.

Finalmente, la siguiente tabla indica las concentraciones simuladas obtenidas en los receptores puntuales y se hace una comparación con la normativa vigente.

TABLA 4.2. ESTIMACIÓN DE CONCENTRACIONES EN RECEPTORES PUNTUALES DE LA MODELACIÓN Y COMPARACIÓN CON NORMA DE CALIDAD DEL AIRE.

Contaminante	Receptores de la modelación (valores en µg/m^3)									Norma de calidad del aire vigente (µg/m^3)
	JIP	COT	CAR	BEL	CAM	TUM	LCH	CEN	GUA	
NO_2 horario	283.81	161.03	336.13	235.98	715.11	226.56	632.23	478.02	494.45	200
NO_2 anual	4.54	2.01	2.87	5.39	11.53	4.07	8.77	8.54	5.95	40
SO_2 diario	6.55	3.09	5.97	6.1	15.18	5.82	70.39	10.75	7.81	125
SO_2 anual	1.18	0.51	0.73	1.4	3.5	1.18	4.02	2.21	1.33	60
$PM_{2.5}$ horario	12.71	14.84	43.20	12.40	19.91	11.70	59.77	16.35	26.12	50
$PM_{2.5}$ horario percentil 98	7.72	5.55	8.05	8.07	12.33	6.73	22.49	10.21	14.30	>=50
$PM_{2.5}$ anual	0.25	0.16	0.17	0.28	0.49	0.19	0.34	0.39	0.41	15

Elaborado: Soraya Ruiz

Las concentraciones ambientales simuladas por el modelo CALPUFF para los receptores puntuales debido a la operación de las 4 termoeléctricas en la ciudad de Quito se resumen en la Tabla 4.2. Donde claramente se aprecia que las concentraciones de NO_2 presentan excedencia de la norma horaria en todos los receptores. En lo que respecta al SO_2 los valores están muy por debajo de la norma vigente.

Se incluyen los valores de $PM_{2.5}$que se aportan por la formación de material particulado fino secundario, donde claramente se nota que es significativo, y en el receptor Los Chillos, incluso se excede la norma vigente horaria.

CAPÍTULO 5.

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

5.1 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La aplicación del modelo CALMET-CALPUFF resultó ser una herramienta útil para el diagnóstico de la dispersión de contaminantes provenientes de las termoeléctricas instaladas en la ciudad de Quito. En términos generales se muestra que las concentraciones más elevadas de los contaminantes primarios se encuentran en las cercanías de las termoeléctricas.

La aplicación del modelo CALMET permitió hacer una buena representación de las condiciones meteorológicas de la ciudad de Quito, y el tener un año completo con buena información meteorológica, permite aplicar esos resultados a otros años de modelación de dispersión de contaminantes.

NO_2

La distribución de las concentraciones anuales de dióxido de nitrógeno tiene una influencia en gran parte de la ciudad de Quito, abarcando toda la mancha urbana. Así se obtiene el valor máximo horario de dióxido de nitrógeno en un punto norte de la ciudad, cercano a Zámbiza, lejano de los puntos de emisión de las termoeléctricas.

Al analizar la distribución de la concentración máxima horaria se verifica que prácticamente en toda la ciudad de Quito se excede la norma de 200 $\mu g/m^3$.

El receptor El Camal, es el que presenta la máxima concentración horaria de dióxido de nitrógeno, con un valor de 715.11 $\mu g/m^3$y el máximo valor promedio anual de 11.53 $\mu g/m^3$.

SO_2

La distribución de las concentraciones anuales de bióxido de azufre tiene una influencia en gran parte de la zona central sur de la ciudad de Quito. Pero al analizar la distribución de la concentración máxima diaria se puede apreciar que hay zonas donde los valores son cercanos al límite de 125 $\mu g/m^3$de la normativa, pero en general se cumple con la normativa vigente.

El receptor Los Chillos es el que presenta el mayor valor de concentración de SO_2, siendo su valor máximo diario de 70.39 $\mu g/m^3$ y el promedio anual de 4.02 $\mu g/m^3$.

Partículas secundarias (sulfatos, nitratos y ácido nítrico)

Aunque en términos espaciales, la pluma de las partículas secundarias afecta esencialmente a las mismas zonas que los contaminantes primarios, se observan diferencias significativas, tanto en el alcance de las concentraciones máximas, como en la homogeneidad de las concentraciones obtenidas para partículas primarias. Esto se debe a que la transformación química se da durante la advección de las partículas y a que estas son de menor tamaño que las PM_{10}, por lo que se transportan a mayor distancia.

En términos de la distribución de las concentraciones, para las partículas secundarias se obtuvieron valores más homogéneos entre sí para los 9 receptores. Aunque en este caso el receptor Los Chillos es el que tiene la concentración máxima horaria de partículas secundarias equivalentes a $PM_{2.5}$ con un valor de 59.77 $\mu g/m^3$, excediendo el valor de la normativa que es 50 $\mu g/m^3$para el percentil 98. Y el receptor Carapungo presenta un valor también alto de concentración de $PM_{2.5}$, con 43.20 $\mu g/m^3$.

Limitaciones de los resultados

La cuantificación de la incertidumbre asociada a las concentraciones obtenidas del modelo CALPUFF, será posible con la información de campañas de monitoreo

de calidad de aire en toda la ciudad, que permitan compararlas con el desempeño del modelo. Adicionalmente algunos autores han reportado cierta incertidumbre asociada al mecanismo de conversión química (MESOPUFF II), a la incorporación de remoción seca y húmeda y a la selección del área de modelación(Levy, Spengler, Hlinka, Sullivan, & Moon, 2002).

5.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.

Cualquier modelo representa una aproximación a la realidad y, en consecuencia, sus resultados tienen incertidumbres asociadas. Estas incertidumbres se expresan a través de las diferencias entre lo estimado y las observaciones. Para demostrar la confiabilidad de los resultados obtenidos se hará un análisis estadístico de las concentraciones observadas (datos monitoreados) respecto a las concentraciones modeladas (o predichas por el modelo), para ello se tomarán los valores promedios diarios, para suavizar incertidumbres tanto en meteorología como en perfiles de emisiones, además esto reduce la autocorrelación en ambas series de datos, mejorando la estimación de parámetros, todo en base a la recomendación de la EPA.

Entonces, en primer lugar se hace una revisión de la información disponible del monitoreo de NO_2y SO_2, para determinar cuantos valores faltantes de promedio diario existen en cada estación de monitoreo ambiental.

Una vez que se han obtenido los resultados del modelo meteorológico CALMET para un año completo de datos (estaciones superficiales más datos de meteorología en altura), y se ha simulado el año completo de emisiones en el modelo de dispersión CALPUFF, el siguiente paso es comparar las concentraciones modeladas con las observaciones de la red de monitoreo de la ciudad de Quito.

Para validar el modelo y determinar el nivel de confianza que tienen los resultados de la simulación del sistema real, se aplicarán los parámetros estadísticos recomendados por la EPA (ver fórmulas en el Anexo B).

En este proceso se comparan los datos pareados para hacer posible la comparación de las emisiones de fuentes puntuales con lo monitoreado.

5.2.1 ANÁLISIS DE LA MODELACIÓN DE NO_2.

A continuación se detalla el análisis de los resultados del NO_2.

TABLA 5.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS DE NO_2 DEL MODELO DE DISPERSIÓN APLICADO A QUITO.

Parámetros Estadísticos	RECEPTORES					
	COT	CAR	BEL	CAM	CEN	GUA
No. De datos	365	365	365	365	364	364
Concentración media observada	19.62	15.95	29.16	30.15	27.98	15.62
Concentración media modelada	2.01	2.86	5.39	11.52	8.54	5.95
Desviación estándar de lo observado	6.27	5.38	7.60	7.15	6.86	6.06
Desviación estándar de lo modelado	2.14	3.56	4.86	9.51	8.38	6.00
Sesgo	17.62	13.08	26.30	24.76	16.45	7.08
Diferencia media normalizada	0.90	0.82	0.90	0.82	0.59	0.45
Error de la raíz cuadrada media	18.13	13.32	23.98	18.90	19.75	9.95
Error de la raíz cuadrada media sistemática	18.12	13.25	23.95	18.74	19.45	9.68
Error de la raíz cuadrada media no sistemática	0.67	1.36	1.17	2.46	2.44	2.00
Coeficiente de correlación	0.95	0.92	0.97	0.93	0.79	0.654
Índice de evaluación	0.36	0.44	0.37	0.48	0.44	0.62

Elaborado: Soraya Ruiz R.

La evidencia empírica indica el comportamiento esperado de estas variables, donde se espera fundamentalmente que el valor medio observado de concentraciones debe ser lo más parecido posible al valor medio modelado.

Al analizar los resultados del NO_2, como se observa en la Tabla 5.1 , vemos que las concentraciones modeladas son más bajas que las observadas, sobre todo en las estaciones del norte de la ciudad como Cotocollao, Carapungo y Belisario, que están más distantes de las instalaciones de las termoeléctricas. Las desviaciones estándar de las concentraciones observadas y modeladas no deben diferir mucho tampoco, así se cumple en las estaciones Camal, Centro y Guamaní.

En un modelo con buen desempeño se esperaría, que el valor medio residual (sesgo) y el error de la raíz cuadrada media deberían ser lo más pequeños posibles. Al ver los resultados del análisis estadístico, se puede distinguir que el sesgo es alto, siendo un poco menor para la estación Guamaní.

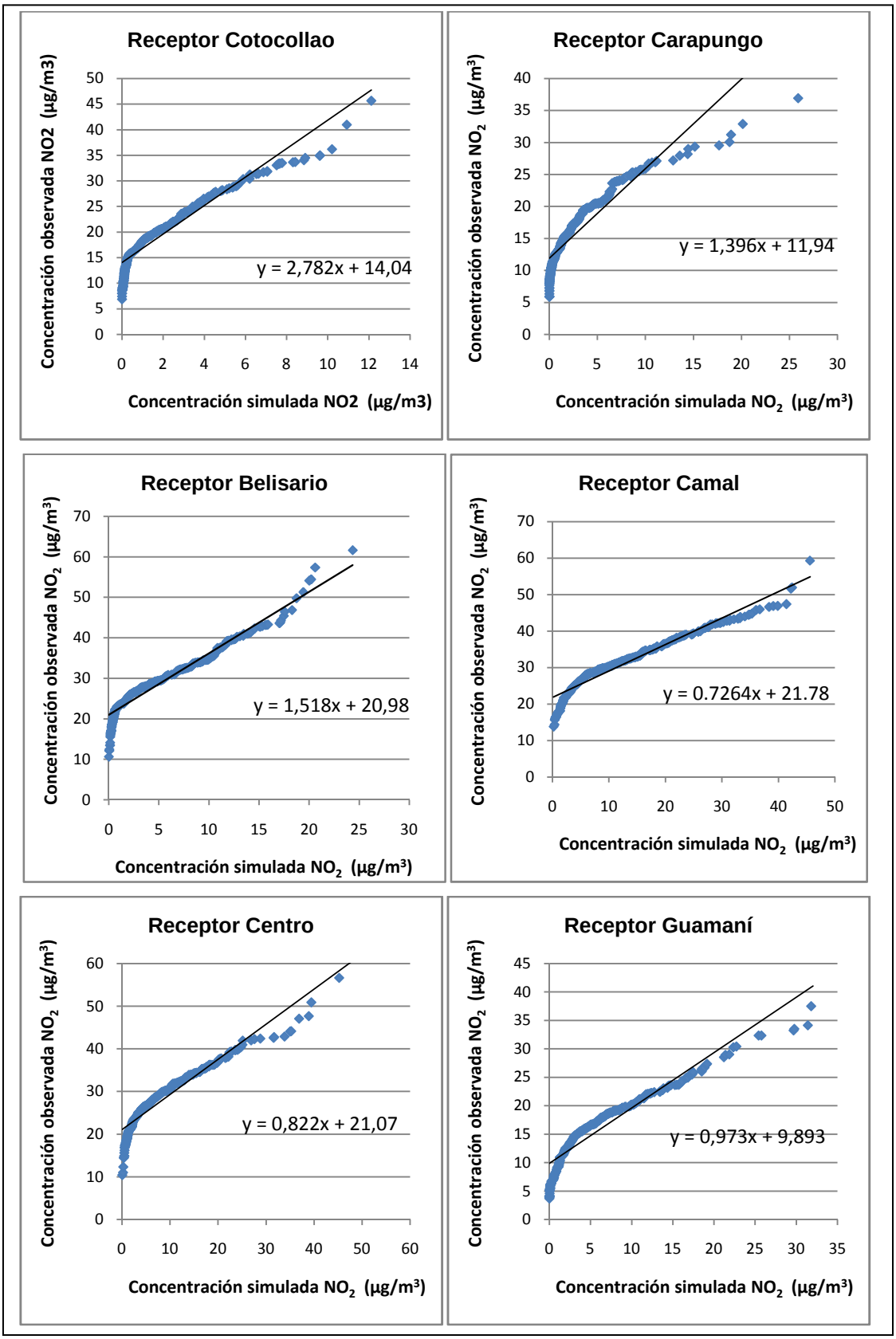
Si la diferencia media normalizada es mayor al 50% se considera que el modelo es deficiente. En este caso la única estación bien representada sería la estación Guamaní. Así también hay que destacar que se presenta un error cuadrático medio sistemático mayor que el error cuadrático medio asistemático, lo cual nos indica resultados sesgados.

Finalmente los dos parámetros que especifican la concordancia horaria de los datos son los índices de correlación que son aproximadamente de 0.9 en todas las estaciones, siendo el menor valor correspondiente a la estación Guamaní, y el índice de evaluación, donde el mejor corresponde a la estación Guamaní.

A continuación se hace un análisis de regresión lineal entre las concentraciones simuladas (eje X) y las concentraciones observadas (eje Y) del NO_2.

Como se puede apreciar en la Figura 5.1, en general la modelación sigue la tendencia de valores en cada una de las estaciones de monitoreo, aunque la tendencia es a subestimar las concentraciones respecto a lo observado.

FIGURA 5.1.ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL ENTRE CONCENTRACIONES SIMULADAS Y OBSERVADAS DE NO_2.



Elaborado: Soraya Ruiz R.

5.2.2 ANÁLISIS DE LA MODELACIÓN DE SO_2.

A continuación se detalla el análisis de los resultados del SO_2.

TABLA 5.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS DE SO_2 DEL MODELO DE DISPERSIÓN APLICADO A QUITO.

Parámetros Estadísticos	RECEPTORES					
	COT	CAR	BEL	CAM	CEN	TUM
No. De datos	347	365	365	365	365	342
Concentración media observada	4.68	3.35	6.93	10.24	6.15	4.78
Concentración media modelada	0.51	0.72	1.40	3.50	2.21	1.18
Desviación estándar de lo observado	1.89	2.06	2.88	7.90	2.81	2.81
Desviación estándar de lo modelado	0.51	0.86	1.22	2.84	1.95	1.06
Sesgo	4.17	2.63	6.20	8.84	2.64	2.57
Diferencia media normalizada	0.89	0.78	0.90	0.86	0.43	0.54
Error de la raíz cuadrada media	4.51	2.91	5.78	8.60	4.05	4.28
Error de la raíz cuadrada media sistemática	4.44	2.90	5.78	8.54	4.03	4.12
Error de la raíz cuadrada media no sistemática	0.14	0.21	0.23	1.01	0.33	0.21
Coeficiente de correlación	0.72	0.97	0.98	0.87	0.67	0.414
Índice de evaluación	0.38	0.56	0.46	0.57	0.62	0.52

Elaborado: Soraya Ruiz R.

En el caso del SO_2, como se observa en la Tabla 5.2, las concentraciones modeladas son más bajas que las observadas, sobre todo en las estaciones del norte de la ciudad como Cotocollao, Carapungo y Belisario, que están más distantes de las instalaciones de las termoeléctricas. Y en las estaciones Centro y Tumbaco los valores son más similares.

Las desviaciones estándar de las concentraciones observadas y modeladas no deben diferir mucho, como es el caso de las estaciones Centro y Tumbaco.

Al ver los resultados del análisis estadístico, se puede distinguir que el sesgo no es muy alto, siendo un poco menor para las estaciones Centro y Tumbaco. Solo la estación Centro tiene una diferencia media normalizada menor al 50%, así que se considera como la única estación bien representada.

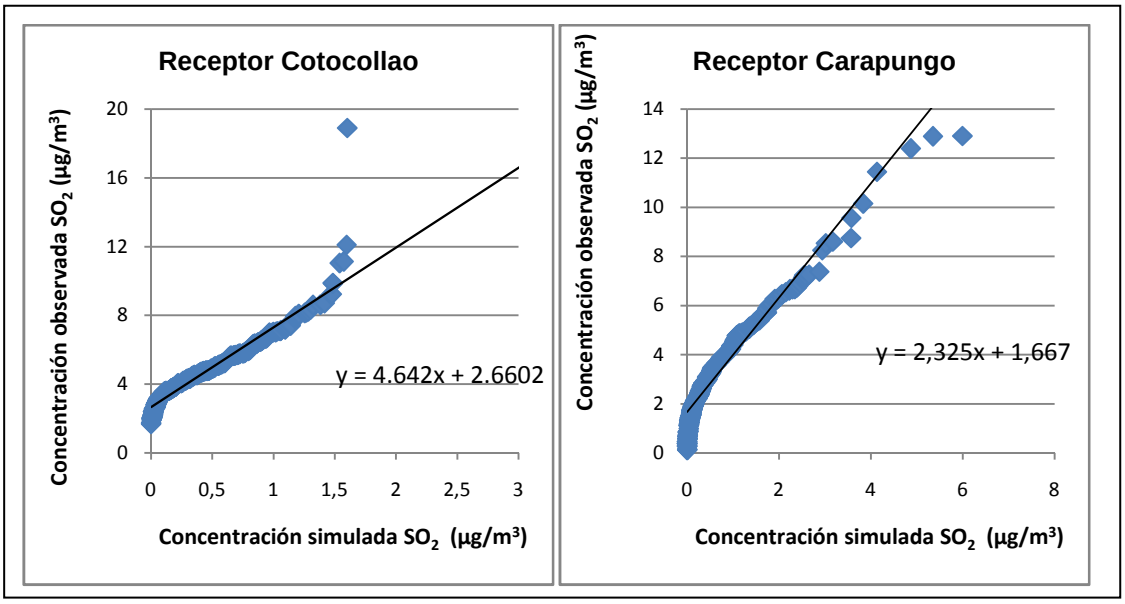
Así también hay que destacar que se presenta un error cuadrático medio sistemático mayor que el error cuadrático medio asistemático, lo cual nos indica resultados sesgados.

Finalmente los índices de correlación fluctúan entre 0.41 y 0.98, y el índice de evaluación va de 0.38 a 0.62, donde el mejor corresponde a la estación Centro.

A continuación se hace un análisis de regresión lineal para las concentraciones de SO_2.

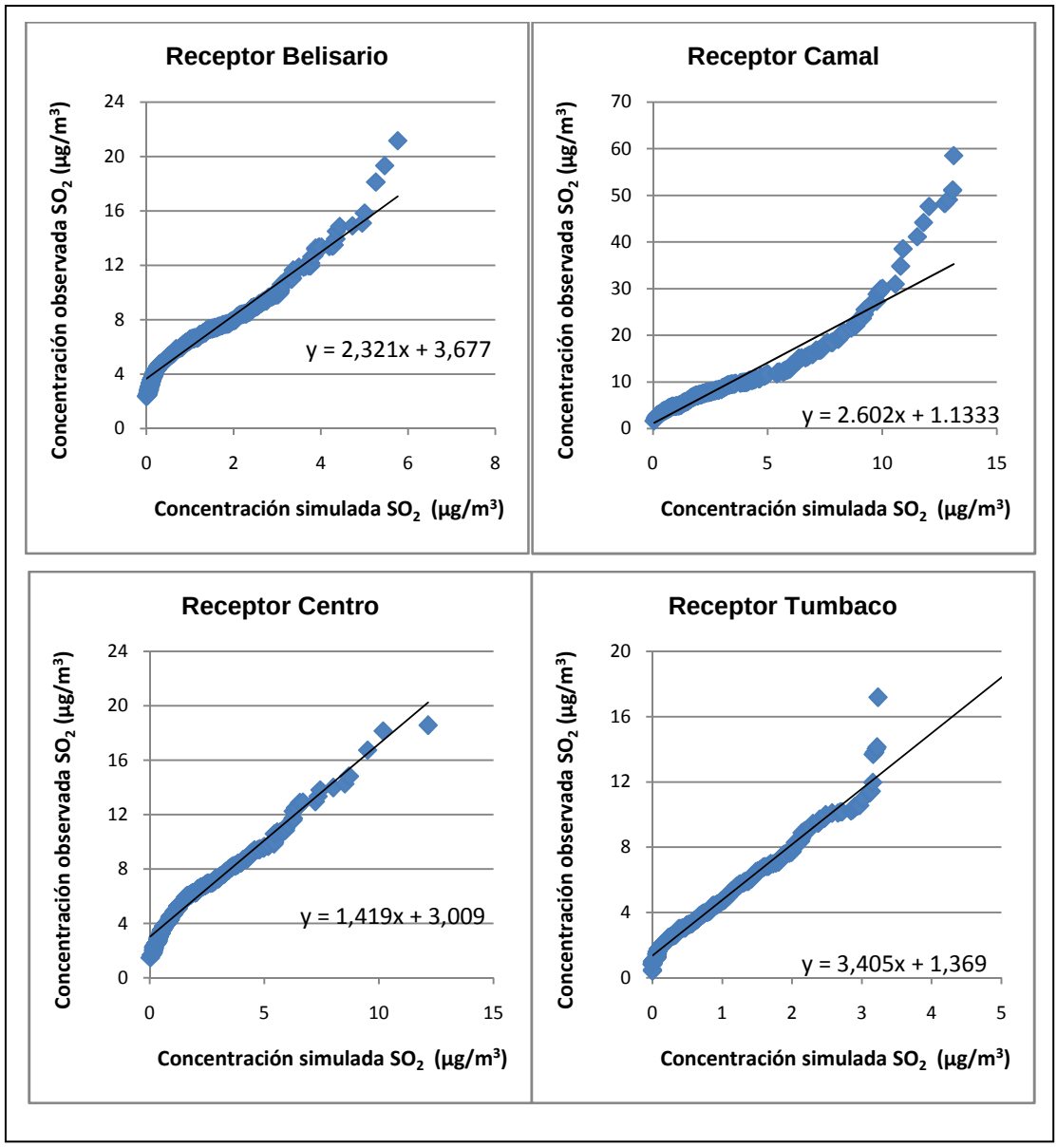
Al observar la Figura 5.2, se observa que los valores simulados siguen la tendencia de los valores observados, pero en general las concentraciones simuladas están subestimadas en relación a las observadas.

FIGURA 5.2.ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL ENTRE CONCENTRACIONES SIMULADAS Y OBSERVADAS DE SO_2.



Elaborado: Soraya Ruiz R.

FIGURA 5.2 CONTINUACIÓN



Elaborado: Soraya Ruiz R.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en el trabajo desarrollado, se pueden mencionar las siguientes conclusiones:

- Se deja en evidencia la importancia que tiene la calidad de la información meteorológica disponible y la disposición de las estaciones de monitoreo de meteorología. Datos de buena calidad entregan campos meteorológicos que se ajustan de mejor manera a los fenómenos ocurridos en el lugar de análisis, lo que permite tener una idea más cercana sobre los impactos reales que tienen las distintas emisiones de contaminantes.
- Con respecto a las estaciones meteorológicas, la ubicación de la red superficial con la que cuenta Quito, con condiciones representativas, entrega información de calidad. Sin embargo, una estación meteorológica en altura, es fundamental a la hora de aplicar esta metodología. Para efectos de esta tesis, esta información se suple adecuadamente por la información construida a partir de la base de datos del NCAR, que ofrece valores cada 6 horas.
- Los factores meteorológicos modelados, como velocidad y dirección de vientos siguen patrones esperados y consistentes entre sí.
- El campo de vientos obtenido a través de la modelación en el modelo meteorológico CALMET, presenta datos representativos del comportamiento atmosférico real de la ciudad de Quito, considerando los vientos anabáticos y catabáticos que se presentan en ciudades de topografía compleja, rodeada de volcanes y cerros.
- Por los resultados obtenidos por la modelación en relación a las concentraciones máxima horaria y promedio anual, requeridos por la norma ecuatoriana de calidad del aire para el NO_2, se aprecia lo siguiente:
    - La máxima concentración promedio de 1 hora fue de 3034.8 $\mu g/m^3$. El punto de máximo impacto está ubicado en las coordenadas 785.500 E (km) y 9982.500 N (km) correspondiente a un barrio al lado este de la Av. Simón Bolívar cercano a Zámbiza. Este valor es

alto, esto implica que puede representar un riesgo para la salud de la población, considerando que no es un impacto local (en el punto de emisión de las termoeléctricas) sino que esta concentración está en un sector lejano.

  - El impacto del NO_2 y sobre todo del NO es más regional, llegando a zonas distantes del emplazamiento de las termoeléctricas. Para el NO_2 se supera la normativa en todos los receptores.Es decir hay que tomar medidas para la reducción de este contaminante, puesto que hemos analizado tan sólo el aporte de concentración debido a las termoeléctricas, y ya se supera la normativa; pero falta considerar el aporte debido a la emisión de fuentes móviles (vehículos motorizados), que según el inventario de emisiones del 2009 los NO_xdebido a fuentes móviles representan el 63.6% del total.
  - Los máximos impactos se concentran en el receptor El Camal para el NO_2y en el receptor Los Chillos para el SO_2.

- Por los resultados obtenidos por la modelación en relación a las concentraciones promedio para 24 horas y promedio anual, requeridos por la norma ecuatoriana de calidad del aire de SO_2, se aprecia lo siguiente:
  - La máxima concentración promedio de 24 horas fue de 121.53 $\mu g/m^3$.
  - El punto de máximo impacto se encuentra dentro del área de emisión de las 2 principales termoeléctricas en el sector de Guangopolo.
  - Existe un alto impacto local del SO_2 sobre la zona de emplazamiento de las 2 principales termoeléctricas, Guangopolo y Gualberto Hernández, aunque este es de menor importancia que el impacto del NO_2, pues no existe superación de normas para el SO_2.
- La modelación de la dispersión atmosférica de NO_2 y SO_2 en la ciudad de Quito, realizada con el modelo CALPUFF presenta concentraciones ambientales de NO_2 y SO_2subestimadas en relación a los valores observados en los seis monitores de la ciudad que miden este

contaminante, sin embargo al comparar la tendencia temporal se observa que esta es similar a lo monitoreado.

- Las concentraciones modeladas de NO_2 y SO_2 son más bajas durante los meses de verano en Quito (julio, agosto, septiembre), lo cual se condice con el hecho de que son meses secos, en los cuales incrementa la radiación solar, por tanto aumenta la velocidad del viento, y también la altura de la capa de mezclado de los contaminantes es más alta, mejorándose la dispersión. Se presentan dos *peaks* de concentraciones altas, durante los meses de marzo y diciembre, seguidos también por concentraciones altas durante octubre y noviembre.Esto se condice con los resultados del inventario de emisiones del DMQ, donde se señala que la distribución mensual de SO_2presenta 2 picos, los cuales tienen relación con el comportamiento de la generación eléctrica dentro del DMQ. Los valores máximos se presentan durante los meses de marzo y diciembre. El pico de marzo se produjo por el máximo de actividad en la central Guangopolo, la cual utiliza combustible Bunker, el cual tiene un alto contenido de azufre. Mientras tanto, los resultados del mes de diciembre se producen por un aumento general en la actividad termoeléctrica, ocasionada por los apagones ocurridos durante los meses de noviembre y diciembre del 2009.
- La fracción de material particulado secundario ($PM_{2.5}$ como suma de nitratos y sulfatos) estimado por la modelación de CALPUFF es relativamente alto, sobre todo al analizar la concentración máxima horaria, pero al analizar el promedio anual y compararlo con respecto del $PM_{2.5}$ total del monitoreo el aporte fluctúa en un 0.9 % en la estación Cotocollao y Carapungo, a un 2.2% en la estación El Camal. Estos aportes son significativos tomando en cuenta que esto se suma al valor de $PM_{2.5}$ emitido como tal en las termoeléctricas y al valor de $PM_{2.5}$ emitido en la ciudad debido a fuentes móviles (51.5% según el inventario de emisiones 2009).

Las recomendaciones que puede emitir el autor son las siguientes:

- Se puede decir que los modelos de dispersión de contaminantes son una herramienta que permite representar una situación real con ciertas limitaciones, debido al sinnúmero de fenómenos involucrados, por lo que se debe tener en consideración que pueden existir diferencias importantes entre lo modelado y lo monitoreado.
- Se recomiendan algunas acciones que se pueden tomar para mejorar a futuro una modelación de este tipo de termoeléctricas. Por ejemplo, disponer de la información completa de cada una de las chimeneas de las termoeléctricas, consumo real de combustible para determinar el nivel de actividad de cada una de las fuentes.
- Es de vital importancia disponer de estaciones de monitoreo de calidad del aire con datos de calidad, es decir que además de tener representatividad poblacional (que da un enfoque relacionado mayormente con los impactos en la salud), se encuentren distribuidos en todo el territorio (para el caso de Quito los tres valles) para poder realizar una comparación más representativa de los contaminantes modelados.Así en este caso por ejemplo, se debería instalar monitoreo de NO_2en los valles adyacentes a la ciudad (Tumbaco y Los Chillos) y también monitorear el SO_2 en el valle de Los Chillos.
- Según el Plan Nacional de Calidad del Aire de Ecuador (Ministerio del Ambiente, 2010), uno de los proyectos es la implantación del Programa Nacional de Reducción de Emisiones, y una de las actividades que se mencionan está la aplicación de metodologías normalizadas para el control de emisiones de fuentes fijas. Se sugiere considerar la modelación de la dispersión de contaminantes como una herramienta útil para la toma de decisiones al momento de presentar un estudio de impacto ambiental para el desarrollo de un nuevo proyecto de instalación de termoeléctricas, un ejemplo de ello se verifica en la legislación chilena, en la que se exige que los proyectos sometidos al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, cuyas emisiones a la atmósfera sean significativas, apliquen “modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos”, capaces de “representar las

variaciones espaciales y temporales” de los impactos en calidad del aire y que “determinen el punto de máximo impacto ambiental” al considerar la situación actual y ‘con proyecto’. (Esto se encuentra consignado en el Artículo N° 12, letra g), del Decreto Supremo N° 30/97 del Ministerio Secretaria General de la Presidencia, “Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental”, (Chile-MINSEGPRESS, 1997).

- Así también se podría desarrollar el mismo ejercicio que en esta tesis, incluyendo la fracción primaria del $PM_{2.5}$, y considerando alternativas de control de emisiones en los equipos (ej. Lavadores con lechada de cal para remoción de SO_2 y partículas finas, precipitadores electrostáticos para remoción de partículas finas, quemadores Low NO_x, sistemas de reducción catalítica selectiva, etc), lo cual generaría una reducción en el nivel de emisiones de cada chimenea; y a partir de esos resultados hacer un análisis de efectos en la salud de la población en el área de influencia de las emisiones de las termoeléctricas, utilizando funciones concentración respuesta.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Blandín Landívar, C. (1976). El clima y sus características en el Ecuador.Quito: Instituto Panamericano de Geografía e Historia.

Bustos, C. (2004). Aplicación de modelos de dispersión atmosférica en la evaluación de impacto ambiental. Santiago-Chile.

Calderón, J. L., &José David Pachacama. (2011). Diseño de un sistema de recuperación de calor para aprovechar la disponibilidad de los gases de combustión de los motores. Quito: Escuela Politécnica Nacional.

CEPAL. (2012). Análisis de la reducción del azufre en el combustible diesel en el Salvador, Guatemala, Honduras y Nicaragua . México: Naciones Unidas.

CONAMA.(2010) Estudio de Impacto Ambiental. Unidad 5 Central Térmica Guacolda S.A. Para resolución de Calificación Ambiental https://www.e-seia.cl/expediente/ficha/fichaPrincipal.php?id_expediente=3510778&idExpediente=3510778&modo=ficha

Consejo Nacional de Electricidad CONELEC. (2010). Estadística del sector eléctrico ecuatoriano. Año 2009. Quito: CONELEC.

Consejo Nacional de Electricidad CONELEC. (2011). Estadística del sector eléctrico ecuatoriano. Año 2010. Quito: CONELEC.

Corporación para el Mejoramiento del Aire CORPAIRE. (2006). Inventario de Emisiones del Distrito Metropolitano de Quito 2005. Quito: CORPAIRE.

K. Donaldson, W. MacNee, y Vincent Stone. (2006). “Toxicology of Nanoparticles in Environmental Air Pollution”. Nanotechnologies for the Life Sciences 3, pp 163-195.

Empresa Eléctrica Quito. (2012). Plan de Expansión 2011-2021 del Sistema Eléctrico de la EEQ.
http://www.eeq.com.ec/laEmpresa/planExpansion.pdf

Ex-CORPAIRE. Secretaría de Medio Ambiente DMQ. (2013). Inventario de Emisiones del Distrito Metropolitano de Quito 2009. Quito.

Flores, L. G. (2002). Aplicación de un modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos, para estimar el impacto sobre la calidad del aire de las emisiones de material particulado en la ciudad de Temuco. Santiago: USACH.

González Barras, R. M. (1993). Modelo lagrangiano de difusión de partículas por el método Monte Carlo. Biblioteca de la Universidad Complutense.
http://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=13995

Instituto Ecuatoriano de Nomalización. (2012). Norma NTE 1 489:2012. Productos Derivados del Petróleo Diesel. Requisitos. INEN.

Instituto Nacional de Ecología. (2003). Evaluación del impacto de las emisiones de la termoeléctrica de Tuxpan en la calidad del aire de la región, usando el sistema de modelado de dispersión CALMET-CALPUFF. México: Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana, Regional y global.

International Energy Agency. (2011). 2011 Key World Energy Statistics. IEA.

Jacob, D. J. (1999). Introduction to Atmospheric Chemistry. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.

Jorquera, H. (2008). Apuntes de Clases IIQ3342. Contaminación Atmosférica. Pontificia Universidad Católica de Chile

Levy, J. I., Spengler, J. D., Hlinka, D., Sullivan, D., yDavid Moon. (2002). “Using CALPUFF to evaluate impacts of power plant emissions in Illinois: model sensitivity and implications”. Atmospheric Environment 36, pp 1063-1075.

Ministerio del Ambiente. (2010). Plan Nacional de la Calidad del Aire.Quito.

Nieuwolt, S. (1977). Tropical climatology : an introduction to the climates of low latitudes.Chichester: Wiley.

Organización Mundial de la Salud (2006). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno, y el dióxido de azufre. Actualización mundial 2005. OMS.

Scire, J. S., Robe, F. R., Fernau, M. E., & Yamartino, R. J. (2000). A User's Guide for the CALMET Meteorological Model. Concord, MA: Earth Tech Inc.

Scire, J. S., Strimaitis, D. G., & Yamartino, R. J. (2000.a). A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model.Concord, MA: Earth Tech, Inc.

Secretaría del Medio Ambiente. Gobierno del Distrito Federal. (2006). Gestión Ambiental del Aire en el Distrito Federal. Avances y Propuestas 2000 – 2006. Secretaría del medio ambiente.
http://www.sma.df.gob.mx/sma/download/archivos/gaa/01.pdf

Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2006). Atmospheric Chemistry and Physics. From Air Pollution to Climate Change (Segunda edición ed.). Hoboken, New Jersey: A Wiley-Interscience publication.

Terán, F. (1962). Orografía e hidrografía de la hoya del Guayllabamba. Instituto Panamericano de Geografía e Historia. *Publicación 250* , 26.

Yu, S., Eder, B., Dennis, R., Chu, S.-h., y Stephen Schwartz. (2003). New unbiased symmetric metrics for evaluation of the air quality model. Community Modeling and Analysis System Center
http://www.cmascenter.org/conference/2003/session_poster/yu_abstract3.pdf

Zaror Zaror C. (2000). Introducción a la ingeniería ambiental para la industria de procesos.Chile: Universidad de Concepción.

Zuk, M., Garibay, V., Iniestra, R., López, M. T., Rojas, L., & Laguna, I. (2006). Introducción a la evaluación de los impactos de las termoeléctricas de México. México: Instituto Nacional de Ecología INE-SEMARNAT.

ANEXOS

ANEXO A

ANÁLISIS DE LA REPRESENTACIÓN METEOROLÓGICA SUPERFICIAL PARA LA CIUDAD DE QUITO. AÑO 2006

A-1:ROSAS DE LOS VIENTOS ESTACIONES SUPERFICIALES

Se grafican las rosas de los vientos promedio para el año 2006 durante: a.) día (08:00-19:00), b.) noche (20:00-23:00); y, c.) madrugada (00:00-07:00) para cada estación de monitoreo.

FIGURA A.1.ROSA DE LOS VIENTOS MODELADAS, EN LA ESTACIÓN COTOCOLLAO.

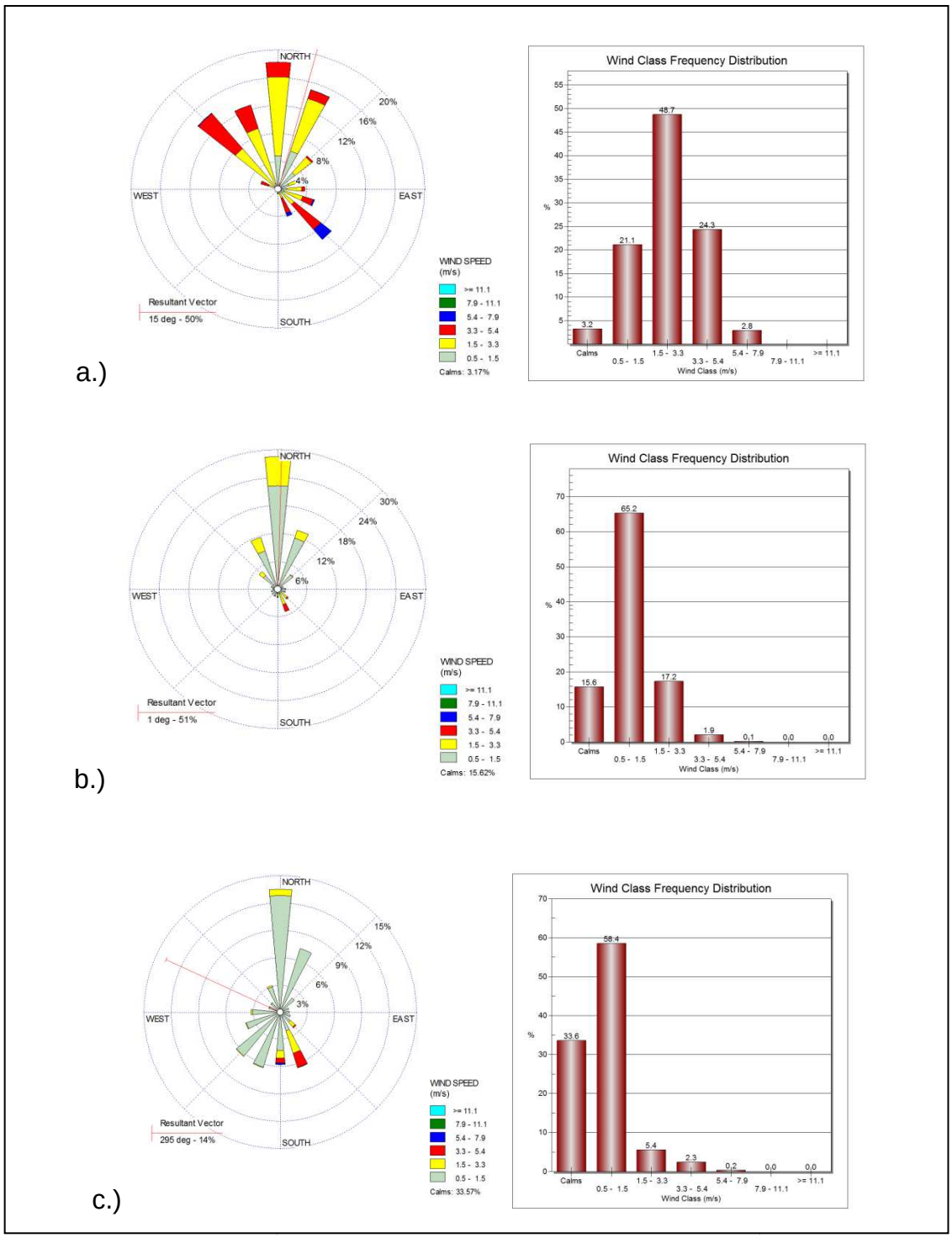


FIGURA A.2.ROSA DE LOS VIENTOS MODELADAS, EN LA ESTACIÓN CARAPUNGO.

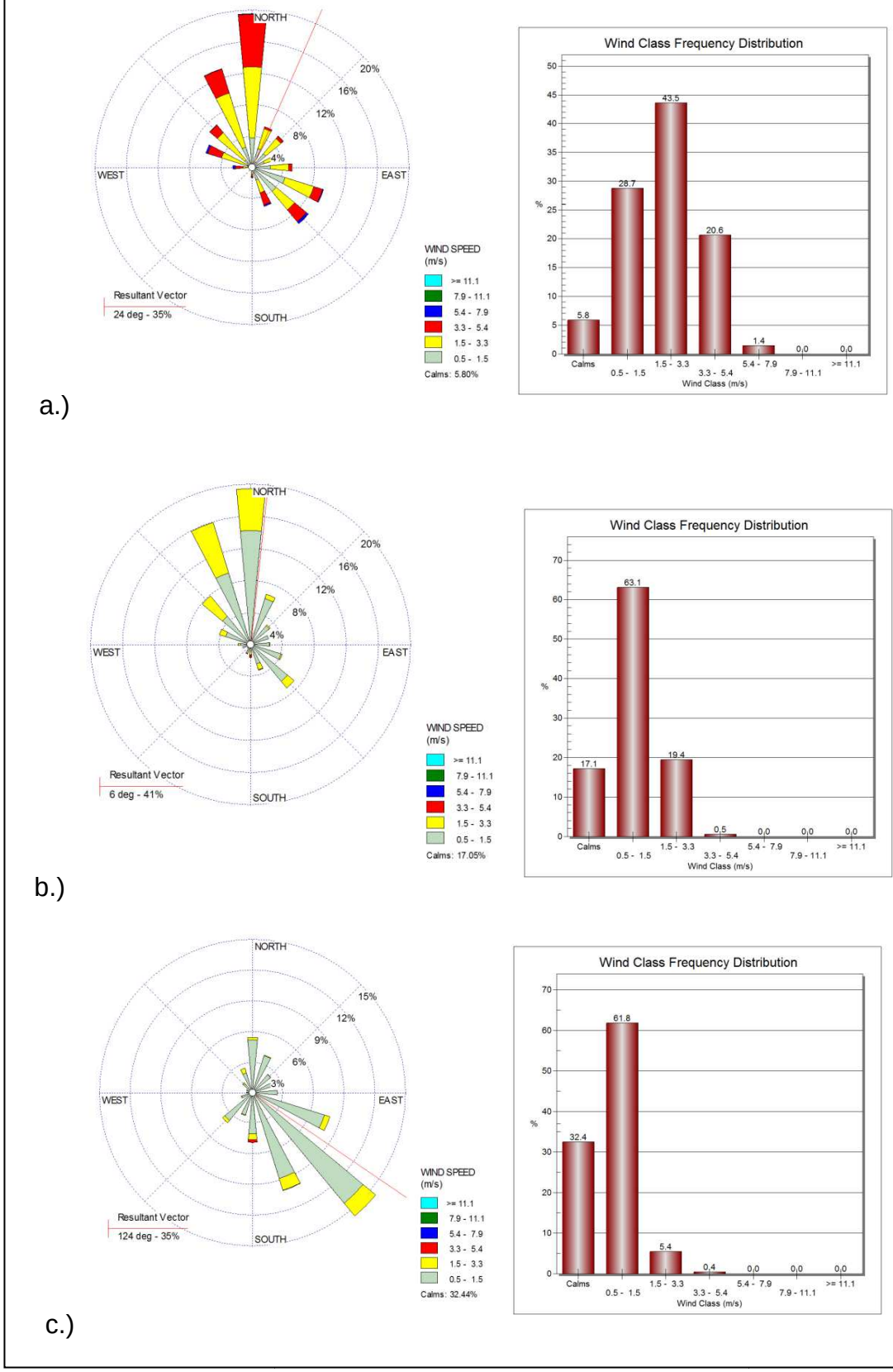


FIGURA A.3.ROSA DE LOS VIENTOS MODELADAS, EN LA ESTACIÓN BELISARIO.

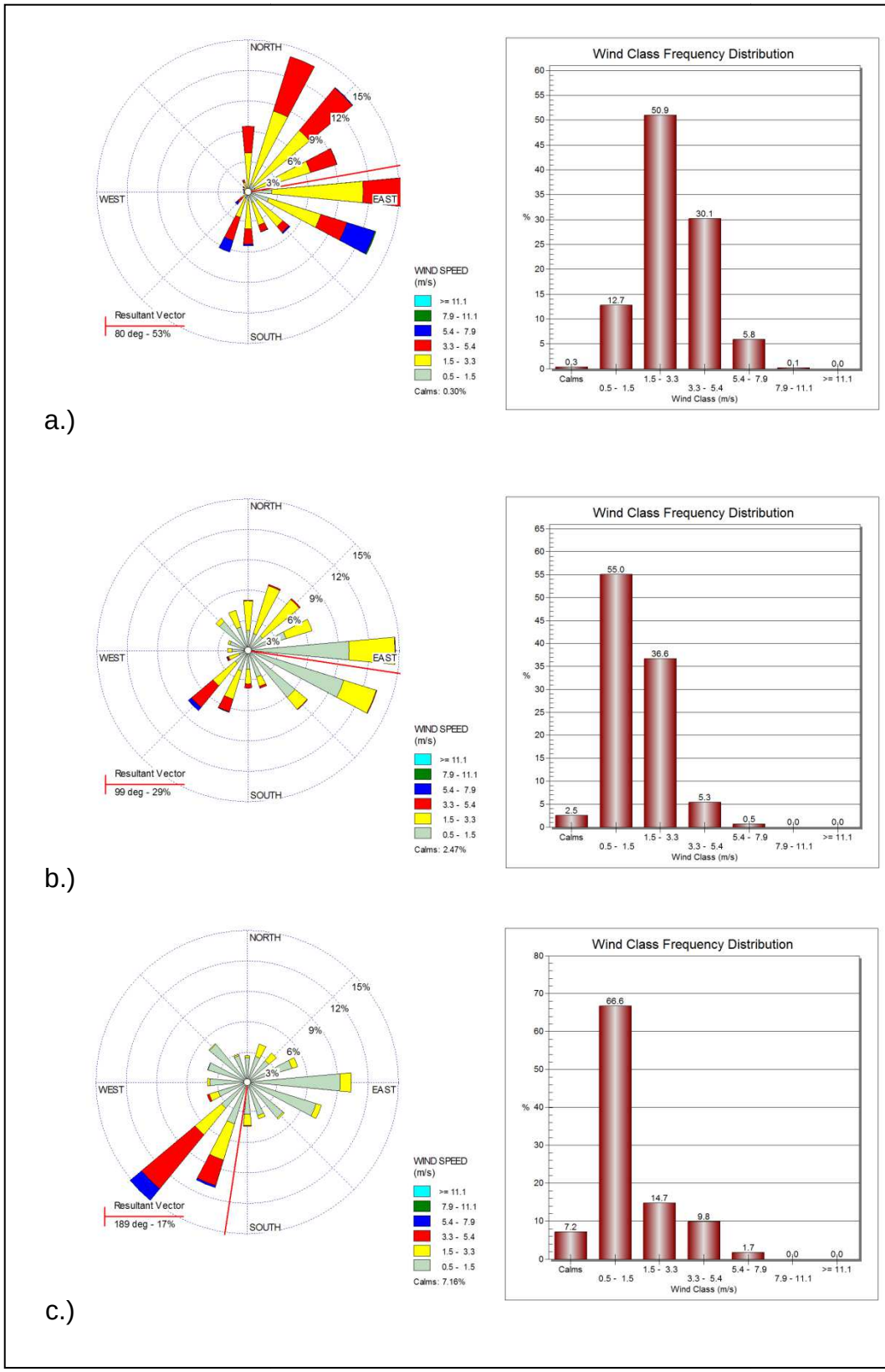


FIGURA A.4.ROSA DE LOS VIENTOS MODELADAS, EN LA ESTACIÓN EL CAMAL.

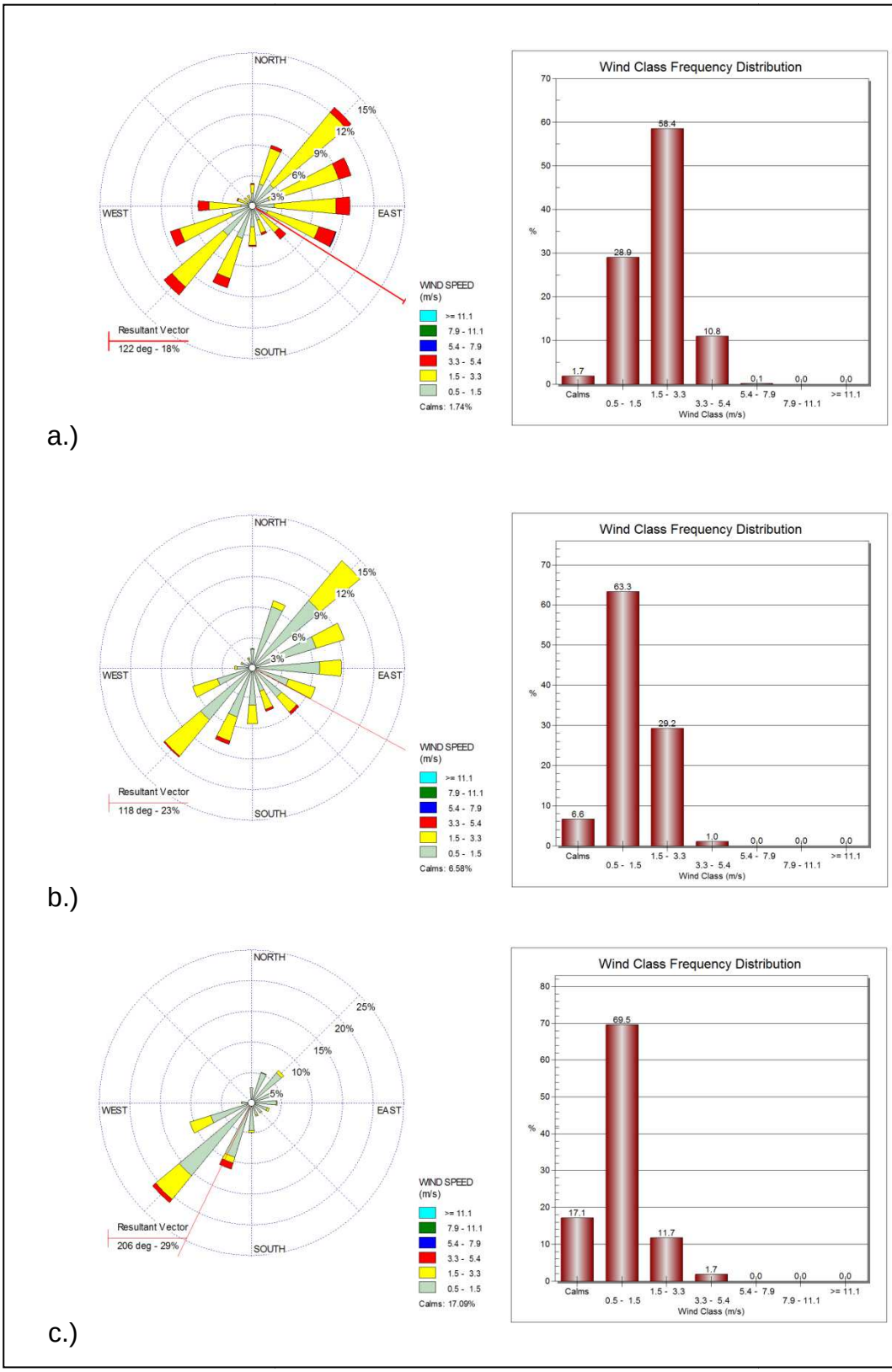


FIGURA A.5.ROSA DE LOS VIENTOS MODELADAS, EN LA ESTACIÓN TUMBACO.

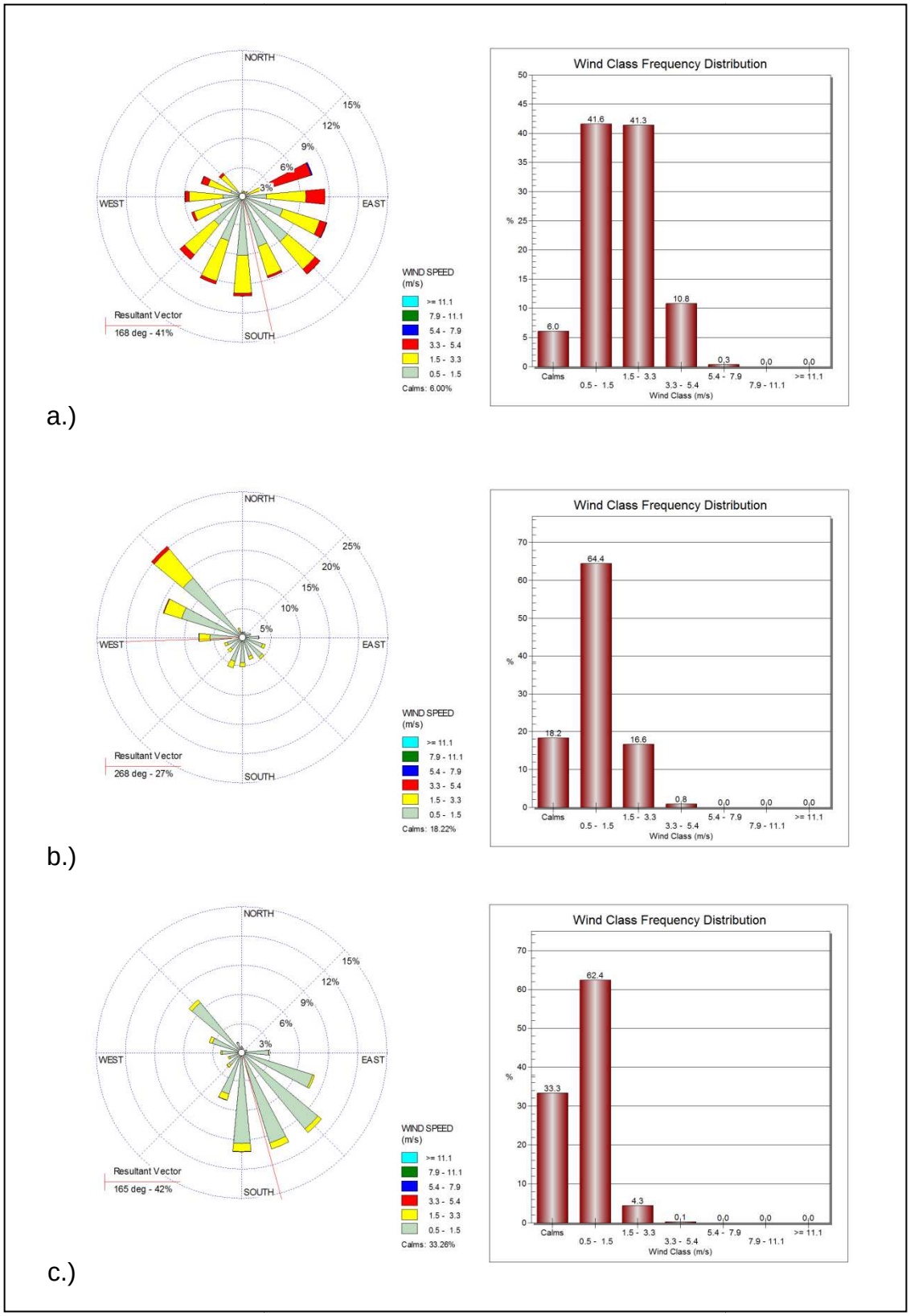
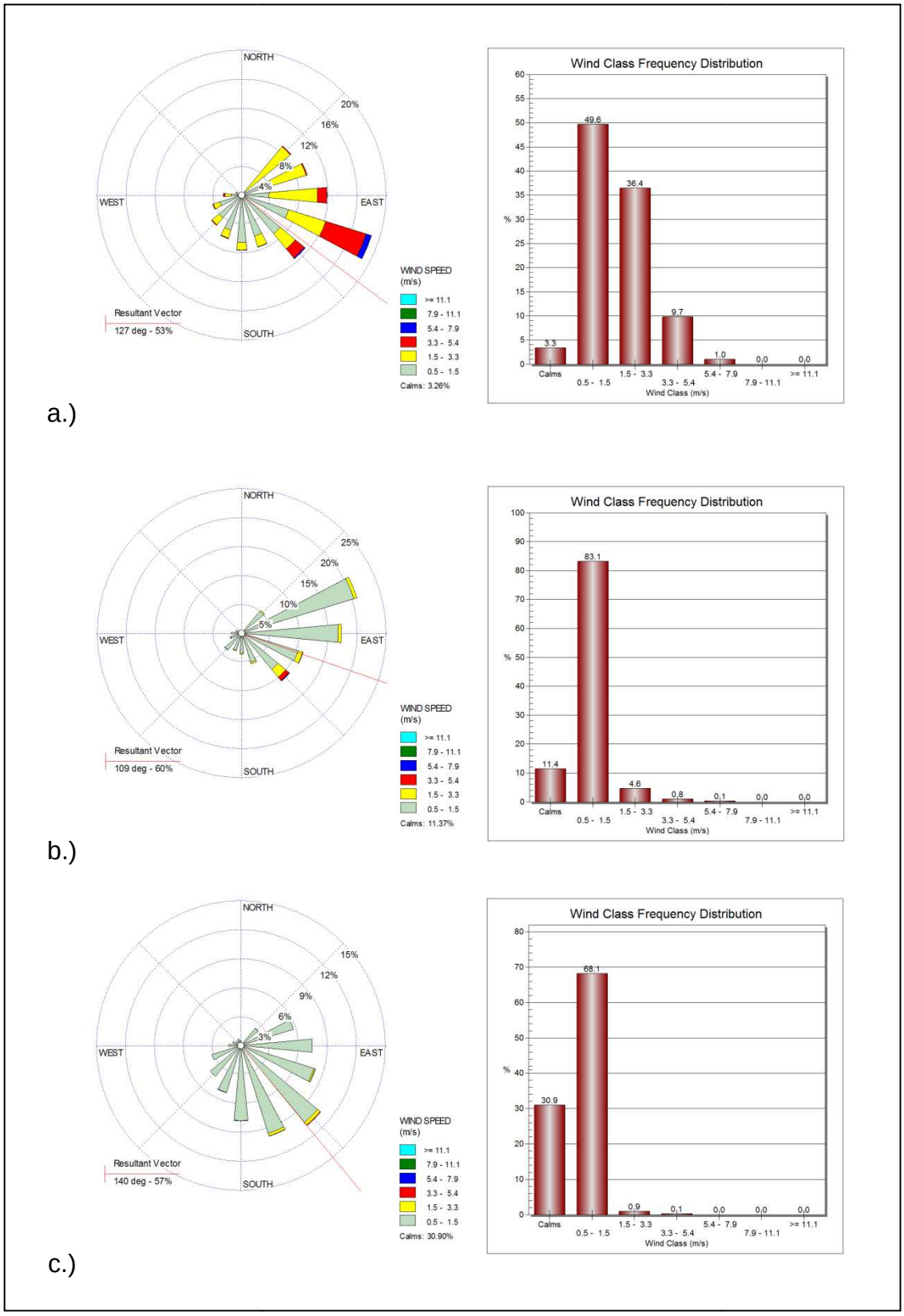
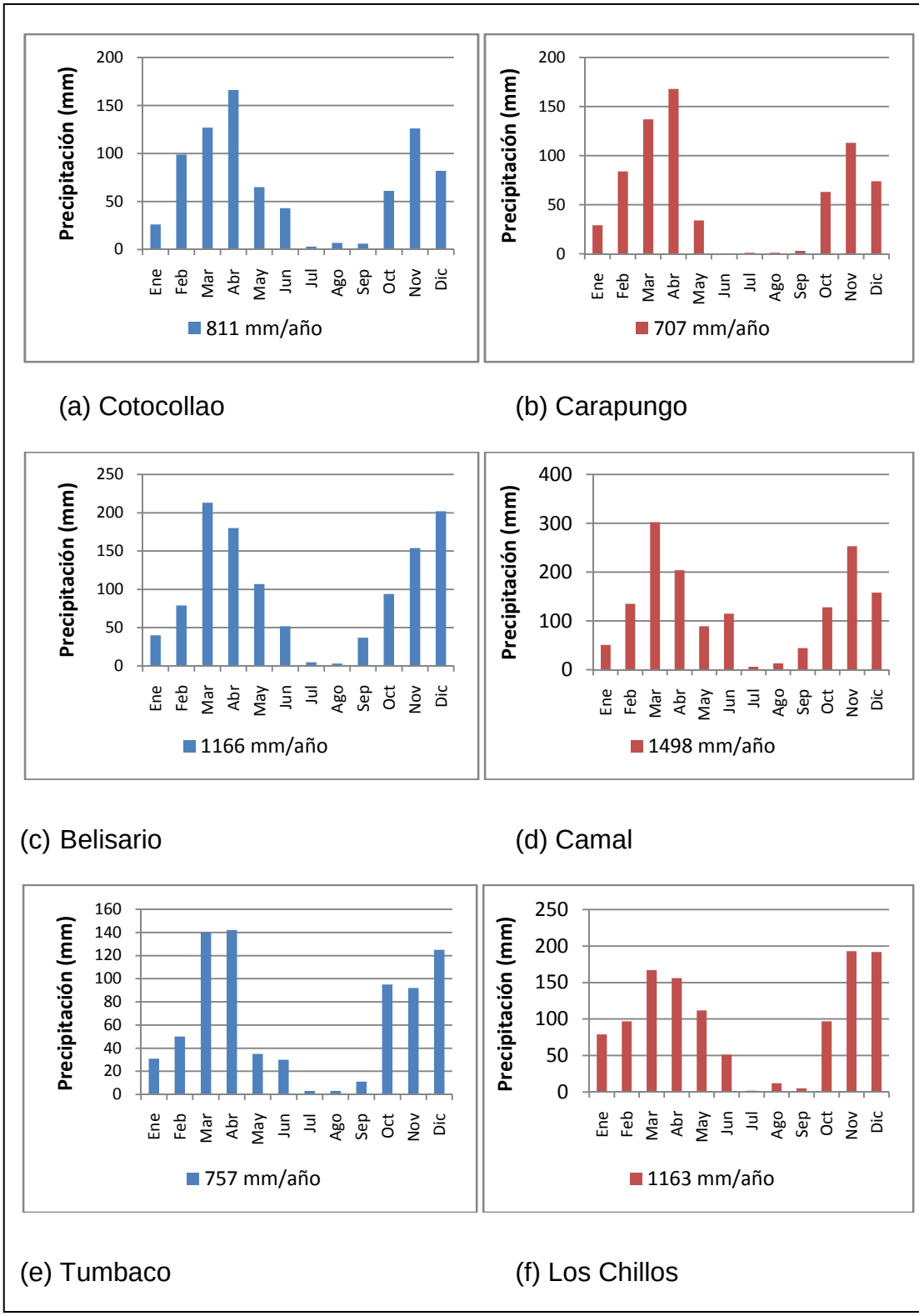


FIGURA A.6.ROSA DE LOS VIENTOS MODELADAS, EN LA ESTACIÓN LOS CHILLOS.



A-2:PERFILES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN PLUVIAL

FIGURA A.7. PERFILES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN PLUVIAL DE TODAS LAS ESTACIONES SUPERFICIALES.



(a) Cotocollao (b) Carapungo

(c) Belisario (d) Camal

(e) Tumbaco (f) Los Chillos

ANEXO B

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE UN MODELO DE DISPERSIÓN.

La evaluación estadística de un modelo se realiza por comparación de los datos entregados por el modelo (concentraciones modeladas o predichas) con los datos monitoreados (u observados) en el lugar de estudio.

Se obtienen datos de concentración en promedios horarios y se comparan con datos monitoreados en las estaciones de monitoreo que estén disponibles en el área de estudio.

Los datos de concentraciones obtenidos se pueden comparar realizando estadísticas de todas las concentraciones observadas y predichas respetando la hora en que éstas ocurren, es decir se comparan ambas series de tiempo.

Los siguientes parámetros para la evaluación de modelos de dispersión han sido recomendados por la EPA de EEUU en el documento "*Guideline on Air Quality Models*"(Yu, Eder, Dennis, Chu, & Schwartz, 2003):
Siendo "*n*" el número de datos de concentración calculados y monitoreados, *Oi* (µg/m^3) laconcentración promedio horaria observada, *Pi* (µg/m^3) la concentración promedio horaria simulada por el modelo.

i. Concentración Media Observada

$$\bar{O} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} O_i$$

ii. Concentración Media Modelada

$$\bar{P} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} P_i$$

iii. Desviación Estándar de lo Observado

$$\sigma_O = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(O_i - \bar{O}\right)^2}$$

iv. Desviación Estándar de lo Modelado

$$\sigma_P = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(P_i - \bar{P}\right)^2}$$

v. Sesgo (Concentración media del residual)

$$B = \bar{O} - \bar{P}$$

vi. Diferencia Media Normalizada

$$NMD = \frac{\bar{O} - \bar{P}}{\bar{O}}$$

vii. Error de la raíz Cuadrada Media

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(O_i - P_i\right)^2}$$

viii. Error de la raíz Cuadrada Media Sistemática

$$RMSE_S = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(O_i - \hat{P}_i\right)^2}$$

ix. Error de la raíz Cuadrada Media no Sistemática

$$RMSE_{NS} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\hat{P}_i - P_i\right)^2}$$

donde:

$$\hat{P}_i = \bar{P} - \frac{\left[\sum_{i=1}^{n}\left(O_i - \bar{O}\right)\left(P_i - \bar{P}\right)\right]}{\left[\sum_{i=1}^{n}\left(O_i - \bar{O}\right)^2\right]}\left(\bar{O} - O_i\right)$$

x. Coeficiente de Correlación

$$Corr = \frac{1}{n}\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(O_i - \bar{O}\right)\left(P_i - \bar{P}\right)}{\sigma_O \ \sigma_P}$$

xi. Índice de Evaluación

$$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(O_i - P_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left[\left|O_i - \bar{O}\right| + \left|P_i - \bar{O}\right|\right]^2}$$