

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Ciencias e Ingeniería

**Identificación del efecto fin de semana en la calidad de aire de Quito-
Ecuador**

Elizabeth Carolina Franco Calisto

René Parra, Ph. D., Director de Tesis

Tesis de grado presentada como requisito para la obtención del título de
Ingeniera Ambiental

Quito, mayo de 2015

Universidad San Francisco de Quito

Colegio de Ciencias e Ingeniería

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

Identificación del efecto fin de semana en la calidad de aire de Quito-Ecuador

Elizabeth Carolina Franco Calisto

René Parra, Ph. D.
Director de Tesis y
Miembro del Comité de Tesis

Ródney Peñafiel, Dr. Ing.
Miembro del Comité de Tesis

Pablo Dávila, Ph. D.
Miembro del Comité de Tesis

Ximena Córdova, Ph. D.
Decana de la Escuela de Ingeniería
Colegio de Ciencias e Ingeniería

Quito, mayo de 2015

© DERECHOS DE AUTOR.

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma:

Nombre: Elizabeth Carolina Franco Calisto

C.I: 1714911557

Fecha: Quito, mayo de 2015

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. René Parra por su guía, paciencia y apertura durante la realización de la tesis.

A mis padres por el apoyo incondicional que me brindan, sobre todo durante la realización de esta tesis.

A todas las instituciones que colaboraron con información para poder elaborar este estudio.

RESUMEN

El Efecto Fin de Semana es un fenómeno que puede presentarse en zonas urbanas, caracterizado por un incremento de las concentraciones de O_3 durante los días de fin de semana, a pesar de que las emisiones de sus precursores (NO_x y VOC) son típicamente menores. El estudio del Efecto Fin de Semana es relevante, para entender el comportamiento de los contaminantes; y por ende, para la gestión de la calidad del aire. A fin de identificar este fenómeno en Quito, se procesaron y analizaron los registros horarios de la calidad del aire, de los años 2005 a 2012, de 8 estaciones automáticas de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire. Se elaboraron para cada año y estación, 3 perfiles medios diarios de las concentraciones de CO, NO_2 , $MP_{2.5}$ y O_3 , diferenciando los días laborables, sábados y domingos. Se obtuvieron además las concentraciones medias octohorarias de O_3 , para cuantificar el porcentaje de variación, de sábados y domingos con respecto a las concentraciones de lunes a viernes. Para todo el periodo analizado, los perfiles de CO, NO_2 y $MP_{2.5}$ de la estación Belisario indican un descenso en las concentraciones de sábados y domingos, como consecuencia de un menor actividad vehicular. Sin embargo, para el O_3 las concentraciones son mayores en sábados y domingos. Los porcentajes de variación de las concentraciones octohorarias de O_3 de los domingos, con respecto a los días laborables, son consistentemente mayores en Belisario (19.7 – 31.1%) y Centro (11.7 – 18.4%). El Efecto Fin de Semana se presenta con claridad en la zona de influencia de estas dos estaciones. Con el fin de evaluar la importancia en Quito, de las hipótesis que explican el Efecto Fin de Semana es necesario incorporar al análisis nuevos registros, desarrollar inventarios de emisiones horarios que consideren el cambio de los patrones de emisión durante la semana y simular la calidad del aire mediante modelos de transporte químico.

ABSTRACT

The Weekend Effect is a phenomenon that occurs in urban areas, and it is characterized by increased concentrations of O_3 during weekend days, although emissions of its precursors (NO_x and VOC) are typically lower. The study of the Weekend Effect is relevant for understanding the behavior of pollutants; and hence, for the management of air quality. In order to identify this phenomenon in Quito, the hourly data of the air quality records of the period 2005-2012, from 8 automatic stations of the Air Quality Monitoring Network of Quito, were processed and analyzed. For each year and station, 3 mean profiles were obtained for the concentrations of CO, NO_2 , $MP_{2.5}$ and O_3 , differentiating work days, Saturdays and Sundays. In addition, the mean concentrations during 8 hours were obtained for O_3 , to quantify the percentage of variation of Saturdays and Sundays in relation to work days. For all the analyzed years, the profiles of CO, NO_2 , $MP_{2.5}$ in the Belisario station, indicate a decline of concentrations on Saturdays and Sundays, as a consequence of less traffic activity. However, the O_3 concentrations are higher on Saturday and Sundays. The percentage of variation of the mean 8 hours concentration of O_3 on Sundays in relation to work days, are consistently higher in the Belisario (19.7 – 31.1%) and Centro (11.7 – 18.4%) stations. The Weekend Effect is clearly present in the area of influence of these two stations. In order to evaluate the importance in Quito of the hypotheses that explain the Weekend Effect, it is necessary to incorporate new records in the analysis, the development of hourly emissions inventories that consider the change of patterns during the week and simulate the air quality dynamic using chemical transport models.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	12
1.1 Antecedentes	12
1.2 Objetivos	13
1.2.1 Objetivo General	13
1.2.2 Objetivos Específicos	14
1.3 Área de estudio.....	14
1.4 Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito (REMMAQ).....	15
1.5 Infraestructura de la REMMAQ.....	16
1.5.1 Subred Automática (RAUTO)	16
1.5.2 Subred Semiautomática	18
1.5.3 Subred Meteorológica (REMET)	18
1.5.4 Subred de Monitoreo Pasivo (REMPA)	18
1.5.5 Subred de Depósito (REDEP)	19
1.6 Calidad de los datos registrados por la REMMAQ	19
2. MARCO LEGAL Y GUÍAS DE LA ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD	21
2.1 Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria del Ministerio de Ambiente (TULSMA).....	20
2.2 Norma de Calidad del Aire Ambiente (NCAA).....	20
2.2.1 Objetivo de la Norma de Calidad del Aire Ambiente	21
2.2.2 Contaminantes criterio del aire ambiente	21
2.2.3 Condiciones de referencia	23
2.3 Guías Internacionales	23
3. FUNDAMENTO TEÓRICO	25
3.1 El Efecto Fin de Semana	25
3.2 Contaminantes del aire	26
3.3 Monóxido de carbono (CO).....	26
3.3.1 Química del CO	26
3.3.2 Efectos sobre la salud	26
3.3.3 Fuentes antropogénicas del CO	26
3.4 Dióxido de nitrógeno (NO ₂).....	27
3.4.1 Química del NO₂	27

3.4.2 Efectos sobre la salud	28
3.4.3 Fuentes antropogénicas del NO₂	28
3.5 Material particulado (PM _{2.5})	28
3.5.1 Efectos sobre la salud	29
3.5.2 Fuentes antropogénicas del PM_{2.5}	29
3.6 Ozono (O ₃)	29
3.6.1 Efectos sobre la salud	30
3.6.2 Fuentes antropogénicas de los precursores del O₃	30
3.6.3 O₃ y sus precursores	30
3.7 La relación VOC/NO _x	30
3.7.1 Zona limitada por VOC	31
3.7.2 Zona limitada por NO_x	31
3.8 Fuentes antropogénicas de los precursores de O ₃ dentro del DMQ.....	32
3.9.1 Reducción del NO_x	34
3.9.2 Perfil temporal de las emisiones de NO_x (NO_x timing)	34
3.9.3 Acumulación de precursores de O₃ en el suelo	34
3.9.4 Acumulación de precursores de O₃ en las capas altas de la atmósfera	35
3.9.5 Incremento de emisiones durante el fin de semana	35
3.9.6 Incremento de la radiación solar en superficie a causa de la disminución de las concentraciones de material particulado	35
3.9.7 Menor destrucción de O₃	36
4. MÉTODO	37
4.1 Información de calidad del aire	37
4.2 Procesamiento de datos	37
4.2.1 Perfil medio diario de las concentraciones horarias de contaminantes	38
4.2.2 Variación de las concentraciones octohorarias de O₃	38
5. RESULTADOS	40
6 DISCUSIÓN	45
7. CONCLUSIONES	48
7.1 Estaciones	48
7.1.1 Carapungo	48
7.1.2 Cotocollao	48
7.1.3 Belisario	48

	10
7.1.4 Centro	49
7.1.5 El Camal	50
7.1.6 Guamaní	50
7.1.8 Los Chillos	51
7.2 Propuestas de Continuidad	52
8. BIBLIOGRAFÍA	53
9. ANEXO A	57
ANEXO B	64
Variación de la concentración media octohoraria de O_3 , de días sábados con respecto a los días laborables (L-V). Carapungo.	64
Variación de la concentración media octohoraria de O_3 , de días domingos con respecto a los días laborables (L-V). Carapungo.	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla1.- Ubicación de las ocho estaciones automáticas.....	18
Tabla2.- Disponibilidad de sensores por estación automática.....	19
Tabla 3.- Concentraciones máximas permitidas de cada contaminante dentro de la Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire Ambiente	22
Tabla 4.-Niveles máximos permisibles para contaminantes no convencionales con efectos tóxicos y/o cancerígenos en el aire ambiente	23
Tabla 5.- Concentraciones guía de la OMS	24
Tabla 6.-Emisiones anuales dentro del DMQ en el año 2007 (t/año).....	33
Tabla 7.- Emisiones anuales dentro del DMQ en el año 2007 (porcentaje)	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Ubicación del Distrito Metropolitano de Quito.....	14
Figura 2.- Administraciones zonales del DMQ.....	15
Figura 3.- Ubicación de las ocho estaciones fijas dentro del DMQ	17
Figura 4.- Composición del material particulado	29
Figura 5.- Isopletas de O_3 , a partir de diferentes concentraciones de VOC y NO_x	32
Figura 6.- Perfil de concentración horario promedio anual año 2012 en Belisario.....	42
Figura 7.- Perfil de concentración horario promedio anual año 2012 en Centro	43
Figura 8.- Comparación de variación de concentración media octohorario de O_3 de los días sábados con respecto a los días laborables	44
Figura 9.- Comparación de la variación de concentración media octohorario de O_3 de los días domingos con respecto a los días laborables	44

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La contaminación ambiental se refiere a la presencia de uno o más contaminantes en el aire, agua y suelo, que afectan de manera adversa a sus características físicas, químicas y biológicas, debido a concentraciones que pueden afectar a la salud pública y el bienestar de la población (Heinke y Glynn, 1996).

En las últimas décadas se han dado varios acontecimientos que han generado graves problemas ambientales, que rebasan lo que la naturaleza es capaz de asimilar. Uno de estos problemas es el aumento de la población urbana, debido a la migración desde zonas rurales. El aumento poblacional urbano a su vez va acompañado de nuevos procesos industriales, de transporte, de consumo de energía, entre otros. Estos acontecimientos generan mayores emisiones atmosféricas, vertidos y residuos; que son perjudiciales para el medio ambiente.

La industrialización y el aumento de la población urbana han provocado una alta demanda de recursos naturales como el agua, madera, suelos y minerales; lo que ha provocado particularmente el incremento de la contaminación del aire (Heinke y Glynn, 1996).

La contaminación del aire se ha convertido en un tema de preocupación, sobre todo en los sectores urbanos, ya que tiene la característica de ser aguda, acumulativa y crónica. Se le considera una amenaza para el ser humano, ya que la exposición a la contaminación del aire causa graves problemas a la salud, como enfermedades respiratorias y afecciones cardíacas (OPS, 2010).

La contaminación del aire tiene distintos orígenes, que comprenden desde fuentes naturales hasta industriales. Una de las fuentes relevantes es el transporte motorizado, que típicamente es responsable de la emisión del mayor porcentaje de óxidos de nitrógeno (NO_x), compuestos orgánicos volátiles (VOC) y material particulado fino ($\text{PM}_{2.5}$) (Falagan, 2005). Los NO_x y VOC, en presencia de radiación solar, promueven la formación de ozono (O_3) troposférico, contaminante secundario con efectos en la salud, materiales y vegetación; cuyo comportamiento ha dado origen al llamado Efecto de Fin de Semana.

El Efecto Fin de Semana es un fenómeno detectado hace más de 40 años, en las zonas urbanas de distintos países. Se presenta como un incremento en las concentraciones de O_3 durante los días no laborables en comparación con las concentraciones en días laborables. (Pollack et al., 2012)

Es importante saber que el O_3 y sus precursores (NO_x y VOC), se comportan de manera dinámica y compleja. La cantidad de O_3 que se forma no siempre responde de manera lineal a los cambios de las concentraciones de NO_x y VOC. Este comportamiento causa dificultad en la aplicación de controles para evitar altos niveles de O_3 . La formación del O_3 además depende de los niveles de radiación solar, por lo que su concentración varía según las horas del día, la localización y la época del año (Seguel et al., 2012).

Otro factor que potencialmente interviene en el efecto fin de semana es la disminución del contaminante $PM_{2.5}$ durante los fines de semana, que se da por la disminución en la circulación de vehículos a diesel. En fines de semana soleados, al haber menores concentraciones de $PM_{2.5}$, hay mayores niveles de radiación solar, lo cual promueve a su vez, una mayor formación de O_3 en la tropósfera (Blier et al., 1999).

La identificación y estudio del Efecto Fin de Semana es relevante, para entender el comportamiento de los contaminantes del aire; y por ende, para una adecuada gestión de la contaminación atmosférica.

En el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), se monitorea la calidad del aire desde el año 2004, por medio de la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico (REMMAQ). Entre otros objetivos, esta información permite conocer el cumplimiento de la Norma de Calidad del Aire Ambiente (NCAA). La cantidad y fiabilidad de estos registros constituye la principal referencia para analizar y estudiar el comportamiento de los contaminantes del aire en Quito.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Analizar las concentraciones de O_3 , NO_2 , $PM_{2.5}$ y CO en 8 estaciones automáticas de la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico, para identificar el Efecto Fin de Semana en Quito.

1.2.2 Objetivos Específicos

- 1.- Analizar el comportamiento de los contaminantes (O_3 , NO_2 , $PM_{2.5}$ y CO) que participan en el Efecto Fin de Semana.
- 2.- Identificar las estaciones automáticas en las que se presenta el Efecto Fin de Semana.
- 3.- Evaluar la variación de las concentraciones de O_3 de los sábados y domingos, con respecto a los días laborables.

1.3 Área de estudio

El DMQ se ubica en la hoya del Guayllabamba, en las laderas orientales del volcán Pichincha. Cuenta con una superficie de 4235 km² aproximadamente. Posee un relieve irregular y su ubicación es Ecuatorial (Figura 1) (Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, 2011).

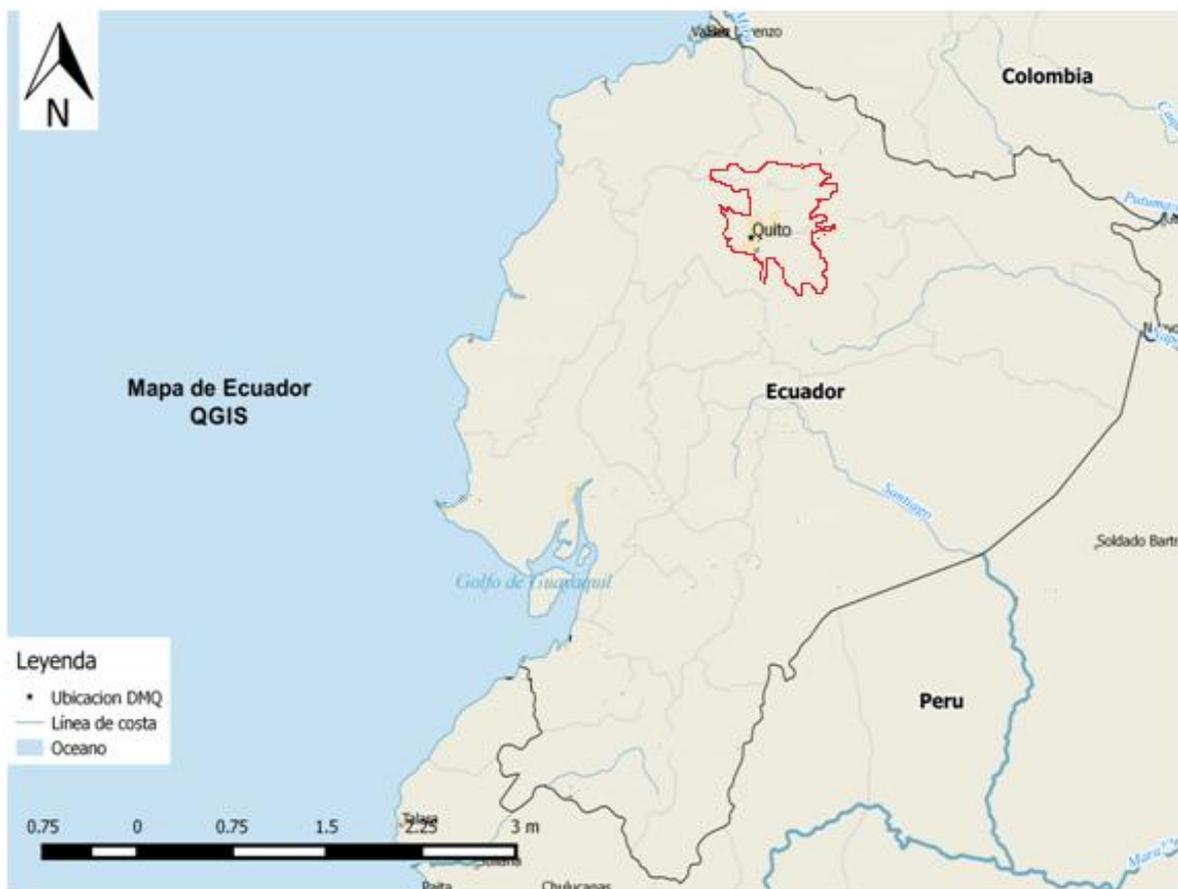


Figura 1.-Ubicación del Distrito Metropolitano de Quito

El DMQ presenta dos estaciones, una seca y una lluviosa. La estación seca típicamente va desde junio a septiembre, mientras que la lluviosa va de octubre a mayo, habiendo un

descenso de lluvia en diciembre. Quito está ubicado a una altura de 2815 msnm y su temperatura promedio es de 14 °C (INAMHI, 2014).

El territorio del DMQ se divide en ocho administraciones zonales, las cuales tienen 65 parroquias (Figura 2) (Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, 2011).

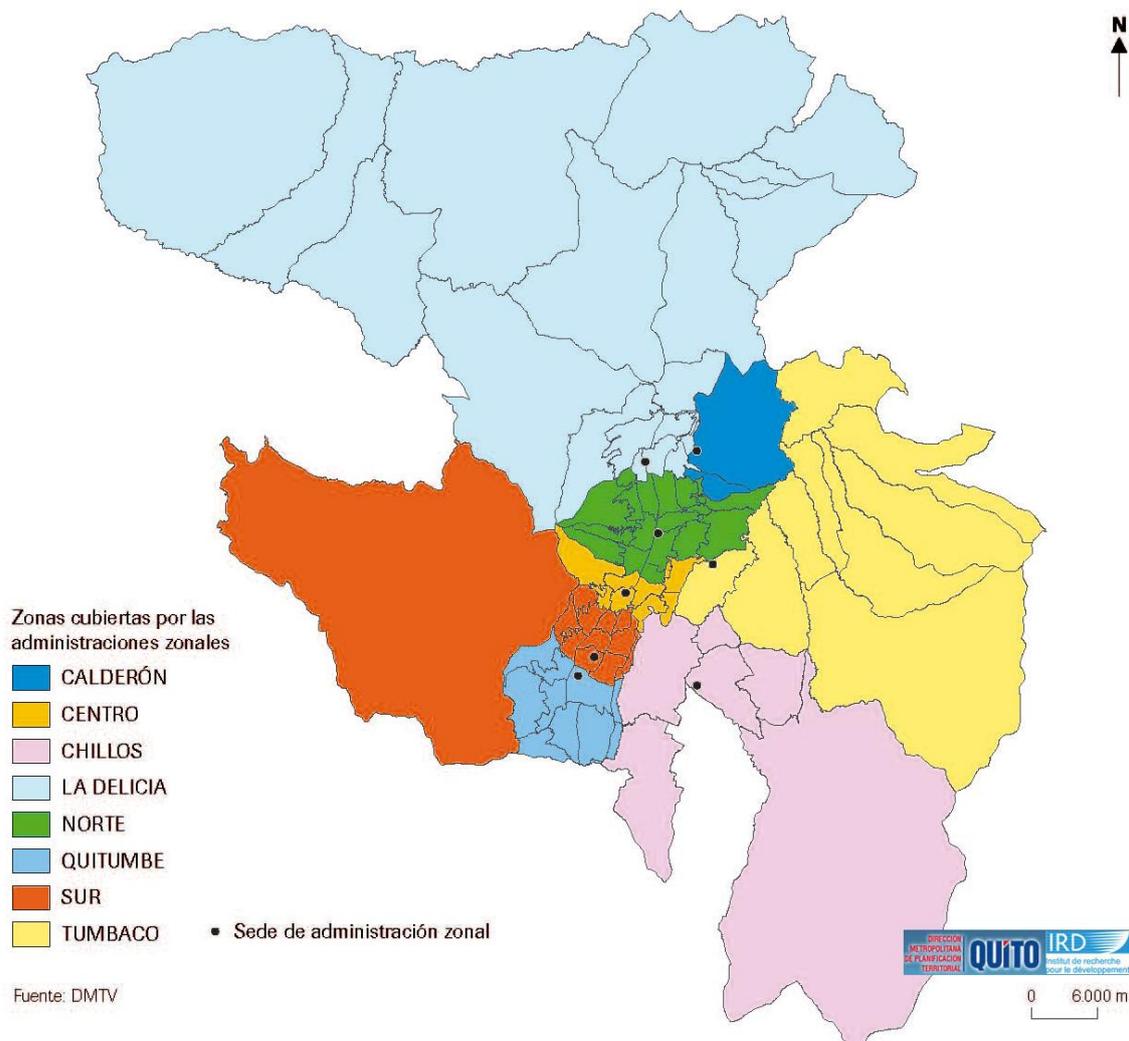


Figura 2.- Administraciones zonales del DMQ (Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, 2011).

1.4 Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito (REMMAQ)

La REMMAQ fue creada por la Empresa de Desarrollo del Centro Histórico (ECH) en el año 2002. En el año 2004 la red pasó a ser gestionada por la Corporación para el Mejoramiento del Aire de Quito (CORPAIRE), hasta el 2010. En la actualidad la REMMAQ es manejada por la Secretaría de Ambiente del Municipio de Quito. (Secretaría de Ambiente, 2012).

El objetivo de la REMMAQ es vigilar los niveles de contaminación en el aire del DMQ, y a su vez, proveer información para:

- Verificar el cumplimiento de la Norma de Calidad del Aire Ambiente (NCAA).
- Analizar la tendencia de los contaminantes del aire y compararlos con las guías de la Organización Mundial de la Salud (OMS).
- Planificar, formular y proponer políticas ambientales para el mejoramiento de la calidad del aire.
- Comprobar la efectividad de las normas y políticas ambientales propuestas para la reducción de los niveles de contaminación del aire.
- Identificar los sitios en los cuales los niveles de contaminación de aire superan los límites establecidos en la NCAA.
- Determinar el comportamiento y dinámica de los contaminantes del aire dentro del DMQ.

La REMMAQ empieza su funcionamiento desde el año 2003, y cuenta con información validada desde el año 2004. Para la localización de las estaciones se utilizaron las recomendaciones de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), y de la Organización Meteorológica Mundial (Secretaría de ambiente, 2012).

1.5 Infraestructura de la REMMAQ

La REMMAQ actualmente cuenta con sensores que registran la contaminación del aire y las principales variables meteorológicas. Se compone de las siguientes subredes: automática (RAUTO), semiautomática, de monitoreo pasivo (REMPA), de depósito (REDEP) y de meteorología (REMET).

1.5.1 Subred Automática (RAUTO)

La RAUTO posee ocho estaciones automáticas fijas (Figura 3), que están equipadas con analizadores automáticos que miden los siguientes contaminantes: monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), ozono (O₃), material particulado con diámetro menor a 10 micras (PM₁₀) y material particulado con diámetro menor a 2.5 micras (PM_{2.5}). La Tabla 1 indica las coordenadas y la dirección de la localización de las estaciones automáticas.

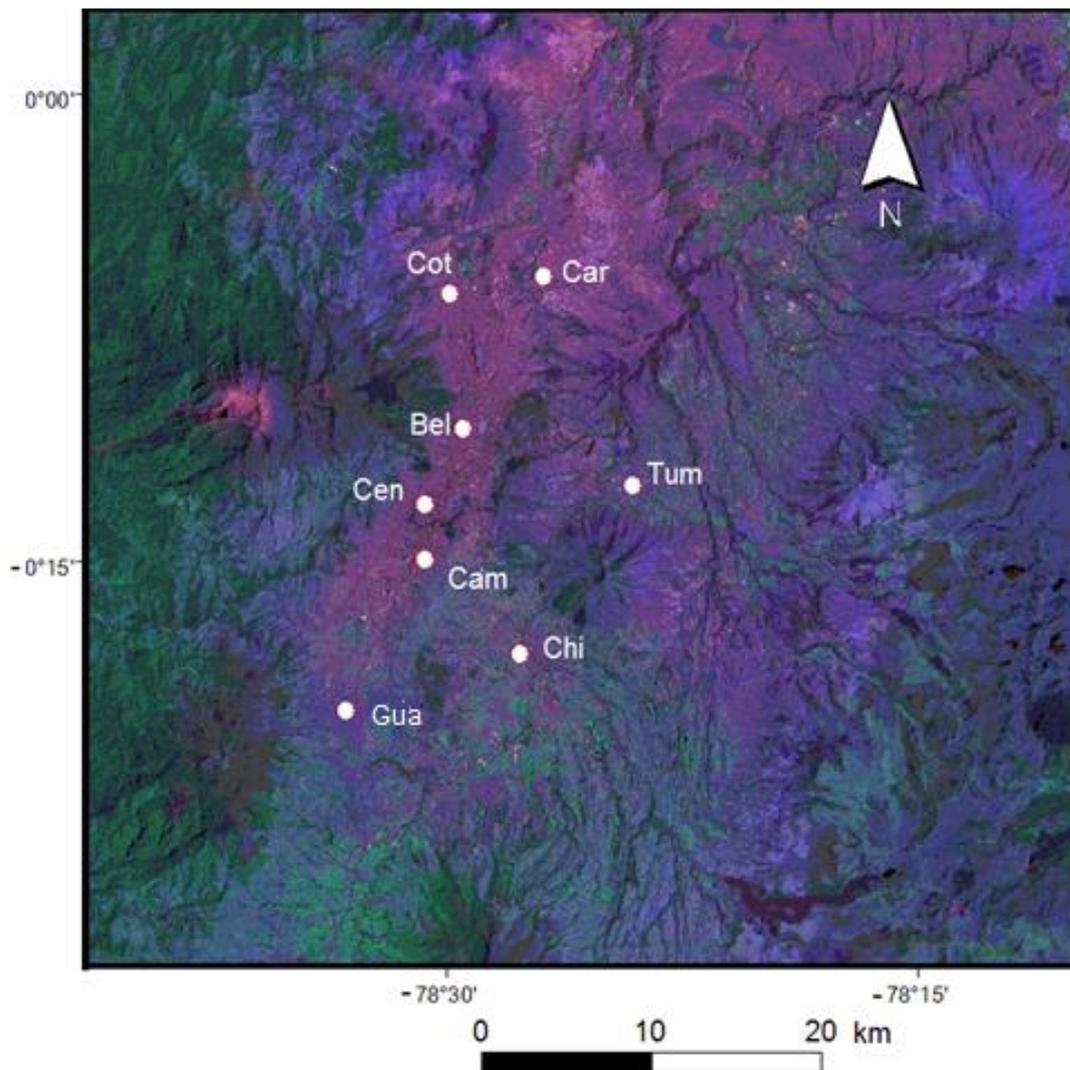


Figura 3.- Ubicación de las ocho estaciones automáticas de la REMMAQ

Hay una novena estación automática (Jipijapa), que se localiza en el edificio en donde funciona la Secretaría de Ambiente. No obstante, y de acuerdo a lo indicado por los técnicos de la REMMAQ, los sensores de la mencionada estación se utilizan como respaldo para sustituir temporalmente a los sensores de las otras estaciones, en caso de avería. Por este motivo, la estación Jipijapa presenta periodos sin registros, por lo que su inclusión en los análisis de la calidad del aire es difícil. Por este motivo, la mencionada estación no ha sido considerada para identificar el Efecto Fin de Semana.

Tabla 1.- Ubicación de las ocho estaciones de monitoreo automático de la REMMAQ

Código	Nombre	Altitud (msnm)	Dirección	Coordenadas (longitud, latitud)
Car	Carapungo	2851	Edificio CNT Carapungo (Super Manzana B, El Verjel S/N)	78°26'50" W, 0°5'54" S
Cot	Cotocollao	2777	Museo Cotocollao (Santa teres #70-121 entre Ignacio Loyola y Alfonso del Hierro)	78°29'50" W, 0°6'28" S
Bel	Belisario	2835	Terraza del edificio administrativo del Colegio San Gabriel (Av. América 3541)	78°29'24" W, 0°10'48" S
Cen	Centro	2820	Terraza de la Radio Municipal (Ex hogar Javier, García Moreno 751 y Sucre)	78°30'36" W, 0°13'12" S
Cam	El Camal	2840	Terraza del Hospital Patronato San José Sur (Adrián Navarro 1660 e Hinostraza)	78°30'36" W, 0°15'00" S
Gua	Guamaní	2887	Escuela Julio Enrique Moreno (Patricio Romero S/N y Lucía Albán)	78°33'5" W, 0°19'51" S
Tum	Tumbaco	2331	Terraza de CNT (Gaspar de Carvajal)	78°24'00" W, 0°12'36" S
Chi	Los Chillos	2453	Terraza de CNT (Av. Ilaló, Vía el Tingo).	78°27'36" W, 0°18'00" S

Los registros de calidad del aire de cada estación se envían de forma automática desde las estaciones hasta un centro de control, donde los datos son validados antes de ser publicados en la página web de la Secretaría del Ambiente (<http://www.quitoambiente.gob.ec/>). Estos datos son actualizados cada dos horas. Las concentraciones de cada contaminante se registran cada 20 segundos y luego se obtienen promedios cada diez minutos (comunicación personal del Ing. Darwin Acosta, responsable del Sistema de Control de la REMMAQ).

La Tabla 2 indica la disponibilidad de sensores en cada estación automática, hasta el año 2012.

Tabla 2.- Disponibilidad de sensores por estación automática

	Car	Cot	Bel	Cen	Cam	Gua	Tum	Chi
SO₂	X	X	X	X	X	N/D	X	N/D
CO	X	X	X	X	X	X	N/D	N/D
O₃	N/D	X	X	X	X	X	X	X
NO_x	X	X	X	X	X	X	N/D	N/D
PM_{2.5}	X	X	X	X	X	N/D	N/D	N/D
PM₁₀	X	N/D	N/D	N/D	N/D	X	X	N/D

N/D: No disponible

1.5.2 Subred Semiautomática

La REMMAQ cuenta además con muestreadores semiautomáticos, para la detección de los siguientes contaminantes:

- Partículas en suspensión totales (PST)
- Material particulado de diámetro menor a 10 micras (PM₁₀)
- Material particulado menor a 2.5 micras (PM_{2.5})

El muestreo de estos contaminantes se realiza en 24 horas, cada seis días, según lo que establece el método gravimétrico, según lo que establece la NCAA.

1.5.3 Subred Meteorológica (REMET)

La REMMAQ cuenta con sensores meteorológicos en seis estaciones: Carapungo, Cotocollao, Belisario, El Camal, Tumbaco y Los Chillos. Se miden los siguientes parámetros atmosféricos (Secretaría de Ambiente, 2012): velocidad y dirección del viento, humedad relativa, radiación solar global, temperatura, precipitación y presión atmosférica.

1.5.4 Subred de Monitoreo Pasivo (REMPA)

La red de monitoreo pasivo opera desde el año 2005 y permite realizar el muestreo simultáneo en 44 sectores del DMQ. Mediante este método, se registra la concentración de los siguientes contaminantes:

- NO₂ (exposición de 30 días por mes)
- O₃ (exposición de 10 días, dos veces por mes)
- SO₂ (exposición de 30 días por mes)
- Benceno-Tolueno y Xileno (BTX) (exposición de 30 días por mes)

Adicionalmente, desde el año 2009, mediante la técnica pasiva, se miden las concentraciones medias mensuales de formaldehído y acetaldehído.

1.5.5 Subred de Depósito (REDEP)

La REDEP empezó su operación desde el año 2005 y posee 35 estaciones. Registra el sedimento de polvo atmosférico (partículas sedimentables, PS), que se colecta durante 30 días para luego ser analizadas por gravimetría y métodos químicos para la determinación de sedimentos solubles, insolubles y pH.

1.6 Calidad de los datos registrados por la REMMAQ

La REMMAQ funciona mediante un sistema de Control y Aseguramiento de la Calidad, que garantiza el cumplimiento de los estándares de monitoreo y registro, a través de procedimientos operativos, de mantenimiento y con formularios que registran todas las actividades realizadas (Secretaría de Ambiente, 2012).

En el año 2006 la REMMAQ desarrolló el Sistema de Documentación para el Control y Aseguramiento de Calidad (SIDOCA) y el Sistema de Manejo de Inventario de Repuestos y de la Operación y Mantenimiento de Equipos (SIROME), para obtener y mantener una actualización permanente de la información, de los procedimientos, así como de la disponibilidad de partes y repuestos (Secretaría de Ambiente, 2012).

En el año 2008, la CORPAIRE solicitó una auditoría y revisión técnica a la USEPA, sobre el funcionamiento de la REMMAQ. El principal resultado de la auditoría indicó que la red funciona adecuadamente y que los registros son fiables. La auditoría indicó adicionalmente que los sensores de O₃ funcionan muy bien, y que los sensores de CO, NO_x y PM_{2.5} funcionan bien (USEPA, 2008).

2. MARCO LEGAL Y GUÍAS DE LA ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD

2.1 Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria del Ministerio de Ambiente (TULSMA)

Dentro del marco legal ecuatoriano se encuentra el Texto Unificado de la Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA), publicado en el 2003. El TULSMA establece las políticas ambientales para la prevención y control de la contaminación.

2.2 Norma de Calidad del Aire Ambiente (NCAA)

El 7 de junio del 2011 entró en vigencia la reforma de la normativa de la calidad del aire ambiente o nivel de inmisión. Esta norma forma parte del Anexo IV del Libro VI del TULSMA

2.2.1 Objetivo de la Norma de Calidad del Aire Ambiente

El objetivo principal de la NCAA es el de cuidar la salud de la población, mantener la calidad del aire, resguardar los ecosistemas y el ambiente. Establece los límites máximos permisibles de los contaminantes del aire al nivel de la tropósfera, para contaminantes criterio y contaminantes no convencionales.

2.2.2 Contaminantes criterio del aire ambiente

La NCAA define como contaminante del aire a cualquier sustancia o material emitido a la atmósfera, sea por actividad humana o procesos industriales, y que afecta adversamente al hombre o al ambiente (MAE, 2012). Dentro de esta norma, se consideran como “contaminantes criterio” a los siguientes contaminantes, para los que se especifican valores máximos de concentración nivel de suelo: PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_2 , SO_2 , CO y O_3 (Tabla 3), (MAE, 2012).

La NCAA adicionalmente establece concentraciones máximas para algunos contaminantes peligrosos del aire (Tabla 4)

Tabla 3.- Concentraciones máximas permitidas en la Norma de Calidad del Aire Ambiente

Contaminante	Máximo permitido
O₃	“La máxima concentración de ozono, obtenida mediante muestra continua en un período de (8) ocho horas, no deberá exceder de cien microgramos por metro cubico ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$), mas de una vez en un año”
NO₂	“El promedio aritmético de la concentración de dióxido de nitrógeno, determinado en todas las muestras en un año no deberá exceder de cuarenta microgramos por metro cubico ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$).La concentración máxima en (1) una hora no deberá exceder doscientos microgramos por metro cubico ($200 \mu\text{g}/\text{m}^3$)”
CO	“La concentración de monóxido de carbono de las muestras determinadas de forma continua, en un período de 8 (ocho) horas, no deberá exceder diez mil microgramos por metro cúbico ($10\ 000 \mu\text{g}/\text{m}^3$), no más de una vez al año. La concentración máxima en (1) una hora de monóxido de carbono no deberá exceder treinta mil microgramos por metro cubico ($30\ 000 \mu\text{g}/\text{m}^3$), mas de una vez en un año”
PM_{2.5}	“Se ha establecido que el promedio aritmético de la concentración de $PM_{2.5}$ de todas las muestras en un año no deberá exceder de quince microgramos por metro cúbico ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$). La concentración máxima en 24 horas, de todas las muestras colectadas, no deberá exceder cincuenta microgramos por metro cúbico ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$), valor que no podrá ser excedido más de dos (2) veces en un año”.
PM₁₀	“El promedio aritmético de la concentración de PM_{10} de todas las muestras en un año no deberá exceder de 50 microgramos por metro cubico ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$). El promedio aritmético de monitoreo continuo durante 24 horas, no deberá exceder de cien microgramos por metro cúbico ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Se considera sobrepasada la norma de calidad del aire para material particulado PM_{10} cuando el percentil 98 de las concentraciones de 24 horas registradas durante un período anual en cualquier estación monitora sea mayor o igual a ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$)”.
SO₂	“La concentración de SO_2 en 24 horas no deberá exceder ciento veinticinco microgramos por metro cúbico ($125 \mu\text{g}/\text{m}^3$), la concentración de este contaminante para un período de diez minutos, no debe ser mayor a quinientos microgramos por metro cúbico ($500 \mu\text{g}/\text{m}^3$)”.

Tabla 4.- Niveles máximos permisibles para contaminantes no convencionales con efectos tóxicos y/o cancerígenos en el aire ambiente

Contaminante no convencional	Nivel máximo permisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de exposición
Benceno	5	Anual
Cadmio	5×10^{-3}	Anual
Mercurio inorgánico (Vapores)	1	Anual

2.2.3 Condiciones de referencia

Las concentraciones de los contaminantes del aire de la NCAA, se establecen para las condiciones de referencia de 25° C y 760 mm Hg (MAE, 2012).

2.3 Guías Internacionales

La Organización Mundial de la Salud (OMS) propone concentraciones guías, en función de la última información científica sobre los efectos en la salud. Estas guías están dirigidas a las autoridades, como referencia para el establecimiento de legislación propia, que tome en cuenta la situación de cada país (OMS, 2005).

Las guías de la OMS fueron actualizadas en el año 2005 e incluyen concentraciones nuevas, para los siguientes contaminantes (OMS, 2005): O_3 , NO_2 , $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} . (Tabla 5).

La NCAA recoge el nuevo criterio de la OMS para el O_3 (concentración media en 8 horas no mayor de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Por ello, para identificar el Efecto Fin de Semana, se utilizará la concentración octohoraria de O_3 .

Tabla 5.- Concentraciones guía de la OMS para el O₃, NO₂, PM_{2.5} y PM₁₀

Contaminante	Máximo permitido
O ₃	El valor que da la guía de calidad del aire para el O ₃ es de 100 µg/m ³ para una media máxima de ocho horas.
NO ₂	El valor que da la guía de calidad del aire para el NO ₂ es de 40 µg/m ³ para la media anual y 200 µg/m ³ para la media de una hora.
PM _{2.5}	El valor que da la guía de calidad del aire para el PM _{2.5} es de 10 µg/m ³ para la media anual y 25 µg/m ³ para la media de 24 horas.
PM ₁₀	El valor que da la guía de calidad del aire para el PM ₁₀ es de 20 µg/m ³ para la media anual y 50 µg/m ³ para la media de 24 horas.

3. FUNDAMENTO TEÓRICO

3.1 El Efecto Fin de Semana

Es un fenómeno en el cual las concentraciones de O_3 son más altas durante los fines de semana, en comparación con los días laborables, a pesar de que las emisiones de *VOC* y NO_x (precursores del O_3 troposférico) son típicamente más bajas, por la disminución de actividades antropogénicas durante sábados y domingos. El Efecto Fin de Semana se suele presentar en las zonas urbanas (Cleveland et al., 1974).

El Efecto Fin de Semana fue reportado por primera vez en el año 1970 en Estados Unidos (Cleveland et al., 1974). Posteriormente se han desarrollado estudios sobre el mismo tema en varias ciudades:

- En la ciudad de México se realizó el análisis del episodio de contaminación atmosférica del fin de semana del 14 al 15 de abril del 2007, usando técnicas de modelado ambiental. Se consideraron 21 estaciones con registros de O_3 , 25 estaciones de CO y 19 estaciones para los NO_x . El estudio demuestra que las emisiones de la Zona Metropolitana de Toluca influyen en la calidad del aire de la ciudad de México. De esta forma, descarta el Efecto Fin de Semana y concluye que la aplicación de una política de reducción de circulación de automóviles, no resultaría en una disminución de las concentraciones de O_3 (García and Jazcilevich, 2009).
- En Santiago de Chile se examinó la diferencia de concentración de O_3 , NO_x y de *VOC*, entre los fines de semana y días laborables. Se analizaron los registros de los años 1999 a 2007 de 3 estaciones urbanas. Los resultados indican la presencia del Efecto Fin de Semana. Se observó que el efecto es más evidente desde el año 2004, como consecuencia de la implementación de controles de contaminación del aire. Se observa una disminución en la relación VOC/NO_x desde el mismo año en el que se identifica el Efecto Fin de Semana, especialmente en las áreas industrializadas de Santiago (Seguel et al., 2011).
- En la Península Ibérica se simuló numéricamente la distribución espacial de las concentraciones de O_3 para días laborables y de fin de semana. Se analizaron los datos del 13 al 16 de agosto del 2000, siendo el 13 y 15, días no laborables y el 14 y 16, días laborables. Se comparó los resultados de la simulación de concentración de O_3 a nivel troposférico con los registros de 48 estaciones. Se

observó que durante los días no laborables, el tráfico pesado es mucho menor, lo que provocó una menor emisión de NO_x (Jiménez et al., 2004).

- Durante mayo y junio de 2010, en la costa sur de California, se midieron las concentraciones de NH_3 , VOC_s , O_3 y NO_2 ; tanto en la superficie como en capas altas de la atmósfera. Los registros de O_3 presentaron concentraciones mayores durante los fines de semana, acompañados de una reducción en los niveles de NO_x , y un incremento en la relación VOC_s/NO_x (Pollack et al., 2012).

3.2 Contaminantes del aire

A los contaminantes que intervienen en el Efecto de Fin de Semana se les denomina “contaminantes principales”, ya que son los más comunes y omnipresentes en las zonas urbanas. Estos contaminantes son el CO , NO_2 y O_3 (Heinke y Glynn, 1996).

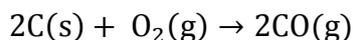
Otro contaminante de interés en el Efecto Fin de Semana es el material particulado fino ($\text{PM}_{2.5}$), que es emitido principalmente por los vehículos a diésel, e interactúa con la radiación solar, afectando por lo tanto la formación de O_3 .

3.3 Monóxido de carbono (CO)

Es un gas incoloro, insípido e inodoro. Se produce a partir de la combustión incompleta del carbono de los combustibles (OMS, 2004).

3.3.1 Química del CO

Se forma cuando se quema carbón o hidrocarburos en presencia de una cantidad limitada de O_2 . A continuación se muestra la reacción química (Brown et al., 2004):



3.3.2 Efectos sobre la salud

El CO es absorbido al torrente sanguíneo, a través de los pulmones, causando la formación de la carboxihemoglobina (COHb), que menoscaba la capacidad de la sangre de transportar oxígeno. Por ello, la presencia de CO en la atmósfera puede ser riesgosa para la salud. El CO tiene una afinidad mucho mayor con la sangre (240 veces más) en relación a la que ésta presenta con el oxígeno (OMS, 2004).

3.3.3 Fuentes antropogénicas del CO

El CO es un constituyente traza de la tropósfera, producido por procesos naturales y por la actividad humana. Ya que las plantas pueden producir y metabolizar CO , los niveles

traza son considerados normales en la naturaleza. Aunque las concentraciones de CO cerca de las áreas urbanas e industriales son mayores en relación con los niveles naturales, no se ha podido demostrar que éstos causen efectos adversos a las plantas y microorganismos, sin embargo; para el ser humano puede representar un peligro, de acuerdo a lo mencionado en la sección 3.3.2.

El CO es originado principalmente por la combustión incompleta de los combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural). En las áreas urbanas la principal fuente suele ser el parque de vehículos a gasolina. El CO es también producido por la actividad industrial, como refinerías, fábricas de papel y la industria química (OMS, 2004).

3.4 Dióxido de nitrógeno (NO₂)

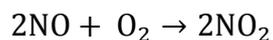
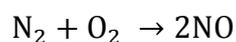
Los óxidos de nitrógeno (NO_x) es un grupo compuesto por óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO₂).

El NO₂ es un gas que posee un color amarillo pardo, constituyente mayoritario del smog. Es tóxico y tiene un olor asfixiante. Desempeña un papel importante en la formación de O₃ en la tropósfera, puesto que es uno de sus precursores. La mayor parte (un 90%) de los NO_x en la atmósfera se emiten en forma de NO, pero éste se oxida rápidamente a NO₂. El NO₂ en presencia de los hidrocarburos y la radiación ultravioleta, es la mayor fuente del O₃ troposférico (OMS, 2004).

Además el NO₂ es la principal fuente de los aerosoles de nitrato, que es una parte importante del PM_{2.5}.

3.4.1 Química del NO₂

Se forma a partir de la reacción del NO con el O₂ (Seguel et al., 2011):



El NO se forma a partir de la reacción entre el N₂ y el O₂ del aire cuando se dan los procesos de combustión, así como por la oxidación del nitrógeno (N) de los combustibles.

3.4.2 Efectos sobre la salud

El NO_2 produce irritación en los pulmones, bronquitis y neumonía. Reduce la resistencia ante las infecciones respiratorias. Además hay estudios que indican que la bronquitis pueden ser causada por la exposición prolongada al NO_2 (OMS, 2004).

3.4.3 Fuentes antropogénicas del NO_2

Los NO_x se forman como un subproducto de la combustión que se dan con altas temperaturas y presiones, como por ejemplo en la combustión de los vehículos y plantas termoeléctricas (OMS, 2004). Bajo condiciones de alta presión y temperatura, el propio N_2 de la atmósfera se forma con el O_2 de la misma, para formar NO_x .

3.5 Material particulado ($\text{PM}_{2.5}$)

Por su origen, el $\text{PM}_{2.5}$ puede ser primario o secundario. Aquellas partículas emitidas directamente desde las fuentes de combustión, se denominan material particulado primario. Las partículas secundarias son las que resultan de la condensación de sus precursores gaseosos, formadas en su mayoría por hidrocarburos, NO_x y SO_2 (NARSTO, 2004).

Una vez en el aire las partículas pueden cambiar en concentración, tamaño y forma, por lo que afectan al balance energético de la atmósfera. Aquellas partículas que son lo suficientemente grandes y oscuras pueden ser observadas con facilidad (por ejemplo el hollín y el humo). Las partículas de menor tamaño solo se pueden detectar a través de un microscopio electrónico (NARSTO, 2004).

Se definen como partículas finas, aquellas que poseen un diámetro menor a $2.5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$). El $\text{PM}_{2.5}$ forma parte del PM_{10} (Figura 4).

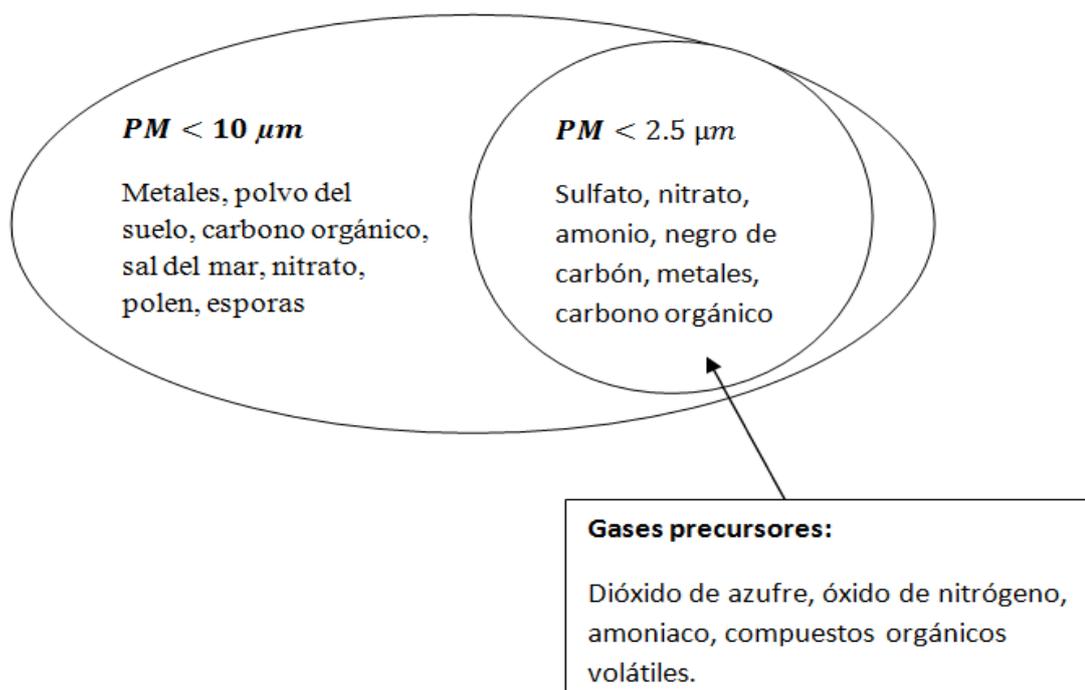


Figura 4.- Composición del material particulado (NARSTO, 2004)

3.5.1 Efectos sobre la salud

Se ha observado que la disminución en la calidad de la salud se encuentra relacionada con la exposición al material particulado. Existen efectos adversos tanto a corto como a largo plazo. El $PM_{2.5}$ puede causar irritación a la garganta y empeorar problemas respiratorios existentes, tales como el asma. Por su tamaño, el $PM_{2.5}$ tiene la capacidad de ingresar directamente al torrente sanguíneo y puede causar cáncer (OMS, 2005).

3.5.2 Fuentes antropogénicas del $PM_{2.5}$

La principal fuente antropogénica de este contaminante es la combustión, especialmente las emisiones de los vehículos a diésel (NARSTO, 2004).

3.6 Ozono (O_3)

Es una molécula formada por tres átomos de oxígeno. Es un oxidante fotoquímico secundario en la troposfera. Los niveles naturales de O_3 están en un rango de 25 a 45 ppb; sin embargo, por el efecto de fuentes antropogénicas en zonas urbanas e

industriales, las concentraciones de O_3 pueden aumentar de manera significativa (Brown, 2004).

El O_3 puede tener efectos negativos o positivos, dependiendo de la capa de la atmósfera en la que se encuentre. El “ozono bueno” se ubica en la estratósfera y el “ozono malo” en la tropósfera. El O_3 estratosférico se encuentra en la atmósfera superior, entre 15 a 50 km por encima de la superficie; y funciona como una capa protectora que absorbe la mayoría de la radiación ultravioleta. Por otra parte, el O_3 troposférico, en concentraciones elevadas, constituye un peligro para la salud pública, animales, plantas y materiales (Brown, 2004).

3.6.1 Efectos sobre la salud

El exceso de O_3 en el aire puede causar efectos adversos en la salud como la reducción de la función pulmonar, tos, estornudos, dolores en el pecho, congestión pulmonar y envejecimiento prematuro de los pulmones (OMS, 2004).

El O_3 afecta sobre todo a las personas con problemas respiratorios previos, así como a aquellas que sufren de asma (OMS, 2004). El O_3 troposférico en altas concentraciones afecta adicionalmente a las plantas (menor crecimiento y productividad) y materiales (reducción de la vida útil de elementos como el caucho y pinturas) (Seguel et al., 2011).

3.6.2 Fuentes antropogénicas de los precursores del O_3

El O_3 es un contaminante secundario, que se forma a partir de sus precursores (NO_x y VOC) en presencia de la luz solar (Brown, 2004).

Las fuentes relevantes de los NO_x normalmente son: el tráfico vehicular (especialmente los vehículos a diésel), los procesos de combustión industriales y las centrales termoeléctricas

Las fuentes más importantes de VOC son: la vegetación, el uso de disolventes, las gasolineras y centros de distribución de combustibles.

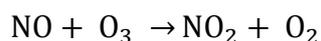
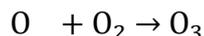
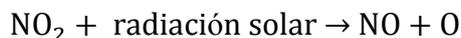
3.6.3 O_3 y sus precursores

La formación de O_3 se da por los siguientes mecanismos:

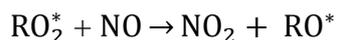
- El NO_2 absorbe la radiación solar y se produce la fotodisociación en NO y O.

- El átomo de oxígeno de la anterior reacción se combina con una molécula de O_2 y se forma el O_3 .

Cuando hay ausencia de VOC, el O_3 obtenido del segundo mecanismo reacciona con el NO del primer mecanismo, de esta forma se regeneran los compuestos iniciales.



Cuando hay emisiones de VOC la oxidación produce radicales libres (RO_2^*) que reaccionan con el NO para regenerar NO_2 sin el consumo de O_3 (lo cual causa su acumulación).



3.7 La relación VOC/ NO_x

La relación entre las concentraciones iniciales de VOC/ NO_x definen dos regímenes claramente diferenciados, que condicionan la formación de O_3 .

3.7.1 Zona limitada por VOC

En esta región la concentración de O_3 depende principalmente de la cantidad de VOC; es decir, la concentración de O_3 se incrementa con el incremento de VOC y disminuye con el incremento de NO_x (Atkins et al., 2006)

3.7.2 Zona limitada por NO_x

En esta zona, la concentración de O_3 depende de la cantidad de NO_x en la atmósfera. Aquí el O_3 incrementa con el incremento de NO_x , y muestra pocos cambios ante el incremento de VOC.

Una relación VOC/ NO_x de 8/1 es aproximadamente un punto de decisión para determinar los beneficios relativos en el control O_3 , mediante el control de las emisiones de NO_x versus el control de las emisiones de VOC, ya que no está dentro de ningún régimen y es más fácil determinar el comportamiento del O_3 con respecto a sus precursores. Una relación baja VOC/ NO_x (menor a 4) corresponde a una zona limitada por VOC (VOClimited). La reducción de VOC es efectiva para reducir O_3 . Una

reducción de NO_x puede llevar a un incremento de O_3 . Una relación alta VOC/NO_x (mayor a 15) corresponde a una zona limitada por NO_x (NO_x limited). En este caso, la reducción o incremento de VOC afecta muy poco en la formación de O_3 . Por el contrario un incremento y decremento de NO_x , incrementará o reducirá respectivamente la formación de O_3 (Atkins et al., 2006).

Cuando la relación VOC/NO_x varía entre 4 y 15, una reducción combinada de VOC y NO_x reducirá también la formación de O_3 .

El diagrama de isopletas (Figura 5) indica las concentraciones de O_3 que se consiguen, a partir de diferentes concentraciones de NO_x y VOC . Este diagrama sirve de ayuda para proponer estrategias de control de los niveles de O_3 (USEPA, 1983).

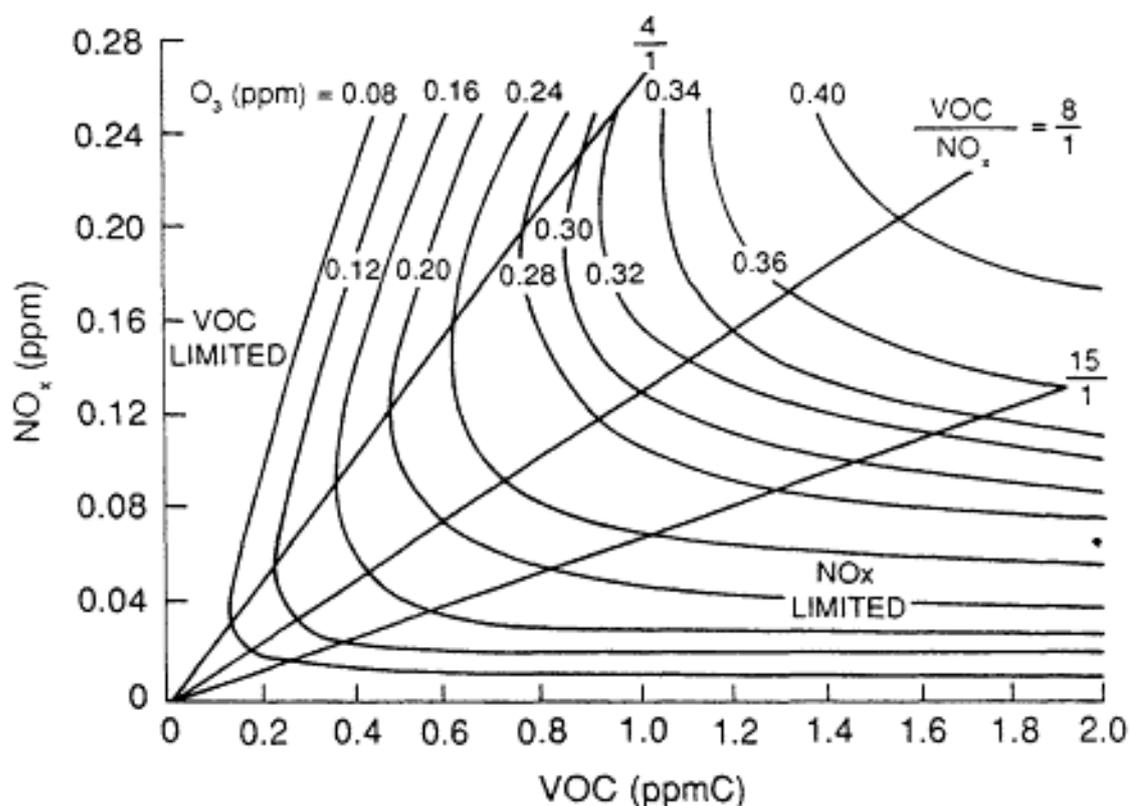


Figura 5.- Isopletas de O_3 , a partir de diferentes concentraciones de VOC y NO_x (USEPA, 1983)

3.8 Fuentes antropogénicas de los precursores de O_3 dentro del DMQ

Las Tablas 6 y 7 indican los resultados globales del inventario de emisiones atmosféricas del DMQ, que corresponde al año 2007 (CORPAIRE, 2009). Este inventario es el último que ha sido publicado en el DMQ con el carácter de oficial. En

relación a los precursores de O₃, se observa que los principales aportes de NO_x provienen de las fuentes móviles (53.8%) y fuentes fijas (44.5%); y para los COVNM, los aportes de la fuentes de área (43%) y fuentes móviles (39.8%) son los más relevantes.

Durante los fines de semana hay una menor circulación de vehículos particulares (mayoritariamente automóviles a gasolina) y de vehículos de carga (vehículos a diésel). La reducción en el tráfico de estos vehículos afectan las emisiones de NO_x y de VOC. Estos cambios se relacionan directamente con el Efecto Fin de Semana.

Tabla 6.- Emisiones anuales dentro del DMQ en el año 2007 (t/año). (CORPAIRE, 2009)

Contaminantes	CO	NO_x	PM_{2.5}	COVNM
Fuentes móviles	101 729	18 457	640	14 369
Fuentes fijas	1636	15 274	318	6239
Fuentes de área	624	585	433	15 515
Total	103 989	34 316	1391	36 123

Tabla 7.- Emisiones anuales dentro del DMQ en el año 2007 (porcentaje). (CORPAIRE, 2009)

Contaminantes	CO	NO_x	PM_{2.5}	COVNM
Fuentes móviles	97.8	53.8	46	39.8
Fuentes fijas	1.6	44.5	22.8	17.3
Fuentes de área	0.6	1.7	31.1	43.0
Total	100	100	100	100

3.9 Hipótesis del Efecto Fin de Semana

Se han formulado siete hipótesis que tratan de explicar las causas del Efecto Fin de Semana (Pollack et al., 2012). A continuación se indica de manera resumida en que consiste cada una de ellas.

3.9.1 Reducción del NO_x

A través del estudio realizado durante dos años en California, se verificó que en los fines de semana, las concentraciones de O₃ tienden a ser más altas comparadas con los días laborables; en tanto que las concentraciones de NO_x son más bajas durante el fin de semana. Las menores concentraciones de NO_x se explican por una reducción en la circulación de vehículos a diésel, que son altamente emisores de estos compuestos.

Se llegó a la conclusión de que una explicación plausible del incremento de O₃ y al mismo tiempo, la reducción en las concentraciones de NO_x, es el régimen de formación de O₃ en una zona limitada por VOC, según lo indicado en la Figura 5 (Harley and Marr, 2002).

3.9.2 Perfil temporal de las emisiones de NO_x (NO_x timing)

Durante los días laborables, el primer pico de las emisiones de NO_x se presenta entre las 07h00 y 09h00. Durante los sábados y domingos, las emisiones de estos compuestos son menores durante estas horas, y el pico de emisiones se desplaza hacia el mediodía. Esta hipótesis indica que las emisiones de NO_x durante el fin de semana, al estar desplazadas hacia el mediodía, son más efectivas para producir O₃, en comparación con las emisiones entre semana. En estas condiciones, las emisiones de NO_x durante los sábados y domingos, se están inyectando en un sistema atmosférico fotoquímicamente más activo, en relación a los días laborables; y por ello hay una mayor formación de O₃ (Chinkin and Coe, 2003).

Sin embargo Yarwood et al. (2003), concluyen que esta hipótesis afectaría en menor grado, en relación a la hipótesis de la reducción de las emisiones de NO_x, en una zona de formación de O₃ con régimen limitado por VOC.

3.9.3 Acumulación de precursores de O₃ en el suelo

Esta hipótesis se basa en la asunción de que durante las noches de los viernes y sábados, hay una mayor actividad vehicular, en relación a las noches del resto de días. Es decir, durante las noches de viernes y sábados hay mayores emisiones de VOC y de NO_x. Estas emisiones se acumulan en la capa estable de la atmósfera que se forma durante la noche. Al día siguiente, cuando la radiación solar elimina paulatinamente la inversión térmica, los VOC y NO_x acumulados participan en las reacciones fotoquímicas, generando

concentraciones de O_3 mayores en comparación con los días laborables (Fujita and Campbell, 2003).

3.9.4 Acumulación de precursores de O_3 en las capas altas de la atmósfera

Durante el mediodía y primeras horas de la tarde, la altura de la capa de mezcla es mayor en relación a las horas de mañana. Los altos niveles de radiación producen que la atmósfera sea inestable, lo que promueve la mezcla de los contaminantes.

Al final de la tarde e inicios de la noche, en la capa adyacente al suelo se forma paulatinamente una inversión térmica nocturna, por el enfriamiento de la superficie. Esta capa de la atmósfera se vuelve estable e impide la dispersión vertical de los contaminantes. En la capa superior que permanece sobre la inversión térmica, se forma una reserva de contaminantes. Esta reserva puede ser rica en O_3 y en sus precursores. Al día siguiente, cuando se elimina la inversión térmica nocturna, los contaminantes de la reserva y los contaminantes acumulados durante la noche dentro de la inversión, se mezclan completamente y participan en las reacciones fotoquímicas que incrementan los niveles de O_3 (Harley and Marr, 2002).

3.9.5 Incremento de emisiones durante el fin de semana

El aumento de los niveles de O_3 durante el fin de semana, puede ser producido por el incremento de los contaminantes durante los sábados y domingos (CARB, 2003). Es decir, si hay mayores emisiones tanto de NO_x y de VOC durante los fines de semana, se esperan mayores concentraciones de O_3 . Aunque esta hipótesis es teóricamente correcta, es aplicable solo para aquellas zonas en donde se presentan mayores emisiones de los precursores de O_3 durante los fines de semana.

3.9.6 Incremento de la radiación solar en superficie a causa de la disminución de las concentraciones de material particulado

Mayores concentraciones de $PM_{2.5}$ en la atmósfera, implican una mayor absorción y/o dispersión de la radiación solar. Por ello, cuando los niveles de $PM_{2.5}$ son importantes, se espera que los niveles de radiación solar sean menores en la superficie.

Esta hipótesis se basa en la reducción de la circulación de vehículos a diésel durante los sábados y domingos, lo que reduce también las emisiones de $PM_{2.5}$. Una menor cantidad de $PM_{2.5}$ permite mayores niveles de la radiación solar en la superficie, promoviendo por lo tanto una mayor formación de O_3 (Blier et al., 1999).

3.9.7 Menor destrucción de O₃

Esta hipótesis parte de una menor emisión de NO_x durante los fines de semana. Por ello hay consecuentemente una menor cantidad de NO en la atmósfera, en comparación con un día laborable. Conociendo que el NO se combina con el O₃, para generar NO₂ y O₂, una menor cantidad de NO durante los fines de semana implica un menor consumo de O₃ y por ende, queda una mayor concentración de O₃ (García and Jazcilevich, 2009).

Son pocos los estudios en los que se han tratado de cuantificar el aporte o la plausibilidad de estas hipótesis, para una región específica.

En el caso del DMQ, a fin de tomar la decisión de explorar con mayor profundidad la plausibilidad de estas hipótesis, es necesario identificar si se presenta el Efecto Fin de Semana.

4. MÉTODO

4.1 Información de calidad del aire

Para identificar el Efecto Fin de Semana en Quito, se procesaron los registros horarios de calidad del aire, proporcionados por las estaciones automáticas de la REMMAQ, durante el periodo 2005 hasta el 2012.

La información de la calidad del aire es de acceso público, y se puede descargar desde la página web de la Secretaría de Ambiente de Quito (<http://www.quitoambiente.gob.ec/>). En la página principal del portal, en el link “INDICE CALIDAD DEL AIRE”, se accede a un utilitario que permite la descarga de los registros. La información de cada contaminante está organizada por estaciones, años, meses, días y horas. Una vez que se seleccionan los contaminantes y el periodo temporal, el utilitario genera un archivo en formato CVS (*Comma Separated Values*), que almacena los registros separados por comas.

4.2 Procesamiento de datos

Para procesar los datos se organizó previamente la información de las 8 estaciones automáticas, de los contaminantes CO, NO₂, PM_{2.5} y O₃. Los archivos CVS fueron cargados en hojas de Excel, para su posterior procesamiento y análisis mediante tablas dinámicas.

Se decidió analizar el comportamiento del CO, ya que al ser un contaminante emitido principalmente por los vehículos a gasolina, el cambio de sus concentraciones durante los fines de semana constituye un indicativo de la disminución del tráfico durante los sábados y domingos.

El análisis del NO₂ se justifica por ser uno de los compuestos directamente relacionados con las reacciones fotoquímicas que generan O₃. Adicionalmente, al formar parte de los NO_x, el cambio de concentraciones durante los fines de semana, se asocia con la reducción de tráfico de vehículos a diésel, emisores importantes de estos contaminantes. El análisis de los cambios de las concentraciones de NO₂ está directamente relacionado con la hipótesis de reducción de las emisiones de NO_x, en una zona de formación de O₃ con régimen limitado por VOC.

El análisis del $PM_{2.5}$ se justifica por la reducción del tráfico de los vehículos a diésel durante los fines de semana. Las menores concentraciones durante sábados y domingos se relacionan con la hipótesis de que a menor cantidad de $PM_{2.5}$ en la atmósfera, hay mayores niveles de la radiación solar en la superficie, y por lo tanto una mayor formación de O_3 .

Las concentraciones de O_3 fueron procesadas para identificar directamente a las estaciones en las que se registran durante sábados y domingos, concentraciones mayores en relación a los días laborables; es decir, aquellas en donde se presenta el Efecto Fin de Semana.

4.2.1 Perfil medio diario de las concentraciones horarias de contaminantes

El método para identificar el Efecto Fin de Semana, se basa en la comparación de las concentraciones de O_3 de sábados y domingos, con respecto a los días laborables (Seguel et al., 2011).

Para realizar esta comparación, se obtuvo para cada año (2005 hasta 2012, 8 años) y estación, el perfil medio diario de las concentraciones horarias de O_3 . Se generó:

- a) Un perfil medio diario de las concentraciones horarias de los días lunes hasta viernes
- b) Un perfil medio diario de las concentraciones horarias de los sábados
- c) Un perfil medio diario de las concentraciones horarias de los domingos

En total se generaron 198 perfiles de O_3 , con el fin de cumplir los objetivos propuestos en este estudio.

Con el mismo enfoque, se generaron perfiles similares de CO , NO_2 y $PM_{2.5}$; como información relevante directamente relacionada con el Efecto Fin de Semana.

4.2.2 Variación de las concentraciones octohorarias de O_3

Para cuantificar la magnitud del cambio de las concentraciones de sábados y domingos, con respecto a las concentraciones de lunes a viernes, se obtuvieron adicionalmente los valores medios octohorarios de O_3 , con los registros desde las 09h00 hasta las 16h00, debido a que este periodo, los niveles de radiación solar son máximos en Quito (Pronostican niveles altos de radiación solar, 2010). Se decidió trabajar con las

concentraciones octohorarias, en razón de que este periodo temporal está considerado en la NCAA para los niveles de O_3 .

Se cuantificaron los porcentajes de diferencia (Porcentaje de variación de la concentración de O_3), con un enfoque similar al utilizado por Seguel et al. (2012) en el estudio del Efecto Fin de Semana en Santiago de Chile:

$$\begin{aligned} \text{Diferencia } O_3 &= \text{Promedio octohorario s\u00e1bado } (\mu\text{g}/\text{m}^3) \\ &\quad - \text{Promedio octohorario lunes a viernes } (\mu\text{g}/\text{m}^3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Diferencia } O_3 &= \text{Promedio octohorario domingo } (\mu\text{g}/\text{m}^3) \\ &\quad - \text{Promedio octohorario lunes a viernes } (\mu\text{g}/\text{m}^3) \end{aligned}$$

$$\text{Variaci\u00f3n } \% = \frac{\text{Diferencia } O_3 \times 100}{\text{Promedio octohorario lunes a viernes}}$$

Los sensores autom\u00e1ticos de la REMMAQ que miden O_3 (Marca Thermo 49C/49i), tienen una precisi\u00f3n de 1 ppb (Thermo, 2004), que corresponde a aproximadamente a 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en las condiciones est\u00e1ndar establecidas en la NCAA (1 atm, 0\u00b0C).

Esta precisi\u00f3n, con respecto a las concentraciones t\u00edpicas de O_3 que se miden en Quito, entre 40 y 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, representa un porcentaje entre el 2 y el 5%. A fin de considerar un margen de seguridad para garantizar la diferencia entre las concentraciones de fin de semana con respecto a d\u00edas laborables, se considera un 5% adicional al porcentaje que representa la precisi\u00f3n del sensor. Por lo tanto, se asume que en aquellos a\u00f1os en los que la variaci\u00f3n de la concentraci\u00f3n octohoraria de O_3 de s\u00e1bados o domingos, con respecto a d\u00edas laborables es igual o mayor al 10%, constituye un indicativo de la presencia del Efecto Fin de Semana.

5. RESULTADOS

Todos los perfiles anuales de las concentraciones medias horarias, de las estaciones y contaminantes analizados, se incluyen en el Anexo A.

Todas las tablas con el cálculo del porcentaje de variación de las concentraciones octohorarias de O₃, se incluyen en el Anexo B.

Por ser los resultados de mayor relevancia, en esta sección solamente se presentan los perfiles de las estaciones Belisario y Centro.

Las Figuras 6 y 7 presentan los perfiles medios horarios del año 2012, de las estaciones Belisario y Centro respectivamente. Las curvas de color azul corresponden al perfil horario de los días lunes a viernes. Las curvas negras y rojas corresponden a los días sábados y domingos respectivamente.

Se han tomado los perfiles del año 2012 como indicativos, ya que los perfiles de los años anteriores, en esencia, presentan las mismas configuraciones (Anexo A)

Se observa que los contaminantes primarios (CO, NO₂ y PM_{2.5}) presentan las mayores concentraciones horarias en los perfiles de los lunes a viernes, en relación a los perfiles de los sábados.

A su vez, los perfiles de los sábados presentan las mayores concentraciones horarias, con respecto a los perfiles de los domingos.

Sin embargo, esta tendencia se revierte para el caso del O₃. Las concentraciones horarias de los perfiles de los domingos son mayores a las concentraciones de los sábados; las que a su vez son mayores a las concentraciones de los días laborables.

Las Figura 8 y 9 presentan los porcentajes de variación de las concentraciones octohorarias de O₃ de los sábados y domingos, con relación a los días laborables, respectivamente.

En la Figura 8 (variación de los sábados con respecto a los días laborables), se observa que Belisario (excepto para año 2010) es la única estación que presenta porcentajes mayores (entre 10.1 y 22.7%) al 10%, porcentaje establecido para identificar el Efecto Fin de Semana. En las demás estaciones, incluida la estación Centro, los porcentajes son

menores a 10%. Hay algunos casos (Guamaní: 2006, 2007, 2010 y 2012; Tumbaco: 2010; Camal, 2010), en los que el porcentaje es negativo, inclusive.

En la Figura 9 (variación de los domingos con respecto a los días laborables), se observa que Belisario (entre 19.7 y 31.1%) y Centro (entre 11.7 y 18.4%) presentan porcentajes mayores al 10%. En las demás estaciones, salvo para algunas en los años 2009 y 2010, los porcentajes son menores a 10%.

Estos resultados indican que para el periodo 2005 – 2012, la variación media de la concentración octohoraria de O₃, presentó claramente el Efecto Fin de Semana en las estaciones Belisario (durante los sábados y especialmente domingos) y Centro (durante los domingos).

Los porcentajes de variación de los domingos, en las dos estaciones, son consistentes con los porcentajes (entre 18.9 y 30.1%) reportados por Seguel et al. (2012) en el estudio del Efecto Fin de Semana en Santiago de Chile.

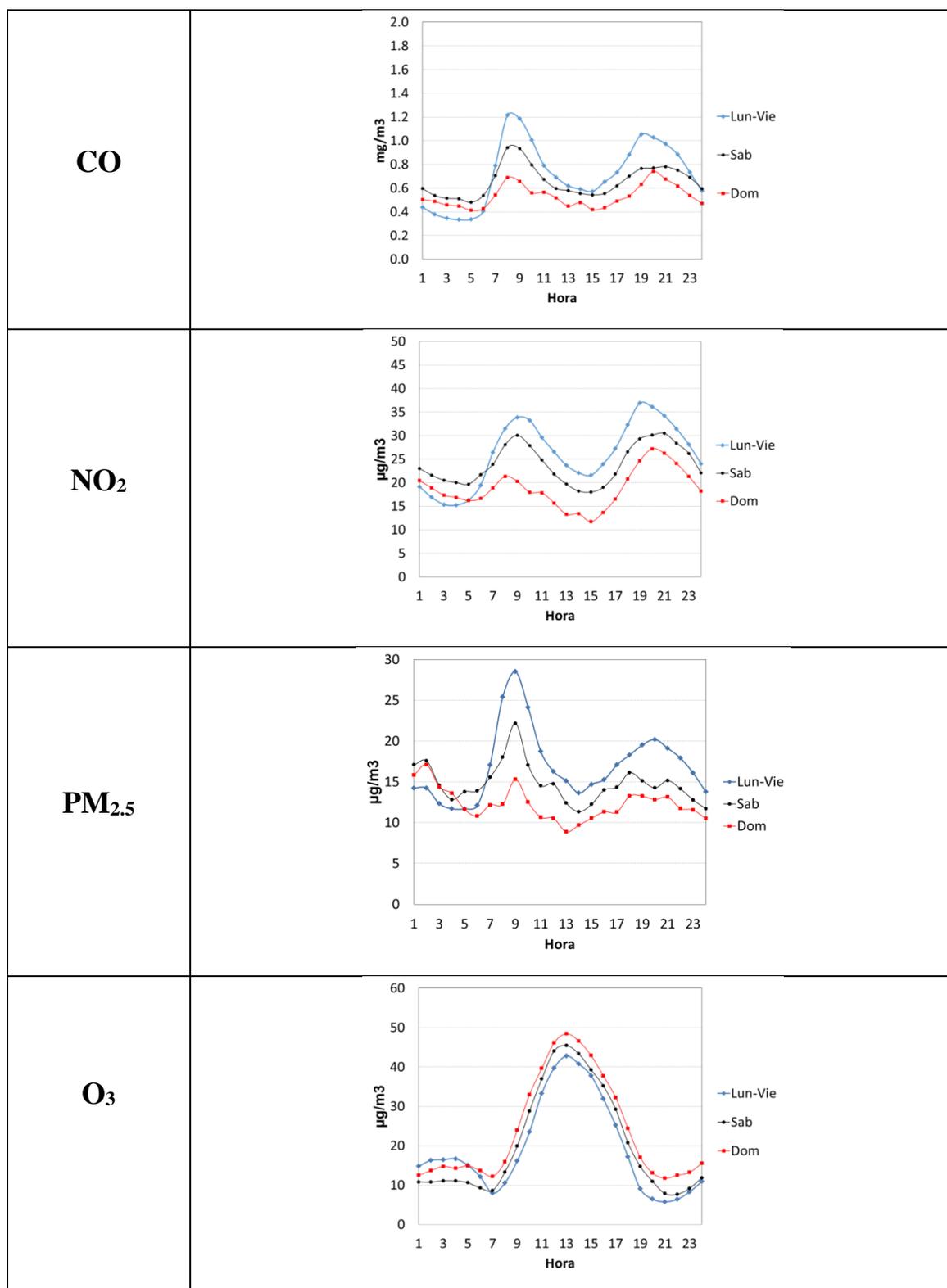


Figura 6.- Perfil de concentración horaria promedio anual del año 2012 en Belisario

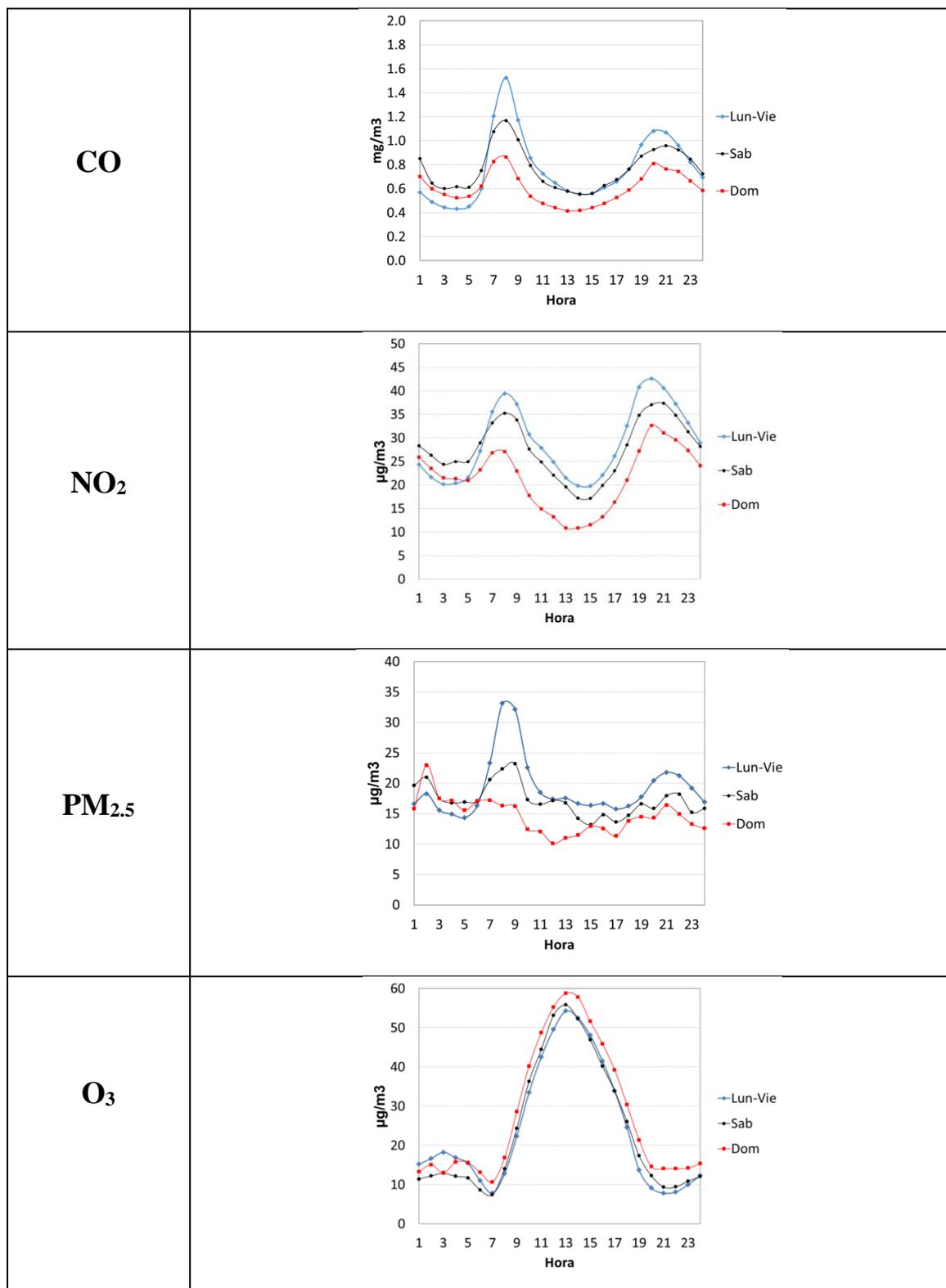


Figura 7.- Perfil de concentración horaria promedio anual del año 2012 en Centro

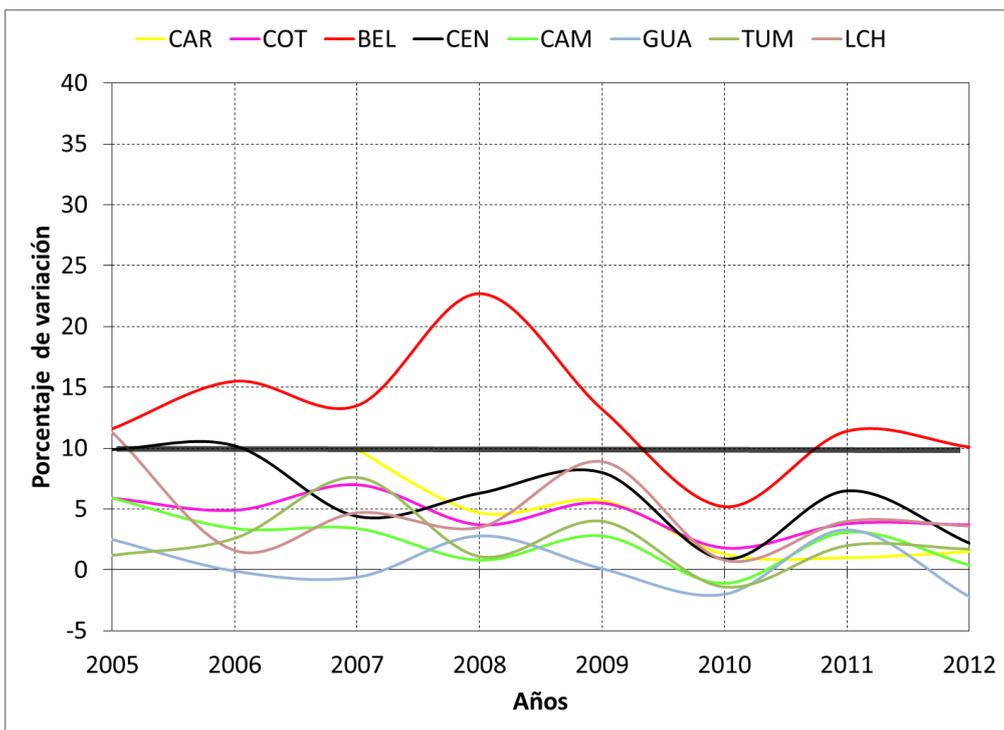


Figura 8.- Comparación de la variación de la concentración media octohoraria de O₃ de los días sábados con respecto a los días laborables

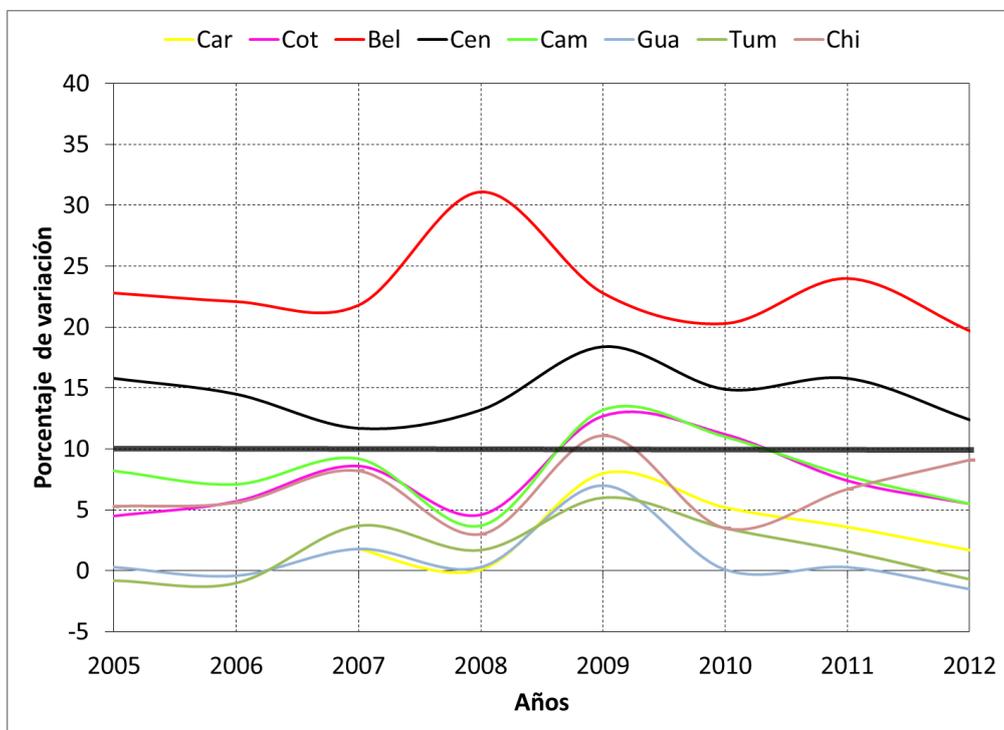


Figura 9.- Comparación de la variación de la concentración media octohoraria de O₃ de los días domingos con respecto a los días laborables

6. DISCUSIÓN

Los perfiles de las concentraciones medias horarias de CO presentan un primer máximo durante las primeras horas de la mañana. Estos máximos se presentan como consecuencia del primer pico de tráfico. Hacia las 06h00 típicamente se presenta la temperatura mínima. En estas condiciones, la densidad del aire es mayor, y por ende, la atmósfera es estable e impide la dispersión vertical de los contaminantes. La mayor estabilidad atmosférica y las altas emisiones del primer pico de tráfico explican los máximos de CO durante las primeras horas de la mañana. Posteriormente, la temperatura se incrementa, por acción de la radiación solar. En estas condiciones la altura de dispersión se va creciendo y con ello también se incrementa la capacidad de dispersión de la atmósfera; produciendo una reducción en las concentraciones de CO hacia el mediodía. Hacia el final de la tarde e inicio de la noche, se presenta un segundo máximo de CO, menor al máximo de la mañana, como respuesta al incremento de tráfico al final del día.

La configuración de los perfiles horarios de las concentraciones medias de NO₂, obedece esencialmente a las mismas causas indicadas para el CO. No obstante, se debe considerar que el NO₂ se destruye por acción de la radiación solar, y por ello sus concentraciones disminuyen a medida que avanzan las horas de la mañana; a más de la reducción producida por el incremento de la altura de la capa de mezcla.

La configuración de los perfiles horarios de las concentraciones medias de PM_{2.5}, obedece a las mismas causas indicadas para el CO.

Los perfiles de O₃ presentan una configuración marcadamente diferente a los perfiles de CO, NO₂ y PM_{2.5}. Todos perfiles de O₃ presentan mayores concentraciones horarias hacia el mediodía o durante las primeras horas de la tarde. Este comportamiento corresponde a la influencia de la radiación solar en las reacciones fotoquímicas que generan O₃. Los niveles máximos de radiación en Quito se registran entre las 09h00 y 16h00, por lo que los perfiles de O₃ presentan un comportamiento creciente hasta el mediodía, y posteriormente decreciente durante la tarde.

En los perfiles de CO se observan mayores concentraciones durante los días entre semana, en comparación con los fines de semana. Esta reducción se asocia directamente

a la disminución de tráfico vehicular durante los fines de semana, debido a que este contaminante es emitido principalmente por los vehículos a gasolina.

El NO_2 al igual que el CO , presenta mayores concentraciones durante los días entre semana en comparación con los fines de semana, lo que se atribuye de la misma manera a la disminución en la circulación de vehículos que usan tanto diésel y gasolina.

De la misma manera, los perfiles del contaminante $\text{PM}_{2.5}$ presentan concentraciones más altas durante los días entre semana en comparación con los fines de semana. Esta disminución se da como resultado de una menor circulación en fines de semana, de vehículos a diésel, principales emisores de $\text{PM}_{2.5}$.

Para el caso de la estaciones Belisario y Centro, podemos observar, al comparar los perfiles de O_3 y NO_2 , que su relación no es lineal, ya que hay una mayor concentración de O_3 en los días domingos, en los que presenta en general una menor concentración de NO_2 . Este comportamiento constituye una evidencia sobre la importancia en Quito de la primera hipótesis del Efecto Fin de Semana, que atribuye un incremento de O_3 , cuando hay menores emisiones de NO_2 , en zonas en donde la formación de O_3 se encuentra limitada por las concentraciones de VOC (Harley and Marr, 2002).

La variación de las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ durante los fines de semana, también pueden intervenir en la formación de O_3 . Mayores concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ dispersan o absorben en mayor nivel la radiación solar, y por ende reduce la cantidad de radiación solar disponible para la formación de O_3 . Si durante los días sábados y domingos hay menores concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$, hay mayores niveles de radiación solar en la atmósfera para generar O_3 (Blier et al., 1999). El comportamiento de los perfiles de $\text{PM}_{2.5}$ en las estaciones Belisario y Centro indica que la hipótesis número 6 del Efecto Fin de Semana, puede ser también relevante en Quito.

En las estaciones Carapungo, Cotocollao, El Camal, Tumbaco y Los Chillos hay una menor variabilidad de las concentraciones entre fines de semana y días laborables. Los datos analizados no permiten identificar con claridad el Efecto Fin de Semana en las mencionadas estaciones. En la estación Guamaní no se identifica el Efecto Fin de Semana.

Estos resultados ayudan a entender mejor el comportamiento de los contaminantes del aire en Quito, y pueden ser la base para el desarrollo de estudios de mayor alcance, para

cuantificar el aporte de las diferentes hipótesis que participan en el Efecto Fin de Semana.

Este análisis puede ayudar al planteamiento de políticas ambientales y acciones para controlar el incremento de las concentraciones de O_3 y de sus precursores, cuya relación es compleja, no lineal; y que se complica adicionalmente por la topografía irregular del DMQ, y por la complejidad de las fuentes de emisión.

7. CONCLUSIONES

7.1 Estaciones

7.1.1 Carapungo

En esta estación no se identifica con claridad el Efecto Fin de. Los porcentajes de variación de las concentraciones octohorarias de O₃ de los sábados con respecto a los días laborables varían entre 1 y 9.9 % (Anexo B); y para los días domingos entre 0.1 y 8 % (Anexo B). Carapungo corresponde a una zona que en los últimos años se ha ido consolidando como urbana, según el Mapa de División Política Administrativa (parroquias urbanas y rurales) (Secretaría General de Planificación, 2011).

Los perfiles diarios de NO₂, CO y PM_{2.5} indican un descenso en las concentraciones en fines de semana, en relación con los días laborables.

A futuro, con una mayor consolidación de la zona de influencia de esta estación, potencialmente se espera que el Efecto Fin de Semana se manifieste con claridad.

7.1.2 Cotocollao

Tampoco se identifica con claridad el Efecto Fin de Semana en esta estación, aunque los porcentajes de variación de las concentraciones medias octohorarias de O₃ son ligeramente mayores, en comparación con la estación Cotocollao (Figuras 8 y 9), sobre todo en los domingos. La variación de los días sábados varía entre 1.8 y 7%, y para los días domingo entre 4.5 y 12.7 % (Anexo B).

Esta zona es considerada urbana, de vialidad y de comercio, según el Mapa de División Política Administrativa (parroquias urbanas y rurales) (Secretaría General de Planificación, 2011). Por esta zona atraviesa una de las avenidas principales de Quito, llamada La Prensa, por lo que el tráfico durante los días laborables es más alto que los días entre semana.

Las diferencias en las concentraciones de O₃ son mayores en el año 2007 (7% en sábados y 8.6% en domingos), aunque en los años 2008 hasta 2012 se observan descensos entre 1.8 a 5.5 %.

7.1.3 Belisario

En Belisario es la estación en la que se presenta con mayor intensidad el Efecto Fin de semana (Figuras 8 y 9). El incremento de las concentraciones octohorarias de O₃ varían

entre 5.2 y 22.7% en los días sábados, y entre 19.7 y 31.1% en los días domingos. En general es la mencionada estación se presenta de manera clara y persistente el efecto Fin de Semana en los días domingos, durante los 8 años de registros analizados.

La estación Belisario se localiza en una zona netamente urbana y de vialidad según el Mapa de División Política Administrativa (parroquias urbanas y rurales) (Secretaría General de Planificación, 2011), que registra el efecto de las emisiones vehiculares de vías con alto tráfico como la Av. América, Mariana de Jesús y Av. Atahualpa.

El comportamiento los contaminantes es consistente durante todo el periodo analizado. Las concentraciones de O_3 son mayores durante los fines de semana, en tanto que las concentraciones de los contaminantes primarios analizados (NO_2 , CO y $PM_{2.5}$) son menores.

Como ya se indicó anteriormente, las hipótesis primera y sexta del Efecto Fin de Semana explicarían en manera clara el comportamiento de los contaminantes en esta estación. En este sentido, la estación Belisario se emplazaría en una zona en donde el régimen de generación de O_3 estaría limitada por *VOC*.

7.1.4 Centro

En el Centro Histórico de Quito se verifica también una presencia fuerte del Efecto Fin de Semana en los días domingos (Figura 9), con una variación de O_3 entre 11.7 y 18.4% (Figura 8 y 9). Durante los días laborables en el Centro Histórico hay niveles importantes de tráfico, con velocidades de circulación bajas; ya que se concentran oficinas, unidades educativas, negocios y hay una gran afluencia turística. Es considerada como zona urbana y vial según el Mapa de División Política Administrativa (parroquias urbanas y rurales) (Secretaría General de Planificación, 2011).

Especialmente durante los domingos hay una reducción importante de tráfico vehicular en el Centro Histórico. En los últimos años, en esta zona se limita el tráfico vehicular. Adicionalmente por el Centro Histórico atraviesa la ruta del Ciclopaseo, actividad que se inició el año 2003, y que se ha ido consolidando, llegando a contar en la actualidad con 15 000 participantes; reduciendo notablemente la presencia de vehículos en esta zona.

Al igual que la estación Belisario, la estación Centro se emplazaría en una zona en la que la generación de O_3 que estaría limitada por *VOC*.

Durante los días sábados, sin embargo, el comportamiento de O_3 es similar al de un día entre semana, debido a los altos niveles de tráfico en el Centro Histórico, por la gran cantidad de actividades comerciales y de turismo. El porcentaje de O_3 durante el sábado, varía entre 0.9 y 10.2 %. (Anexo B)

7.1.5 El Camal

En la estación El Camal no se aprecia con claridad y/o consistencia, la presencia del Efecto Fin de Semana (Figuras 8 y 9). Los incrementos en las concentraciones octohorarias de O_3 los días sábados entre -1.1 y 5.9 % y en los días domingos una variación de 3.7 y 13.2 % (Anexo B).

El comportamiento de los contaminantes del aire es variable sin una tendencia claramente definida durante el periodo de tiempo de estudio.

Una de las potenciales causas para este comportamiento es la presencia de actividades comerciales intensas, especialmente durante los sábados (ferias en el Mercado Mayorista), que produce emisiones de contaminantes importantes, similares a los registrados durante los días laborables.

7.1.6 Guamaní

En la estación Guamaní no se identifica el Efecto Fin de Semana (Figuras 8 y 9). Inclusive para los años 2006, 2007, 2010 y 2012 el promedio de las concentraciones octohorarias de O_3 , dieron valores negativos para los día sábados, y en los años 2006 y 2012 para los días domingos (Anexo B).

La estación Guamaní corresponde a una zona de transición entre la parte urbana y rural, con la presencia de un incremento de tráfico durante los sábados, potencialmente por una mayor cantidad de vehículos que se desplazan desde y hacia Quito, en relación a los días laborables. Según el Mapa de División Política Administrativa (parroquias urbanas rurales) (Secretaría General de Planificación, 2011), Guamaní no está considerada como parte de la zona urbana de Quito.

7.1.7 Tumbaco

El comportamiento de los contaminantes registrados en la estación Tumbaco no permite identificar con claridad del Efecto Fin de Semana. Los incrementos de O_3 de los días sábados varían entre -1.4 y 7.6 %, y en los días domingos entre -1.7 y 6 % (Anexo B).

Tumbaco corresponde a una zona en pleno desarrollo, con un incremento importante de tráfico vehicular, es una zona en donde hay una influencia importante de las emisiones de la vegetación, por lo que potencialmente la generación de O_3 corresponde a un régimen limitado por NO_x .

7.1.8 Los Chillos

El Valle de los Chillos es un sector que ha ido creciendo y evolucionando con el tiempo de acuerdo a las necesidades de la población, al encontrarse lejos de Quito se desarrollaron locales de negocios, bancos, y planteles educativos, logrando de esa forma que la población no deba movilizarse lejos de su hogar, promoviendo de esta forma la urbanización de la zona. El Valle de Los Chillos se conecta con el DMQ por medio de la autopista General Rumiñahui, una de las vías con mayor nivel de tráfico en el DMQ.

Los valores medio de las concentraciones octohorarias de O_3 varían entre 0.8 y 11.3 %, para los días sábados, y entre 3 y 11.1 % para los días domingos (Anexo B).

El comportamiento de los contaminantes registrados en la estación Los Chillos no permite identificar con claridad del Efecto Fin de Semana. Además se debe tomar en cuenta, que a más de las emisiones de tráfico, en la estación de Los Chillos, puede haber la influencia de las emisiones de las centrales térmicas de Guangopolo y Gualberto Hernández.

7.2 Propuestas de Continuidad

- Actualizar el inventario de emisiones del DMQ, priorizando aquellas fuentes de los precursores de contaminantes que participan en el Efecto Fin de Semana. Se debe dar especial relevancia a las emisiones del tráfico vehicular, en razón que se requiere contar con información de las emisiones para días laborables, sábados y domingos.
- En base del inventario de emisiones actualizado, se pueden desarrollar ejercicios de simulación numérica de la calidad del aire, por medio de modelos de transporte químico; a fin de cuantificar el aporte en el incremento de las concentraciones de O_3 , de las diferentes hipótesis que explican el Efecto Fin de Semana.
- Promover el monitoreo automático, al menos en las estaciones Belisario y Centro, de las concentraciones de VOC. Con esta información se puede cuantificar la relación VOC/NO_x y reducir la incertidumbre de los inventarios de emisiones. La relación VOC/NO_x es una magnitud relevante en el estudio del Efecto Fin de Semana.
- Alternativamente se podrían desarrollar estudios para establecer la relación VOC/NO_x , por medio de la información disponible para el CO, considerando que el CO puede ser utilizado como un indicador de las concentraciones de VOC
- Desarrollar estudios para caracterizar la relación entre las concentraciones de $PM_{2.5}$ y niveles de radiación en superficie. Este aspecto ayudaría a conocer en parte, como participa este mecanismo, en la mayor formación de O_3 durante los fines de semana.
- Empezar a monitorear mediante sensores automáticos, las concentraciones de contaminantes CO, NO_2 y $PM_{2.5}$ en la estación Tumbaco, CO y $PM_{2.5}$ en la estación Los Chillos (la estación Los Chillos, desde el año 2012, ya cuenta con un sensor automático de NO_2). Esta información, a más de servir para verificar el cumplimiento de la NCAA, ayudará a entender mejor el comportamiento de los contaminantes, y como se relacionan con el Efecto Fin de Seman

8. BIBLIOGRAFÍA

- Atkins, C., Miller, J., & Balling, R. (2006). *Quantifying the ozone "weekend effect" at Various locations in Phoenix, Arizona*. *Atmospheric Environment*. 40, 39, 7457-7662.
- Blier, W., Winer, A., Hansen, D., & Chavira, R. (1999). *Analysis of weekday/weekend differences in ambient air quality and meteorology in the South Coast Air Basin*. Final report to the California Air Resources Board, Contract No. 95-334.
- Brown, L., Lemay, E., & Burten, B. (2004). *Química*. México D.F: Pearson Educación.
- CARB. (2003). *The ozone weekend effect in California*. California: California Air Resources Board.
- Chikin, L., Coe, D., Funk, T., Hafner, H., Ryan, P., & Lawson, D. (2003). *Weekday versus weekend activity patterns ozone precursors emissions in California's South Coast Air Basin*. *Journal of the Air and Waste Management Association*. 53, 7, 829-843.
- Cleveland, W., Graedel, T., Kelines, B., & Warner, J. (1974). *Sunday and Workday Variations in Photochemical Air Pollutants in New Jersey and New York*. *Science*. 186, 1037-1038.
- Falagan, J. (2005). *Higiene industrial aplicada "ampliada"*. Madrid: Fundación Luis Fernandez Velasco.
- Fujita, E., Campbell, E., Zielinska, B., Sagebiel, J., Goliff, W., Stockwell, W., & Lawson, D. (2003). *Diurnal and Weekday Variations in the Sour Contributions of Ozone Precursors in California's South Coast Air Basin*. *Journal of the Air and Waste Management Association*. 53, 7, 844-863.

García, A., Jazcilevich, A., Ruiz, G., Torres, R., Suarez, M., & Reséndiz, A. (2009).

Ozone weekend effect analysis in Mexico City. *Atmosfera*. 22, 281-297.

Harley, R., Marr, L. (2002). *Spectral analysis of weekday-weekend differences in ambient ozone, nitrogen oxide, and non-methane hydrocarbon time series in California*. *Atmospheric Environment*. 36, 14, 2327-2335.

Heinke, W., Glynn, J. (1996). *Ingeniería ambiental*. México: Prentice Hall.

INAMHI. (2014). Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología.

<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/clima/>

CORPAIRE. (2009). *Inventario de Emisiones del DMQ 2007*. Distrito Metropolitano de Quito: Corporación Para el Mejoramiento del Aire de Quito.

Secretaría de Ambiente. (2012). *Informe Anual 2011 Calidad del Aire*. Distrito Metropolitano de Quito. <http://www.quitoambiente.gob.ec/>

Jiménez, P., Parra, R., Gassó, S., & Baldasano, J. (2004). *Modeling the ozone weekend effect in very complex terrains: a case study in the Northeastern Iberian Peninsula*. *Atmospheric Environment*. 39, 429-444.

Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. (2011). *Quito por temas*. Distrito Metropolitano de Quito. <http://www.quito.gob.ec/index.php/quito-por-temas>

NARSTO. (2004). *Particulate Matter Science for Policy Makers: A NARSTO Assessment*. (P. McMurry, M. Shepherd, & J. Vickery, Edits.) Cambridge: Cambridge University Press.

MAE. (2012). Acuerdo No. 050. Norma de Calidad del Aire Ambiente o Nivel de Inmisión. Ministerio del Ambiente.

- OIT. (2001). *Medio Ambiente*. Gobierno de España: Organización Internacional del Trabajo.
- OMS. (2005). *Guías de Calidad del Aire para Europa. Segunda Edición*. Copenhagen: Organización Mundial de la Salud.
- OMS. (2004). *Contaminantes del aire*. Copenhagen: Organización Mundial de la Salud
- OPS. (2010). *Determinantes ambientales y sociales de la salud*. Washington DC: Organización Panamericana de la Salud.
- Pollack, B., Ryerson, B., & Trainors, M. (2012). *Airborne and ground-based observations of a weekend effect ozone, precursors, and oxidation products in the California South Coast Air Basin*. *Journal of Geophysical Research*, 117, 1-14.
- Pronostican niveles altos de radiación solar. (2010, agosto 25). *La Hora*. Consultado en <http://www.lahora.com.ec/>
- Secretaría General de Planificación. (2011). *Mapa de División Política Administrativa (parroquias urbanas y rurales)*. Distrito Metropolitano de Quito: Secretaría General de Planificación.
- Secretaría de Territorio, Habitat y Vivienda. (2001). *Administraciones zonales del DMQ*. Distrito Metropolitano de Quito: Secretaría de Territorio, Habitat y Vivienda.
- Seguel, R., Morales, S. & Leiva, M. (2012). *Ozone weekend effect in Santiago, Chile*. *Environmental Pollution*, 162, 72-79.
- Thermo. (2004). *MODEL 49 C, UV PHOTOMETRIC O₃, ANALYZER*. Thermo Electron Corporation Environment Instruments.

USEPA.(1983). *Proceeding of the Empirical Kinetic Modeling Approach (EKMA)*.

United States of America: United States Environmental Protection Agency.

USEPA. (2008). *Review of the CORPAIRE ambient air monitoring network for the city*

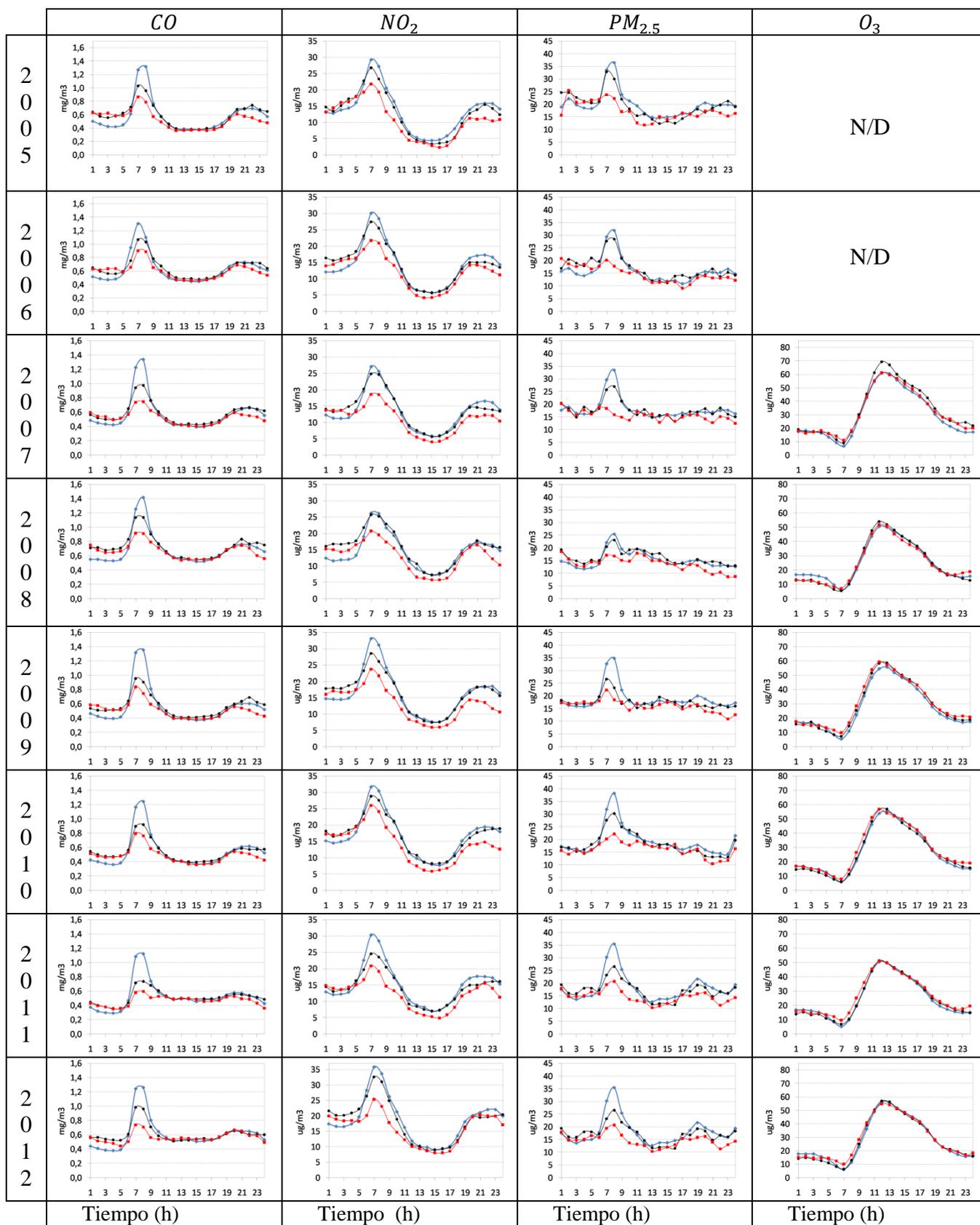
of Quito, Ecuador.United States. Environmental Protection Agency.

Yarwood, G., Stoeckenius, T., Heiken, J., &Dunker, A. (2003).*Modeling*

weekday/weekend, ozone difference in Los Angeles region for 1977. Journal of

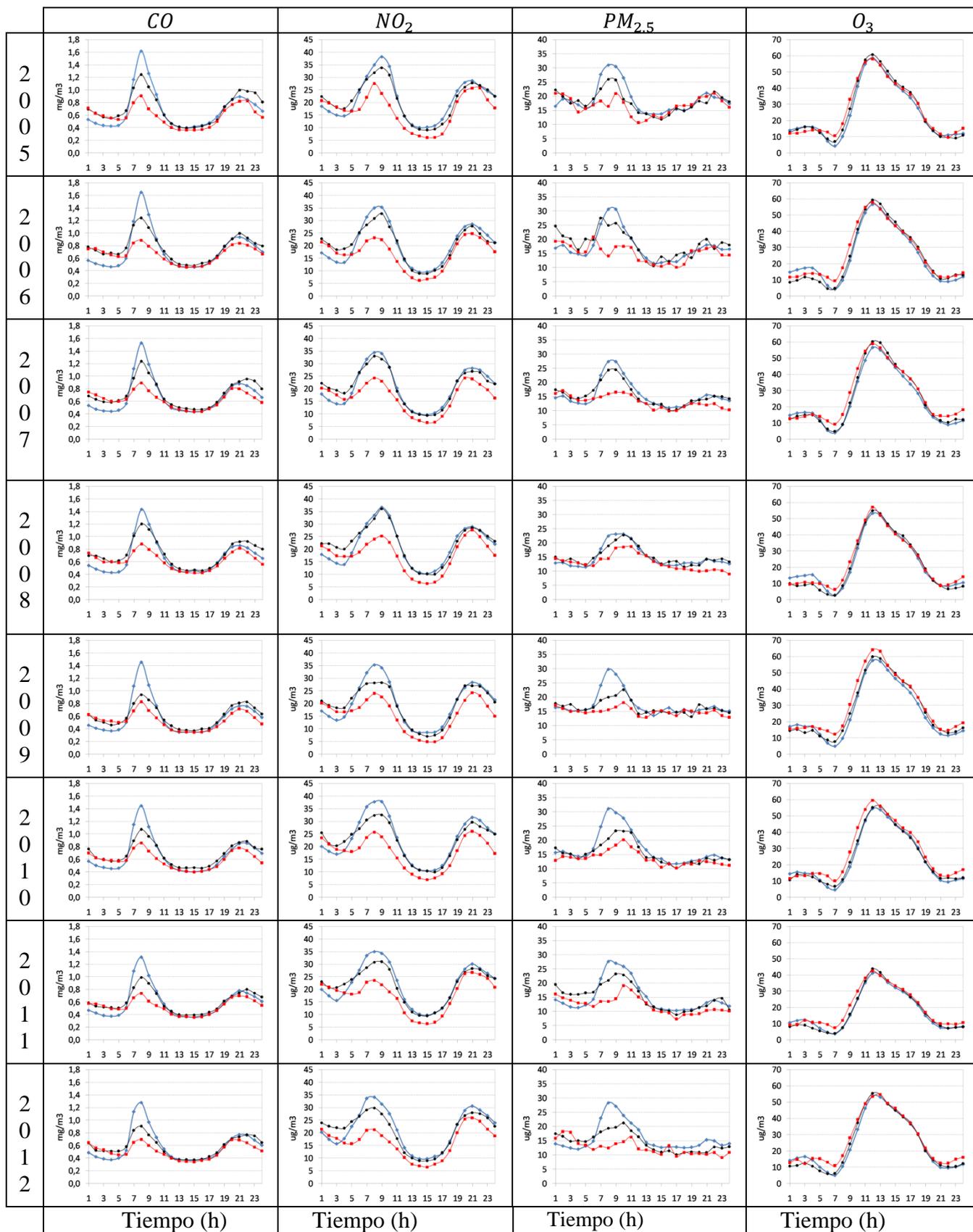
the Air and Waste Management Association. 53, 864-875.

9. ANEXO A



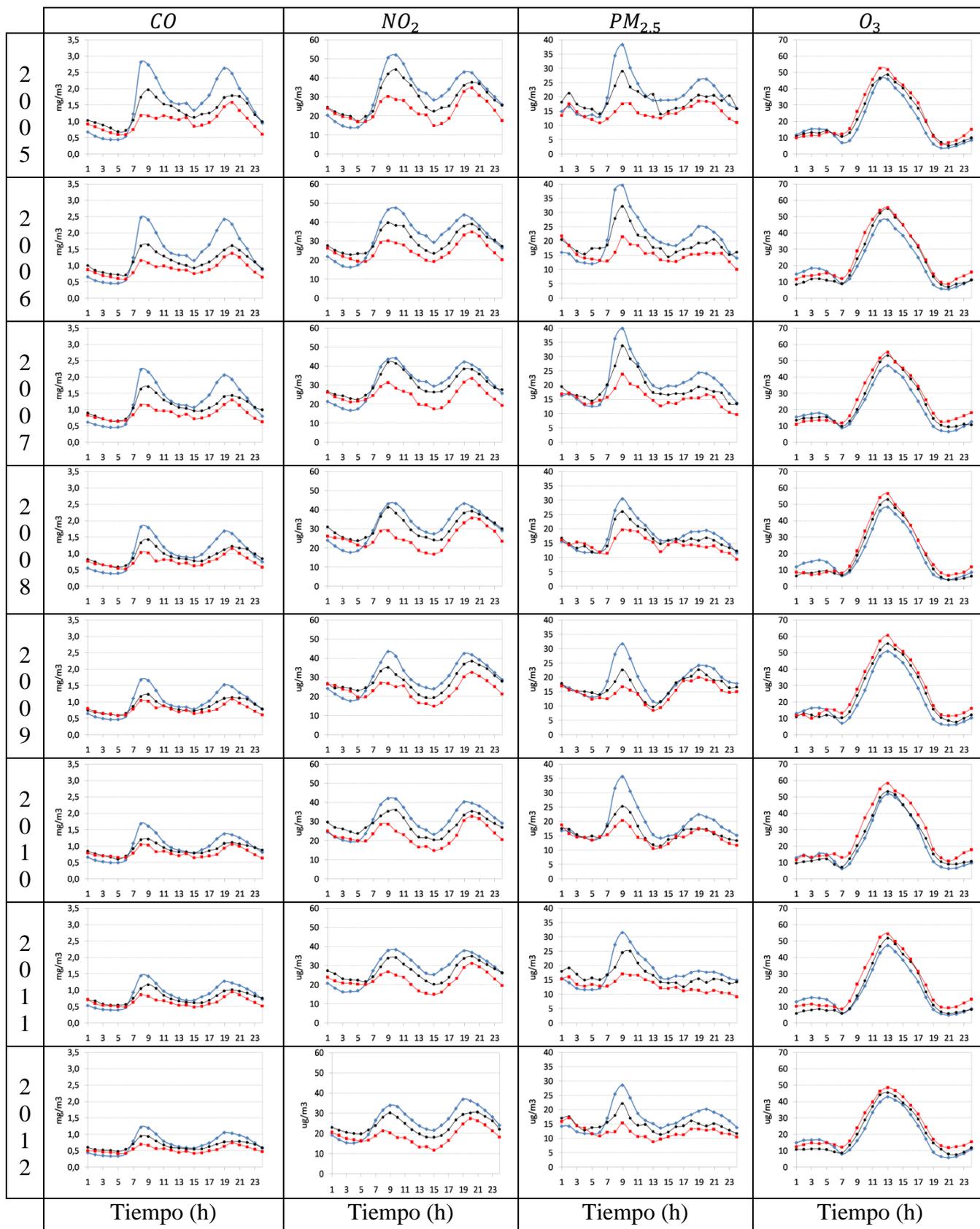
Perfiles medios diarios para Carapungo



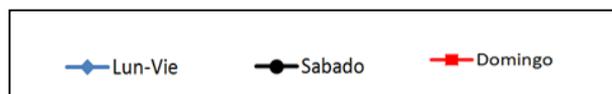


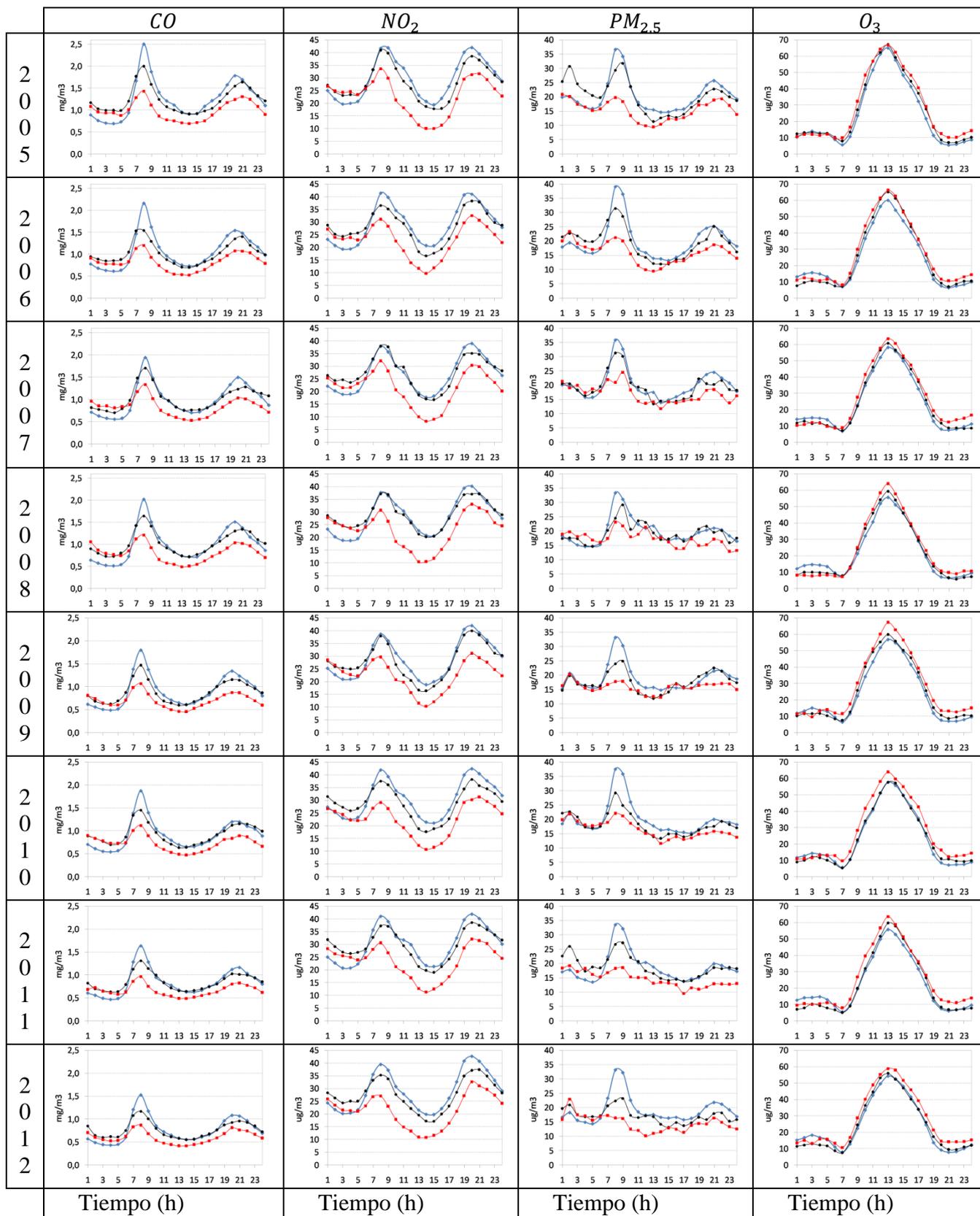
Perfiles medios diarios para Cotocollao



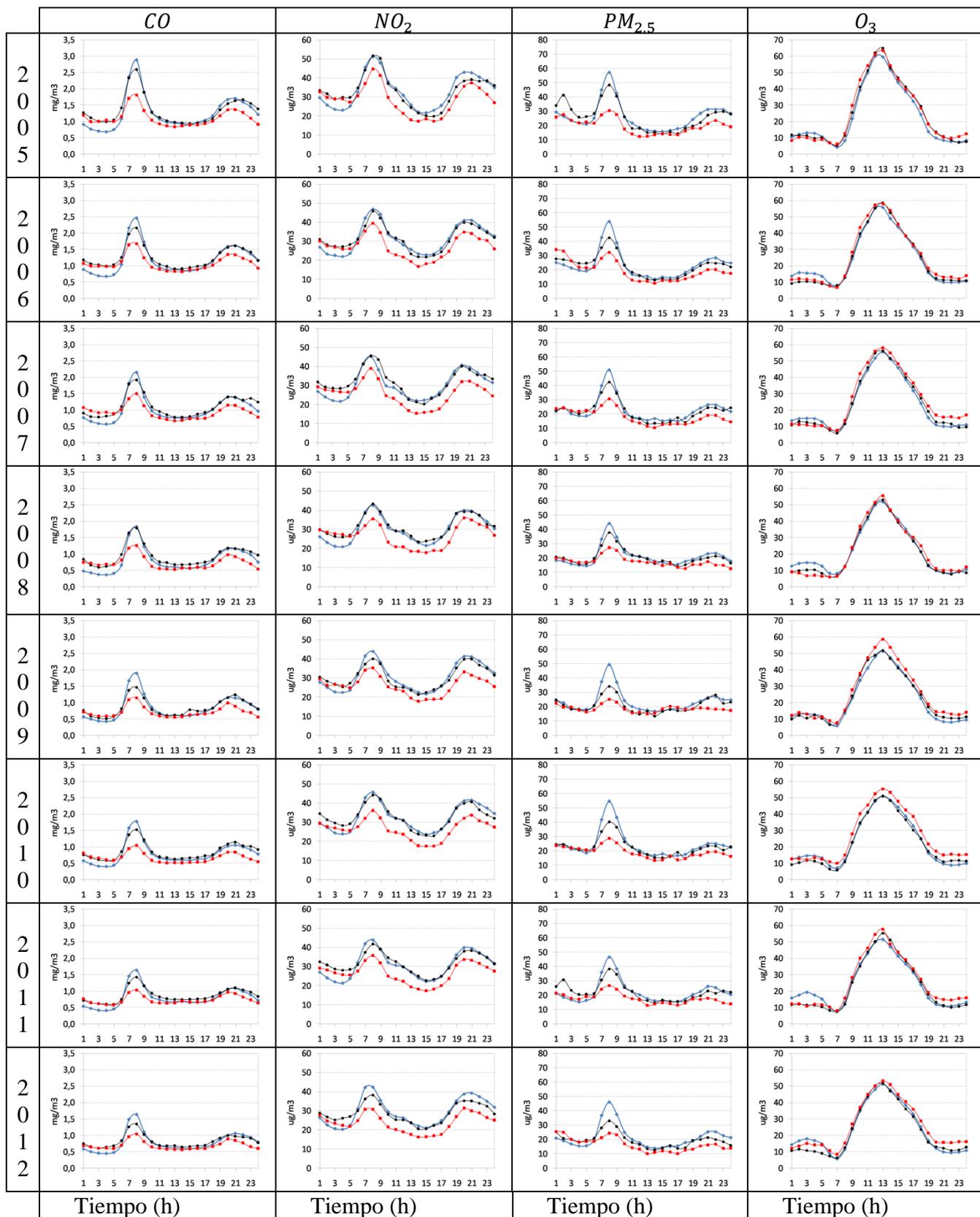


Perfiles medios diarios para Belisario

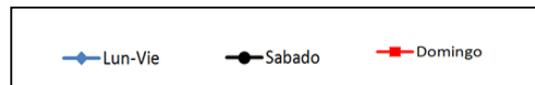


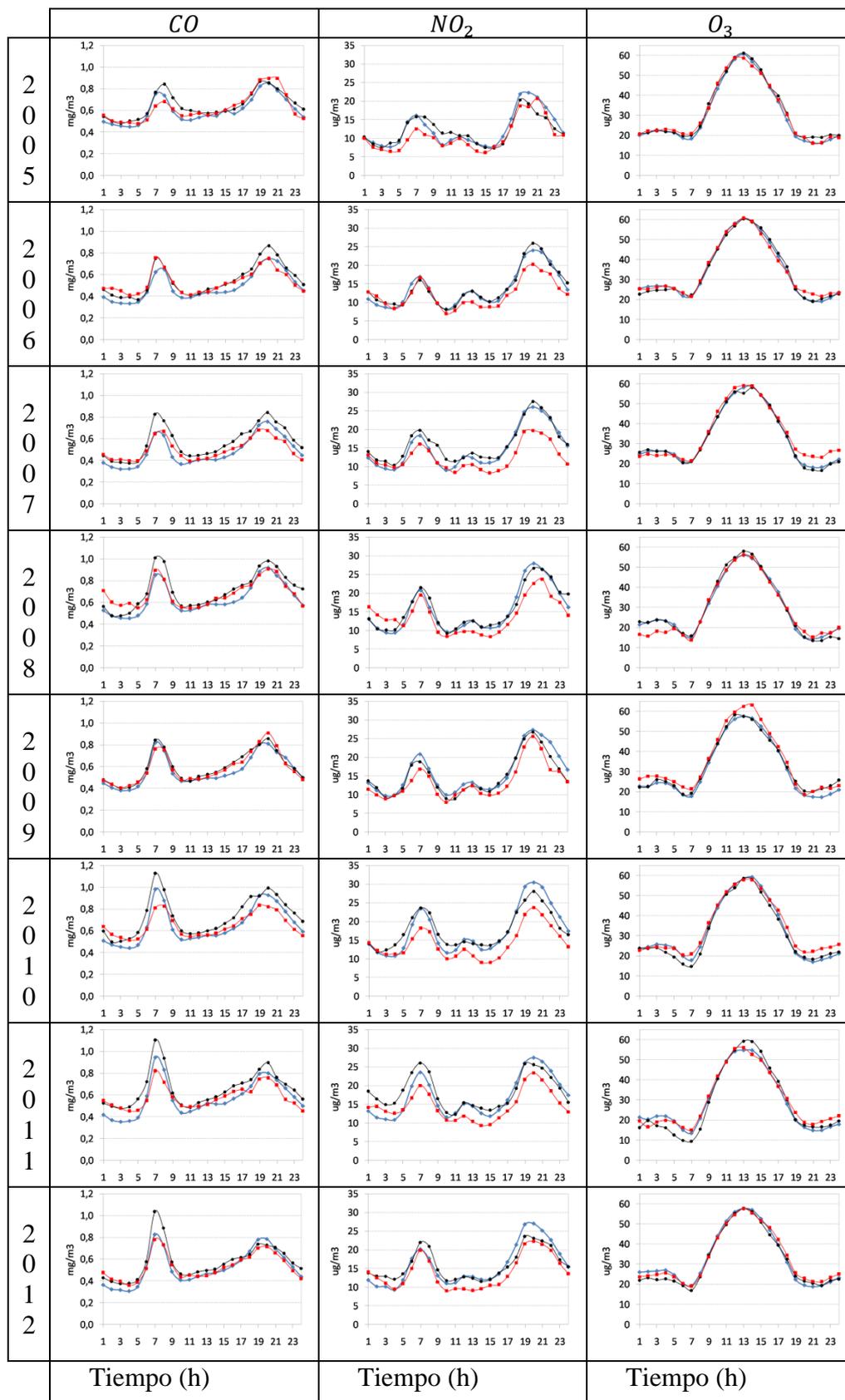


Perfiles medios diarios para Centro

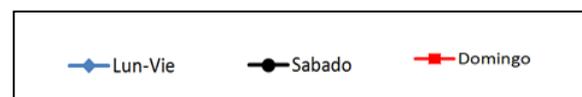


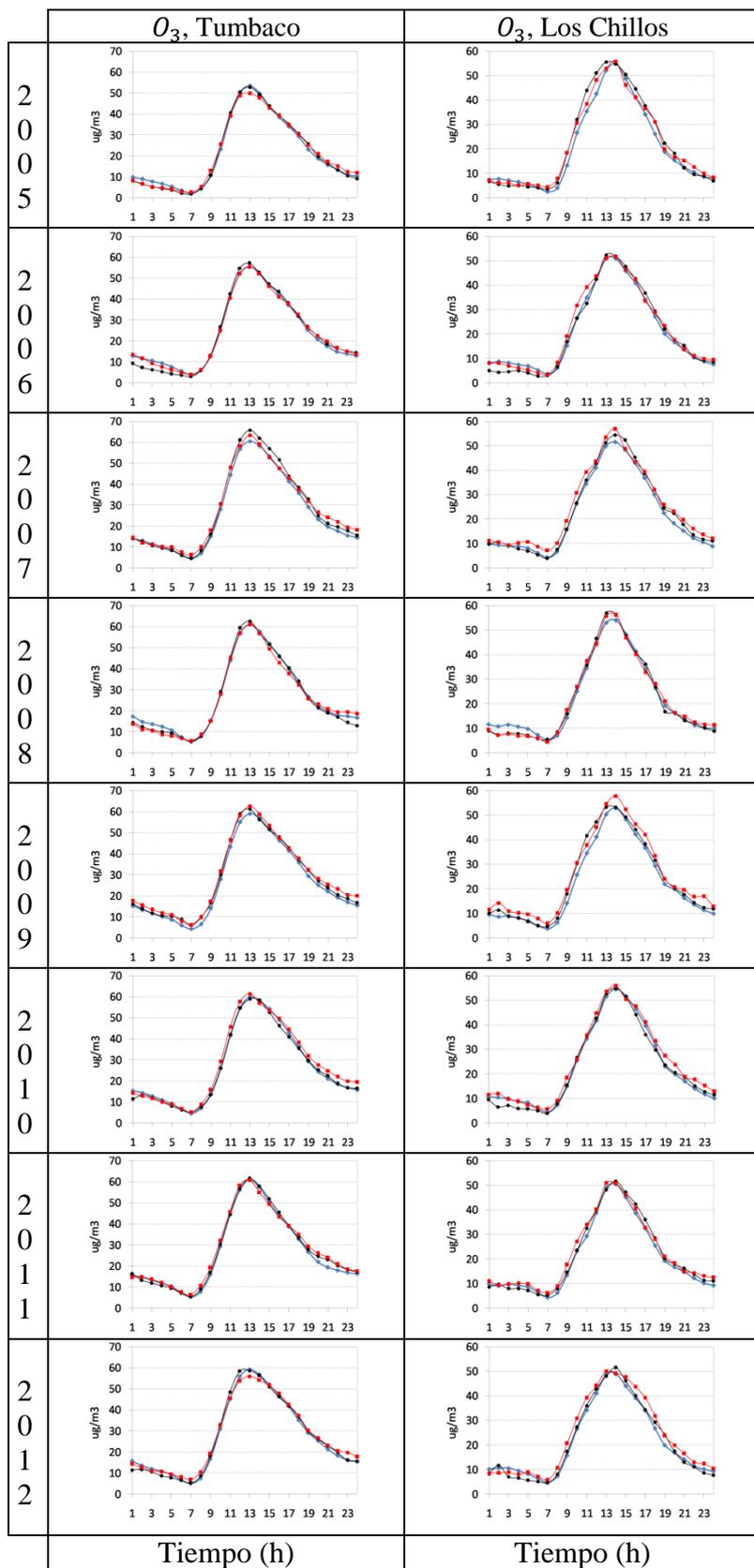
Perfiles medios diarios para El Camal





Perfiles medios diarios para Guamaní





Perfiles medios diarios para Tumbaco y Los Chillos

Lun-Vie
 Sabado
 Domingo

ANEXO B

Variación de la concentración media octohoraria de O₃, de días sábados con respecto a los días laborables (L-V). Carapungo.

Año	Día	O₃, µg/m³	Variación %
2007	Promedio L-V	49.91	9.9
	Promedio sábado	54.86	
2008	Promedio L-V	40.87	4.7
	Promedio sábado	42.81	
2009	Promedio L-V	45.17	5.7
	Promedio sábado	47.78	
2010	Promedio L-V	44.53	1.3
	Promedio sábado	45.12	
2011	Promedio L-V	40.41	1.0
	Promedio sábado	40.84	
2012	Promedio L-V	45.66	1.5
	Promedio sábado	46.28	

Variación de la concentración media octohoraria de O₃, de días sábados con respecto a los días laborables (L-V). Cotocollao.

Año	Día	O₃, µg/m³	Variación %
2005	Promedio L-V	45.02	5.9
	Promedio sábado	47.70	
2006	Promedio L-V	44.21	4.9
	Promedio sábado	46.42	
2007	Promedio L-V	43.62	7.0
	Promedio sábado	46.70	
2008	Promedio L-V	40.68	3.7
	Promedio sábado	42.17	
2009	Promedio L-V	45.19	5.5
	Promedio sábado	47.72	
2010	Promedio L-V	42.72	1.8
	Promedio sábado	43.50	
2011	Promedio L-V	31.70	3.8
	Promedio sábado	32.93	
2012	Promedio L-V	42.77	3.7
	Promedio sábado	44.37	

Variación de la concentración media octohoraria de O₃, de días sábados con respecto a los días laborables (L-V). Belisario.

Año	Día	O₃, µg/m³	Variación %
2005	Promedio L-V	34.45	11.6
	Promedio sábado	38.47	
2006	Promedio L-V	36.89	15.5
	Promedio sábado	42.62	
2007	Promedio L-V	35.78	13.52
	Promedio sábado	40,62	
2008	Promedio L-V	32.58	22.7
	Promedio sábado	39.98	
2009	Promedio L-V	38.85	13.2
	Promedio sábado	44.01	
2010	Promedio L-V	38.73	5.2
	Promedio sábado	40.76	
2011	Promedio L-V	34.16	11.4
	Promedio sábado	38.08	
2012	Promedio L-V	33.24	10.1
	Promedio sábado	36.63	

Variación de la concentración media octohoraria de O_3 , de días sábados con respecto a los días laborables (L-V). Centro.

Año	Día	O_3, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Variación %
2005	Promedio L-V	46.71	9.9
	Promedio sábado	51.37	
2006	Promedio L-V	45.41	10.2
	Promedio sábado	50.07	
2007	Promedio L-V	44.87	4.4
	Promedio sábado	46.87	
2008	Promedio L-V	42.04	6.3
	Promedio sábado	44.70	
2009	Promedio L-V	44.18	8.0
	Promedio sábado	47.72	
2010	Promedio L-V	43.99	0.9
	Promedio sábado	44.41	
2011	Promedio L-V	41.67	6.5
	Promedio sábado	44.40	
2012	Promedio L-V	43.02	2.7
	Promedio sábado	44.19	

Variación de la concentración media octohoraria de O₃, de días sábados con respecto a los días laborables (L-V). El Camal.

Año	Día	O₃, µg/m³	Variación %
2005	Promedio L-V	45.52	5.9
	Promedio sábado	48.21	
2006	Promedio L-V	43.80	3.4
	Promedio sábado	45.30	
2007	Promedio L-V	43.36	3.4
	Promedio sábado	44,84	
2008	Promedio L-V	40.13	0.8
	Promedio sábado	40.42	
2009	Promedio L-V	40.30	2.8
	Promedio sábado	41.43	
2010	Promedio L-V	40.97	-1.19
	Promedio sábado	40.48	
2011	Promedio L-V	41.52	3.1
	Promedio sábado	42.83	
2012	Promedio L-V	41.20	0.4
	Promedio sábado	41.37	

Variación de la concentración media octohoraria de O₃, de días sábados con respecto a los días laborables (L-V). Guamaní.

Año	Día	O₃, µg/m³	Variación %
2005	Promedio L-V	49.98	2.3
	Promedio sábado	51.17	
2006	Promedio L-V	52.12	-0.1
	Promedio sábado	52.08	
2007	Promedio L-V	50.65	-0.6
	Promedio sábado	50.34	
2008	Promedio L-V	47.39	2.8
	Promedio sábado	48.75	
2009	Promedio L-V	49.93	0.1
	Promedio sábado	49.99	
2010	Promedio L-V	50.66	-2.0
	Promedio sábado	49.62	
2011	Promedio L-V	47.33	3.3
	Promedio sábado	48.92	
2012	Promedio L-V	50.05	-2.2
	Promedio sábado	48.93	

Variación de la concentración media octohoraria de O₃, de días sábados con respecto a los días laborables (L-V). Tumbaco.

Año	Día	O₃, µg/m³	Variación %
2005	Promedio L-V	38.57	1.2
	Promedio sábado	39.04	
2006	Promedio L-V	41.05	2.6
	Promedio sábado	42.15	
2007	Promedio L-V	45.48	7.6
	Promedio sábado	48.96	
2008	Promedio L-V	45.12	1.1
	Promedio sábado	45.64	
2009	Promedio L-V	44.27	4.0
	Promedio sábado	46.08	
2010	Promedio L-V	44.62	-1.4
	Promedio sábado	43.96	
2011	Promedio L-V	44.75	2.0
	Promedio sábado	45.68	
2012	Promedio L-V	45.45	1.7
	Promedio sábado	46.23	

Variación de la concentración media octohoraria de O₃, de días sábados con respecto a los días laborables (L-V). Los Chillos.

Año	Día	O₃, µg/m³	Variación %
2005	Promedio L-V	39.32	11.3
	Promedio sábado	43.78	
2006	Promedio L-V	38.43	1.6
	Promedio sábado	39.07	
2007	Promedio L-V	38.71	4.7
	Promedio sábado	40.56	
2008	Promedio L-V	39.40	3.5
	Promedio sábado	40.80	
2009	Promedio L-V	38.64	8.9
	Promedio sábado	42.08	
2010	Promedio L-V	40.02	0.8
	Promedio sábado	40.36	
2011	Promedio L-V	35.98	4.0
	Promedio sábado	37.44	
2012	Promedio L-V	37.27	3.6
	Promedio sábado	38.61	

Variación de la concentración media octohoraria de O₃, de días domingos con respecto a los días laborables (L-V). Carapungo.

Año	Día	O₃, µg/m³	Variación %
2007	Promedio L-V	49.91	1.8
	Promedio domingo	50,81	
2008	Promedio L-V	40.87	0.1
	Promedio domingo	40.90	
2009	Promedio L-V	45.17	8.0
	Promedio domingo	48.80	
2010	Promedio L-V	44.53	5.2
	Promedio domingo	46.85	
2011	Promedio L-V	40.41	3.6
	Promedio domingo	41.89	
2012	Promedio L-V	45.66	1.7
	Promedio domingo	46.45	

Variación de la concentración media octohoraria de O_3 , de días domingos con respecto a los días laborables (L-V). Cotocollao.

Año	Día	O_3, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Variación %
2005	Promedio L-V	45.02	4.5
	Promedio domingo	47.07	
2006	Promedio L-V	44.21	5.7
	Promedio domingo	46.76	
2007	Promedio L-V	43.62	8.6
	Promedio domingo	47.40	
2008	Promedio L-V	40.68	4.6
	Promedio domingo	42.57	
2009	Promedio L-V	45.19	12.7
	Promedio domingo	50.97	
2010	Promedio L-V	42.72	11.2
	Promedio domingo	47.51	
2011	Promedio L-V	31.70	7.4
	Promedio domingo	34.06	
2012	Promedio L-V	42.77	5.5
	Promedio domingo	45.14	

Variación de la concentración media octohoraria de O_3 , de días domingos con respecto a los días laborables (L-V). Belisario.

Año	Día	O_3, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Variación %
2005	Promedio L-V	34.45	22.8
	Promedio domingo	42.32	
2006	Promedio L-V	36.89	22.1
	Promedio domingo	45.05	
2007	Promedio L-V	35.78	21.8
	Promedio domingo	43.61	
2008	Promedio L-V	32.58	31.1
	Promedio domingo	42.72	
2009	Promedio L-V	38.85	22.8
	Promedio domingo	47.74	
2010	Promedio L-V	38.73	20.3
	Promedio domingo	46.60	
2011	Promedio L-V	34.16	24.0
	Promedio domingo	42.39	
2012	Promedio L-V	33.24	19.7
	Promedio domingo	39.79	

Variación de la concentración media octohoraria de O_3 , de días domingos con respecto a los días laborables (L-V). Centro.

Año	Día	O_3, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Variación %
2005	Promedio L-V	46.71	15.8
	Promedio domingo	54.12	
2006	Promedio L-V	45.41	14.5
	Promedio domingo	52.01	
2007	Promedio L-V	44.87	11.7
	Promedio domingo	50.15	
2008	Promedio L-V	42.04	13.2
	Promedio domingo	47.62	
2009	Promedio L-V	44.18	18.4
	Promedio domingo	52.35	
2010	Promedio L-V	43.99	14.9
	Promedio domingo	50.58	
2011	Promedio L-V	41.67	15.8
	Promedio domingo	48.26	
2012	Promedio L-V	43.02	12.4
	Promedio domingo	48.36	

Variación de la concentración media octohoraria de O_3 , de días domingos con respecto a los días laborables (L-V). El Camal.

Año	Día	O_3, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Variación %
2005	Promedio L-V	45.52	8.2
	Promedio domingo	49.26	
2006	Promedio L-V	43.80	7.1
	Promedio domingo	46.94	
2007	Promedio L-V	43.36	9.2
	Promedio domingo	47.38	
2008	Promedio L-V	40.13	3.7
	Promedio domingo	40.62	
2009	Promedio L-V	40.30	13.2
	Promedio domingo	45.63	
2010	Promedio L-V	40.97	11.0
	Promedio domingo	45.49	
2011	Promedio L-V	41.52	7.8
	Promedio S-D	44.77	
2012	Promedio L-V	41.20	5.5
	Promedio S-D	43.48	

Variación de la concentración media octohoraria de O_3 , de días domingos con respecto a los días laborables (L-V). Guamaní.

Año	Día	O_3, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Variación %
2005	Promedio L-V	49.98	0.3
	Promedio domingo	50.14	
2006	Promedio L-V	52.12	-0.4
	Promedio domingo	51.97	
2007	Promedio L-V	50.65	1.8
	Promedio domingo	51.59	
2008	Promedio L-V	47.39	0.3
	Promedio domingo	47.56	
2009	Promedio L-V	49.93	7.0
	Promedio domingo	53.47	
2010	Promedio L-V	50.66	0.1
	Promedio domingo	50.71	
2011	Promedio L-V	47.33	0.3
	Promedio domingo	47.50	
2012	Promedio L-V	50.05	-1.5
	Promedio domingo	49.27	

Variación de la concentración media octohoraria de O_3 , de días domingos con respecto a los días laborables (L-V). Tumbaco.

Año	Día	O_3, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Variación %
2005	Promedio L-V	38.57	-0.8
	Promedio domingo	38.26	
2006	Promedio L-V	41.05	-1.0
	Promedio domingo	40.62	
2007	Promedio L-V	45.48	3.7
	Promedio domingo	47.17	
2008	Promedio L-V	45.12	-1.7
	Promedio domingo	44.34	
2009	Promedio L-V	44.27	6.0
	Promedio domingo	46.96	
2010	Promedio L-V	44.62	3.5
	Promedio domingo	46.21	
2011	Promedio L-V	44.75	1.6
	Promedio domingo	45.49	
2012	Promedio L-V	45.45	-0.7
	Promedio domingo	45.09	

Variación de la concentración media octohoraria de O_3 , de días domingos con respecto a los días laborables (L-V). Los Chillos.

Año	Día	O_3, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Variación %
2005	Promedio L-V	39.32	5.3
	Promedio domingo	41.44	
2006	Promedio L-V	38.43	5.6
	Promedio domingo	40.61	
2007	Promedio L-V	38.71	8.2
	Promedio domingo	41.89	
2008	Promedio L-V	39.40	3.0
	Promedio domingo	40.61	
2009	Promedio L-V	38.64	11.1
	Promedio domingo	42.95	
2010	Promedio L-V	40.02	3.5
	Promedio domingo	41.45	
2011	Promedio L-V	35.98	6.7
	Promedio domingo	38.40	
2012	Promedio L-V	37.27	9.1
	Promedio domingo	40.68	