UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# Sensibilidad de la contaminación fotoquímica en Bogotá a la Oscilación del Sur El Niño (ENSO)

**Gabriel de Jesús Saldarriaga Orozco**

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Química y Ambiental

Maestría en Ingeniería – Ingeniería Ambiental

Bogotá D.C., Colombia

2012

# Sensibilidad de la contaminación fotoquímica en Bogotá a la Oscilación del Sur El Niño (ENSO)

**Gabriel de Jesús Saldarriaga Orozco**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Ingeniería – Ingeniería Ambiental**

Director:

Rodrigo Jiménez Pizarro, Ph.D.

Línea de Investigación:

Química atmosférica

Grupo de Investigación:

Calidad del aire

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Química y Ambiental

Maestría en Ingeniería – Ingeniería Ambiental

Bogotá D.C., Colombia

2012

*A mi esposa Sandra y a mis hijos Gabriela y Alejandro a quienes va mi entrega.*

*A la fortaleza y tenacidad de mi mamá Cilia.*

*Y a mi hermanita Esneda por su gran corazón.*

# Agradecimientos

A mi hermana Esneda por su constante apoyo.

A Cilia -mi mamá, Esneda, Luis, Nidia, Alma, Jorge, María Isabel, Francisco, Sandra, Cilia Eva, Clara Sofía, Diana María, Luisa Fernanda, María del Pilar, Angélica María, Mauricio, Ricardo Alberto, Andrés Felipe, Francisco Gabriel, Alejandro, Gabriela, Carlos, José Oliden, Diego, Alexander, Natalia, Mónica, Silvana, Sara, Jacobo, Karla, Joaquín, Samuel, Ruby, y Fabián; mi familia.

A Omar Franco Torres por el apoyo durante su paso por Ideam.

A Rodrigo Jiménez Pizarro por su constante dedicación en la orientación de este trabajo.

A Yuli, Paty, .María C., Andrea, Liliana, Fernando “El Profe”, Fabio y Juan Gabriel.

A Franklin Ruiz, Carlos Rocha y Gloria León.

A la Secretaría Distrital de Ambiente que facilitó los datos de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá -RMCAB.

Al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Ideam, que suministró los datos de las observaciones en superficie del aeropuerto El Dorado de Bogotá.

A los profesores de la Maestría en Ingeniería – Ingeniería Ambiental.

# Resumen

En este trabajo se investigó el efecto del incremento de la radiación solar global y de la temperatura superficial asociado al fenómeno de El Niño, es decir al ciclo cálido de ENSO (El Niño-Southern Oscillation), en la concentración superficial de ozono ($O_3$) en Bogotá. Con base en un índice estandarizado de la NOAA (Oceanic Niño Index – ONI) y en la disponibilidad y calidad de las series temporales meteorológicas y de la calidad del aire, se definieron 2 períodos de análisis: febrero de 2009 (fase neutra) y febrero 2010 (fase cálida de El Niño). Los análisis de la temperatura superficial, tanto en las estaciones de la RMCAB como en la estación El Dorado del IDEAM, revelan diferencias de temperatura de ~2.5 °C entre los periodos analizados. A pesar de que las diferencias en temperatura superficial son significativas y suficientes para aumentar significativamente el nivel de ozono superficial, no se evidenciaron cambios sustanciales en las concentraciones de $O_3$ tal como fueron medidas por las estaciones de la RMCAB, ni en los patrones de circulación del aire. Por el contrario, la altura de la capa de mezcla, estimada mediante la aplicación del método de Holzworth a los radiosondeos diarios en el Aeropuerto El Dorado, es en promedio ~300 metros, es decir ~24% más alta durante la fase cálida de El Niño comparada con un período soleado no influenciado por ENSO. Con base en un modelo conceptual simplificado basado en un modelo de caja, es posible inferir que si bien la producción neta de ozono aumenta durante la fase cálida de ENSO, este efecto no se evidencia en la concentración superficial de ozono debido al incremento simultaneo de la altura de la capa de mezcla. El análisis de la información disponible sugiere por tanto que la producción incremental de ozono es compensada por una mayor dilución debida a una capa de mezcla más alta durante períodos más cálidos.

**Palabras clave:** Bogotá; El Niño Oscilación del Sur (ENOS); Meteorología urbana; Neblumo fotoquímico, Capa de mezcla; Análisis estadístico.

**Sensitivity of photochemical pollution in Bogota to El Niño Oscillation Southern (ENOS)**

# Abstract

This thesis investigates the effect of the increase of solar radiation and surface temperature associated with El Niño, i.e. the warm cycle of ENSO (El Niño Southern Oscillation), on the surface ozone concentration in Bogota. Two periods of analysis were defined based on NOAA's ONI index (Oceanic Niño Index), and the availability and quality of the meteorological and air quality time series: February 2009 (neutral phase) and February 2010 (warm phase of El Niño). The analysis of surface temperatures at urban sites of Bogota's Air Quality Network (RMCAB) and IDEAM's El Dorado station show temperature differences between these two periods of ~2.5 °C. Although these differences in surface temperature are significant and sufficient to produce substantial increase of surface ozone, no significant changes in ozone levels were observed at the RMCAB stations. Moreover, no significant changes were observed on the wind speed and wind circulation patterns. On the contrary, the mixed layer height at the El Dorado airport (estimated with the Holzworth's method applied to daily radiosoundings) was ~300 m (~24%) higher during the warm phase of El Niño compared with the sunny period not influenced by ENSO. Based on a box-model based conceptual model, one may hypothesize that the ozone production increase during the ENSO's warm phase is compensated by a deeper mixed layer, leading to similar surface ozone concentration levels during the two periods.

**Keywords:** Bogotá; El Niño Southern Oscillation (ENSO); Urban meteorology; Photochemical smog, Mixed layer; Statistical analysis.

# Contenido

**Pág.**

**Resumen** ..... **IX**

**Sensitivity of photochemical pollution in Bogota to El Niño Oscillation Southern (ENOS)** ..... **X**

**Abstract** ..... **X**

**Lista de figuras** ..... **XIII**

**Lista de tablas** ..... **XV**

**Introducción** ..... **1**

**1. MARCO TEÓRICO** ..... **5**

1.1 La atmosfera ..... 5

1.1.1 Capas de la atmosfera ..... 6

1.1.2 Capa de mezcla ..... 9

1.2 Contaminación fotoquímica ..... 12

1.2.1 El ciclo del Nitrógeno y su relación con el $O_3$ ..... 13

1.2.2 El ciclo de oxidación de COV ..... 14

1.3 Variabilidad y cambio climático, el rol de ENSO ..... 16

1.3.1 El Niño Oscilación del Sur -ENSO ..... 16

1.3.2 Escenarios de cambio climático para Bogotá ..... 20

**2. METODOLOGÍA** ..... **23**

2.1 Fase 1. Consolidación de la información atmosférica relevante a la contaminación fotoquímica ..... 23

2.1.1 Red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá –RMCAB ..... 23

2.1.2 Estación Meteorológica del aeropuerto El Dorado..... 25

2.2 Fase 2. Periodo de análisis..... 26

2.3 Fase 3. Metodología de Análisis de las series de tiempo..... 28

**3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS ..... 29**

3.1 Análisis de los procesos atmosféricos de la RMCAB ..... 29

3.1.1 Análisis exploratorio ..... 29

3.1.2 Análisis de los procesos atmosféricos en el periodo de análisis..... 30

3.2 Variación temporal de la temperatura superficial, máxima, mínima y media registradas en el Aeropuerto El Dorado..... 35

3.3 Determinación de la altura de capa de mezcla ..... 37

3.4 Análisis de la sensibilidad de $O_3$ y Ox a cambios en temperatura superficial asociados a eventos ENSO..... 39

**4. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y PERSPECTIVAS ..... 43**

**5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 47**

**A. ANEXO I. Formato de Auto contenidos ..... 53**

**B. ANEXO II. Altura de capa de mezcla, Z [m]..... 57**

**C. ANEXO III. Box Plot concentración promedia horaria de $O_3$ ..... 59**

**D. ANEXO IV. Gráficos series temporales $O_3$ [ppb] – $NO_2$ [ppb] – T [°C] –RSG [w/m$^2$] ..... 63**

**E. ANEXO V. Rosas de viento, estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá –RMCAB; Tunal, Puente Aranda y Guaymaral ..... 67**

# Lista de figuras

**Pág.**

**Figura 1-1.** Composición de la atmosfera (Fuente: R. Jiménez 2011)..... 6

**Figura 1-2.** Capas de la atmosfera (Fuente: Tomado y adaptado de Seinfeld, 2006) ..... 7

**Figura 1-3.** Comportamiento del gradiente de temperatura entre superficie y la tropopausa (Adaptado de Benavides, 2010)..... 8

**Figura 1-4.** Perfil vertical típico de temperatura (T), Temperatura potencial (θ), relación de mezcla (q) y velocidad del viento (V) [Adaptado de Stull, 2005]..... 9

**Figura 1-5.** Grafica Método de Holzworth (con base en información de radiosondeo y temperatura superficial en el Aeropuerto El Dorado, 01/01/2009). ..... 12

**Figura 1-6.** Esquema simplificado de la foto oxidación de ROC (Alcanos) [Jiménez, R. 2004]. ..... 15

**Figura 1-7.** Representación esquemática de la TSM y precipitaciones tropicales en el Océano Pacífico ecuatorial en condiciones normal, El Niño y La Niña. [IRI, 2012]. ..... 17

**Figura 1-8.** Representación gráfica de las cuatro regiones de El Niño (NOAA/NESDIS 50KM GLOBAL ANALYSIS: SST Anomaly (degrees C), 5/21/2012 (White regions indicate sea-ice). [NOAA, 2012]..... 18

**Figura 1-9.** Serie histórica del ONI 1950-2010. Las áreas en rojo representan anomalías en el sentido de El Nino y en azul hacia La Nina. [NOAA, 2012] ..... 20

**Figura 2-1.** Estacionalidad de la concentración de ozono, promedios mensuales de O3 – estación Parque Simón Bolívar –PSB y Carvajal. ..... 27

**Figura 3-1.** Box plot para las concentraciones horarias de $O_3$ año 2009 y 2010. ..... 30

**Figura 3-2.** Concentraciones horarias de $O_3$, estación Usaquén 2009 y 2010. ..... 31

**Figura 3-3.** Promedio de la temperatura media horaria, febrero de 2009 y 2010. ..... 32

**Figura 3-4.** Rosa de Vientos Parque Simón Bolívar (RMCAB). ..... 33

**Figura 3-5.** Promedio de la concentración media horaria, febrero de 2009 y 2010. ..... 34

**Figura 3-6.** Temperatura Máxima, Mínima y Media diaria - Aeropuerto El Dorado (1998-2011). ..... 35

**Figura 3-7.** Variación de la temperatura en el ciclo diario (Aeropuerto El Dorado – Febrero de 2010). ..... 36

**Figura 3-8.** Determinación altura de capa de mezcla, Método de Holzworth modificado. Aeropuerto El Dorado, 15/02/2009. ..... 37

**Figura 3-9.** Estadísticos altura de capa de mezcla. Aeropuerto El Dorado. ..... 38

**Figura 3-10.** Perfil diario de la altura de la capa de mezcla 11:00, 13:00 y 15:00 horas. Aeropuerto El Dorado. ..... 39

**Figura 3-11**. Esquema Modelo de caja. ..... 40

# Lista de tablas

**Pág.**

**Tabla 2-1.** Relación de datos y reemplazos realizados a la serie de tiempo..... 25

**Tabla 2-2.** Índice Océano El Niño 1997 a 2010. [NOAA. CPC, 2012]..... 26

# Introducción

La contaminación del aire se ha convertido en una de las principales preocupaciones de la salud pública en muchas ciudades de América Latina y el Caribe, donde las concentraciones de partículas y de otros contaminantes exceden las normas nacionales de calidad del aire. La exposición a los tipos y concentraciones de contaminantes que frecuentemente se encuentran en las zonas urbanas, se ha relacionado con un aumento de riesgo de mortalidad y morbilidad debido a una variedad de condiciones, incluidas las enfermedades respiratorias y cardiovasculares [IDEAM, 2010].

Gran parte de los problemas de la contaminación del aire son el resultado del rápido proceso de desarrollo e industrialización propio de las grandes ciudades, así como del crecimiento del sector transporte asociado con el mismo proceso productivo que lo requiere para el movimiento de materias primas, mercancías y del personal que desarrolla estas actividades. Las emisiones del sector industrial como del sector transporte están compuestas por contaminantes entre los que se encuentran los óxidos de nitrógeno (NOx); precursor de ozono ($O_3$).

El ozono superficial es un contaminante secundario, que se forma en la atmósfera a partir de complejas reacciones fotoquímicas que involucran a hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NOx) y radiación solar. Estos contaminantes primarios son emitidos tanto por la industria (fuentes fijas) como por el tráfico automotor (fuentes móviles). Los hidrocarburos emitidos por la vegetación (compuestos orgánicos volátiles biogénicos (COVB) pueden también jugar un rol importante. La contaminación fotoquímica urbana, es decir la foto-oxidación de hidrocarburos catalizada por los óxidos de nitrógeno, genera contaminantes secundarios tales como el formaldehído (HCHO) y el nitrato peroxiacetílico (PAN), cuya toxicidad es mayor a la de sus precursores [Finlayson-Pitts & Pitts, 2000].

Adicionalmente, el calentamiento en la atmósfera puede producir impacto en las reacciones químicas de los gases y aerosoles que se encuentran en este medio, debido a que la temperatura de la atmósfera afecta la rapidez con la que suelen ocurrir tales reacciones [Oviedo, 2009]. Las condiciones atmosféricas tienen una gran influencia en la contaminación del aire, a través del transporte y/o en la formación del agente contaminante (o precursor del agente contaminante). La exposición a los agentes contaminantes del aire puede tener efectos severos sobre la salud, especialmente durante episodios con concentraciones elevadas.

Existe diversa literatura que documenta los impactos adversos sobre la salud por la exposición a concentraciones elevadas de contaminantes ambientales, como el ozono, el material particulado de diámetro aerodinámico menor a 10 y 2,5 micras, al dióxido de azufre, al dióxido de nitrógeno, al monóxido de carbono y al plomo [Ebi y McGregor, 2008]. En el año 2000 le atribuyeron a la contaminación ambiental urbana 0,8 millones de muertes y 7,9 millones de años de vida ajustados por discapacidad perdidos debido a problemas respiratorios, enfermedades pulmonares y cáncer [WHO, 2002]. Dado que el estado de la atmósfera en diversas escalas determina el desarrollo, el transporte, la dispersión y la sedimentación de los contaminantes ambientales, existe la preocupación de que cambios en los patrones climáticos puedan afectar la carga de enfermedad y mortalidad asociada a contaminación atmosférica.

Las concentraciones de contaminantes atmosféricos en el aire son el resultado de las interacciones entre los patrones climáticos locales, las características de la circulación atmosférica, el viento, la topografía y las actividades humanas, principalmente. Algunas localidades, por su situación climática y topográfica, están expuestas a tener una mala calidad del aire debido a que las condiciones climáticas favorecen reacciones químicas que transformación las emisiones; adicionalmente la topografía restringe la dispersión de los contaminantes [Kossman y Sturman 2004; Rappengluck et al., 1999]. Nilsson et al., 2001a, 2001b también describen que las condiciones meteorológicas también influyen en los procesos químicos y físicos que intervienen en la formación de contaminantes secundarios como el ozono. Im, U., Markakis et al., 2011 encontraron variaciones en las tasas de $O_3$ de 1± 0.1 ppb $K^{-1}$ en ciudades del Mediterráneo, entre las se encuentra Estambul, para este propósito utilizaron modelos como Community Multiscale Air Quality Modeling -CMAQ y Weather Research and Forecasting -WRF.

Oviedo 2009 tomando como línea base la distribución de ozono troposférico registrado cerca de la superficie los días 5, 6 y 7 de marzo de 2002 en Bogotá; encontró que si la temperatura del aire superficial se incrementara en 2 ºC, las concentraciones de ozono aumentarían moderadamente con respecto a las condiciones iniciales. Por otra parte, temperaturas más altas favorecen la producción de ozono y la descomposición química del nitrato peroxiacetilico – PAN, los cuales conducen a altos niveles de ozono superficial [G. Zeng, et al 2008].

Por otra parte, dentro del sistema climático recurrentemente se desarrolla el calentamiento de la superficie del Océano Pacífico Tropical central y oriental conocido como Fenómeno El Niño, el cual produce un efecto climático que genera impactos socioeconómicos y ambientales importantes a diferentes regiones geográficas del planeta. Colombia es uno de los países en el que se percibe sensiblemente dicho efecto, y donde el impacto socioeconómico y ambiental es considerable.

La intensidad de un fenómeno El Niño depende de la magnitud de las anomalías y del área cubierta por las mismas. Esta intensidad, aunque influye, es diferente de la magnitud del efecto climático y del impacto producido por el fenómeno en las actividades humanas.

El último fenómeno “EL Niño” empezó a manifestarse desde mayo de 2009, y a mediados de junio del mismo año se dio inicio de la etapa temprana de su formación, el evento alcanzó su etapa máxima de desarrollo entre finales de diciembre de 2009 e inicios de enero del 2010 con eventos que superaron promedios históricos de temperatura entre 2 y 3 °C en la ciudad de Bogotá [IDEAM, 2011]. En razón a estas circunstancias, esta investigación tuvo como objetivos analizar y estimar el efecto del fenómeno El Niño – Oscilación de Sur en la contaminación fotoquímica en Bogotá, incluyendo períodos secos prolongados caracterizados por alta radiación solar y temperatura máxima; Compilar y sintetizar las mediciones de $O_3$ troposférico y otras variables atmosféricas relevantes a la contaminación fotoquímica hechas por la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) y el IDEAM; Evaluar críticamente la calidad de las mediciones de la RMCAB y el IDEAM asociadas a la contaminación fotoquímica y seleccionar periodos de medición apropiados para análisis comparativo;

Desarrollar una metodología de análisis estadístico que permita comparar espaciotemporalmente mediciones asociadas a la contaminación fotoquímica; Estimar el efecto del fenómeno Oscilación del Sur El Niño en la contaminación fotoquímica en Bogotá y su variación temporal y geográfica con base en las predicciones de cambio climático en Bogotá, y discutir y estimar su efecto en la contaminación fotoquímica habida cuenta de la incertidumbre en las observaciones y predicciones.

El desarrollo de este trabajo comprende cuatro secciones: en la primera sección, se desarrollan los elementos teóricos relacionados con la contaminación fotoquímica; se realiza una descripción de los principales factores que inciden en la formación y destrucción del ozono en la troposfera; los elementos conceptuales relacionados con ENSO y los aspectos relacionados con la capa de mezcla. En la segunda sección, se desarrollan los aspectos metodológicos que permitieron el análisis espaciotemporal de las mediciones asociadas a la contaminación fotoquímica y de los procesos atmosféricos implicados: mezcla, reacción y transporte; para poder estimar la sensibilidad de $O_3$ y $O_X$ a cambios asociados a eventos ENSO. En la tercera sección, se presentan y discuten los resultados obtenidos en la investigación, logrando inferir mediante un modelo conceptual simplificado (modelo de caja), que la producción incremental de ozono es aparentemente compensada por una mayor dilución debida a una capa de mezcla más alta durante la fase cálida de ENSO. Finalmente se presentan las conclusiones, las recomendaciones y algunas perspectivas resultado de esta investigación.

# 1. MARCO TEÓRICO

Las condiciones meteorológicas y su efecto sobre la concentración de los contaminantes en el aire ambiente, han sido estudiados en diferentes ciudades del mundo. En la Sabana de Bogotá, el proceso de urbanización e industrialización ha ocasionado un notable aumento de las emisiones de contaminantes al aire debido al tráfico automotor, la industria, el uso de combustibles fósiles para la preparación de alimentos, la disposición de residuos sólidos, el tratamiento de aguas residuales y la erosión del suelo, principalmente. Adicionalmente, existe una relación entre la dispersión de contaminantes en al aire y los factores meteorológicos tales como el viento, el perfil de temperatura atmosférica, la altura de la capa de mezcla, precipitación y la radiación solar, entre otros. Esto ha conducido a que la problemáticas asociadas al incremento de la contaminación atmosférica, especialmente sobre la ciudad, estén siendo abordadas por diferentes autores. Es así que en esta sección, se desarrollan los elementos teóricos relacionados con la contaminación fotoquímica; se describen los principales factores que inciden en la formación y destrucción del ozono en la troposfera; los elementos conceptuales relacionados con ENSO y los aspectos relacionados con la capa de mezcla.

## 1.1 La atmosfera

La atmósfera terrestre está compuesta principalmente por $N_2$ (78.1%), $O_2$ (20.9%) y Ar (0.9%) (Ver Figura 1-1). El vapor de agua es el siguiente constituyente más abundante; se encuentra principalmente en la atmósfera baja, su concentración es muy variable y está controlada por evaporación y la precipitación. Los demás constituyentes son una variedad de gases traza, que juegan papeles importantes en el balance radiativo de la Tierra y en las propiedades químicas de la atmósfera. La presencia de estas especies puede atribuirse a los procesos geológicos, biológicos, químicos, y antropogénicas (Seinfeld & Pandis, 2006).

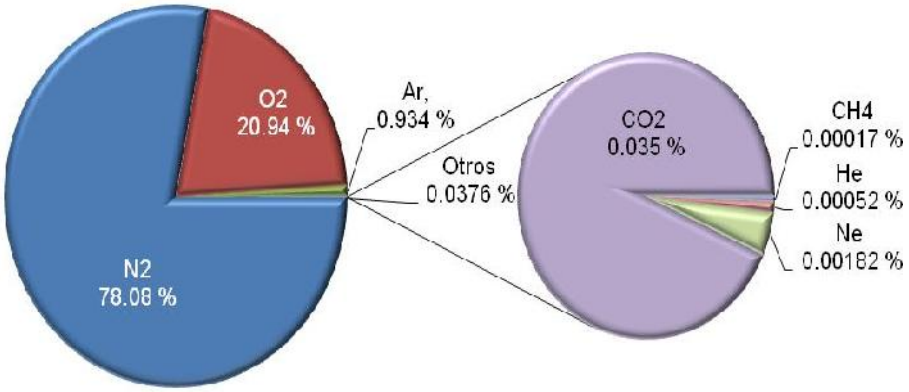



Figura 1-1. Composición de la atmosfera (Fuente: R. Jiménez 2011)

El estudio de la química atmosférica se remonta al siglo XVIII cuando químicos como Joseph Priestley, Lavoisier Antoine-Laurent, y Henry Cavendish intentaron determinar los componentes químicos de la atmósfera. Gracias a sus esfuerzos, así como los de químicos y físicos del siglo XIX, se establecieron la identidad de los principales componentes de la atmósfera; $N_2$, $O_2$, vapor de agua, $CO_2$ y los gases raros. Posteriormente, a finales del siglo XIX y principios del siglo XX, la atención se centra sobre los componentes traza de la atmósfera, es decir, aquellos cuyas fracciones molares alrededor de $10^{-6}$, una parte por millón (ppmv) en volumen. Estos gases pueden ser clasificados como primarios (emitidos directamente) o secundarios si estos se producen por transformación química en la atmosfera; entre estos últimos se encuentra el $O_3$ con tiempo de vida moderadamente largo y de residencia ~2 días – 1 año [Jiménez, 2007].

### 1.1.1 Capas de la atmosfera

La meteorología estudia la atmósfera hasta los 50 km aproximadamente, lo cual incluye la tropósfera y estratósfera La aeronomía se ocupa de la capas superiores. Estas capas están determinadas por variaciones de temperatura con la altitud y esta variación, representada por el perfil de temperatura con respecto a la altitud media es la base para diferenciar las capas que comprende la atmósfera (ver Figura 1-2).

La troposfera es la capa más baja de la atmósfera; se extiende desde la superficie de la Tierra hasta la tropopausa, entre los 10 y 18 km de altitud dependiendo de la latitud y

época del año; se caracteriza por la disminución de la temperatura con la altura y mezcla vertical relativamente rápida.

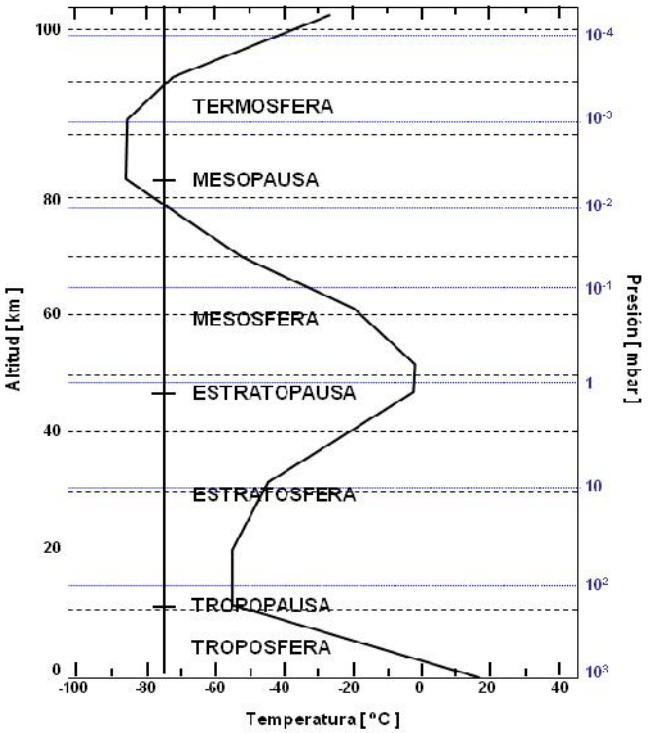



Figura 1-2. Capas de la atmosfera (Fuente: Tomado y adaptado de Seinfeld, 2006)

De otra parte, aunque la troposfera es sólo una pequeña fracción de la altura total de la atmósfera, esta contiene aproximadamente el 80% de su masa total. En esta parte de la atmosfera, la temperatura disminuye casi linealmente con la altura, con un gradiente de 9.8 K/km para aire seco [Stull, 2000].

Benavides en 2010, encontró que en Bogotá el gradiente de temperatura entre la superficie y la troposfera (a partir de la información de los ozonosondeos), está entre -6.98 y -7.10 °C/km con un promedio de -7.06°C/km (ver Figura 1-3).

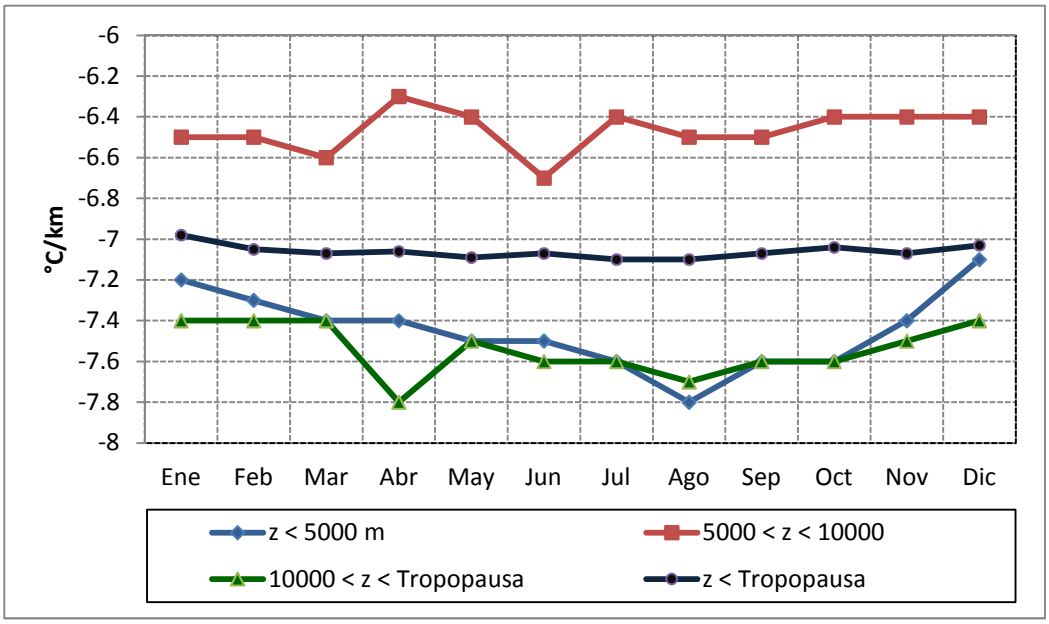



Figura 1-3. Comportamiento del gradiente de temperatura entre superficie y la tropopausa (Adaptado de Benavides, 2010)

Un perfil vertical diurno promedio de temperatura potencial (cuando la radiación neta es mayor a 20 W/m$^2$), permite identificar cuatro capas en la troposfera (Ver Figura 1-4): i) la capa de superficie -SL, donde se concentra la transferencia de energía y la generación de turbulencia mecánica; ii) la capa de mezclado o convectiva -ML, que se caracteriza por que el gradiente de temperatura es cero; iii) la capa de inversión -EZ, caracterizada por el gradiente positivo; iv) la troposfera libre -FA, donde el gradiente de temperatura no tiene variaciones asociadas al ciclo día-noche (Sozzi, 1998).

La altura donde termina la capa de inversión recibe el nombre de capa de mezcla, y es tal vez el parámetro más importante en la micrometeorología y en los modelos de dispersión de contaminantes [Ruiz, 2007]; la altura de capa de mezcla determina el volumen disponible para la dispersión de contaminantes.

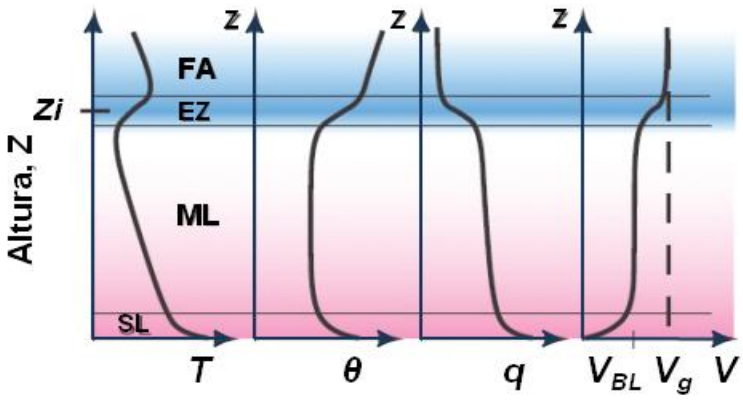



Figura 1-4. Perfil vertical típico de temperatura (T), Temperatura potencial (θ), relación de mezcla (q) y velocidad del viento (V) [Adaptado de Stull, 2005].

### 1.1.2 Capa de mezcla

La capa de mezcla puede definirse como el espesor de la atmósfera en la que se mezclan los contaminantes; su espesor o altura de capa de mezcla – Z, en general depende de las condiciones atmosféricas y en particular de la estabilidad termodinámica, de la radiación solar, de la velocidad del viento y del tipo de terreno.

Los procesos físicos que ocurren en la capa superficial de la atmosfera, toman importancia, debido a que en ella se producen variaciones de densidad, temperatura y momento en la interfaz superficie – atmosfera, generando así turbulencia convectiva que a su vez está acompañada de una turbulencia de tipo mecánico producto de la perdida de energía del viento a causa de la rugosidad de la superficie. Esta dinámica de la atmosfera en el nivel superficial influye en el transporte y dispersión de contaminantes [Sozzi, 1998]. La concentración de contaminantes en la atmosfera, no solo depende de la cantidad emitida, sino también de la velocidad con la que ellos se dispersan.

Como lo describe Ruiz en 2007, el carácter de estabilidad atmosférica está relacionado con la variación de temperatura a lo largo de la vertical. En la troposfera, el gradiente vertical de temperatura disminuye al aumentar la altura; sin embargo, en realidad esto no se presenta así, y fácilmente se observa en una curva de estado a partir de los datos trasmitidos durante un radiosondeo. En la curva de estado se pueden apreciar disminuciones continuas de temperatura en función de la altura (disminución irregular) con pendientes que varían de una región a otra en la grafica, encontrándose zonas

donde el gradiente de temperatura es mayor o menor y zonas donde la temperatura no varía con la altura (isotermas). De igual forma, también pueden apreciarse zonas de inversión donde la temperatura aumenta con la altura.

La altura de la capa de mezcla puede determinarse a partir de perfiles verticales de variables meteorológicas, en particular de la temperatura y velocidad del viento; además de las variables observadas en superficie.

***Altura de capa de mezcla***. La altura de la capa de mezcla es un parámetro fundamental que caracteriza la estructura de la troposfera baja, donde las sustancias emitidas en ella se dispersan y mezclan de manera gradual, horizontal y verticalmente, por la acción de la turbulencia permaneciendo el tiempo suficiente si no hay ningún sumidero significativo. Como bajo condiciones estables de la atmósfera no se alcanza el mezclado completo, el concepto de capa de mezcla resulta ser preferible, pues acentúa el proceso más que el resultado. Sin embargo, la capa de mezcla concuerda con la capa limite atmosférica - CLA si esta última se define como el dominio turbulento de la atmósfera adyacente a la tierra [Turtós et al, 2010].

En razón a lo anterior, la altura de la capa de mezcla se convierte en un parámetro importante para los modelos de contaminación atmosférica, por cuanto establece el volumen disponible en que ocurre la dispersión de contaminantes; a partir de aquí, se puede predecir y evaluar concentraciones de contaminantes en el aire ambiente.

La altura de la capa de mezcla se obtiene a través de diferentes métodos; sin embargo, para fines de este trabajo sólo se describe el método de Holzworth.

***Método de Holzworth***. Uno de los métodos más usados es el de Holzworth, el cual se usa típicamente para determinar la altura de la capa de mezcla, dos veces al día (en la mañana y en la tarde) a partir de un radiosondeo matutino.

La altura de mezcla de la mañana es calculada como la altura desde la superficie hasta donde se interceptan la curva que sigue la adiabática seca (a partir de la temperatura mínima observada en superficie más 5 °C), y el perfil de temperatura real observado por

el sondeo de las 12:00 UTC (Z) (Figura 1-5). El incremento de la temperatura mínima es debido al efecto de “isla de calor” durante la noche y las primeras horas de la mañana en las ciudades para poder estimar la altura de la capa de mezcla urbana.

La altura de mezcla de la tarde, es determinada de la misma manera, pero teniendo en cuenta la temperatura superficial máxima observada en superficie entre las 12:00 y las 16:00 horas.

En un diagrama termodinámico, la adiabática seca representa la trayectoria que sigue una parcela de aire no saturada cuando asciende con un enfriamiento promedio –dT/dz = 9.8 °K/km. De tal manera, que las alturas de la capa de mezcla se pueden determinar mediante la siguiente expresión:

$$T_2 = T_1 - \Gamma(Z_2 - Z_1)$$

Donde;

Γ = 9.8 °K/km, es el gradiente adiabático seco y
T2 y T1 son las temperaturas para las alturas Z2 y Z1 respectivamente.

En la Figura 1-5, la adiabática de la mañana (Adiabática Tmín) asciende desde la superficie a partir de la temperatura superficial mínima, más un incremento de 5 ºC teniendo en cuenta los efectos de isla de calor de las zonas urbanas durante la noche y en horas tempranas de la mañana.

Por su parte, la adiabática de la tarde que asciende desde la superficie, parte de la temperatura máxima (adiabática Tmáx) sin realizar ningún ajuste en la temperatura debido a que la diferencia entre las temperaturas máximas de superficie urbana y rural son insignificantes.

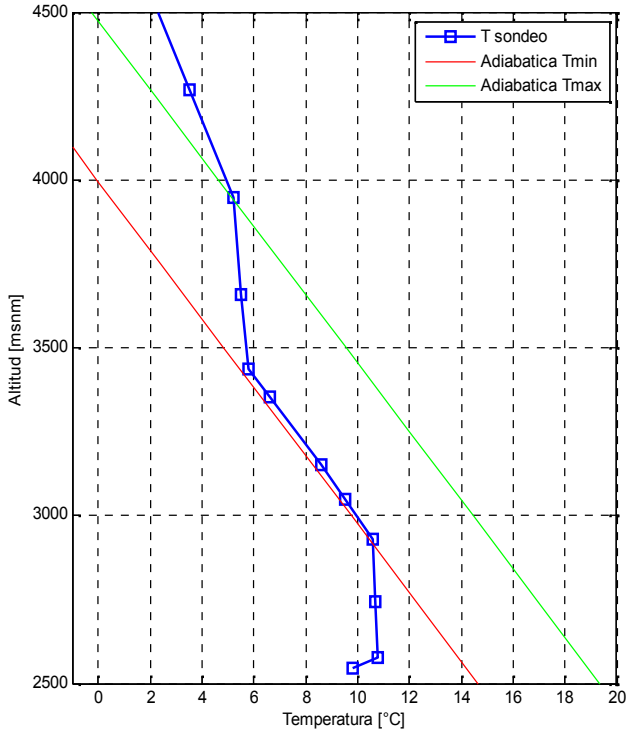



Figura 1-5. Grafica Método de Holzworth (con base en información de radiosondeo y temperatura superficial en el Aeropuerto El Dorado, 01/01/2009).

El momento en que se calcula la altura de capa de mezcla urbana en la mañana, por lo general esta coincide con las concentraciones típicas máximas diurnas de contaminantes poco reactivos en muchas ciudades; mientras que la altura de la mezcla de la tarde coincide con bastante exactitud con las concentraciones típicas mínimas de contaminantes poco reactivos en muchas ciudades [Turtós. et al, 2010].

## 1.2 Contaminación fotoquímica

El ozono ($O_3$), es la forma alotrópica del oxígeno constituida por tres átomos de oxigeno, que a diferencia del oxígeno diatómico ($O_2$), es un importante contaminante secundario que se forma a partir reacciones que involucran compuestos orgánicos volátiles (VOC) y óxidos de nitrógeno (NOx) en presencia de luz solar. El $O_3$ por tratarse de un contaminante fotoquímico, se forma durante las horas de luz en condiciones apropiadas; pero se destruye en el día como en la noche. En tal razón, las concentraciones de $O_3$ pueden variar dependiendo de la hora del día y de la ubicación. La exposición al ozono

se ha asociado con varios efectos adversos para la salud, como el agravamiento del asma y disminución de la función pulmonar [Drechsler, 2004].

La formación de $O_3$ en la troposfera es un proceso complejo que implica las reacciones de sus precursores e impulsada por compuestos orgánicos de corta duración que son emitidos por fuentes antropogénicas y biogénicas; sin embargo, la formación de ozono depende críticamente del nivel de NOx. La mayor parte de la emisión directa de NOx a la atmósfera está en la forma de NO. De otra parte, el $NO_2$ se forma en la atmósfera por la conversión de NO. Al igual que en la estratosfera, el NO y el $NO^2$ generalmente son agrupados como NOx debido a la rápida interconversión entre el NO y $NO_2$ (~ 5 min); mientras que el tiempo necesario para la oxidación orgánica puede tardar de una a varias horas [Seinfeld & Pandis, 2006].

### 1.2.1 El ciclo del Nitrógeno y su relación con el $O_3$

La fotolisis del $NO_2$ (NO y $NO_2$ en presencia de luz solar) en longitudes de onda hv < 420 nm da como resultado la formación del ozono.

$$NO_2 + hv \rightarrow NO + O(^3P) \qquad \text{(reacción 2-1)}$$

A continuación, ocurre una reacción muy rápida del $O(^3P)$[1] con oxigeno molecular.

$$O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M \qquad \text{(reacción 2-2)}$$

El ozono producido, reacciona rápidamente con el óxido nítrico regenerando el $NO_2$ antes fotolizado.

$$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2 \qquad \text{(reacción 2-3)}$$

En ausencia de compuestos orgánicos activos (ROC), la combinación de la reacción 1-1 y la 1-2 predice el establecimiento de equilibrio pseudo-estacionario de la mezcla. Una

[1] O (1D) y O (1S) se producen sólo en longitudes de onda más corta que 244 y 170 nm, respectivamente; así que la producción por fotolisis de NO2 en la troposfera es insignificante.

vez se alcanza la condición de estado foto estacionario, la tasa neta de producción de ozono llega a cero [Jiménez, 2004].

Reacciones 1-2 y 1-3 son comparativamente rápidas; mientras que la reacción de fotólisis 1-1 es más lenta y es generalmente la limitante de la velocidad de reacción durante el ciclo del nitrógeno y es la razón por la que el ozono no se forma apreciable en la noche. También es una de las causas por las que se encuentran concentraciones altas de ozono durante periodos secos, cuando las temperaturas son altas y la radiación solar es intensa. El tiempo de ciclo para las tres reacciones descritas anteriormente es de tan sólo unos pocos minutos. El ozono se acumula durante varias horas, dependiendo de las tasas de emisión y las condiciones meteorológicas preponderantes. Por lo tanto, el ciclo de nitrógeno es lo suficientemente rápido como para mantener una estrecha aproximación a la ecuación de estado foto estacionario que se deriva de las reacciones anteriores.

### 1.2.2 El ciclo de oxidación de COV

Los hidrocarburos y otros COV se oxidan en la atmósfera por una serie de reacciones para formar monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono ($CO_2$) y agua ($H_2O$). Este proceso de oxidación puede incluir varias fases cíclicas impulsadas por el ataque del radical hidroxilo (OH) sobre otro hidrocarburo, sobre compuestos intermedios parcialmente oxidados, y otros COV. El OH presente en el aire ambiente, se forma por fotólisis de ozono en presencia de vapor de agua, y también a partir de ácido nitroso, peróxido de hidrógeno y otras fuentes. En la secuencia de reacciones, R puede ser hidrógeno o cualquier fragmento orgánico [Drechsler, 2004]. Este proceso de oxidación por lo general comienza con el ataque del OH sobre un hidrocarburo o COV y sigue la siguiente secuencia.

$RH + OH \rightarrow H_2O + R$ (reacción 2-4)

$R + O_2 + M \rightarrow RO_2 + M$ (reacción 2-5)

$RO_2 + NO \rightarrow NO_2 + RO$ (reacción 2-6)

$OH + HCHO \rightarrow H_2O + HCO$ (reacción 2-7)

$HCO + O_2 \rightarrow HO_2 + CO$ (reacción 2-8)

$HO_2 + NO \rightarrow NO_2 + OH$ (reacción 2-9)

$OH + CO \rightarrow H + CO_2$ (reacción 2-10)

$H + O_2 + M \rightarrow HO_2 + M$ (reacción 2-11)

$HCHO + hv \rightarrow H + HCO$ (reacción 2-12)

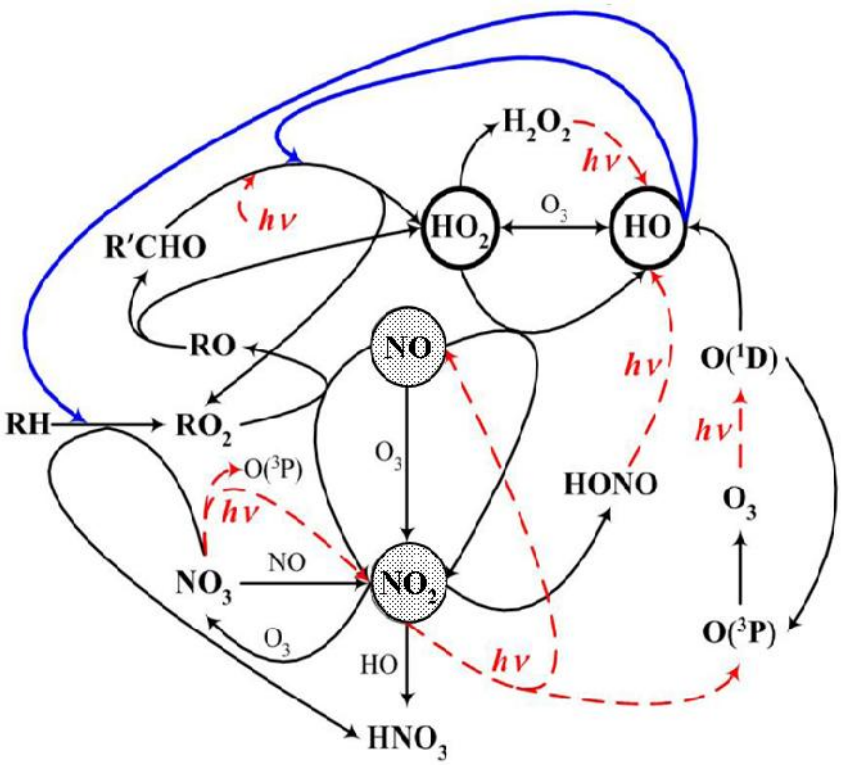



Figura 1-6. Esquema simplificado de la foto oxidación de ROC (Alcanos) [Jiménez, R. 2004].

Jiménez (2004) se refiere a la foto-oxidación atmosférica de la ROC como un proceso complejo de ciclos (Figura 1-6); de este describe la foto-oxidación de alcanos y alquenos (RH), que da comienzo con el ataque de oxidantes disponibles (OH, NO, Cl) que llevan a la formación de radicales alquilo (R), que reaccionan fácilmente con $O_2$ para producir radicales alquilperoxi (RO). La oxidación del óxido nítrico (NO) produce radicales alcoxi (RO) que reaccionan con el $O_2$ para producir compuestos carbonílicos (R'CHO) y radicales (HO2 hidroperoxilo). Compuestos carbonílicos (R'CHO) puede someterse a

fotólisis o reaccionar con OH, NO o Cl. En cualquier caso $HO_2$ se produce. En atmósferas contaminadas, $HO_2$ se convierte fácilmente en OH (reacción 1-9).

## 1.3 Variabilidad y cambio climático, el rol de ENSO

### 1.3.1 El Niño Oscilación del Sur -ENSO

El Niño es un calentamiento en las aguas superficiales de la porción oriental y central del océano Pacifico ecuatorial que ocurre en promedio entre 2 a 7 años, con duración de unos 9 a 18 meses, El efecto climático depende de la época del año en que se presente el fenómeno, ocurriendo generalmente el mayor impacto entre diciembre y abril, debido a que en el Pacifico ecuatorial las temperaturas superficiales son más cálidas en esta época del año. La intensidad del fenómeno depende en gran medida de la magnitud de las anomalías océano-atmosfera y del área cubierta por estas sobre el Pacifico Tropical.

El Niño y su fase opuesta La Niña, son las componentes oceánicas del ENSO (El Niño-Southern Oscillation) y en términos generales, corresponden a la aparición de aguas superficiales relativamente más cálidas (El Niño) o más frías (La Niña) que lo normal en el Pacífico tropical central y oriental, frente a las costas del norte de Perú, Ecuador y sur de Colombia. Estas alteraciones de la estructura térmica superficial y sub-superficial del océano están asociadas con el debilitamiento de los vientos alisios del Este y con el desplazamiento del núcleo de convección profunda del Oeste al Centro del Océano Pacífico tropical, en condiciones El Niño o con su permanencia e intensificación en el caso de La Niña [Montealegre, 2007]. En consecuencia, un ligero calentamiento de las aguas debido a El Niño puede resultar en una importante predistribución de las precipitaciones conectivas tropicales.

El Niño y La Niña se caracteriza por temperaturas mayores o menores que el promedio de la TSM en el Pacífico tropical; sin embargo, también están asociados con cambios en el viento, la presión, y los patrones de las precipitaciones. En los trópicos, donde se forma El Niño y La Niña, las precipitaciones tienden a ocurrir en las áreas donde la TSM es más cálida. En la Figura 1-7 se muestra en esquema la relación entre las TSM y las precipitaciones tropicales.

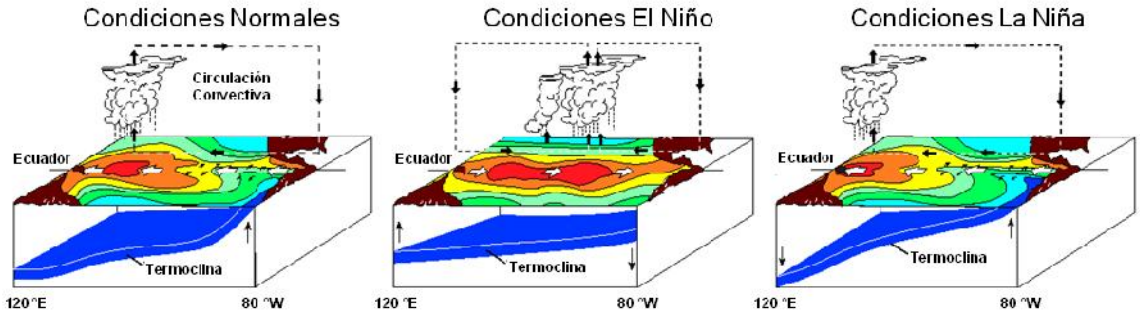



Figura 1-7. Representación esquemática de la TSM y precipitaciones tropicales en el Océano Pacífico ecuatorial en condiciones normal, El Niño y La Niña. [IRI, 2012].

En condiciones normales, el agua más caliente se encuentra en el Pacífico occidental, al igual que la mayor precipitación. Los vientos cerca de la superficie del océano viajan de Este a Oeste a través del Pacífico (estos vientos se llaman vientos del Este); en condiciones de El Niño, los vientos del este se debilitan, la TSM está más caliente que el promedio para el pacifico tropical central y oriental, y la región de mayor precipitación se desplaza hacia el Este; mientras que en condiciones de La Niña, los vientos del este se fortalecen, el agua más fría del océano se extiende al Oeste hasta el pacifico central y las temperaturas más calientes que el promedio de la TSM se ven acompañadas por precipitaciones mayores que las habituales en el Pacífico occidental [IRI, 2012].

**Regiones El Niño**

Para la vigilancia de la variabilidad de la temperatura superficial del mar -TSM en la franja tropical del Pacifico, se establecieron 4 zonas l a lo largo de la línea ecuatorial, entre la costa oeste de América del Sur y el meridiano de 180º o línea del cambio de la fecha (Figura 1-8).

- Región Niño 4: Entre las latitudes 5° N y 5° S y las Longitudes 160° E y 150° W.
- Región Niño 3: Entre las latitudes 5º N y 5º S y las Longitudes 90º y 150º W.
- Región Niño 3-4: Entre las Latitudes 5º N y 5º S y las Longitudes 120º y 170º W.
- Región Niño 1+2: Entre las Latitudes 0° y 10° S y las Longitudes 90° y 80° W.

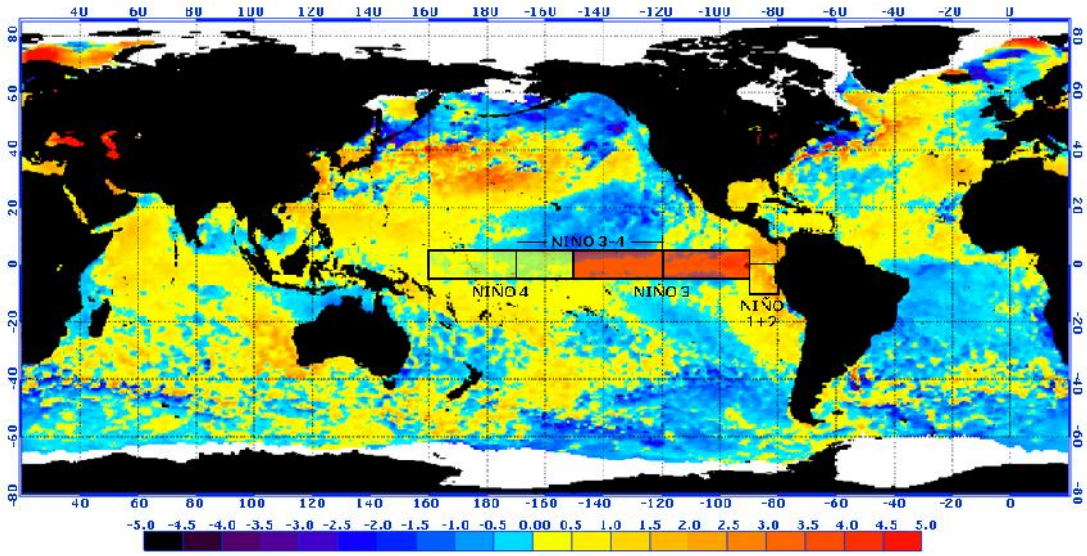



Figura 1-8. Representación gráfica de las cuatro regiones de El Niño (NOAA/NESDIS 50KM GLOBAL ANALYSIS: SST Anomaly (degrees C), 5/21/2012 (White regions indicate sea-ice). [NOAA, 2012].

En cada una de estas regiones están ubicados instrumentos de observación, donde se mide la TSM en grados Celsius y se determinan sus anomalías -ATSM, evaluadas como la diferencia entre un valor mensual y su promedio climatológico o valor normal. En la región Niño 1+2, la temperatura registrada, es el promedio de la temperatura medida en las regiones Niño 1 y Niño 2.

Las anomalías estimadas corresponden a los índices utilizados para el seguimiento de su variabilidad y sus valores mensuales aparecen en el boletín de diagnóstico climático, editado por la National Oceanic and Atmospheric Administration -NOAA, de los Estados Unidos de Norteamérica. Los índices más utilizados en la vigilancia de los fenómenos El Niño y La Niña corresponden a las regiones Niño 3 y Niño 3-4, en consideración a que en el sector central del Pacifico tropical se observan los mayores contrastes de la termodinámica oceánica.

No obstante, en la actualidad no hay consenso dentro de la comunidad científica mundial respecto al uso de alguno de ellos en forma prioritaria, a tal punto, que los modelos

numéricos de pronóstico de los centros mundiales especializados predicen el comportamiento de la TSM, en términos de anomalías, para ambas regiones [Montealegre, 2007].

**Índices macro climáticos ENOS**

Para poder definir y establecer la intensidad y duración del ENSO, se han establecido Índices macro climáticos basados en la anomalía de la temperatura de la superficie del océano Pacífico ecuatorial. Tres de estos índices se describen a continuación:

- ***Índice Oceánico del Niño - ONI***: Es un índice estandarizado de la NOAA, definido como la media móvil de tres meses de las anomalías en la temperatura superficial del mar en la región Niño 3-4. De acuerdo con este índice, en condiciones El Niño (La Niña), el ONI debe ser igual ó superior (igual o inferior) a medio grado Celsius de anomalía (ver Figura 1-9).

- ***Índice de Oscilación del Sur - SOI***: Es calculado como las diferencias normalizadas entre la presión atmosférica medida en Tahití (Polinesia Francesa, representa el sector central del Pacífico tropical) y Darwin (norte de Australia, representa el sector occidental) y es un indicador de las fluctuaciones de la masa atmosférica entre los sectores centro-oriental y occidental del pacífico.

- ***Índice Multivariado del ENSO - MEI***: Este índice puede ser entendido como la media ponderada de seis variables sobre el Pacifico tropical: presión atmosférica a nivel del mar, componente zonal (este-oeste) y meridional (norte-sur) del viento en superficie, temperatura de la superficie del mar, temperatura del aire en superficie, y cantidad total de nubosidad. Los valores positivos del MEI representan la fase caliente de ENSO, es decir, EL Niño.

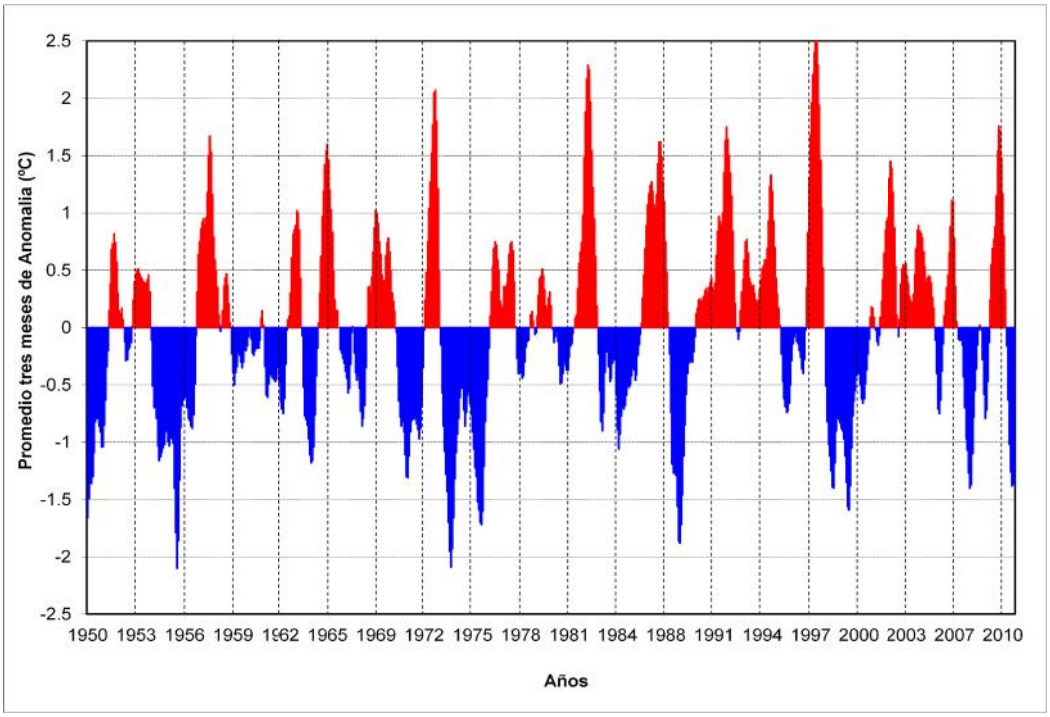



Figura 1-9. Serie histórica del ONI 1950-2010. Las áreas en rojo representan anomalías en el sentido de El Nino y en azul hacia La Nina. [NOAA, 2012]

### 1.3.2 Escenarios de cambio climático para Bogotá

En el cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático se llegó a la conclusión de la existencia de un riesgo por el aumento en las temperaturas extremas con más episodios de calor extremo en un clima futuro; así mismo, se proyectan aumentos futuros en las temperaturas extremas que seguirán a los aumentos en la temperatura media en la mayoría de regiones del mundo, excepto donde cambian las propiedades de la superficie (por ejemplo, capa de nieve o humedad de la tierra). A finales del siglo XXI, la probabilidad proyectada de estaciones calurosas extremas sobrepasa el 90% en muchas zonas tropicales y alcanza cerca del 40% en otras zonas [IPCC, 2007].

Para generar escenarios del clima futuro, el Panel Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático –IPCC (por sus siglas en ingles) considera modelos integrados que contemplen tanto la generación futura de gases de efecto invernadero producto del

desarrollo socioeconómico global, como la respuesta del clima del planeta al forzamiento radiativo resultante [IDEAM, 2010].

En Particular para Colombia, se predice que los aumentos más significativos de la temperatura media se presenten en gran parte de la región Caribe y Andina con valores que oscilan entre 3 ºC y 4 °C, con valores superiores en zonas del Tolima y Norte de Santander; influenciado por la manifestación de que los días, según los modelos, serán más cálidos, ya que la media de las temperaturas máximas en gran parte de las regiones mencionadas aumentaría sus valores entre 4 y 5°C para finales del siglo XXI con respecto a la normal climatológica 1971-2000. Por su parte, en el ámbito regional, las zonas más sensibles al incremento de la temperatura corresponden al alto Magdalena, medio Magdalena y Catatumbo, en donde los incrementos de la temperatura pueden superar los 4 °C. Adicionalmente, en regiones que actualmente presentan limitantes de humedad, con índices de aridez bajos y limitantes para el abastecimiento del agua para la sociedad, presentan un alto cubrimiento con el incremento de la temperatura entre 2 ºC y 4 °C; regiones que corresponden al río Sogamoso, sabana de Bogotá, noroeste de la Sierra Nevada de Santa Marta, cuenca del Cesar y cuenca del río Patía. Esta situación puede ser especialmente crítica para la sabana de Bogotá, pues al parecer el modelo puede estar subvalorando el incremento de temperatura en esta región, en donde se podrían esperar mayores incrementos si se basan en las tendencias actuales, las cuales muestran que las zonas altas localizadas en vertientes de baja humedad (sotavento) presentarán mayores incrementos de la temperatura [IDEAM, 2010].

# 2. METODOLOGÍA

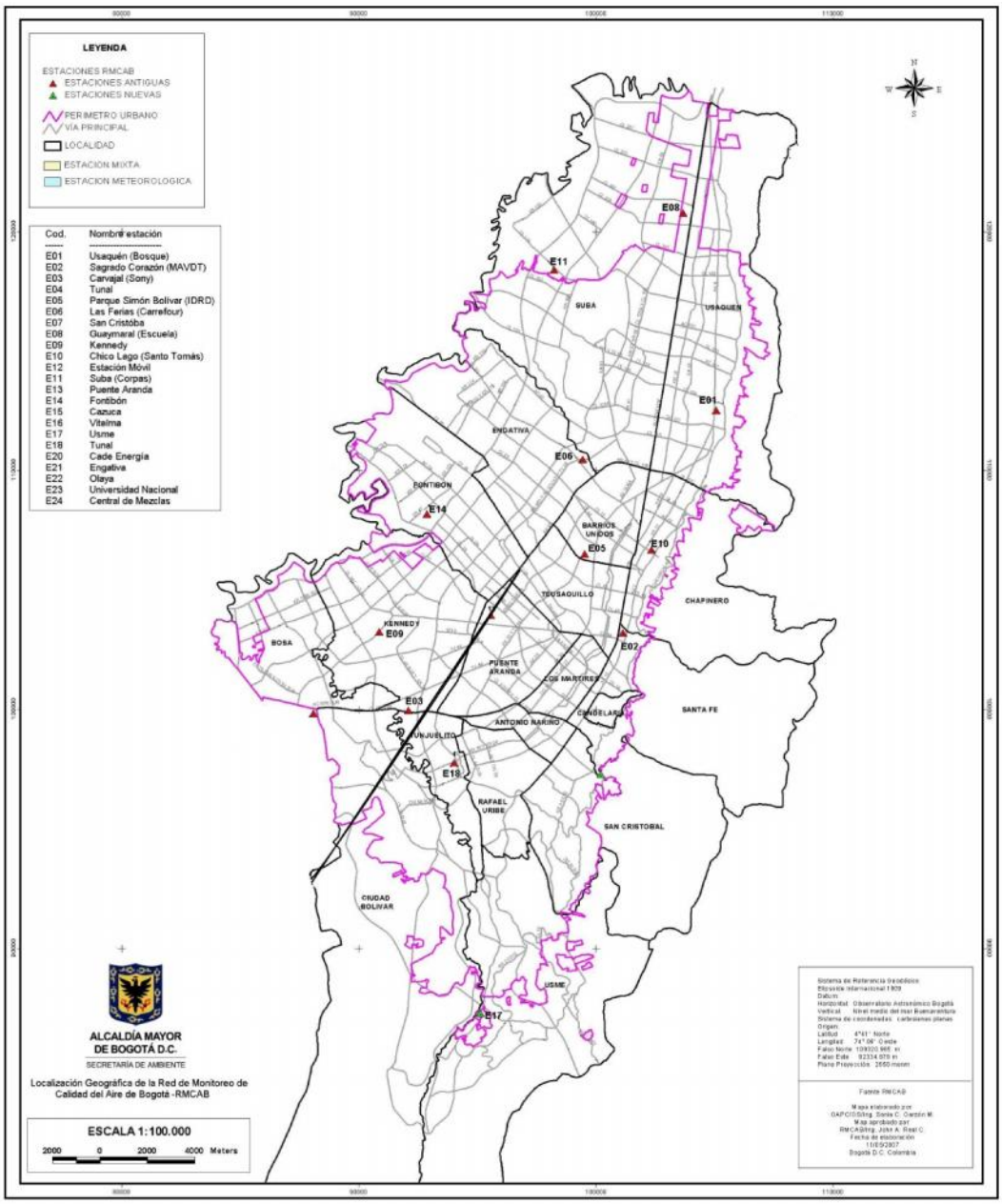
Para dar respuesta a los objetivos planteados en este trabajo, se cumplieron las siguientes fases:

## 2.1 Fase 1. Consolidación de la información atmosférica relevante a la contaminación fotoquímica

Una vez recolectada la información de la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá - SDA y del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM, se consolido una base de datos en archivos auto contenidos en formato ASCII (CSV - delimitado por coma), codificados (ANEXO I) y archivados para su visualización y análisis en Matlab 2010a y R 2.13.2; a continuación se describe cada una de las fuentes de información:

### 2.1.1 Red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá –RMCAB

La Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá –SDA opera la red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá D.C. –RMCAB (ver mapa) , con el propósito de evaluar la calidad del aire, respecto a los límites máximos permitidos establecidos en la Resolución 601 del 4 de abril de 2006 y modificada por la Resolución 610 del 24 de marzo de 2010 (expedidas por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible); de la RMCAB se recibieron registros de 24 estaciones de monitoreo distribuidas en su mayoría dentro del perímetro urbano del Distrito Capital; sin embargo, para propósitos de este trabajo se tuvieron en cuenta 12 estaciones de tipo automático con analizadores que registran concentraciones de $O_3$ (principio analítico: fotómetro UV no dispersivo) y $NO_2$ (principio analítico: quimioluminiscencia). Los datos de la RMCAB consolidados en base de datos corresponden a $O_3$, NOx, CO, precipitación, radiación solar, temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento para periodo comprendido entre agosto de 1997 a diciembre de 2010.




Mapa. Localización de la red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá. [Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá –SDA. Informe 2007].

El total de datos recibidos, fue sometido a un proceso de revisión, identificando vacíos y sin datos (codificados en la base de la RMCAB: Sin Data, <Muestra, OutRange, FaltanDat) contenidos en la serie temporal; estos tuvieron que ser reemplazados como Not a Number (NaN) de tal forma que pudieran ser leídos en Matlab; de este análisis se

tiene que le porcentaje promedio de datos validos corresponde a un 62.5 % de total de datos posibles (ver Tabla 2-1).

| Año | Sin Data | <Muestra | OutRange | FaltanDat | Vacíos | Total Datos | % Datos validos |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1997 | | | | | 46,985 | 286,416 | 83.6 |
| 1998 | | | | | 160,518 | 911,040 | 82.4 |
| 1999 | | | | | 354,660 | 1,068,720 | 66.8 |
| 2000 | 7,047 | 97 | 138 | 72 | 275,641 | 983,808 | 71.2 |
| 2001 | | | | | 309,436 | 1,138,800 | 72.8 |
| 2002 | | | | | 438,502 | 1,077,480 | 59.3 |
| 2003 | | | | | 606,019 | 998,640 | 39.3 |
| 2004 | | | | | 551,741 | 966,240 | 42.9 |
| 2005 | | | | | 607,650 | 1,095,000 | 44.5 |
| 2006 | | | | | 509,102 | 1,138,800 | 55.3 |
| 2007 | 591 | 39 | | | 351,491 | 1,007,400 | 65.0 |
| 2008 | 49,997 | 292 | | | 472,371 | 1,309,708 | 60.1 |
| 2009 | 45,299 | 8,476 | | | 194,170 | 1,235,160 | 79.9 |
| 2010 | 204,589 | 12,537 | | | 201,931 | 1,208,880 | 65.3 |
| Sub total | 307,523 | 21,441 | 138 | 72 | 5,080,217 | 14,426,092 | 62.5 |

Tabla 2-1. Relación de datos y reemplazos realizados a la serie de tiempo.

### 2.1.2 Estación Meteorológica del aeropuerto El Dorado

El IDEAM opera la red hidrometeorológica nacional, a la que pertenece la estación Aeropuerto El Dorado, de donde se obtuvieron las observaciones realizadas en superficie (precipitación, temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento). Los datos de las observaciones horarias correspondientes al mes de febrero de 2009 y 2010, tuvieron que ser digitados, pues estos solo estaban disponibles en papel (en total se digitaron cerca de once mil datos de variables de superficie del aeropuerto El Dorado). De igual forma, el IDEAM está encargado del radiosondeo diario en el aeropuerto El Dorado, realizados a las 12 UTC (Z) (entre las 06:00 y 07:00 hora local). El reporte contiene la observación en tiempo real, codificada en grupos de 5 números, e indica el valor que toma la temperatura, el viento (dirección y velocidad) y la temperatura del punto de rocío, a medida que la radiosonda asciende en la atmósfera. La información codificada en el

informe de altura es enviada al banco de datos meteorológicos mundial, con el fin de alimentar los modelos de predicción climática. La información disponible en internet, (Universidad de Wyoming, 2012); en total de descargaron 53 informes de altura que contienen datos: Atmospheric Pressure, Geopotential Height, Temperature, Dewpoint Temperature, Relative Humidity, Mixing Ratio, Wind Direction, Wind Speed, Potential Temperature, Equivalent Potential Temperature, Virtual Potential Temperature.

## 2.2 Fase 2. Periodo de análisis

Durante esta fase, se realizó el análisis de la ocurrencia del Fenómeno El Niño, a partir de las mediciones (disponibles en la URL de la **NOAA**) de la Temperatura Superficial del Mar -TSM y sus anomalías asociadas para identificar la existencia o no del fenómeno; utilizando para ello el Oceanic Niño Index –ONI en la región Niño 3-4, de acuerdo a los expuesto en la sección 2.3.1.

| Año | Media móvil de la temperatura superficial del mar [°C] | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | DJF | JFM | FMA | MAM | AMJ | MJJ | JJA | JAS | ASO | SON | OND | NDJ |
| **1997** | -0.4 | -0.3 | 0 | 0.4 | **0.8** | **1.3** | **1.7** | **2** | **2.2** | **2.4** | **2.5** | **2.5** |
| **1998** | **2.3** | **1.9** | **1.5** | **1** | **0.5** | 0 | **-0.5** | **-0.8** | **-1** | **-1.1** | **-1.3** | **-1.4** |
| **1999** | **-1.4** | **-1.2** | **-0.9** | **-0.8** | **-0.8** | **-0.8** | **-0.9** | **-0.9** | **-1** | **-1.1** | **-1.3** | **-1.6** |
| **2000** | **-1.6** | **-1.4** | **-1** | **-0.8** | **-0.6** | **-0.5** | -0.4 | -0.4 | -0.4 | **-0.5** | **-0.6** | **-0.7** |
| **2001** | **-0.6** | **-0.5** | -0.4 | -0.2 | -0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0 | -0.1 | -0.1 |
| **2002** | -0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.4 | **0.7** | **0.8** | **0.9** | **1** | **1.1** | **1.3** | **1.5** | **1.4** |
| **2003** | **1.2** | **0.9** | **0.5** | 0.1 | -0.1 | 0.1 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.5 | 0.6 | 0.4 |
| **2004** | 0.4 | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | **0.5** | **0.7** | **0.8** | **0.9** | **0.8** | **0.8** | **0.8** |
| **2005** | **0.7** | **0.5** | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.3 | 0.2 | -0.1 | -0.4 | -0.7 |
| **2006** | -0.7 | -0.6 | -0.4 | -0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | **0.5** | **0.6** | **0.9** | **1.1** | **1.1** |
| **2007** | **0.8** | 0.4 | 0.1 | -0.1 | -0.1 | -0.1 | -0.1 | -0.4 | **-0.7** | **-1** | **-1.1** | **-1.3** |
| **2008** | **-1.4** | **-1.4** | **-1.1** | **-0.8** | **-0.6** | -0.4 | -0.1 | 0 | 0 | 0 | -0.3 | -0.6 |
| **2009** | -0.8 | -0.7 | -0.5 | -0.1 | 0.2 | **0.6** | **0.7** | **0.8** | **0.9** | **1.2** | **1.5** | **1.8** |
| **2010** | **1.7** | **1.5** | **1.2** | **0.8** | 0.3 | -0.2 | **-0.6** | **-1** | **-1.3** | **-1.4** | **-1.4** | **-1.4** |

Tabla 2-2. Índice Océano El Niño 1997 a 2010. [NOAA. CPC, 2012]

De la serie de tiempo disponible (periodo 1950 – 2011), se analizó el periodo 1997 – 2010, en el que se pueden observar en color rojo 5 eventos de la fase cálida del ENSO (El Niño) (Tabla 2-2); al menos transcurren 5 meses consecutivos donde la media móvil para tres meses de anomalías en la temperatura superficial del mar exceden los 0.5

grados Celsius. El ONI permite identificar un evento El Niño (fase caliente del ENSO) y La Niña (fase fría del ENSO) en el Océano Pacifico tropical, como la media móvil de tres meses de las anomalías en la temperatura superficial del mar en la región Niño 3-4 [5°N-5°S, 120°-170°W].

De esta forma, y considerando: i) que las actividades socioeconómicas locales para los periodos a analizar sean en lo posible similares y ii) que se cuente con la mayor cantidad de estaciones con datos ($O_3$, NOx, temperatura y radiación solar) de la RMCAB; se identificaron dos periodos de análisis: el primero que corresponde al periodo El Niño, entre el trimestre mayo-junio-julio de 2009 y el trimestre marzo-abril-mayo de 2010; y el segundo periodo, "neutral" –periodo de no ocurrencia de extremos del ENSO (El Niño o La Niña), entre el trimestre mayo-junio-julio de 2008 y el trimestre abril-mayo-junio de 2009.

De estos periodos, se tomo como base de análisis el mes de febrero (febrero de 2009, neutral- y febrero de 2010, El Niño); dado que los trimestres donde las anomalías superficiales de la TSM durante el evento El Niño son mayores entre diciembre y enero; sin embargo, las condiciones de actividad socioeconómica para Bogotá difieren en comparación a un mes típico normal por cuanto estos meses corresponden a periodos vacacionales. De otra parte, la estacionalidad de las concentraciones promedio mensuales de $O_3$ (Ver Figura 2-1), muestran que febrero corresponde al mes donde se son las más altas, lo que soporta la selección del periodo de análisis.

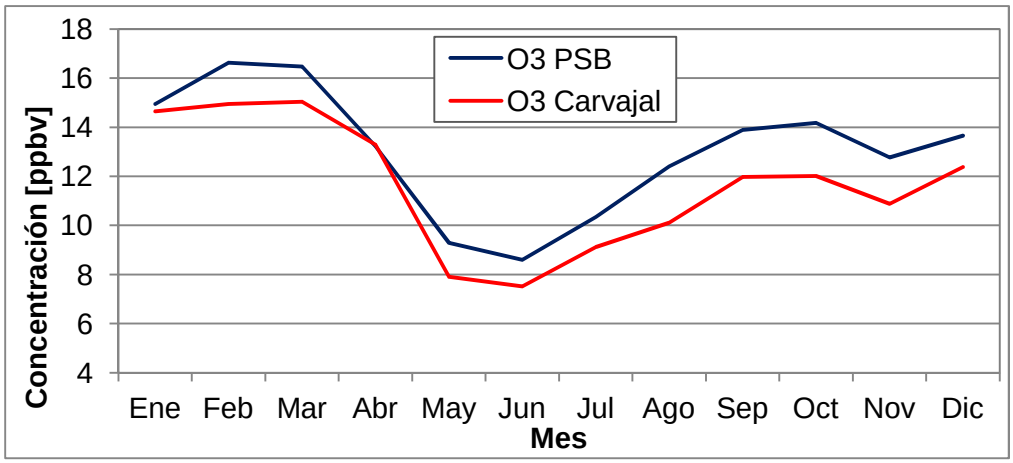



Figura 2-1. Estacionalidad de la concentración de ozono, promedios mensuales de $O_3$ – estación Parque Simón Bolívar –PSB y Carvajal.

## 2.3 Fase 3. Metodología de Análisis de las series de tiempo

A partir de la información consolidada, se siguió la metodología planteada para el análisis de las series de tiempo:

i) Análisis exploratorios para las concentraciones de $O_3$, Ox, NO, $NO_2$, y de los procesos atmosféricos Temperatura y Radiación solar, de las estaciones de monitoreo de la RMCAB; este análisis dio una idea del comportamiento de las series temporales, observadas en los valores que toman las variables (mediana y datos atípicos) en diagramas de caja y de dispersión.

ii) Análisis de las variables meteorológicas medidas en el Aeropuerto El Dorado, en especial la variación temporal de la temperatura superficial, máxima, mínima y media registradas;

iii) Análisis de los perfiles de temperatura a partir de radiosondeos del Aeropuerto El Dorado, permitiendo determinar la Altura de capa de mezcla según el método descrito en la sección 1.1.2;

iv) Análisis de significancia estadística para i) y ii), que permitió la comparación espaciotemporalmente de las mediciones asociadas a la contaminación fotoquímica y de los procesos atmosféricos en Bogotá; incluyendo la altura de capa de mezcla.

v) Análisis de la sensibilidad de $O_3$ y Ox a cambios en temperatura superficial asociados a eventos ENSO ($\partial[OX]/\partial T$) y escenarios de temperatura por cambio climático en Bogotá; balance de masa en volumen de control con unidad de área unitaria y altura variable de acuerdo al periodo de análisis.

# 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

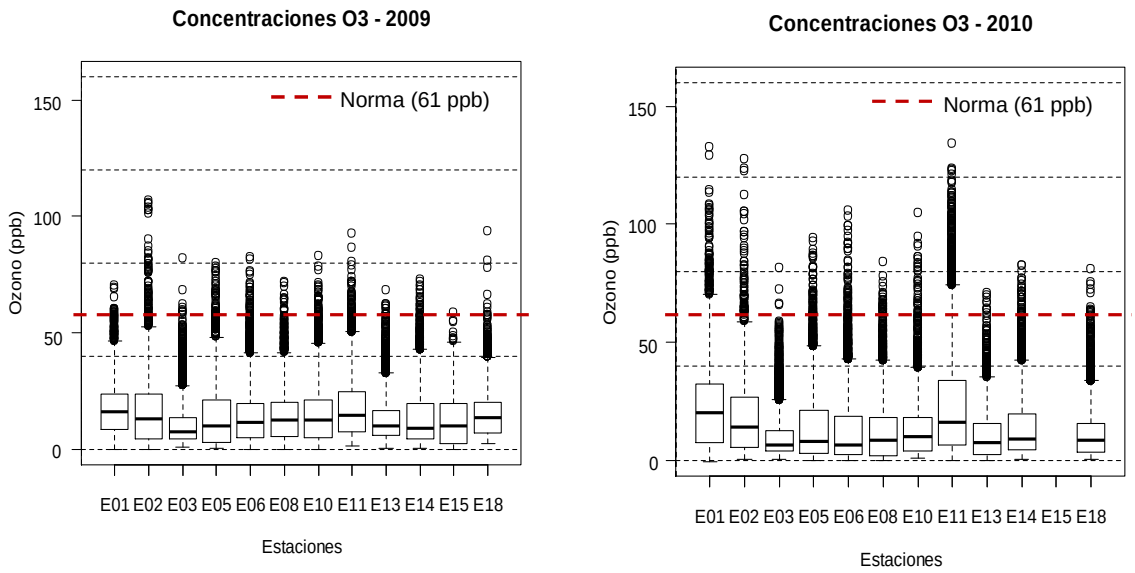
En esta sección se presentan y discuten los resultados obtenidos en la investigación, a partir del desarrollo de los aspectos metodológicos descritos anteriormente, y que permitieron al análisis espaciotemporal de las mediciones asociadas a la contaminación fotoquímica y de los procesos atmosféricos implicados: mezcla, reacción y transporte; para poder estimar la sensibilidad de $O_3$ y Ox a cambios asociados a eventos ENSO.

## 3.1 Análisis de los procesos atmosféricos de la RMCAB

### 3.1.1 Análisis exploratorio

En términos generales, los análisis exploratorios de los datos a nivel horario de las series de tiempo de la red de calidad del aire de Bogotá, presentan series incompletas (62.5 % de datos validos) que fueron descritas en la sección 2.1.1; hay deriva e inconsistencias internas evidentes y Off Sets con promedios de 3 ppb que pueden esconder la incertidumbre de las mediciones; factores que no pueden ser reconocidos por la ausencia de metadatos (Anexo III).

En particular para $O_3$, no se observa diferencias marcadas entre los comportamientos en las concentraciones en los diferentes sectores de la ciudad; sin embargo, puede notarse que la varianza aumenta a medida que lo hace la media. También, se destacan valores atípicos altos respecto a la norma horaria (120 µg/m$^3$ - Resolución 610 de 2010, ~61 ppb) y valores más altos durante periodos secos prolongados como la fase cálida del ENSO (El Niño), tal como muestra en el diagrama de caja para los años 2009 y 2010.




| | | | |
|---|---|---|---|
| 01 – Usaquén | 02.- Sagrado Corazón | 03 - Carvajal (Sony) | 05 - Parque Simón Bolívar-PSB |
| 06 - Las Ferias | 08 – Guaymaral | 10 - Chicó lago | 11 - Suba (Corpas) |
| 13 - Puente Aranda | 14 - Fontibón | 15 - Cazucá | 18 - Tunal |

Figura 3-1. Box plot para las concentraciones horarias de $O_3$ año 2009 y 2010.

### 3.1.2 Análisis de los procesos atmosféricos en el periodo de análisis

A partir de los análisis exploratorios realizados y una vez definidos los periodos de análisis descrito en la sección 2.2, se estudia el comportamiento de las variables $O_3$, Ox, NO, $NO_2$, Temperatura y Radiación Solar Global en cada uno de ellos, buscando una relación entre ellos.

En primera instancia, se estudia las series temporales de las variables de interés en los años 2009 y 2010 (Anexo IV). En este análisis, se observa una relación no muy notable entre la concentración de ozono y la temperatura superficial. En particular, como ejemplo, se trabaja la estación de Usaquén (Ver Figura 3-2), donde solo se cuenta con datos de $O_3$ desde finales del 2008; sin embargo, con la información de esta estación se puede precisar algunas conclusiones: i) se evidencia una correlación débil entre la temperatura máxima y la concentración máxima de $O_3$ (teniendo presente la calidad de las series temporales); ii) como la estación no se cuenta con datos de $NO_2$ y $O_3$ concurrentes, se limita la estimación de Ox; iii) las concentraciones de NO son muy similares a las de

NOx, lo cual puede indicar que la estación está próxima a emisiones "frescas" y que la titulación de $O_3$ en este punto es significativa.

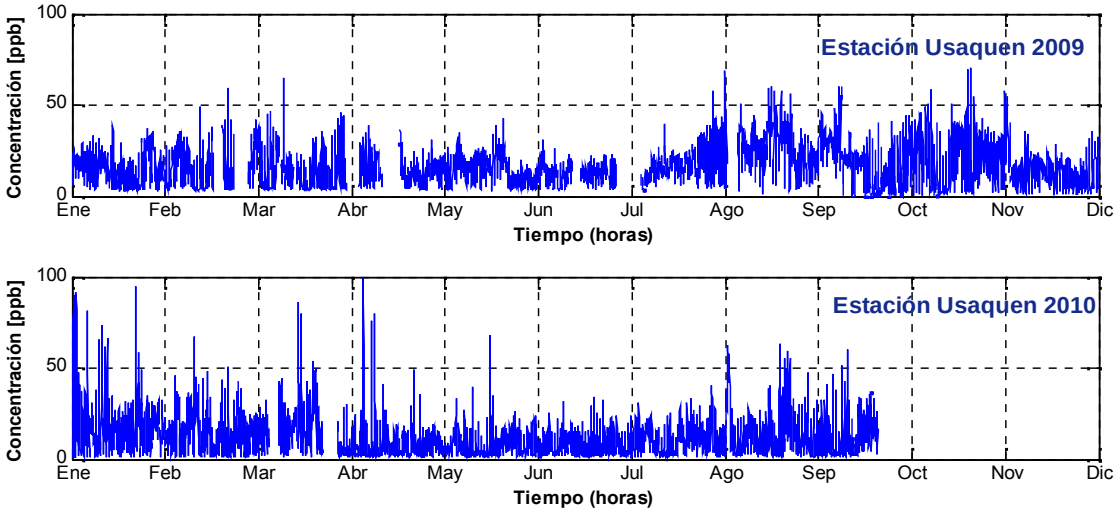



Figura 3-2. Concentraciones horarias de $O_3$, estación Usaquén 2009 y 2010.

Ahora bien, por los resultados encontrados y de las limitaciones observadas en los análisis anteriores, se precisa estudiar el comportamiento de las concentraciones de $O_3$ en un periodo más corto; para este propósito se analizaron los meses de febrero de 2009 y 2010; en primera instancia, el comportamiento de la temperatura superficial, luego vientos y posteriormente las concentraciones de $O_3$ y $NO_2$.

La figura 3-3 muestra los resultados el análisis realizado a la temperatura; en ella se puede observar diferencias que oscilan entre 2 y 3 °C entre los dos meses de análisis, presentándose la mayor diferencia en la estación Carvajal (2.9 °C).

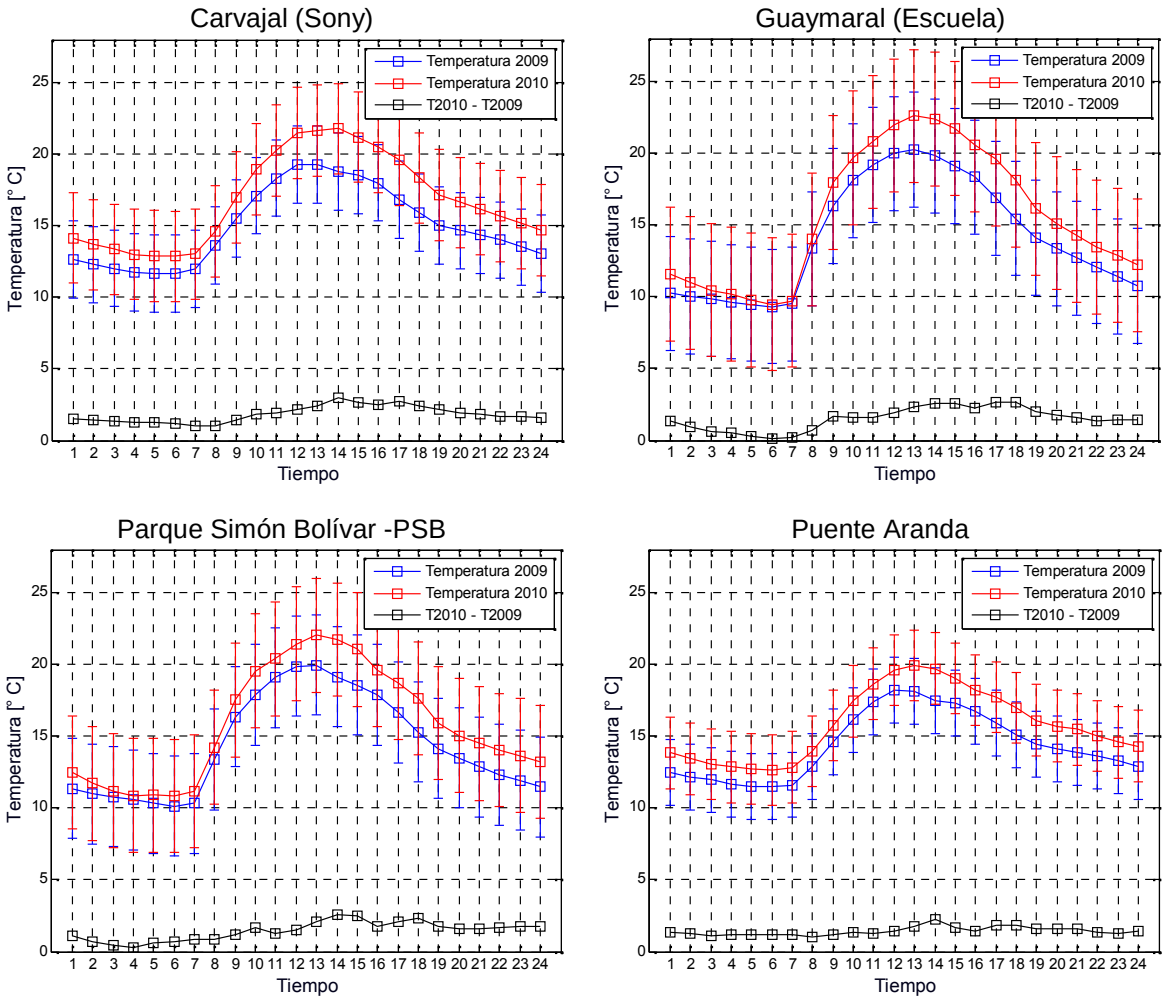



Figura 3-3. Promedio de la temperatura media horaria, febrero de 2009 y 2010.

Respecto al viento, elemento climatológico que puede definirse como "aire en movimiento"; se describe por sus características de velocidad y dirección; estas características se representaron gráficamente para las estaciones de monitoreo de la RMCAB mediante la rosa de vientos (Figura 3-4); en los resultados obtenidos, se observa simultáneamente la relación que existe entre las características que componen el viento: velocidad, dirección y frecuencias de ocurrencia; se destaca que el comportamiento de los vientos; muestran similitud en los periodos de análisis. Lo cual puede sugerir, que ante la ocurrencia de periodos secos característicos de la fase cálida del ENSO (El Niño), la circulación local no presenta variaciones, en especial las velocidades del viento.

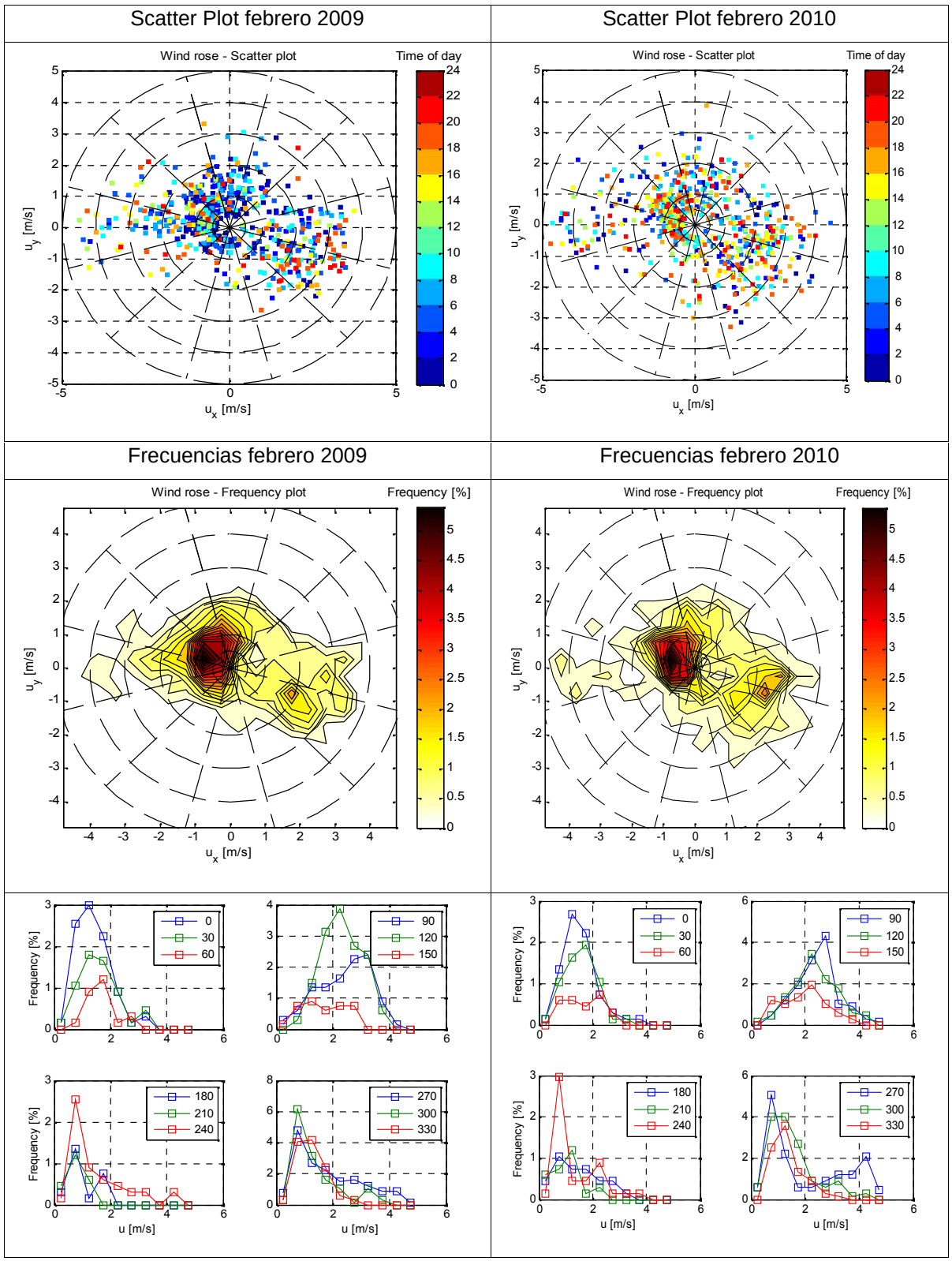



Figura 3-4. Rosa de Vientos Parque Simón Bolívar –PSB (RMCAB).

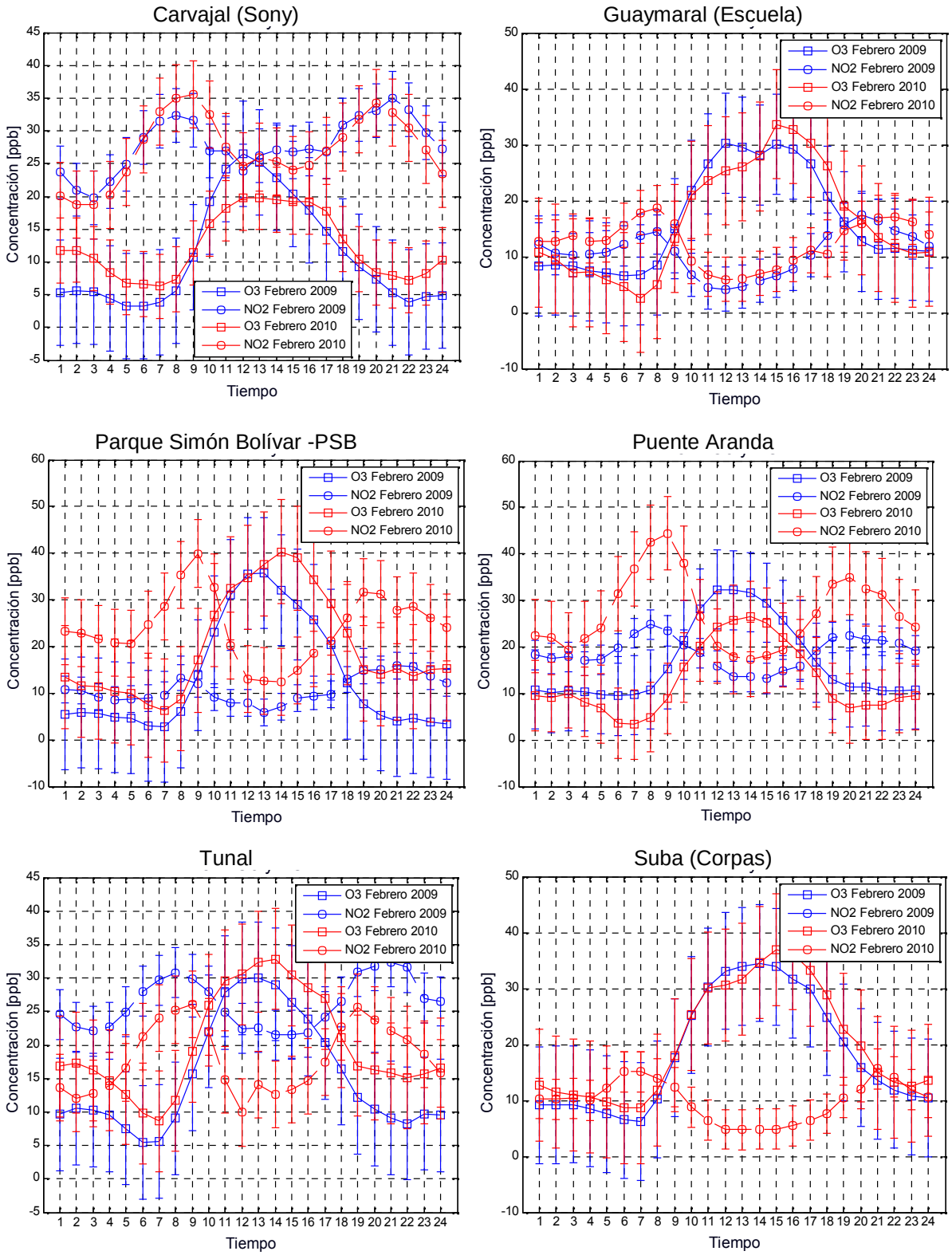



Figura 3-5. Promedio de la concentración media horaria, febrero de 2009 y 2010.

En la figura 3-5 se observa el perfil horario de las concentraciones de $O_3$ y $NO_2$ para los meses de febrero de 2009 y 2010; nótese que los perfiles no difieren significativamente entre los periodos de análisis, de acuerdo al supuesto que una variación en la temperatura superficial, modificaría las concentraciones de $O_3$ en aire ambiente.

## 3.2 Variación temporal de la temperatura superficial, máxima, mínima y media registradas en el Aeropuerto El Dorado

Para el análisis de de la variación de la temperatura medida en superficie, se utilizó la serie temporal (enero de 1998 - abril de 2011) de la estación del aeropuerto El dorado (Figura 3.6).

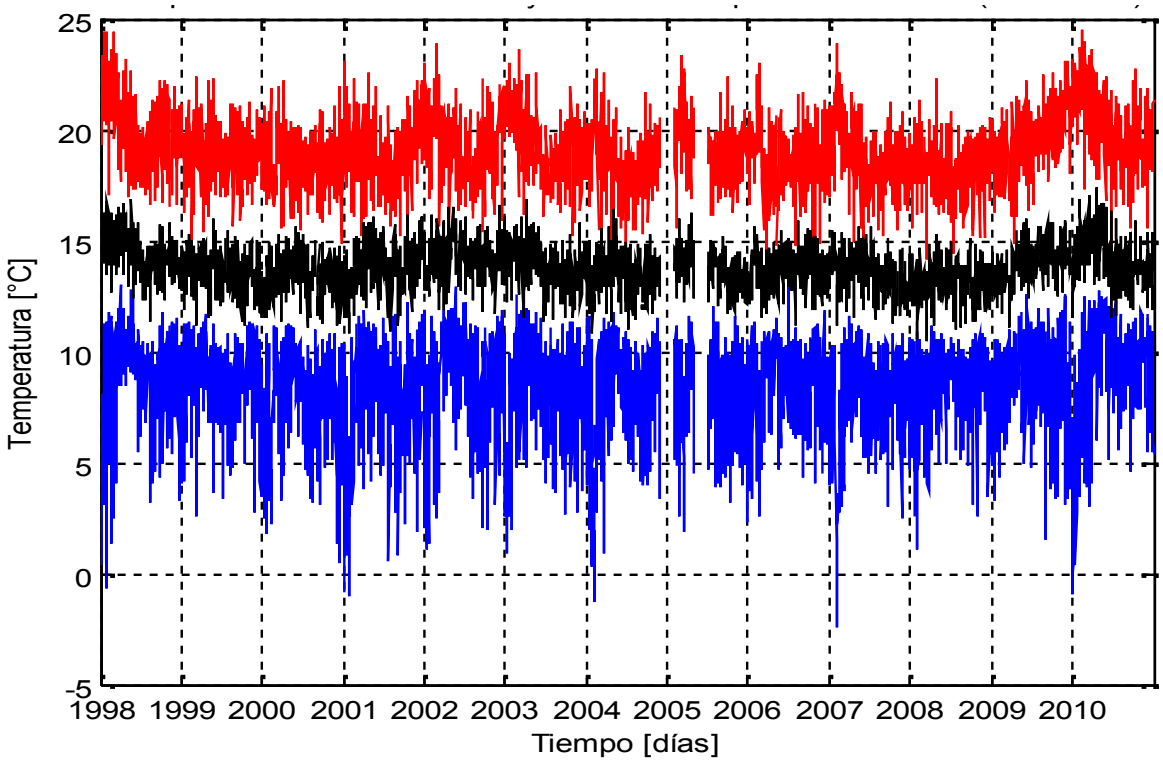



Figura 3-6. Temperatura Máxima, Mínima y Media diaria - Aeropuerto El Dorado (1998-2011).

El comportamiento temporal de la temperatura en el aeropuerto El Dorado, muestra variaciones estacionales a lo largo de la escala de tiempo; siendo más pronunciadas en los periodos secos típicos para la sabana de Bogotá. Los análisis indican variaciones en la amplitud de la temperatura que fluctúan en 10.7 °C en promedio, con una máxima de 25.8 °C y mínima de 2.6 °C. Ejemplo de estas variaciones, puede apreciarse en las observaciones de temperatura en superficie (febrero de 2010) durante el fenómeno El Niño 2009-2010.

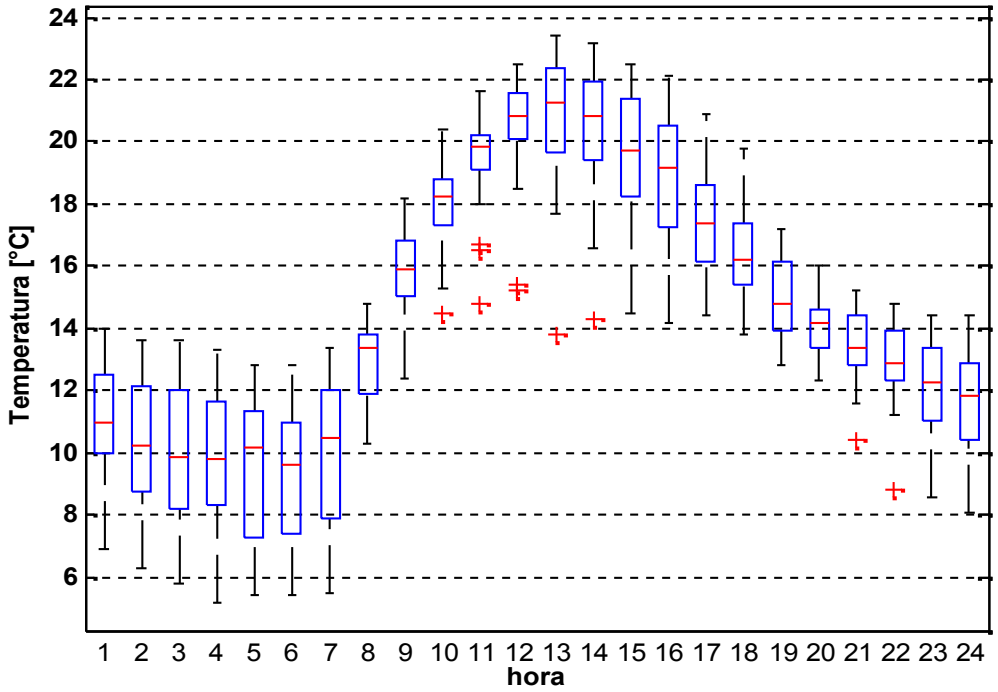



Figura 3-7. Variación de la temperatura en el ciclo diario (Aeropuerto El Dorado – Febrero de 2010).

Nótese que los valores extremos son simultáneos; cuando se presentan temperaturas máximas (generalmente entre las 12:00 y las 13:00 horas), también lo hacen las mínimas (antes del amanecer). Estos se acentúan en los periodos secos prolongados, característicos de la fase cálida del ENSO (El Niño); como los presentados en El Niño 1997-1998 y 2009-2010.

Lo anterior sugiere, que la temperatura máxima y mínima se convierte en un mejor indicador de variabilidad, dado que los valores de las temperaturas medias “esconden” los valores extremos.

## 3.3 Determinación de la altura de capa de mezcla

A partir del perfil diario de temperatura real observada por el sondeo de las 12:00 Z en el Aeropuerto El Dorado, se determina la altura de capa de mezcla -Z; modificando el método de Holzworth descrito en la sección 1.1.2. Ahora, la adiabática seca asciende a partir de la temperatura superficial observada a las 11:00, 13:00 y 15:00 horas del día, como se muestra en la siguiente Figura.

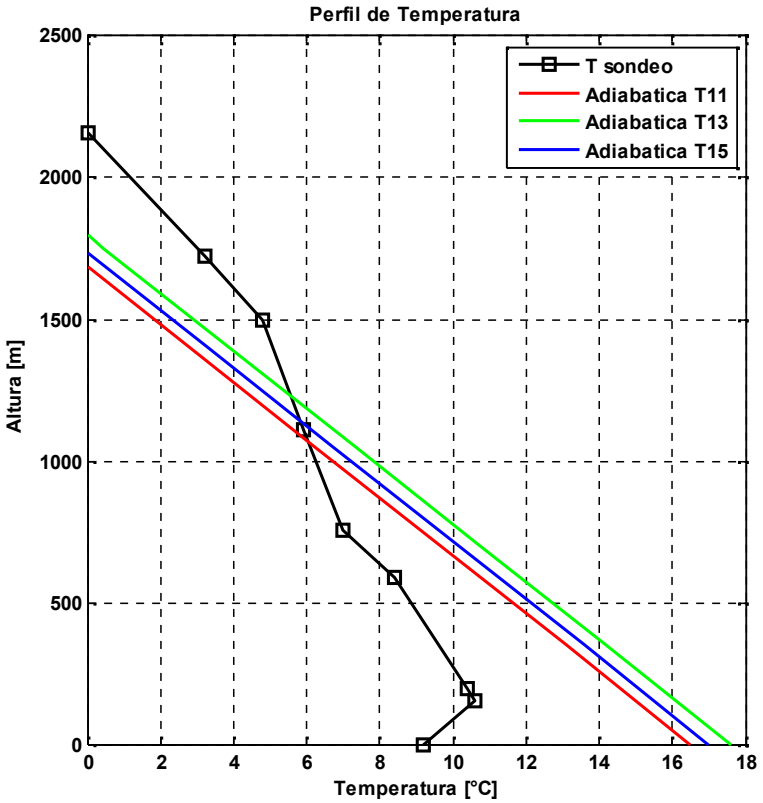



Figura 3-8. Determinación altura de capa de mezcla, Método de Holzworth modificado. Aeropuerto El Dorado, 15/02/2009.

Las determinaciones diarias de Z son realizadas para el mes de febrero de 2009 y 2010 (Anexo IV). Los resultados permiten encontrar diferencias promedio en términos

absolutos de 298.1 metros (24.2 %) entre los periodos de análisis. Las diferencias varían de acuerdo a la evolución diurna de Z (Figura 3-10); siendo más evidente a las 13:00 horas, 409 m más en febrero de 2010 (30.5 %). Las variación de de la altura de capa de mezcla puede observarse en la siguiente figura.

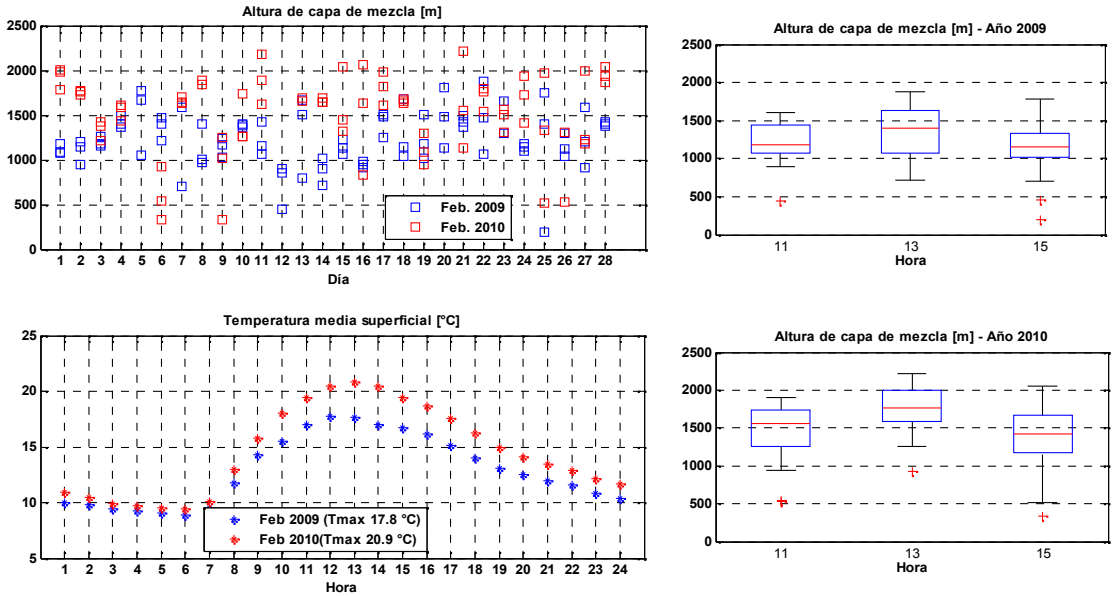



Figura 3-9. Estadísticos altura de capa de mezcla. Aeropuerto El Dorado.

Los resultados permiten sugerir, condiciones de mayor dilución de contaminantes en la capa de mezcla cuando se presenta el ciclo estacional del fenómeno cálido del ENSO (El Niño), por efectos del incremento de la temperatura superficial; que como se observa en la Figura 3.9 (inferior izquierdo), alcanza 3.1 °C de diferencia entre la máxima temperatura del perfil medio diario horario.

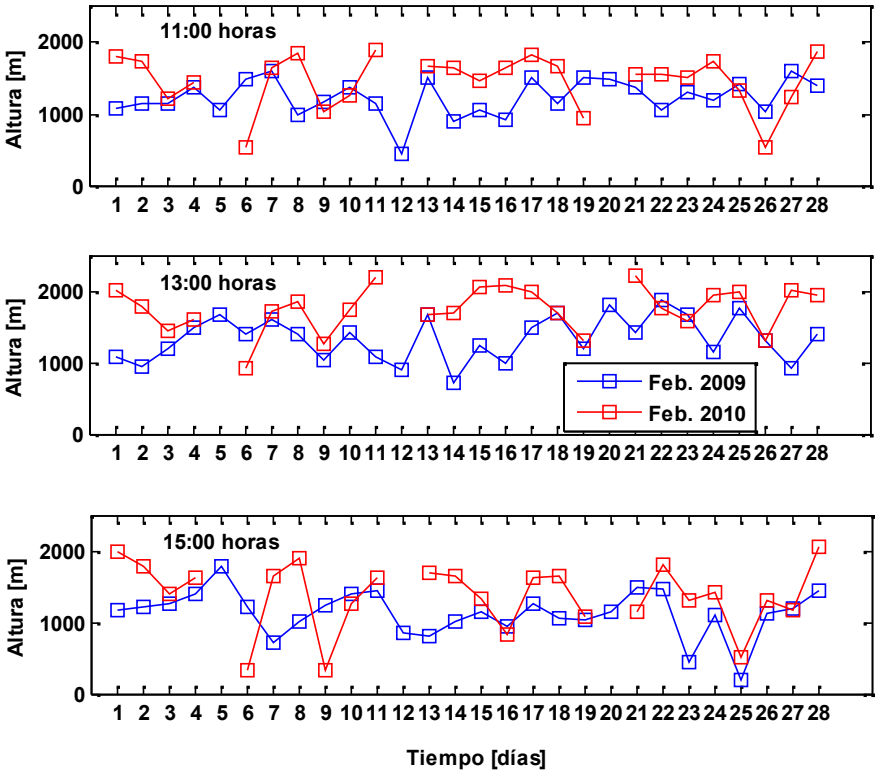



Figura 3-10. Perfil diario de la altura de la capa de mezcla 11:00, 13:00 y 15:00 horas. Aeropuerto El Dorado.

## 3.4 Análisis de la sensibilidad de $O_3$ y Ox a cambios en temperatura superficial asociados a eventos ENSO

Considérese un modelo Euleriano, basado en el principio de conservación de la masa de una especie en una región de la atmósfera, en un volumen de control de altura *H* (altura de la capa de mezcla) y de base Δx, Δy, como se muestra en la Figura siguiente.

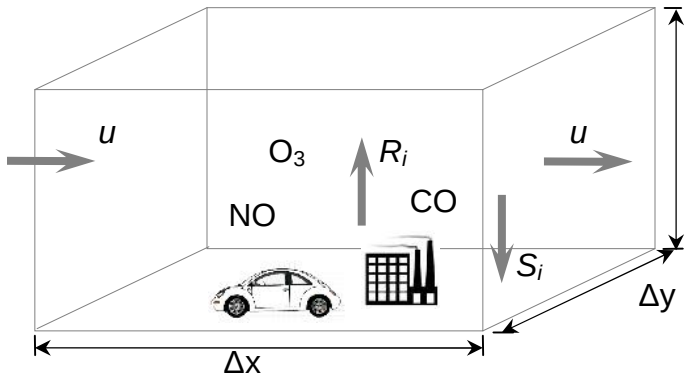



Figura 3-11. Esquema Modelo de caja.

En términos generales, el balance de masa en estado estacionario para la concentración (Ci) de la especie i, se describe como:

$$\frac{d}{dt}(C_i \Delta x\ \Delta y\ H) = uH\Delta y(C_i^0) - uH\Delta y(C_i) + Q_i + (R_i \Delta x\ \Delta y\ H) - S_i \qquad (1)$$

Agrupando, tenemos;

$$\frac{d}{dt}(C_i \Delta x\ \Delta y\ H) = uH\Delta y\left(C_i^0 - C_i\right) + Q_i + (R_i \Delta x\ \Delta y\ H) - S_i \qquad (2)$$

Donde, $Q_i$ → Tasa de emisión [kg/h]; $S_i$ →Tasa de destrucción [kg/h]; $R_i$ → Tasa de generación [kg/m$^3$ h]; $C_i^0$→ Concentración de fondo y $u$ → Velocidad del viento, asumiendo dirección constante.

Dividiendo los términos de la ecuación (2) por el área ($\Delta x\ \Delta y$), tenemos:

$$\frac{d}{dt}(C_i\ H) = u\frac{H}{\Delta x}\left(C_i^0 - C_i\right) + q_i + (R_i\ H) - s_i \qquad (3)$$

Siendo $q_i$ y $s_i$, la tasa de generación y remoción por unidad de área. De otro lado, la tasa de remoción debido a la deposición seca se puede describir mediante la velocidad de deposición seca ($u_{di}$) de la especie $i$, como;

$$S_{i=u_{di}\times C_i} \tag{4}$$

Entonces, (3) se puede expresar como:

$$\frac{d}{dt}(C_i\,H) = u\frac{H}{\Delta x}\left(C_i^0 - C_i\right) + q_i + (R_i\,H) - u_{di}C_i \tag{5}$$

La relación entre la longitud del volumen de control con la velocidad del viento predominante *u,* está definida como el tiempo de residencia $\tau$, de tal manera que ahora se tiene:

$$\frac{d}{dt}(C_i\,H) = \frac{H}{\tau}\left(C_i^0 - C_i\right) + q_i + (R_i\,H) - u_{di}C_i \tag{6}$$

Integrando en ambos extremos;

$$\Delta(C\,H) = \int_0^\tau \frac{H}{\tau}(C_i^0 - C_i)\,dt + \int_0^\tau q_i dt + \int_0^\tau (R_i\,H)\,dt - \int_0^\tau u_{di}C_i dt \tag{7}$$

De esta manera y considerando que la altura de capa de mezcla (H) durante la evolución diurna varía dependiendo de las condiciones atmosféricas predominantes; para este caso, en función de la temperatura; se tiene las siguientes consideraciones:

i) La concentración de ozono observad por la red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá –RMCAB ($C_i$ = [$O_3$]), no tiene variaciones significativas en los periodos analizados.

ii) Sea H la altura de la capa de mezcla del mes de febrero de 2009 y H' la altura en febrero de 2010 (evento El Niño).

iii) La masa del contaminante *i* ($O_3$) es función de la altura; a mayor altura, mayor será la masa contenida en el volumen de control.

iv) El primer término de la derecha, será mayor en tanto la altura del volumen de control sea mayor (H’ > H); de acuerdo a la consideración (i). Aunque la concentración observada no tenga variación entre los periodos analizados, la masa contenida en los volúmenes sí, debido a que esta depende de la altura de la capa de mezcla H.

v) La tasa de deposición, no dependen de la altura, por tanto para los dos periodos de análisis, estos no tiene variación.

vi) La tasa de emisión es cero.

vii) La tasa neta de producción de ozono durante la fase cálida de ENSO aumenta.

En conclusión, con base en el modelo conceptual simplificado, es posible inferir que si bien la producción neta de ozono aumenta durante la fase cálida de ENSO, este efecto no se evidencia de forma dramática en la concentración superficial de ozono debido al incremento simultaneo de la capa de mezcla, es decir la producción incremental de ozono es aparentemente compensada por una mayor dilución debida a una capa de mezcla más alta.

# 4. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y PERSPECTIVAS

No se observan diferencias marcadas a nivel espacial en las concentraciones de $O_3$; sin embargo, puede notarse que la varianza aumenta a medida que lo hace la media; se destacan valores atípicos altos respecto a la norma horaria y valores más altos durante periodos secos prolongados como la fase cálida del ENSO (El Niño).

Sorprendentemente, los perfiles horarios de las concentraciones de $O_3$ y $NO_2$, no difieren significativamente entre los periodos de análisis (meses de febrero de 2009 y 2010). Esto es contrario a la hipótesis de trabajo inicial, según la cual incrementos notables en la temperatura superficial causarían aumentos significativos de las concentraciones de $O_3$ superficial.

El comportamiento temporal de la temperatura superficial en el aeropuerto El Dorado, muestra variaciones estacionales a lo largo de la escala de tiempo; con valores extremos durante el mismo día, es decir cuando se presentan temperaturas máximas (generalmente entre las 12:00 y las 13:00 horas), también lo hacen las mínimas (antes del amanecer). Esto se acentúa durante los periodos secos prolongados, característicos de la fase cálida del ENSO (El Niño). Esta correlación entre temperatura máxima de un día y mínima del siguiente hace que la temperatura media no sea el mejor indicador de ocurrencia de la fase cálida de ENSO. La temperatura máxima sería un mejor indicador.

El análisis cualitativo y cuantitativo detallado de las series temporales de concentración de contaminantes criterio de la red de calidad del aire de Bogotá revela vacíos importantes en las series, deriva en las mediciones e inconsistencias internas evidentes. El análisis mostro que le porcentaje promedio de datos validos para la serie 1997-2010 corresponde a un 62.5 % de total de datos posibles.

Particularmente en las series de medición de $O_3$ superficial, se observan offsets típicamente de ~3 ppb. Este evidente error instrumental, muy probablemente asociado a saltos en la calibración del cero instrumental, hace extremadamente difícil derivar cambios en niveles promedio o máximo de ozono inferiores o iguales a ~3 ppbv. La ausencia de metadatos hace imposible cualquier intento de corrección de este error sistemático.

Los análisis realizados a las observaciones de la temperatura superficial en las estaciones de la RMCAB, permiten observar diferencias que evidencian el efecto de El Niño, presentándose la mayor diferencia en la estación Carvajal.

Las características estadísticas del viento, velocidad, dirección y frecuencias de ocurrencia, muestran una similitud remarcable entre los periodos de análisis. Esto indica que, ante la ocurrencia de periodos secos característicos de la fase cálida del ENSO (El Niño), la circulación local no presenta variaciones significativas, en especial, la velocidad.

Las diferencias encontradas en la altura de capa de mezcla (h) permiten sugerir condiciones de mayor dilución de contaminantes en la capa de mezcla cuando se presenta el ciclo estacional del fenómeno cálido del ENSO (El Niño), por efectos del incremento de la temperatura superficial. Este efecto compensaría la mayor producción neta de ozono en la capa de mezcla durante la fase cálida de ENSO, lo que resultaría en concentraciones de ozono a nivel de superficie similares en períodos Niño y neutrales.

Es necesario contar con instrumentos que permitan estimar con menos incertidumbre y mejor resolución espacial la evolución diaria de la altura de la capa de mezcla. Estas mediciones son esenciales para mejorar la comprensión de la dinámica de la contaminación fotoquímica en Bogotá y su interacción con ENSO.

Para avanzar en la determinación cuantitativa del efecto de la Oscilación del Sur El Niño (ENSO) en la contaminación fotoquímica en Bogotá, más allá de lo logrado en el este trabajo de investigación, es necesario a) llevar a cabo observaciones avanzadas durante periodos secos afectados o no por la fase cálida de ENSO. Estas observaciones deberían incluir monitoreo directo de capa de mezcla y intermediarios o productos

terminales de la oxidación fotoquímica (p.e. NOy, formaldehído, glioxal), b) aplicar modelos (de caja o preferiblemente eulerianos) que incluyan una descripción detallada de la fotoquímica urbana.

Se recomienda que las bases de datos alfanuméricas correspondientes a las series de tiempo de la RMCAB, contengan los metadatos asociados a las novedades que se presentan en la operación y mantenimiento de las estaciones.

# 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Belalcazar, L C**; Clappier, A; Manzi, V; Hubert Van den Bergh. (2007). Air quality modeling over Bogotá Colombia; combined techniques to estimate and evaluate emission inventories. Atmospheric Environment, Vol. 41, 6302-6318; ISSN: 1352-2310.

**Benavides, H.** (2010). Análisis de variables en altura con base en los ozonosondeos realizados en Bogotá. Nota Técnica IDEAM–METEO/004-2010.

**Drechsler, D. M.** (2004). Review of the California ambient air quality standard for ozone. California Environmental Protection Agency. Air Resources Board and Office of Environmental Health and Hazard Assessment. Volume I - Public Review Draft.

**Ebi KL, McGregor G**. (2008) Climate Change, Tropospheric Ozone and Particulate Matter, and Health Impacts. Environ Health Perspect 116(11): doi:10.1289/ehp.11463.

**Finlayson-Pitts, B.J. and Pitts, J.N.** (2000). Chemistry of the upper and lower atmosphere. Academic Press, San Diego (CA).

**G. Zeng, J. A. Pyle, and P. J. Young.** (2008). Impact of climate change on tropospheric ozone and its global budgets. Atmos. Chem. Phys., 8, 369–387.

**Holzworth, G. C.** (1972). Mixing heights, wind speeds, and potential for urban air pollution throughout the contiguous United States. Environmental Protection Agency-Division of Meteorology. Office of Air Programs. Research Triangle Park, North Carolina.

**IDEAM-Bedoya-S, J. M.** (2010). Informe de avance sobre la vulnerabilidad del recurso hídrico en Colombia ante el cambio climático. Documento interno sin publicar. Bogotá.

**IDEAM-Montealegre, E.** (2007). Modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia. Documento interno sin publicar. Bogotá.

**IDEAM**, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial [MAVDT]. (2010). Segunda comunicación nacional de Colombia ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. IDEAM, MAVDT y PNUD. Bogotá.

**IDEAM**. (2002). Efectos naturales y socioeconómicos del fenómeno el Niño en Colombia. Technical report, Ideam, Sistema Nacional para la prevención de desastres, Bogotá D.C.

**IPCC.** (2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.

**Im, U., Markakis, K., Poupkou, A., Melas, D., Unal, A., Gerasopoulos, E., Daskalakis, N., Kindap, T., and Kanakidou, M.** (2011). The impact of temperature changes on summer time ozone and its precursors in the Eastern Mediterranean, Atmos. Chem. Phys., 11, 3847-3864, doi:10.5194/acp-11-3847-2011.

**Jiménez, R.** (2004). Development and application of UV-visible and mid-IR differential absorption spectroscopy techniques for pollutant trace gas monitoring. Ph.D. Thesis – Atmospheric Sciences, Insitute of Environmental Sciences and Engineering (SSIE), School of Architecture, Civil and Environmental Engineering (ENAC), École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Thesis No. 2944.

**Jiménez, R**. (2011), Curso Contaminación atmosférica. Notas de clase. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C.

**Kossmann M, Sturman A.** (2004). The surface wind field during winter smog nights in Christchurch and coastal Canterbury, New Zealand. Int J Climatol 24:93–108.

**Nilsson ED, Paatero J, Boy M.** (2001a). Effects of air masses and synoptic weather on aerosol formation in the continental boundary layer. Tellus Series B: Chem Phys Meteorol 53:462–478.

**Nilsson ED, Rannik U, Kulmala M, Buzorius G, O'Dowd CD.** (2001b). Effects of continental boundary layer evolution, convection, turbulence and entrainment, on aerosol formation Tellus Series B: Chem Phys Meteorol 53:441–461.

**OVIEDO T., Blanca E.** (2009). Análisis del efecto del cambio climático en la dispersión de ozono y Material particulado en Bogotá. Tesis para optar al título de Magíster en Ciencias – Meteorología. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

**RUIZ, J. F.** (2002). Simulación de la contaminación atmosférica generada por fuentes móviles en Bogotá. Universidad Nacional de Colombia. Tesis para optar al título de Magíster en Ciencias – Meteorología. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

**Solomon, S**., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B.Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). (2007). Climate Change 2007: ThePhysical Science Basis. Contribution of Working Group I to the FourthAssessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC (AR4).

**Seinfeld, John H. and Pandis, Spyros N.** (2006). Atmospheric Chemistry and Physics - From Air Pollution to Climate Change. Second Edition. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

**Sozzi, R**., (1998). La turbulencia de la atmosfera y la dispersión de los contaminantes en el aire – vol. 1. Micrometeorología y turbulencia del aire. México D.F.

**Stull, R.** (2000). Meteorology for scientists and engieneers. Second Edition. Published by Brooks/Cole Thomson Learning. CA-USA.

**Turtós C., Leonor et al**. Estimación de la altura de la capa de mezcla en Casablanca a partir de parametrizaciones en superficie. CUBAENERGÍA, Ciudad de La Habana, Cuba. http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar17/HTML/articulo04.htm (Consultado el 15/04/2012)

**WHO.** (2002). World Health Report 2002: Reducing Risks, Promoting Healthy Life. Geneva:World Health Organization.

**Zarate, E.** (2007). Understanding the origins and fate of air pollution in Bogotá, Colombia. Tesis Doctoral No. 3768, EPFL, Lausana, Suiza.

## REFERENCIAS DE INTERNET

**IDEAM**. (2012). Sistema de Información Ambiental de Colombia – SIAC. Calidad del aire. Contaminación atmosférica. http://www.siac.gov.co/contenido/contenido.aspx?catID=466&conID=606 (Consultado el 21/05/2012).

**NOAA. (2012).** National Oceanic and Atmospheric Administration. NOAA's El Niño Page. http://www.elnino.noaa.gov/ (Consultado el 22/05/2012).

**NOAA. CPC. (2012).** National Centers for Environmental Prediction. Climate Prediction Center. http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml (Consultado el 26/05/2012).

**IRI. (2012).** The International Research Institute for Climate and Society. Overview of the ENSO System. http://iri.columbia.edu/climate/ENSO/background/basics.html (Consultado el 31 de mayo de 2012).

**WEBMET. (2012).** The Meteorological Resource Center. WebMET.com. The Holzworth Method. http://www.webmet.com/met_monitoring/651.html (Consultado el 02/04/2012).

**University of Wyoming. (2012).** College of Engineering. Department of Atmospheric Science. Weather – Soundings. http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html (Consultado el 15/03/2012).

# A. ANEXO I. Formato de Auto contenidos

**Universidad Nacional de Colombia**

*Maestría en Ingeniería - Ingeniería Ambiental*

Trabajo de Grado: ***"Sensibilidad de la contaminación fotoquímica en Bogotá a la Oscilación del Sur El Niño (ENSO)"***

Origen de la información:

**Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá – SDA**

**Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá - REMCAB**

| | |
|---|---|
| Fecha de Proceso: | Marzo 2011 |
| Fecha consolidación: | Setiembre 2011 |
| Procesó: | Gabriel de Jesús Saldarriaga Orozco |
| Director: | Rodrigo Jiménez Pizarro, Ph.D. |

***Codificación de Estaciones - REMCAB***

| Número | Nombre Estación | Localidad | Sector |
|---|---|---|---|
| E01 | Usaquén (Bosque) | Usaquén | Norte |
| E02 | Sagrado Corazón (MAVDT)[2] | Santa Fe | Centro |
| E03 | Carvajal (Sony) | Kennedy | Suroccidente |
| E04 | Tunal | Tunjuelito | Sur |
| E05 | Parque Simón Bolívar (IDRD) | Barrios Unidos | Centro |
| E06 | Las Ferias (Carrefour) | Engativá | Norte |
| E07 | San Cristóbal | San Cristóbal | Sur |
| E08 | Guaymaral (Escuela) | Suba | Norte |
| E09 | Kennedy | Kennedy | Suroccidente |
| E10 | Chico Lago (Santo Tomás) | Chapinero | Centro |
| E12 | Estación Móvil | Puente Aranda | Centro |

| Número | Nombre Estación | Localidad | Sector |
|---|---|---|---|
| E11 | Suba (Corpas) | Suba | Noroccidente |
| E13 | Puente Aranda | Puente Aranda | Suroccidente |
| E14 | Fontibón | Fontibón | Suroccidente |
| E15 | Cazucá | Soacha | Suroccidente |
| E16 | Vitelma | Santafe | Sur |
| E17 | Usme | Usme | Sur |
| E18 | Tunal | Tunjuelito | Sur |
| E20 | Cade Energía | | |
| E21 | Engativa | Engativa | Noroccidente |
| E22 | Olaya | | |
| E23 | Universidad Nacional | Teusaquillo | Centro |
| E24 | Central de Mezclas | | |

***Descripción de Variables***

| Variable | Descripción | Unidad |
|---|---|---|
| $O_3$ | Ozono | ppb |
| NO | Monóxido de nitrógeno | ppb |
| $NO_2$ | Dióxido de Nitrógeno | ppb |
| NOx | Óxidos de Nitrógeno | ppb |
| PM10 | Material Particulado < 10 µm | $\mu g/m^3$ |
| CO | Monóxido e Carbono | ppm |
| VV | Velocidad del Viento | m/s |
| DV | Dirección del viento | Grados |
| T | Temperatura | ºC |
| HR | Humedad Relativa | % |
| P | Precipitación | mm |
| PB | Presión Barométrica | mm Hg |
| RSD | Radiación Solar Directa | $w/m^2$ |
| RSF | Radiación Solar Difusa | $w/m^2$ |
| RSG | Radiación Solar Global | $w/m^2$ |

***Codificación de variables - Gases y Meteorología***

| Variable | Código | Variable | Código |
|---|---|---|---|
| Año | 010 | DV10 | 061 |
| Mes | 011 | VV20 | 062 |
| Día | 012 | DV20 | 063 |
| Hora | 013 | T2 | 070 |
| $O_3$ | 020 | T8 | 071 |
| NO | 030 | T10 | 072 |
| $NO_2$ | 031 | T20 | 073 |
| NOX | 032 | HR | 080 |
| PM10 | 040 | P | 090 |
| PM2.5 | 041 | PB | 100 |
| TSP | 042 | RSD | 110 |
| CO | 050 | RSF | 111 |
| VV10 | 060 | RSG | 112 |

***Reemplazos realizados a la base de datos***

| Donde hay: | Se Cambia por: |
|---|---|
| Sin Data | NaN |
| Vacios | NaN |
| <Muestra | NaN |
| OutRange | NaN |
| FaltanDat | NaN |

**Relación de total de datos y cantidad de reemplazos realizados**

| Año | Sin Data | <Muestra | OutRange | FaltanDat | Vacios | Total Datos |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1997 | - | - | - | - | 46,985 | 286,416 |
| 1998 | - | - | - | - | 160,518 | 911,040 |
| 1999 | - | - | - | - | 354,660 | 1,068,720 |
| 2000 | 7047 | 97 | 138 | 72 | 275,641 | 983,808 |
| 2001 | - | - | - | - | 309,436 | 1,138,800 |

| Año | Sin Data | <Muestra | OutRange | FaltanDat | Vacios | Total Datos |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2002 | - | - | - | - | 438,502 | 1,077,480 |
| 2003 | - | - | - | - | 606,019 | 998,640 |
| 2004 | - | - | - | - | 551,741 | 966,240 |
| 2005 | - | - | - | - | 607,650 | 1,095,000 |
| 2006 | - | - | - | - | 509,102 | 1,138,800 |
| 2007 | 591 | 39 | - | - | 351,491 | 1,007,400 |
| 2008 | 49,997 | 292 | - | - | 472,371 | 1,309,708 |
| 2009 | 45,299 | 8,476 | - | - | 194,170 | 1,235,160 |
| 2010 | 204,589 | 12,537 | - | - | 201,931 | 1,208,880 |

***Observaciones***

i) La estación Universidad Nacional opero hasta 2002, de 2003 en adelante se traslada al Parque Simón Bolívar – IDRD.

ii) La estación Carvajal y la estación Casuca, contienen los mismos datos para el periodo Enero - Marzo de 2008.

iii) En el año 2007, la estación Carrefour aparece repetida - dos (2) columnas con iguales datos.

iv) En el año 2007, no aparece información de la estación Guaymaral – Escuela.

v) En el año 2007, la estación Guaymaral aparece con encabezado Carrefour en el parámetro CO, se le asigna CO a Carrefour.

vi) En el año 2009, La estación Guaymaral NO tiene datos de Dirección del viento a 20 metros, solo aparece velocidad del viento.

vii) Se codifica de la siguiente forma: Estaciones: (E, número estación, código variable).

**Ejemplo**: La variable temperatura (070), para la estación Kennedy (E09), se codifica como:

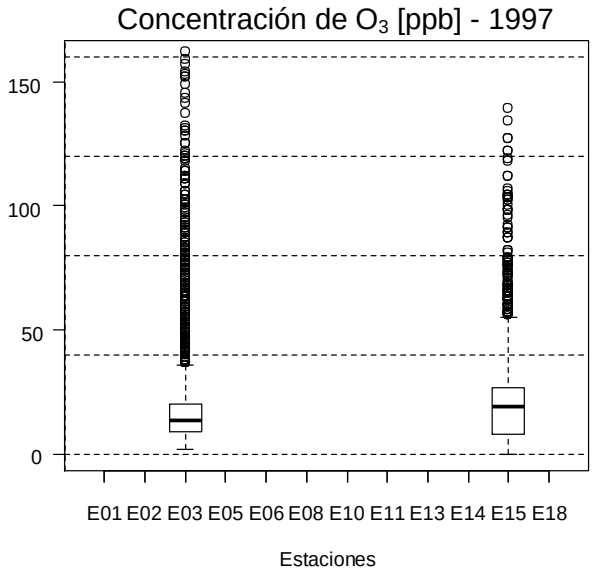
E09070 (E09: Estación 09, Kennedy; 070: Temperatura)

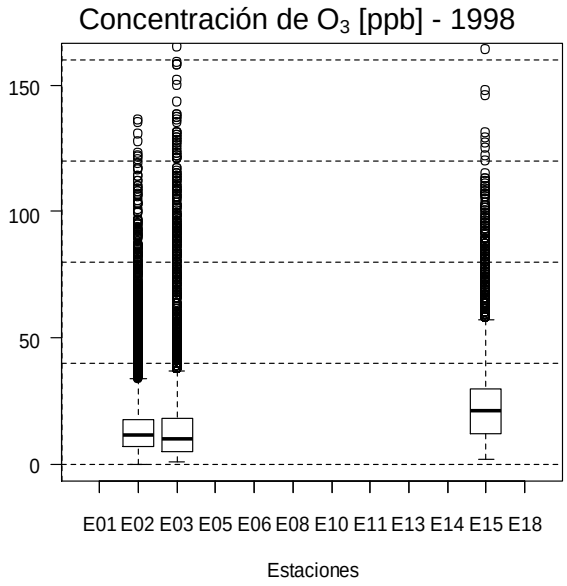
# B. ANEXO II. Altura de capa de mezcla, Z [m]

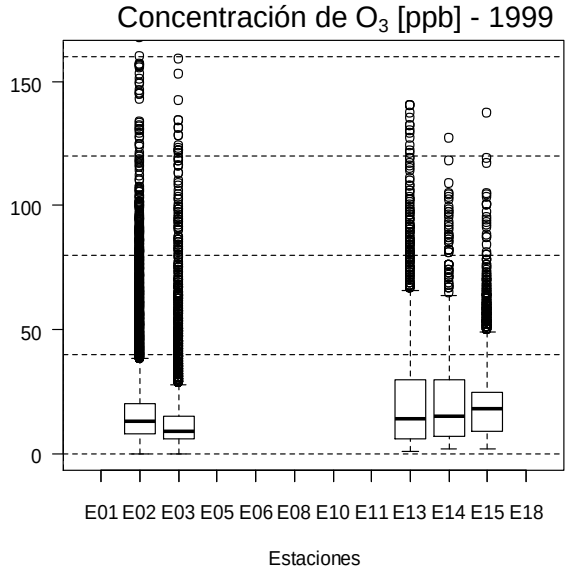
| Día | Año 2009 Hora | | | Año 2010 Hora | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 11:00 | 13:00 | 15:00 | 11:00 | 13:00 | 15:00 |
| 1 | 1,089.0 | 1,077.0 | 1,181.0 | 1,799.0 | 2,014.0 | 1,993.0 |
| 2 | 1,148.0 | 952.0 | 1,212.0 | 1,730.0 | 1,773.0 | 1,779.0 |
| 3 | 1,159.0 | 1,187.0 | 1,271.0 | 1,215.0 | 1,434.0 | 1,390.0 |
| 4 | 1,373.0 | 1,500.0 | 1,409.0 | 1,438.0 | 1,593.0 | 1,617.0 |
| 5 | 1,053.0 | 1,672.0 | 1,787.0 | NaN | NaN | NaN |
| 6 | 1,478.0 | 1,406.0 | 1,226.0 | 539.4 | 926.8 | 331.3 |
| 7 | 1,597.0 | 1,597.0 | 708.5 | 1,655.0 | 1,711.0 | 1,637.0 |
| 8 | 980.5 | 1,402.0 | 1,012.0 | 1,846.0 | 1,851.0 | 1,899.0 |
| 9 | 1,177.0 | 1,039.0 | 1,240.0 | 1,025.0 | 1,256.0 | 336.1 |
| 10 | 1,377.0 | 1,410.0 | 1,393.0 | 1,267.0 | 1,750.0 | 1,267.0 |
| 11 | 1,157.0 | 1,070.0 | 1,433.0 | 1,899.0 | 2,195.0 | 1,634.0 |
| 12 | 444.3 | 901.3 | 859.3 | NaN | NaN | NaN |
| 13 | 1,508.0 | 1,678.0 | 804.8 | 1,666.0 | 1,666.0 | 1,694.0 |
| 14 | 901.0 | 713.1 | 1,019.0 | 1,652.0 | 1,701.0 | 1,652.0 |
| 15 | 1,068.0 | 1,228.0 | 1,141.0 | 1,458.0 | 2,050.0 | 1,321.0 |
| 16 | 916.0 | 984.8 | 946.5 | 1,639.0 | 2,074.0 | 835.2 |
| 17 | 1,514.0 | 1,484.0 | 1,252.0 | 1,834.0 | 1,993.0 | 1,620.0 |

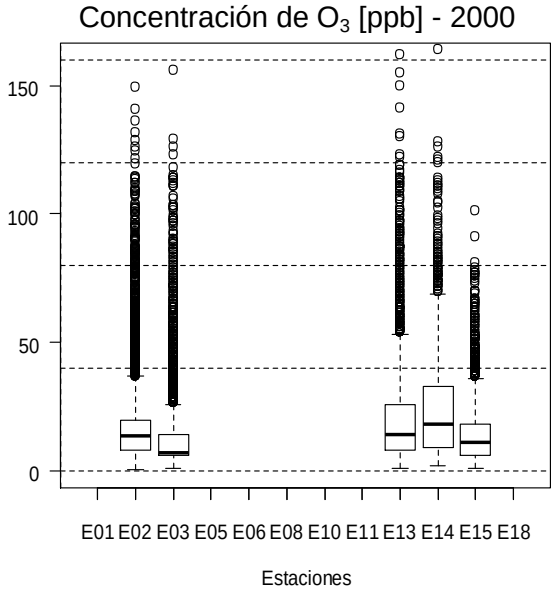
| Día | Año 2009 Hora | | | Año 2010 Hora | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **11:00** | **13:00** | **15:00** | **11:00** | **13:00** | **15:00** |
| 18 | 1,149.0 | 1,690.0 | 1,046.0 | 1,663.0 | 1,683.0 | 1,638.0 |
| 19 | 1,508.0 | 1,189.0 | 1,028.0 | 946.9 | 1,302.0 | 1,089.0 |
| 20 | 1,484.0 | 1,813.0 | 1,137.0 | NaN | NaN | NaN |
| 21 | 1,367.0 | 1,431.0 | 1,496.0 | 1,559.0 | 2,224.0 | 1,142.0 |
| 22 | 1,065.0 | 1,883.0 | 1,473.0 | 1,547.0 | 1,765.0 | 1,804.0 |
| 23 | 1,298.0 | 1,668.0 | 453.0 | 1,510.0 | 1,575.0 | 1,312.0 |
| 24 | 1,185.0 | 1,149.0 | 1,102.0 | 1,739.0 | 1,945.0 | 1,424.0 |
| 25 | 1,413.0 | 1,760.0 | 193.9 | 1,337.0 | 1,982.0 | 519.5 |
| 26 | 1,041.0 | 1,305.0 | 1,122.0 | 531.6 | 1,311.0 | 1,311.0 |
| 27 | 1,599.0 | 922.7 | 1,204.0 | 1,235.0 | 2,003.0 | 1,181.0 |
| 28 | 1,388.0 | 1,403.0 | 1,436.0 | 1,870.0 | 1,943.0 | 2,053.0 |
| **P25** | **1,067.3** | **1,075.3** | **1,017.3** | **1,267.0** | **1,593.0** | **1,181.0** |
| **Mediana** | **1,181.0** | **1,402.5** | **1,161.0** | **1,559.0** | **1,765.0** | **1,424.0** |
| **P75** | **1,429.3** | **1,614.8** | **1,301.5** | **1,730.0** | **1,993.0** | **1,652.0** |
| **DS** | **259.0** | **313.4** | **325.2** | **379.2** | **318.6** | **472.4** |
| **Promedio** | **1,229.9** | **1,339.8** | **1,128.1** | **1,464.0** | **1,748.8** | **1,379.2** |

## C. ANEXO III. Box Plot concentración promedia horaria de $O_3$

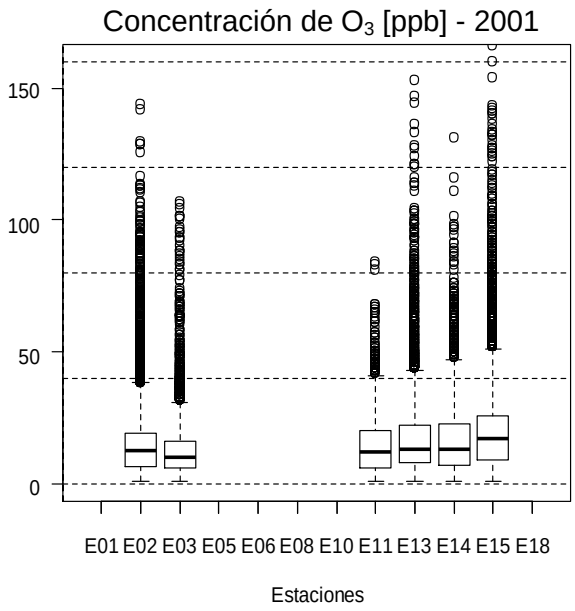


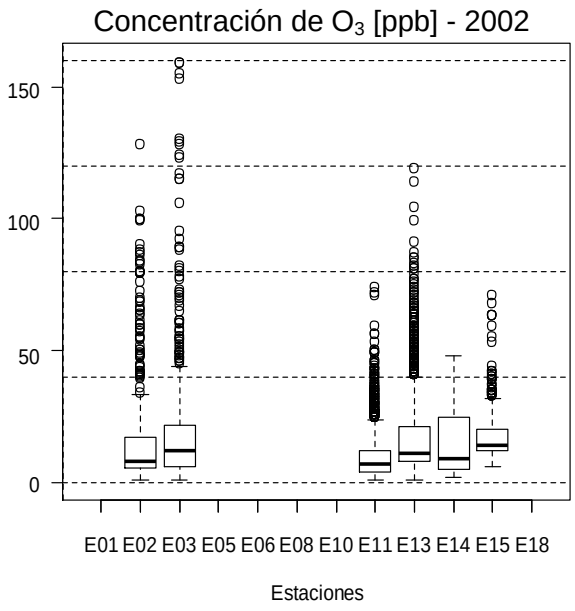



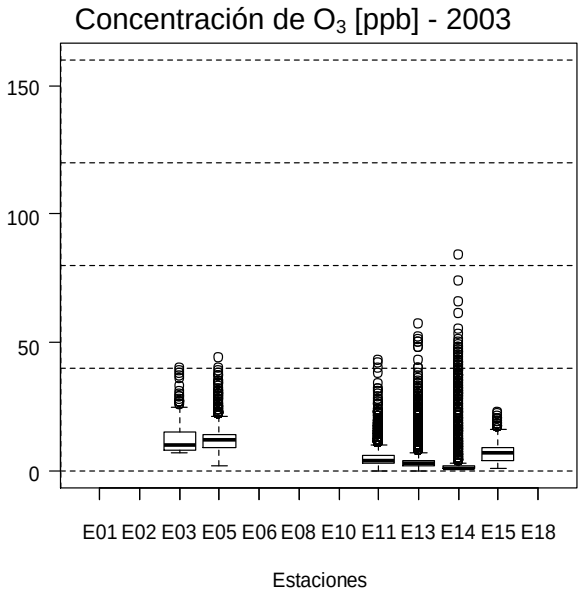



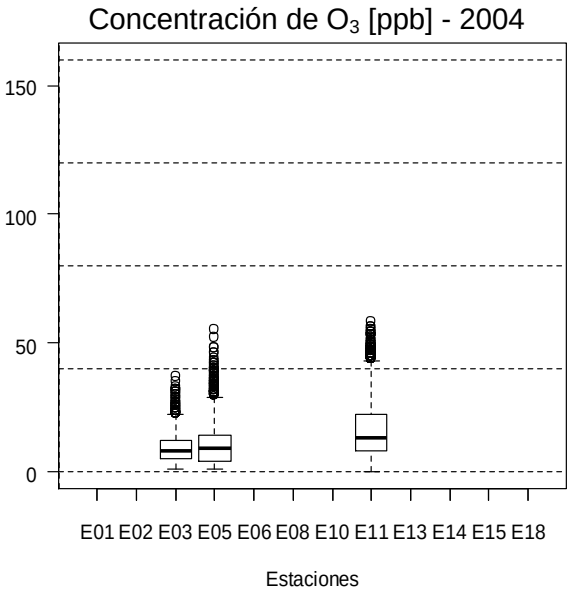




E01- Usaquén
E02- Sagrado Corazón
E03- Carvajal (Sony)
E05 - Parque Simón Bolívar -PSB
E06 - Las Ferias
E08 - Guaymaral
E10 - Chicó lago Sto Tomás
E11 - Suba (Corpas)
E13 - Puente Aranda
E14 - Fontibón
E15 - Cazucá
E18 - Tunal

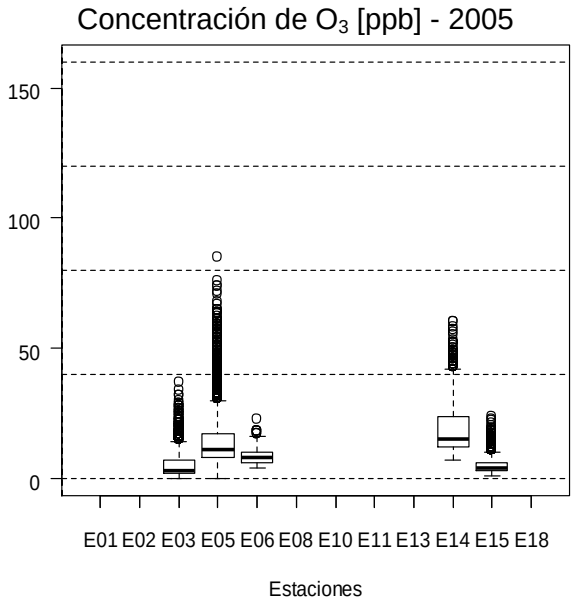


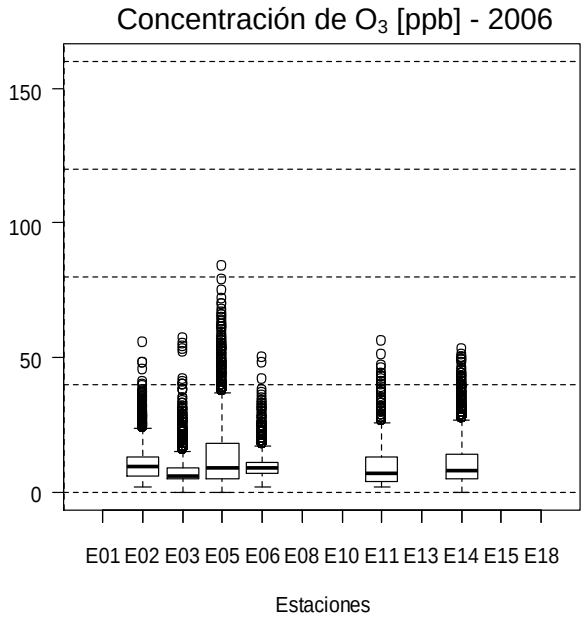



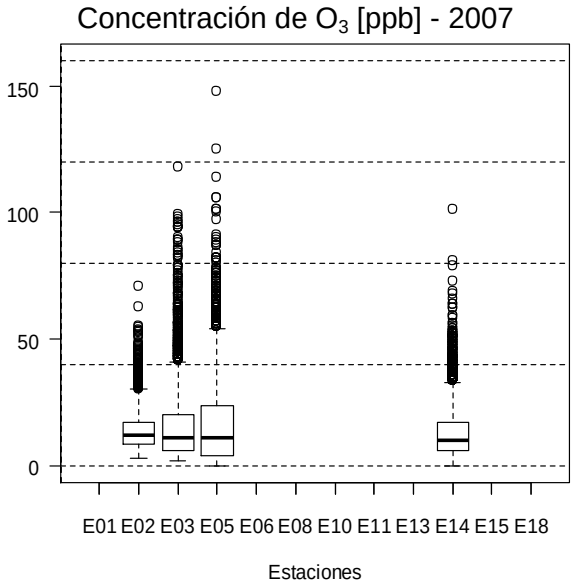



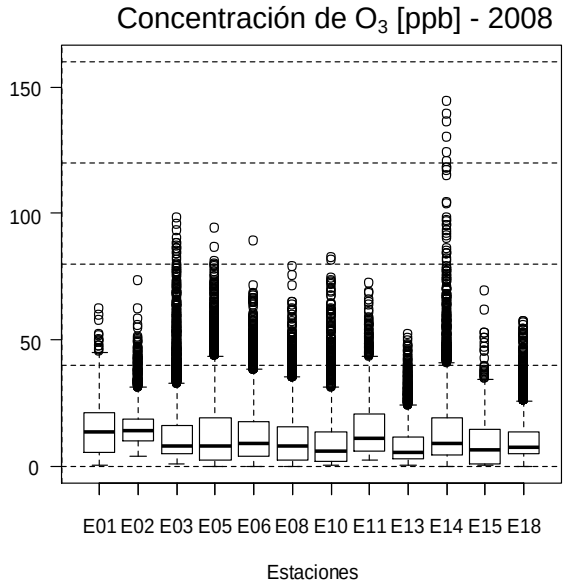




E01- Usaquén
E02- Sagrado Corazón
E03- Carvajal (Sony)
E05 - Parque Simón Bolívar -PSB
E06 - Las Ferias
E08 - Guaymaral
E10 - Chicó lago Sto Tomás
E11 - Suba (Corpas)
E13 - Puente Aranda
E14 - Fontibón
E15 - Cazucá
E18 - Tunal



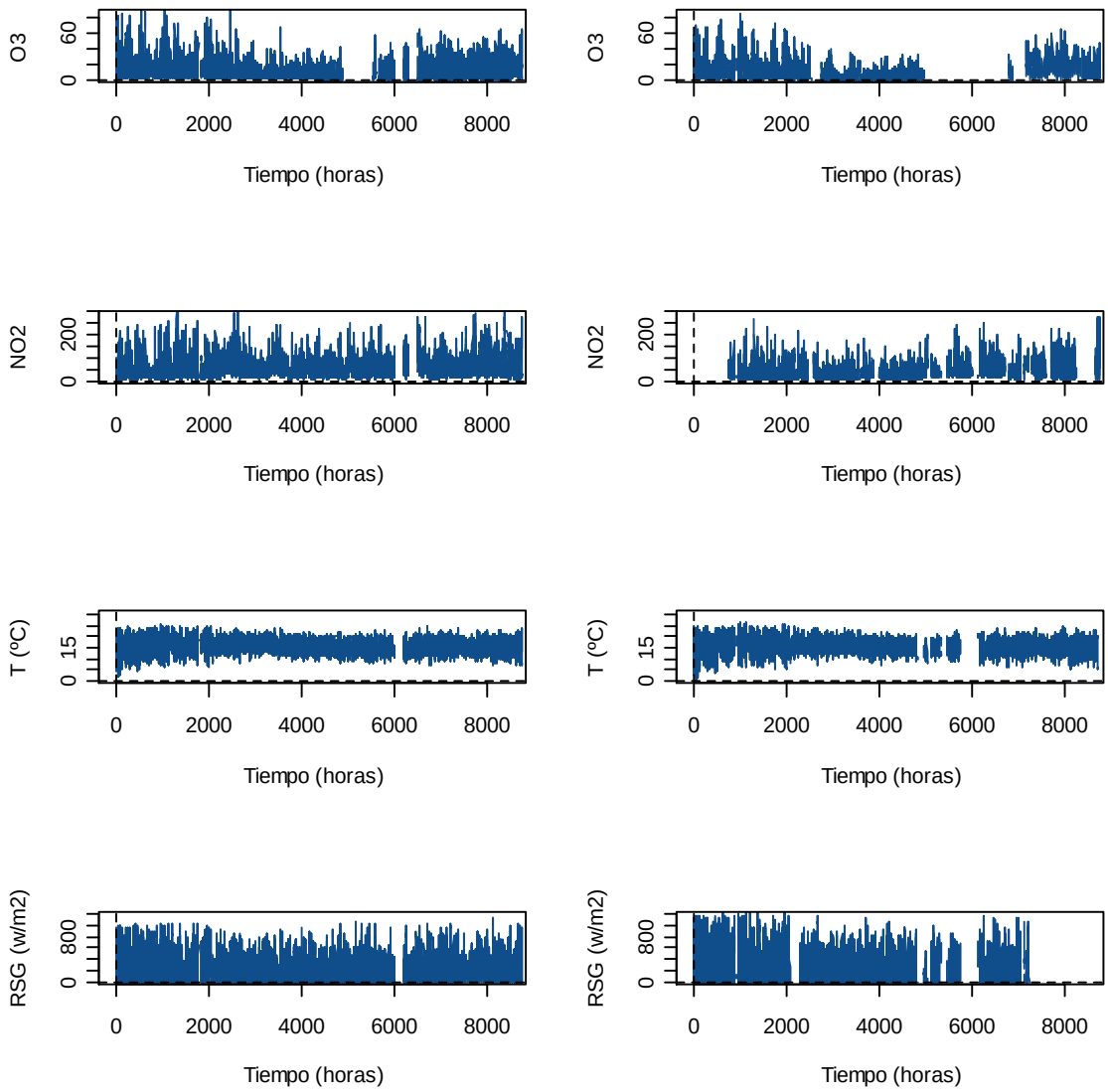



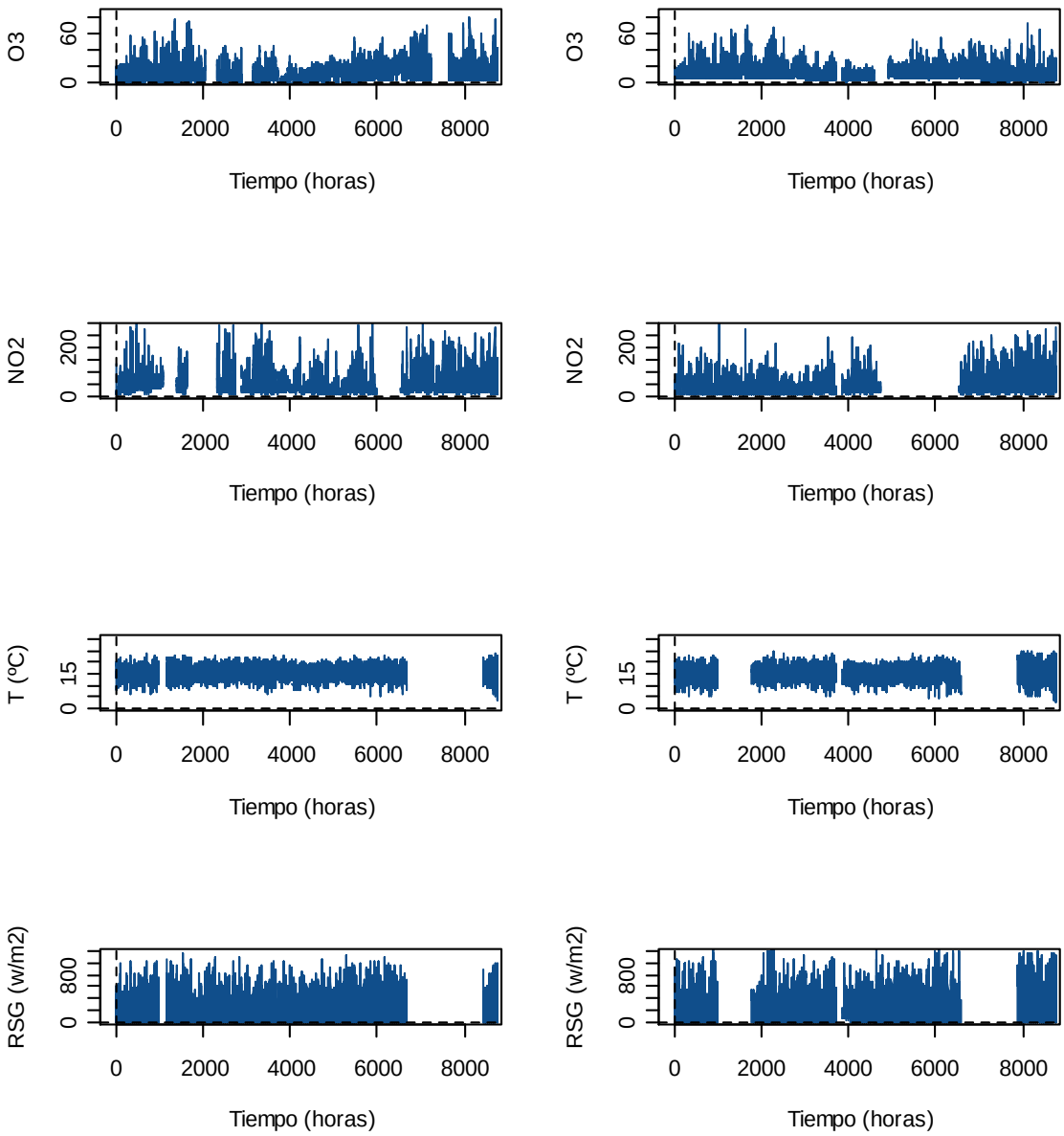

E01- Usaquén
E02- Sagrado Corazón
E03- Carvajal (Sony)
E05 - Parque Simón Bolívar -PSB
E06 - Las Ferias
E08 - Guaymaral
E10 - Chicó lago Sto Tomás
E11 - Suba (Corpas)
E13 - Puente Aranda
E14 - Fontibón
E15 - Cazucá
E18 - Tunal

# D. ANEXO IV. Gráficos series temporales $O_3$ [ppb] – $NO_2$ [ppb] – T [°C] –RSG [w/m$^2$]

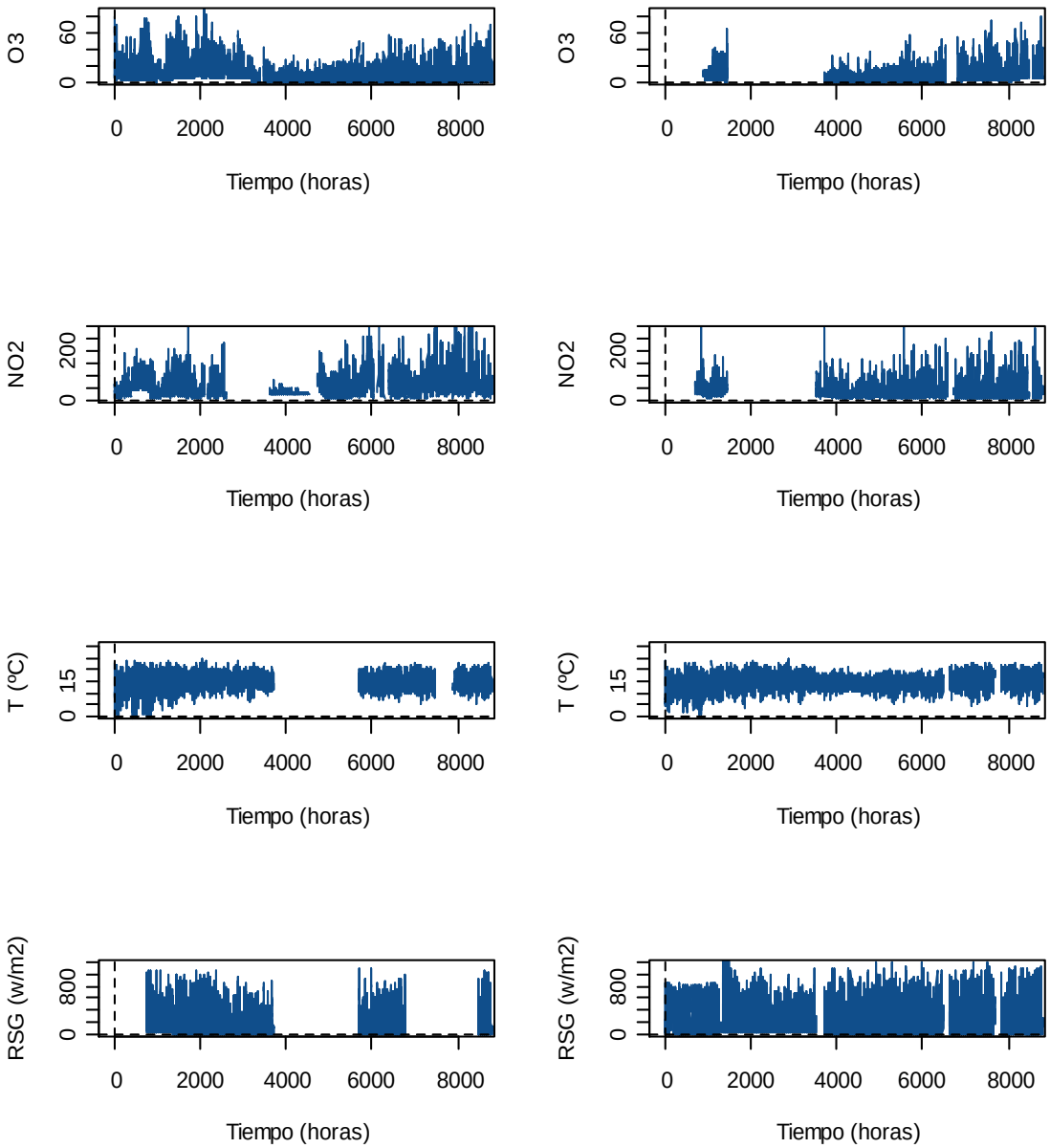
***Estación Guaymaral y Parque Simón Bolívar –PSB – Año 2010***



***Estación Guaymaral y Parque Simón Bolívar -PSB – Año 2009***



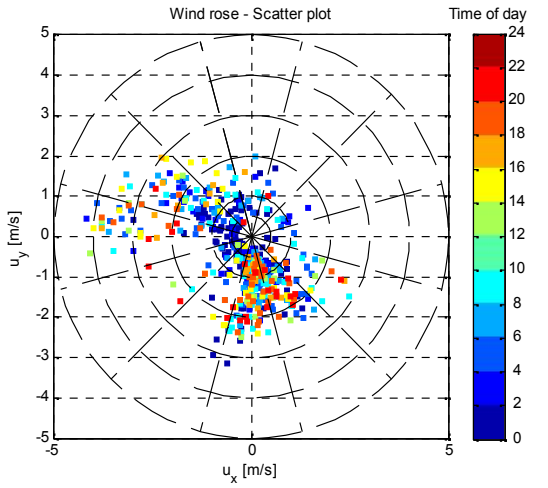
***Estación Guaymaral y Parque Simón Bolívar-PSB – Año 2008***



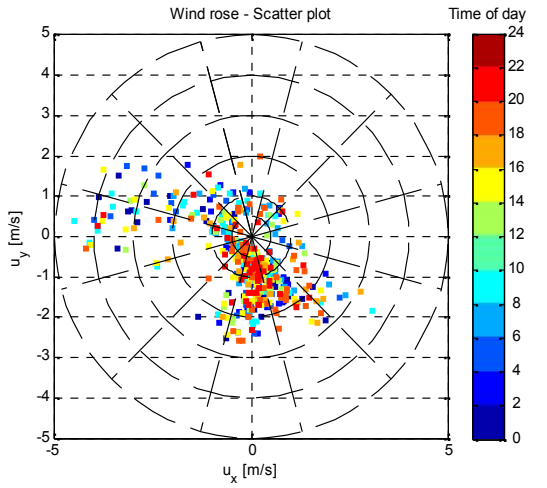
E. **ANEXO V. Rosas de viento, estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá –RMCAB; Tunal, Puente Aranda y Guaymaral**

## Rosa de Vientos Tunal

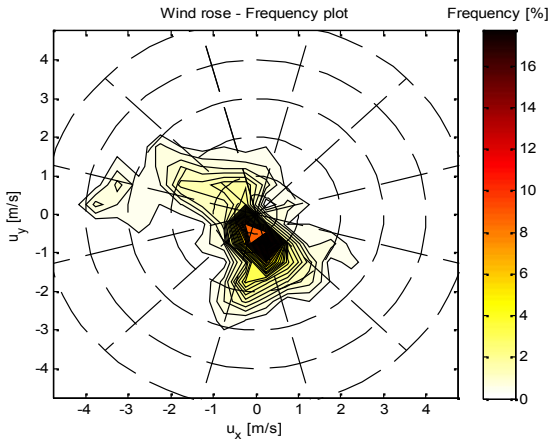
### Scatter Plot febrero 2009



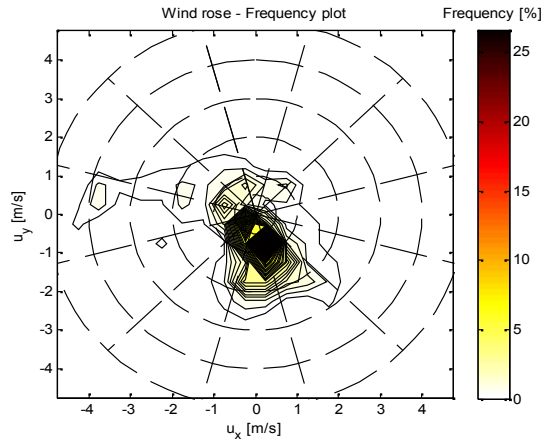

### Scatter Plot febrero 2010

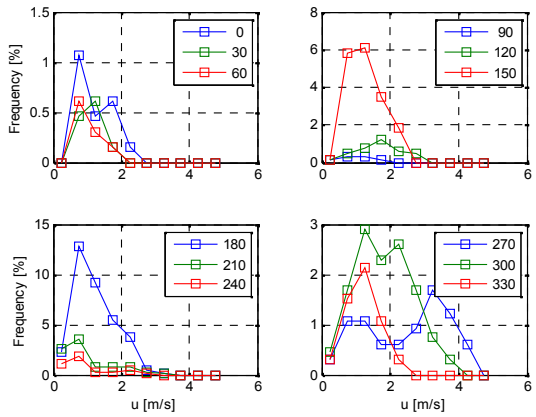


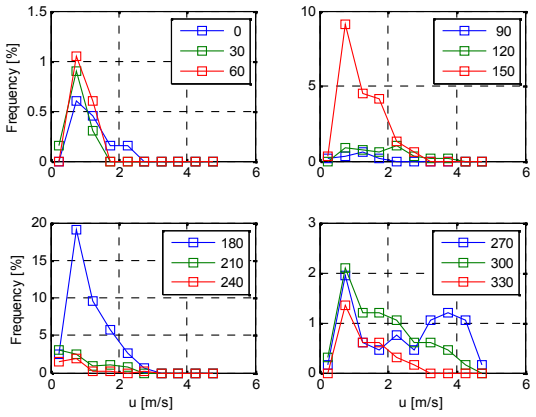

### Frecuencias febrero 2009



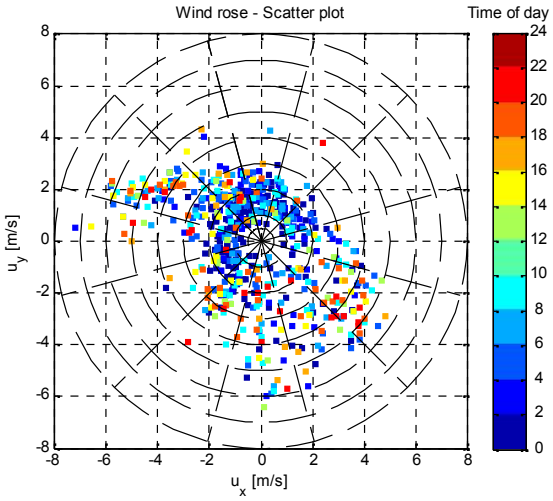
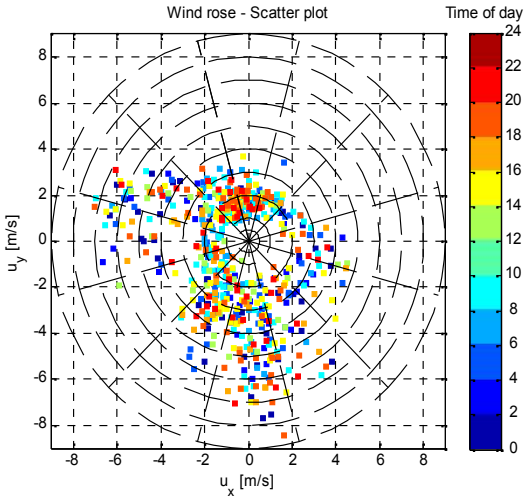
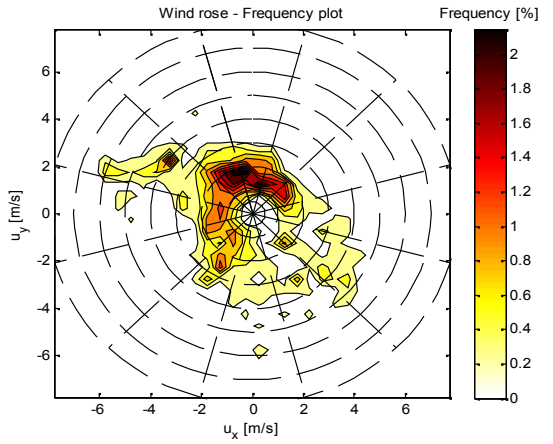
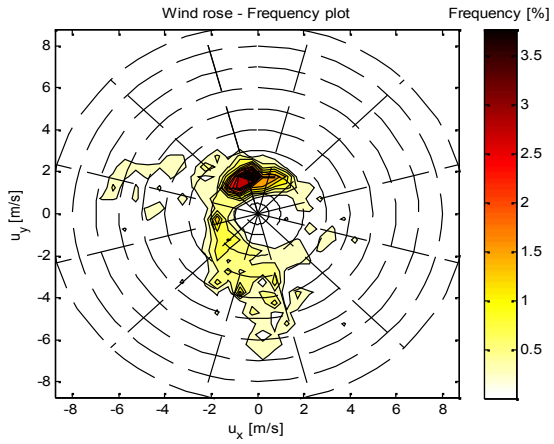
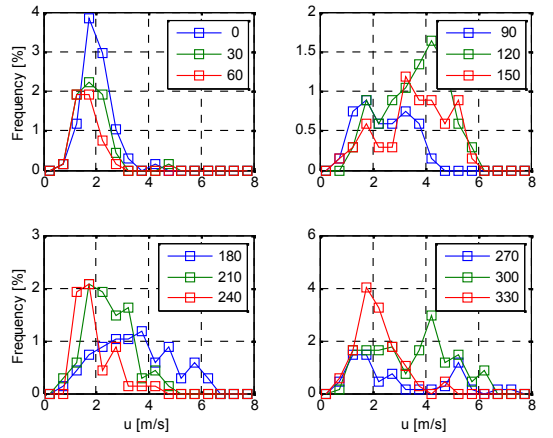
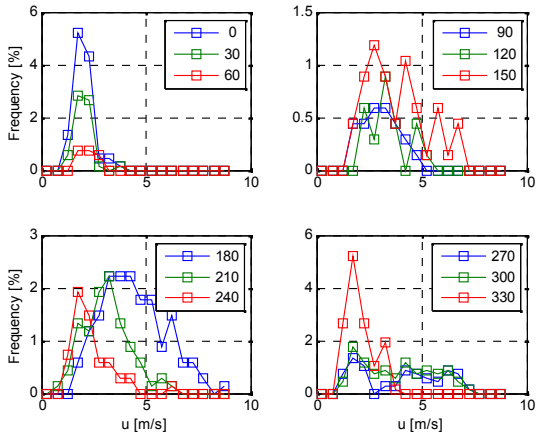

### Frecuencias febrero 2010



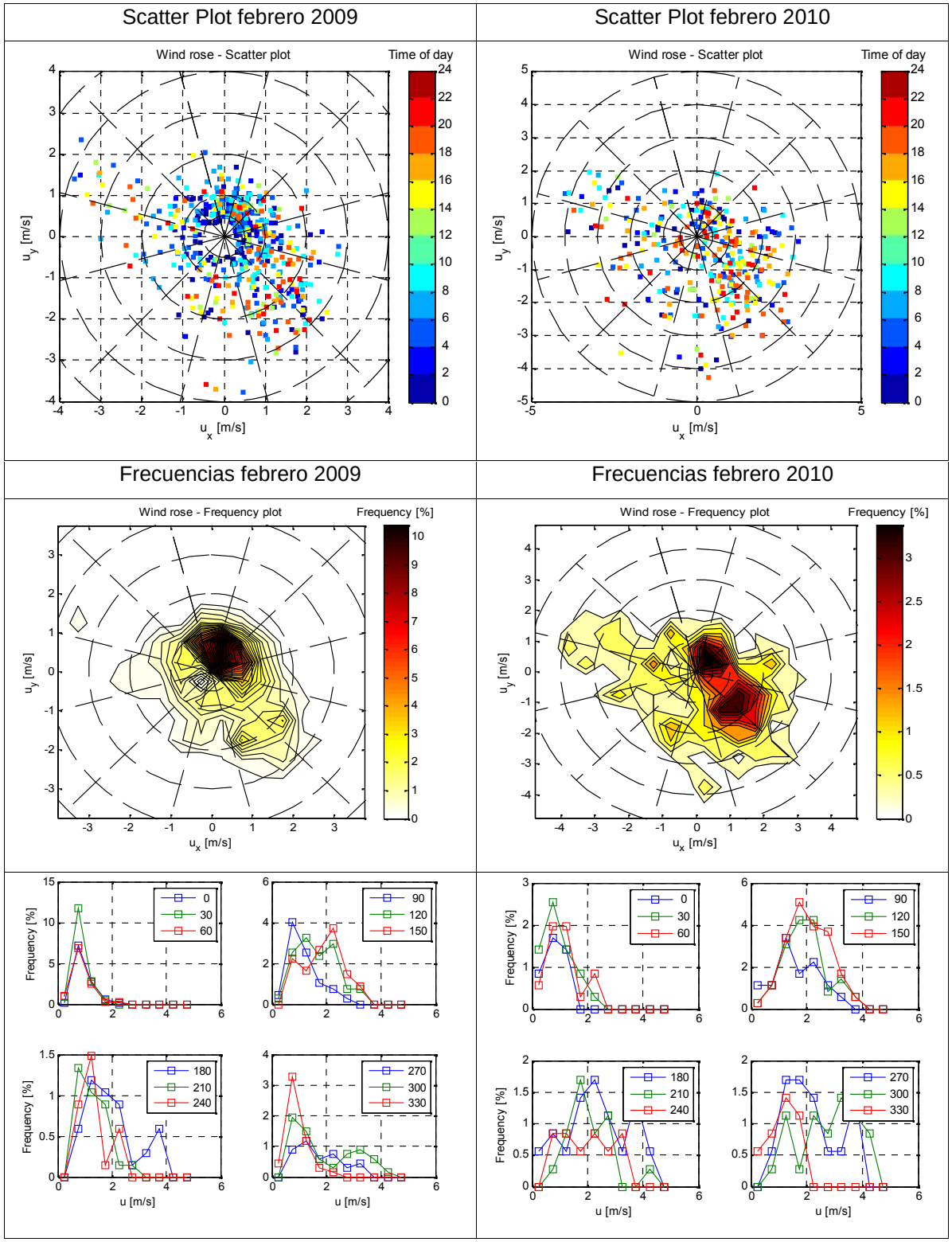




## Rosa de Vientos Puente Aranda

| Scatter Plot febrero 2009 | Scatter Plot febrero 2010 |
|---|---|
|   |   |
| **Frecuencias febrero 2009** | **Frecuencias febrero 2010** |
|   |   |
|   |   |

Rosa de Vientos Guaymaral


Scatter Plot febrero 2009
Scatter Plot febrero 2010
Wind rose - Scatter plot
Time of day
u_x [m/s]
u_y [m/s]
Frecuencias febrero 2009
Frecuencias febrero 2010
Wind rose - Frequency plot
Frequency [%]
Frequency [%]
u [m/s]
0
30
60
90
120
150
180
210
240
270
300
330