5. COMPONENTE INVENTARIO DE EMISIONES POR FUENTES FIJAS PUNTUALES. AÑO BASE 2014.

5.1. Presentación

Al igual que las emisiones provenientes de fuentes móviles, las fuentes fijas son de especial interés en la cuantificación de inventarios de emisión y la estimación del aporte completo de fuentes antropogénicas a las emisiones de centros urbanos.

Para el caso de Manizales, se destaca el trabajo realizado por Muñoz (2008), donde se estimaron las emisiones por fuentes fijas para el sector de Maltería con año base 2005. A partir de esta fecha no se ha realizado una actualización de dicho inventario. Otros sectores de importancia, por ejemplo la zona industrial de Milán y otras fuentes en la zona rural de Manizales y otros municipios de importancia como Villamaría (por su cercanía con la ciudad), no han sido tenidos en cuenta en la estimación de las emisiones.

En este estudio se realizó la actualización del inventario de emisiones por fuentes fijas puntuales para el año base 2014. La estimación del inventario contó con dos etapas. En la primera, se utilizó la información de muestreos isocinéticos (los reportes más recientes tomando como límite el año 2014) que reposan en los expedientes ambientales de la Corporación. Se consultó además información de otras fuentes como el Registro Único Ambiental (RUA). Esta última fuente de consulta empleada para aquellas empresas de importancia que no están obligadas a tramitar permiso de emisiones y no cuentan con información de actividad (consumo de combustible, tiempos de operación entre otros) en los expedientes ambientales. En la segunda etapa, se realizó la estimación de las emisiones utilizando la información de los reportes isocinéticos y aplicando la metodología de factores de emisión. Esta última, para los contaminantes de los cuales no se disponía información proveniente de monitoreos isocinéticos.

5.2. Metodología inventario de emisiones por fuentes fijas

La estimación del inventario de emisiones se centró en los siguientes aspectos:

- Diseño de la base de datos con los campos de información de utilidad en la estimación del inventario de emisiones y posterior análisis de información.
- Recopilación de información secundaria de las principales industrias generadoras de emisiones en Manizales y aquellas de importancia en el departamento de Caldas.
- Consulta de la base de datos de empresas que están obligadas a tramitar permiso de emisión. Información aportada por la Corporación Ambiental.
- Revisión de los expedientes ambientales de empresas seleccionadas para extraer la información necesaria para la base de datos.
- Búsqueda de empresas que no están obligadas a tramitar permiso de emisión pero que ameritan una búsqueda de información sobre su proceso, el cual podría ser generador de emisiones atmosféricas.
- Revisión de los registros del RUA (Registro Único Ambiental) para las empresas seleccionadas que no están obligadas a tramitar permiso de emisión.

- Estimación de emisiones para contaminantes criterio (CO, NO_X, SO_X, PM), efecto invernadero (CO_2, CH_4, N_2O), metales, compuestos orgánicos volátiles, dioxinas y furanos y otros contaminantes de interés.
- Revisión global de cálculos realizados. Aquellos reportes o cálculos que muestran valores atípicos no se tuvieron en cuenta en el inventario.

5.2.1. Diseño de base de datos para recopilación de información de fuentes fijas puntuales

Previo a la recopilación de la información necesaria para la estimación de las emisiones por fuentes fijas, se realizó un diseño de una base de datos que permite no solo la estimación de las emisiones sino también llevar un registro completo de las industrias analizadas. Lo anterior es de gran utilidad para analizar aspectos como fortalezas y debilidades de la información, necesidades futuras de información, entre otros. Además, permite actualizaciones de información a futuro para el cálculo periódico del inventario, aspecto de gran utilidad en la evaluación de las tendencias y comportamiento de las emisiones.

El diseño de la base de datos y los campos de información, fueron seleccionados teniendo en cuenta la información específica que pueda encontrarse dentro de los expedientes de permiso de emisión de las empresas.

Los contaminantes tenidos en cuenta en el inventario comprenden aquellos reportados en los expedientes de permiso de emisión, determinados a partir de estudios isocinéticos. Se tuvieron en cuenta los expedientes del año 2014 o el último expediente reportado, si el año es anterior al 2014. Según el tipo de proceso industrial, la Resolución 909 de 2008 especifica los contaminantes que deben ser objeto del monitoreo isocinético. Se incluyeron además campos en la base de datos para estimar otros contaminantes de importancia dentro del grupo de contaminantes criterio, gases efecto invernadero, metales entre otros, que complementan los reportes de medición isocinética. Las estimaciones de estos contaminantes se realizaron a partir de la metodología de factores de emisión con base en la información secundaria consultada, por ejemplo la actividad económica, materias primas, cantidades producidas, uso de combustible y tiempos de operación de los equipos fuente.

5.2.2. Recopilación de información de fuentes fijas puntuales

La recopilación de información de las fuentes fijas puntuales se realizó aplicando las siguientes etapas:

- Consulta de la base de datos de empresas que están obligadas a tramitar permiso de emisión. Información aportada por la Corporación Ambiental.
- Revisión de los expedientes ambientales de empresas seleccionadas para extraer la información necesaria para la base de datos.
- Búsqueda de empresas que no están obligadas a tramitar permiso de emisión pero que ameritan una búsqueda de información sobre su proceso, el cual podría ser generador de emisiones atmosféricas.
- Revisión de los registros del RUA (Registro Único Ambiental) para las empresas seleccionadas que no están obligadas a tramitar permiso de emisión.

La revisión de los expedientes ambientales y registros del RUA fue realizada por personal del G.T.A en Ingeniería Hidráulica y Ambiental. Se realizaron tres campañas de revisión de los expedientes ambientales (agosto 2014, junio 2015 y enero 2016). Las siguientes son algunas conclusiones importantes obtenidas del proceso de revisión de información secundaria:

- Se realizó la consulta de 39 empresas generadoras de emisiones atmosféricas en Manizales, Villamaría y Chinchiná.
- De las 39 industrias consultadas, 28 reportan estudios isocinéticos. La información de proceso de las 11 industrias restantes fue obtenida de los expedientes ambientales y del RUA.
- En total se cuantificaron 87 puntos de emisión de importancia para la estimación del inventario de emisiones por fuentes fijas puntuales.
- De las 39 industrias consultadas, 33 se encuentran ubicadas en jurisdicción del municipio de Manizales, 4 en jurisdicción del municipio de Villamaría y 2 en jurisdicción del municipio de Chinchiná.
- Entre las empresas consultadas que se ubican en el municipio de Manizales, 19 hacen parte de la zona industrial Maltería, 3 hacen parte de la zona industrial de Milán y las restantes se distribuyen en otras zonas del área urbana y rural.

5.2.3. Recopilación de información bibliográfica de soporte para aplicar la metodología de factores de emisión

Se realizó la consulta principalmente de la metodología reportada por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés). La metodología y factores de emisión reportados por la EPA han sido utilizados en la estimación de otros inventarios en las principales ciudades del país. Es el caso del inventario de emisiones por fuentes fijas industriales del Valle de Aburrá (AMVA, 2013) y el inventario de emisiones por fuentes fijas industriales de la ciudad de Bogotá estimado por Peñaloza (2010).

La ecuación para la estimación de emisiones por el método de factor de emisión se reporta como (http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/):

$$E_p = \sum_{j,k} EF_{j,k} * A_{j.k} * \left(1 - \frac{n_{j,k}}{100}\right) \quad (5.1)$$

Donde E_p es la emisión anual del contaminante p. Los subíndices j, k representan el tipo de combustible y categoría de la fuente de emisión. A es el dato de actividad anual (por ejemplo consumo anual de combustible o cantidad de producto elaborado). EF es el factor de emisión promedio y n la eficiencia de la tecnología de control de emisiones utilizada.

Los factores de emisión (EFs) fueron consultados de la base de datos EPA AP-42 (http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/). Otras fuentes de información sobre factores de emisión fueron la IPCC (http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/find_ef_main.php) y la UNEP (http://toolkit.pops.int/Publish/Main/Download.html).

5.3. Resultados

5.3.1. Diseño de la base de datos

Se empleó el software Excel para registrar la información secundaria consultada. Esta información fue dividida en grupos principales y subgrupos. La Tabla 5.1 resume los campos de información que componen la base de datos de Fuentes Fijas Puntuales para la estimación del inventario de emisiones en Manizales. En el Anexo 5.1 (digital) se adjunta la base de datos en su versión final.

Tabla 5.1. Campos de información que componen la base de datos de Fuentes Fijas Puntuales.

Campos de Grupo	Campos de Subgrupo	Observaciones
Información General de Identificación	Numeró de identificación de industria	Información definida por el G.T.A
	Numeró de identificación de punto de emisión	
	Nombre de la empresa	Información definida por expediente de emisiones
	Numeró de identificación de expediente de emisiones	
Información General de Consulta	Fecha de consulta de expediente de emisiones u otro tipo información	Información definida por el G.T.A según fecha de consulta
	Fecha de reporte de emisiones	Para aquellas empresas con monitoreo isocinético. Fecha de publicación del estudio
	Fecha elaboración monitoreo isocinético	Según informe del monitoreo isocinético. Fecha de elaboración del muestreo
Información General de Actividad Económica	Actividad Económica	Según documento del DANE: Clasificación Industrial Internacional Uniforme de todas las Actividades Económicas (DANE, 2012)
	Código CIIU	
	Tipo de producción	Lista desplegable con sectores productivos definidos por el G.T.A. según las actividades económicas del DANE. Por ejemplo: Bebidas y alimentos, Fundición, Metalúrgica, entre otros.
	Descripción específica de actividad económica	Según información del expediente ambiental y datos del objeto, misión y visión de la empresa
Información General del Equipo Fuente	Tipo de Equipo	Equipo generador de emisiones
	Descripción y Características	Información específica disponible, como marca, serial, tecnología.
Información sobre ubicación de la empresa	Ubicación geográfica de la empresa	Información sobre coordenadas geográficas, planas y altitud (msnm)
	Dirección	Dirección de ubicación específica reportada
	Zona industrial	Según la zona de ubicación, por ejemplo Maltería, Milán, Centro, Otros
	Municipio	Se incluye una lista con todos los municipios de Caldas, con fines de

Campos de Grupo	Campos de Subgrupo	Observaciones
		ampliación a futuro para todos los municipios de Caldas
	Suelo	Tipo de suelo rural o urbano
Información Específica sobre Puntos de Emisión	Altura de chimenea	Datos de la chimenea de escape de gases
	Diámetro de chimenea	
	Temperatura	Información de los gases emitidos. Obtenida del informe de muestreo isocinético
	Velocidad	
	Caudal	
	Porcentaje de oxígeno	
Información de Producción	Producción media, capacidad instalada	Datos de producción para efectos de aplicación de metodología de factores de emisión
Información sobre Combustible y Materia Prima (MP)	Tipo de combustible	Combustible utilizado en la producción. Por ejemplo: gas natural, carbón, asociado a proceso, entre otros
	Materia Prima consumida	Referida al combustible o a otro tipo de MP que implique generación de emisiones
	Consumo y unidad de medida	Cantidad consumida (se reporta en lo posible sobre base anual)
	Frecuencia de Consumo	Unidad(es) que describe la frecuencia de consumo de combustible u otra MP que genere emisión. Por ejemplo jornada de trabajo en horas/día, hora/mes, mes/año.
Información sobre Equipo de Control de Emisiones	Equipo	Descripción del sistema de control de emisiones y porcentaje de reducción reportado o teórico. Información del informe de muestreo isocinético
	Reducción (%)	
Información sobre Tipo de Estimación y Fuente de emisión	Método de Obtención de Emisiones	Ya sea por reporte isocinético, factor de emisión, balances de masa, entre otros
	Fuente de emisión	Si es proceso de combustión por quema de combustible, combustión asociada al proceso o no combustión
	Proceso específico asociado a la emisión	Descripción específica del proceso generador de emisiones
	Tipo de fuente	A la fecha solo se incluyeron fuentes puntuales pero se coloca esta casilla

Campos de Grupo	Campos de Subgrupo	Observaciones
		para incluir a futuro otros tipos como fuentes de área por ejemplo.
Información sobre Emisiones Estimadas	Emisiones de Contaminantes Criterio: CO, NO_X (NO, NO_2) SO_X (SO_2, SO_3), PM (PM_1, $PM_{2.5}$, PM_{10}, TSP)	Se registran las emisiones de contaminantes específicos según cada subgrupo. Las emisiones se reportan en ton/año.
	Emisiones de Compuestos Orgánicos: VOC, TOC, THC	
	Emisiones de Metales (As, Ba, Be, Cd, Cr, Co, Cu, Mn, Hg, Mo, Ni, Pb, Se, V, Zn, Fe)	
	Emisiones de Gases Efecto Invernadero (CO_2, CH_4 y N_2O)	
	Emisión de otros contaminantes (PCDD/Fs, PAH, HCl, H2S, HF, POM, HCOH, Benzopireno y dibenzoantraceno)	
Información sobre Factores de Emisión Empleados y Constantes	Tipo de Factor, Valor y Fuente	Esta información es consignada en una hoja de cálculo paralela.
	Constantes y Factores de Conversión	
Hojas resumen de consulta rápida	Tabla dinámica	Tabla dinámica para consulta rápida según requerimientos del usuario
	Tablas con consolidados por empresa	Hojas con consolidados de emisiones por empresa para contaminantes criterio, GEI y suma de metales

5.3.2. Resultados de emisiones estimadas y conformación del sector industrial asociado al inventario

Teniendo en cuenta que el alcance del proyecto se enfoca en el municipio de Manizales, se muestran a continuación los resultados obtenidos para las empresas que hacen parte de los municipios de Manizales y Villamaría. Este último incluido debido a su cercanía con Manizales y la influencia directa que pueden tener las emisiones sobre el área urbana. La Figura 5.1 muestra el dominio establecido para la conformación del inventario de emisiones sobre los municipios de Manizales y Villamaría, y la ubicación de las empresas incluidas en el inventario.

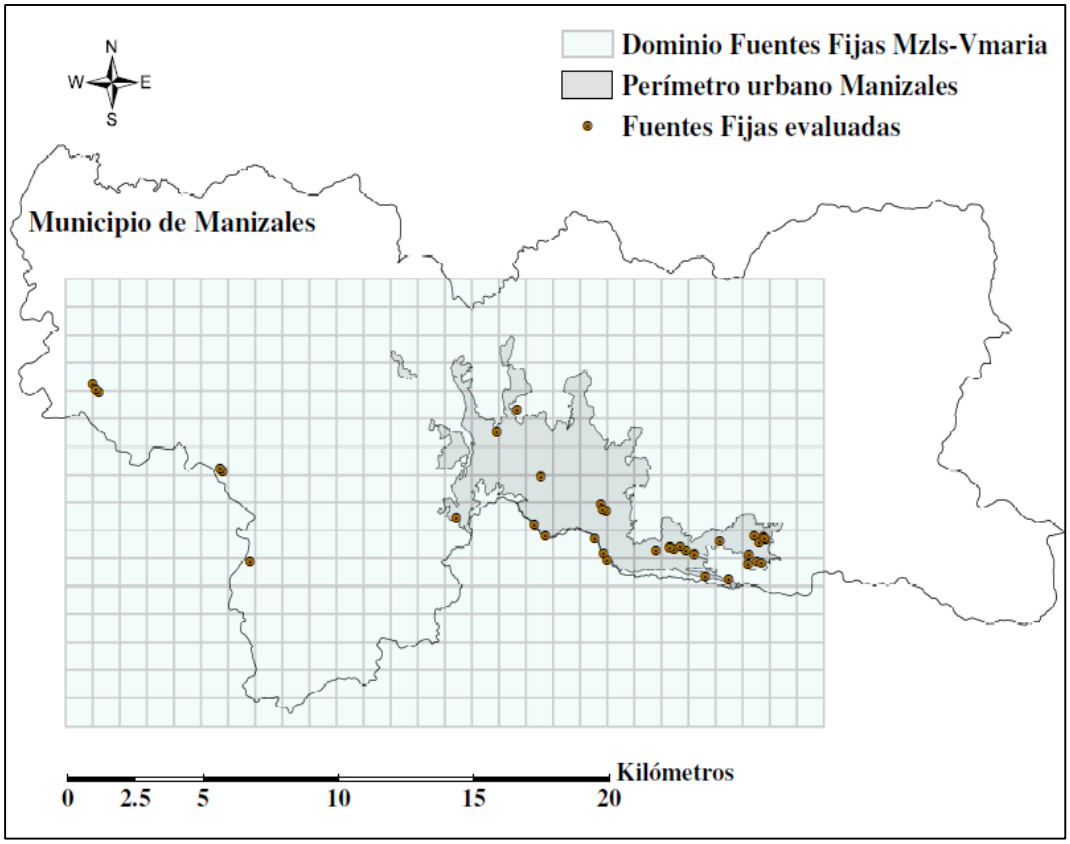


Figura 5.1. Dominio establecido para la conformación del inventario de emisiones sobre los municipios de Manizales y Villamaría. Ubicación de las empresas incluidas en el inventario.

La Tabla 5.2 resume los resultados obtenidos de las emisiones del sector industrial (ton/año) asociadas a las fuentes fijas puntuales consultadas en Manizales y Villamaría.

Tabla 5.2. Consolidado de emisiones por Fuentes Fijas Puntuales asociadas al tipo de industria en Manizales y Villamaría, año base 2014.

	Emisión (ton/año)									
Tipo de industria	**CO**	**NO_X**	**SO_X**	**PM_{10}**	**TSP**	**VOC**	**Metales**	**CO_2**	**CH_4**	**N_2O**
Bebidas y alimentos	**46.0**	**39.9**	**62.9**	**23.5**	**45.5**	**0.71**	**0.10**	**26740**	**0.6**	**0.4**
Combustión	46.0	39.9	62.9	23.5	42.3	0.71	0.10	26740	0.6	0.4
No combustión					3.2					
Fundición	**160.1**	**14.9**	**9.5**	**8.6**	**39.2**	**2.08**	**0.11**	**18609**	**0.5**	**0.5**
Combustión	0.8	6.1	3.4	8.5	10.9	0.04	0.02	2997	0.5	0.5
Combustión - Proceso productivo	159.3	8.8	6.1	0.1	26.7	2.04	0.09	15612		
No combustión					1.7					
Incineración de residuos	**0.2**	**4.7**	**0.4**	**0.2**	**0.3**	**0.02**	**0.01**	**468**	**0.0**	**0.0**
Combustión		0.4	0.0	0.0	0.0	0.02	0.00	468	0.0	0.0
Combustión - Proceso productivo	0.2	4.3	0.4	0.2	0.2		0.01			
Industria química	**0.4**	**3.0**	**16.0**	**0.1**	**0.1**	**0.02**	**0.00**	**1369**	**0.0**	**0.0**
Combustión	0.4	3.0	15.9	0.1	0.1	0.02	0.00	1369	0.0	0.0
No combustión			0.1							
Madera	**0.7**	**2.9**	**12.7**	**0.8**	**3.4**	**0.04**	**0.01**	**1912**	**0.1**	**0.0**
Combustión	0.7	2.9	12.7	0.8	0.9	0.04	0.01	1912	0.1	0.0
No combustión					2.5					
Metalúrgica	**1.8**	**8.7**	**0.1**	**0.2**	**4.2**	**0.12**	**0.00**	**2687**	**0.0**	**0.0**
Combustión	1.8	8.7	0.1	0.2	3.9	0.12	0.00	2687	0.0	0.0
No combustión					0.3					
Minerales	**7.4**	**6.5**	**11.6**	**3.4**	**26.5**	**1.26**	**0.02**	**4101**	**0.6**	**0.1**
Combustión	2.4	5.6	10.4	3.2	16.8	0.04	0.02	2839	0.1	0.1
Combustión - Proceso productivo	5.0	0.9	1.2	0.2	4.8	1.22	0.01	1262	0.5	
No combustión					4.8					
Otros	**0.0**	**1.7**	**0.0**	**0.1**	**0.2**	**0.00**	**0.00**	**64**	**0.0**	**0.0**
Combustión	0.0	1.7	0.0	0.1	0.1		0.00	64	0.0	0.0
No combustión					0.0	0.00				
Tejas	**2.5**	**7.2**	**0.3**	**0.4**	**0.7**	**0.12**	**0.00**	**8127**	**0.0**	**0.1**
Combustión	2.5	7.2	0.3	0.4	0.7	0.12	0.00	8127	0.0	0.1
EMISIONES TOTALES (ton/año)	**219.1**	**89.5**	**113.5**	**37.2**	**120.1**	**4.38**	**0.25**	**64077**	**1.8**	**1.2**

Como se observa en la Tabla 5.2 y en la Figura 5.2, la cual presenta el aporte porcentual a las emisiones según el tipo de industria, la industria de bebidas y alimentos es la mayor aportante a las emisiones de NO_X (45%), SO_X (55%), PM_{10} (63%), TSP (38%), CO_2 (42%) y CH_4 (31%). Las contribuciones descritas anteriormente son concordantes con la conformación del parque industrial evaluado (Figura 5.3), donde la industria de bebidas y alimentos comprende el mayor porcentaje de empresas analizadas con un 24% del parque industrial. Estas emisiones están asociadas principalmente al uso de carbón como combustible.

La industria de fundición es un grupo importante de fuentes de emisión ya que a pesar de ser el cuarto tipo de industria predominante con un 11% de conformación en el parque industrial, es la mayor aportante de emisiones de CO (73%), VOC (47%), metales (43%) y N_2O (41%). Las emisiones provenientes del sector de fundición se asocian principalmente a combustión propia del proceso productivo, en el cual predomina el uso de hornos de inducción para el procesamiento de la materia prima que generalmente es chatarra.

Otros tipos de industria con mayoritaria conformación en el parque industrial son: la industria química (16% de las empresas evaluadas) que se caracteriza por un aporte importante a las emisiones de SO_X con el 14%. Estas emisiones están asociadas al uso predominante de combustible tipo diésel (Fuel Oil No.2) con contenidos de azufre de 50 ppm a partir del año 2013 (Ecopetrol, 2013). Finalmente la industria de minerales (16% de las empresas evaluadas) con aportes importantes a las emisiones de VOC (29%) y CH_4 (31%) asociadas principalmente al proceso de producción de asfalto.

En términos de emisiones totales anuales, las fuentes industriales de tipo puntal evaluadas en Manizales y Villamaría para el año base 2014 emiten predominantemente CO_2 (64077 ton/año), CO (219.1 ton/año), TSP (120.1 ton/año), SO_X (113.5 ton/año) y NO_X (89.5 ton/año).

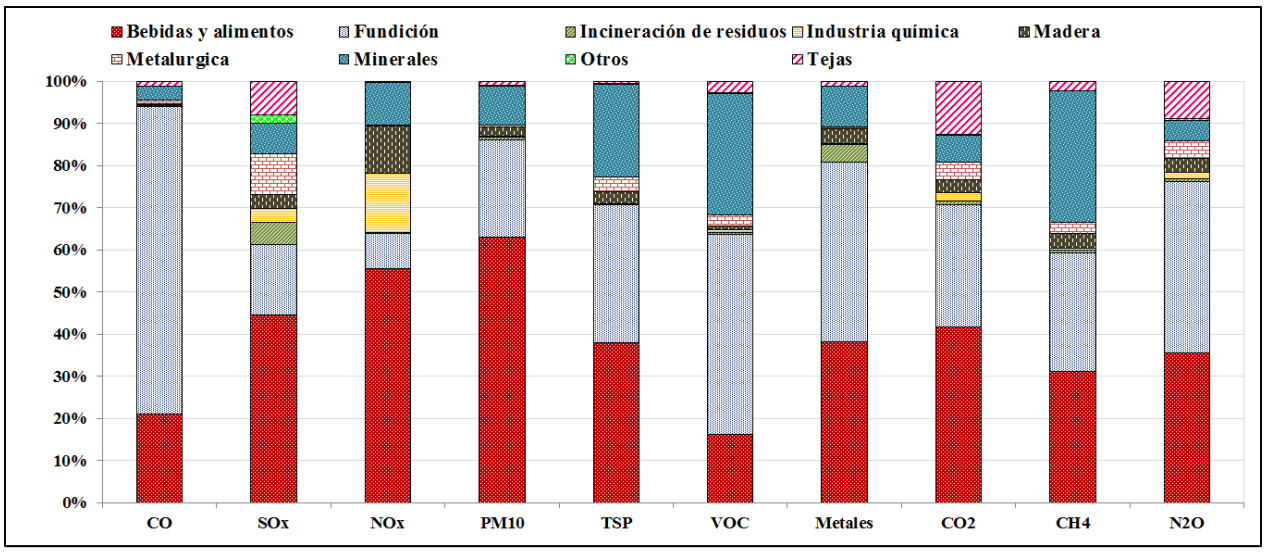


Figura 5.2. Aporte porcentual del tipo de industria al total de las emisiones por fuentes fijas puntuales en Manizales y Villamaría.

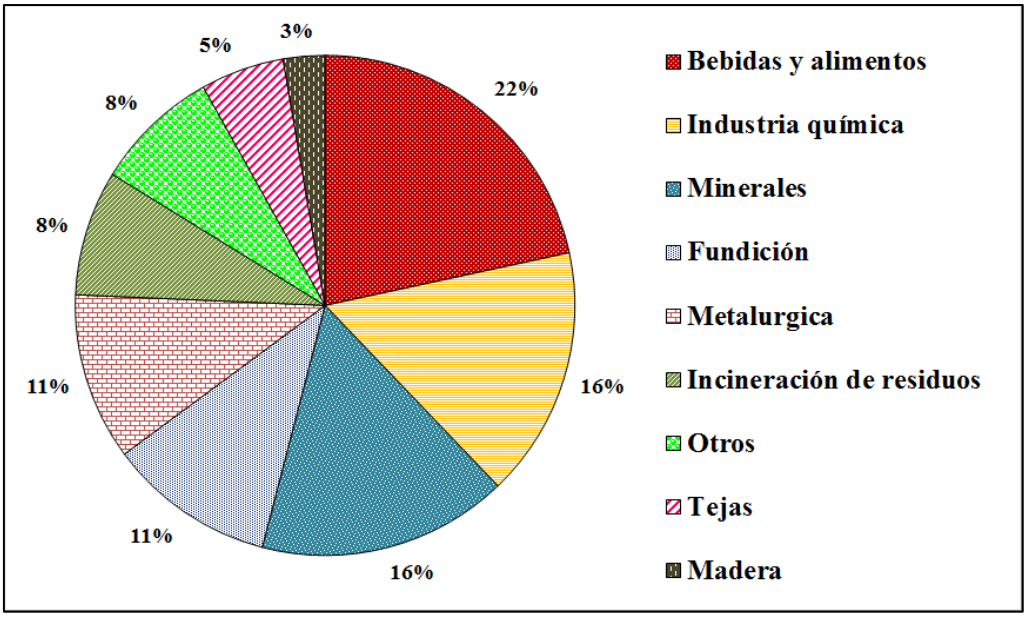


Figura 5.3. Composición porcentual del parque industrial evaluado en Manizales y Villamaría según el tipo de industria.

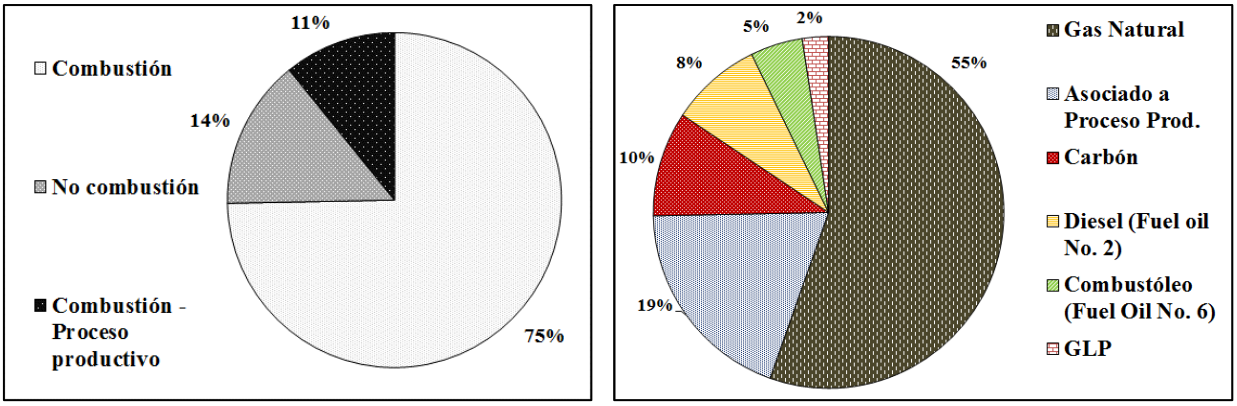
5.3.3. Emisiones asociadas al tipo de combustible utilizado en el sector industrial

En el inventario de emisiones se tuvieron en cuenta tres grupos que abarcan las fuentes de emisión. Estos grupos se definieron según el uso o no de combustible:

- *Grupo 1. Combustión*: Aquellas emisiones asociadas a la quema de combustible. Por ejemplo calderas, hornos o dispositivos que funcionan a gas natural (GN), diésel (conocido como ACPM o Fuel Oil No. 2), combustóleo (Fuel Oil No. 6), carbón y gas licuado de petróleo (GLP).
- *Grupo 2. Combustión-Proceso productivo*: Emisiones en las que se da un proceso de combustión pero están ligadas directamente al proceso. Por ejemplo: fundición en hornos de arco eléctrico, producción de asfalto, incineración de residuos posterior al proceso inicial de arranque de combustión, entre otros.
- *Grupo 3. No combustión*: Emisiones asociadas a proceso productivo sin quema de combustible. Por ejemplo molienda, granalladoras, pulido de materiales, entre otros.

La Figura 5.4a muestra la distribución de las fuentes de emisión evaluadas dentro de los grupos mencionados. Se observa como el mayor número de fuentes evaluadas se encuentran dentro de procesos de quema de combustible (combustión) con el 75%.

Las fuentes fijas de emisión tenidas en cuenta en el inventario utilizan predominantemente gas natural (55%), como se observa en la Figura 5.4b. Esta Figura muestra la distribución de tipo de combustible incluyendo aquellas fuentes asociadas al proceso productivo, que componen los grupos 2 y 3 descritos anteriormente. Este último con un 19% del total de fuentes evaluadas. En menor proporción se encuentran el uso de carbón y diésel con 10% y 8% respectivamente. Cabe destacar que la distribución porcentual descrita en la Figura 5.4 se realizó sobre el número total de fuentes (83 puntos de emisión evaluados en Manizales y Villamaría) y no sobre el número de empresas (37 empresas para Manizales y Villamaría), ya que hay industrias que poseen más de una fuente de emisión.



(a) (b)

Figura 5.4. Distribución de las fuentes de emisión evaluadas en el inventario de emisión por fuentes fijas puntuales para Manizales y Villamaría. a) Porcentaje de fuentes asociadas a grupos según su uso de combustible. b) Distribución de los tipos de combustible dentro de las fuentes evaluadas.

La distribución porcentual de las emisiones totales con respecto al tipo de combustible empleado se muestra en la Figura 5.5. La combustión de gas natural, combustible predominante entre las fuentes de emisión con un 55% del total de fuentes, es responsable de las mayores emisiones de NO_X (37%), CH_4 (40%) y N_2O (59%). Se destacan las emisiones asociadas a combustibles de menor uso como el carbón, que contribuyen a las mayores emisiones de SO_X (62%), PM_{10} (86%), TSP (46%), metales (43%) y CO_2 (35%). Asimismo este combustible genera emisiones de NO_X casi al mismo porcentaje de las generadas por uso de gas natural con un 33% de las emisiones. Finalmente el tercer mayor contribuyente a las emisiones totales son las fuentes asociadas al proceso productivo (que incluyen combustión y no combustión) y donde se encuentran procesos como fundición, incineración de residuos, molienda, entre otros. Este grupo aporta el 73% de las emisiones de CO y 47% de las emisiones de VOC como sus contaminantes predominantes, y en menor medida emisiones de TSP con un 33%.

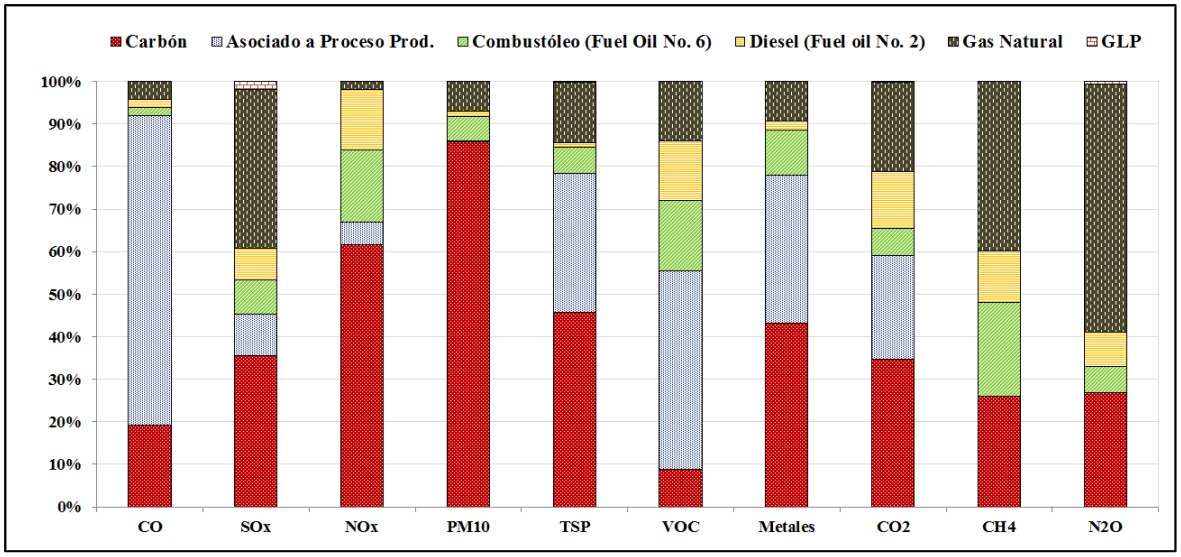
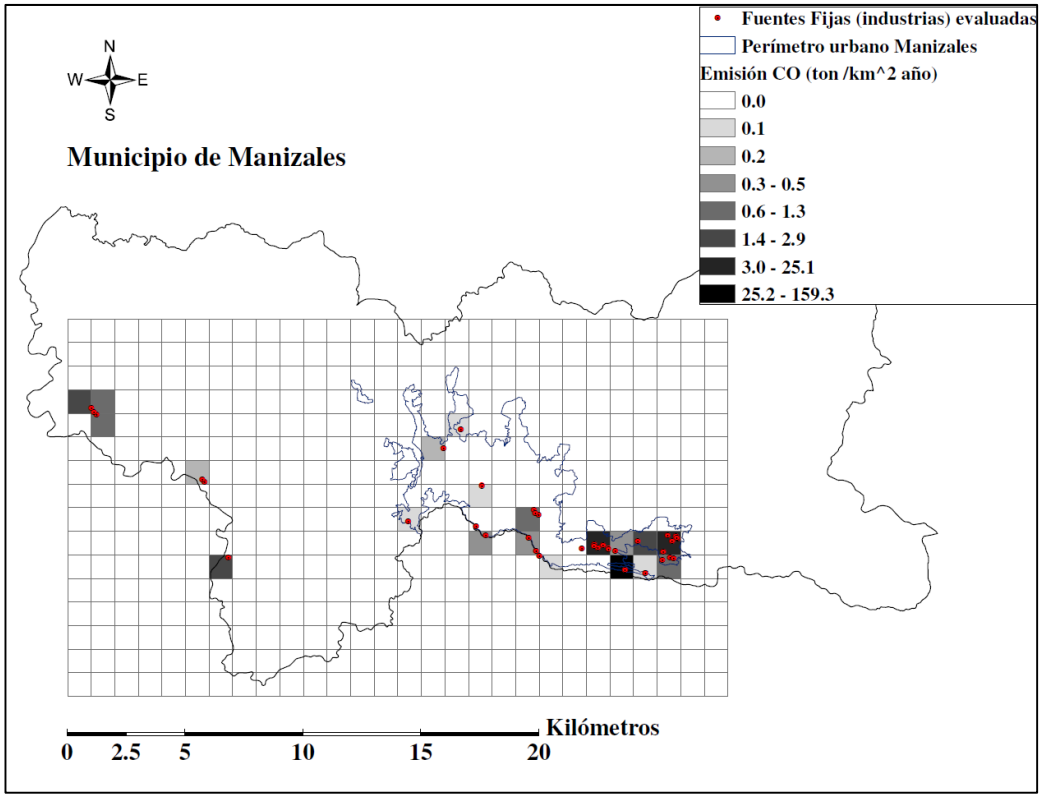


Figura 5.5. Distribución porcentual de las emisiones totales en función del tipo de combustible empleado.

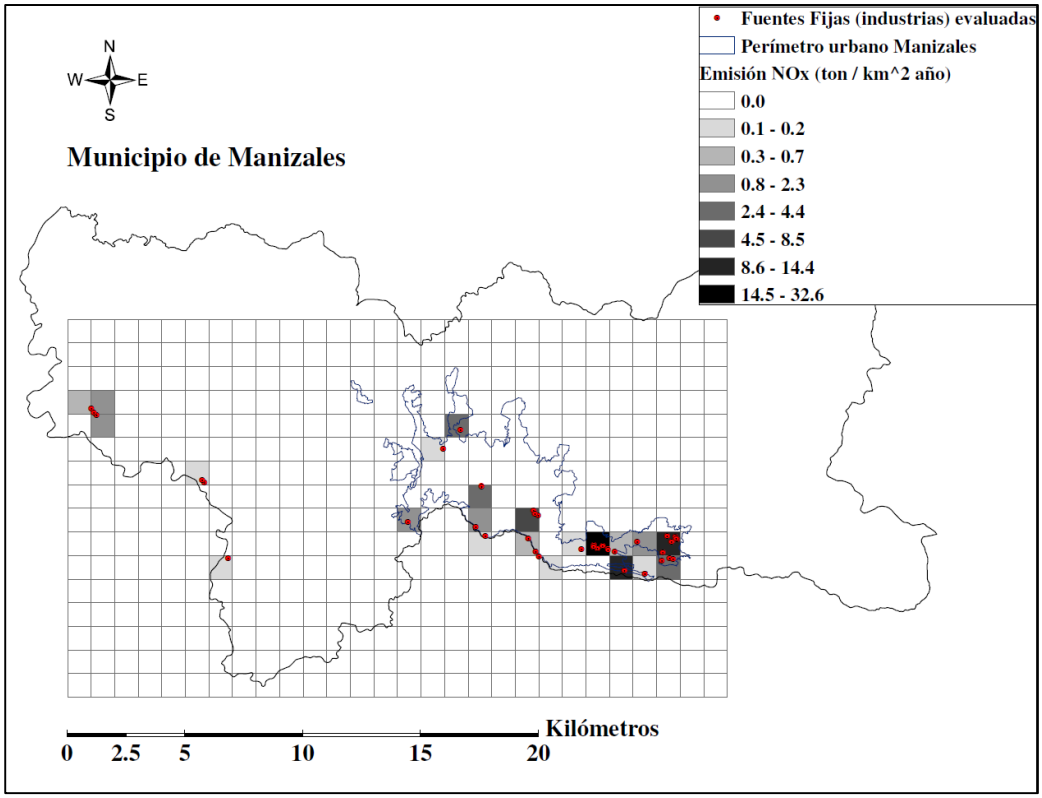
5.3.4. Desagregación espacial de emisiones industriales

Las emisiones estimadas para las fuentes fijas puntuales fueron distribuidas sobre el dominio descrito en la Figura 5.1, el cual se elaboró con una resolución de celdas de 1kmx1km. Las industrias que hacen parte de cada celda en el dominio del inventario, se identificaron aplicando herramientas de geolocalización en sistemas de información geográfica (SIG). Posteriormente las emisiones por celda fueron cuantificadas en ton/km^2-año, sumando las emisiones de cada industria por celda en el dominio.

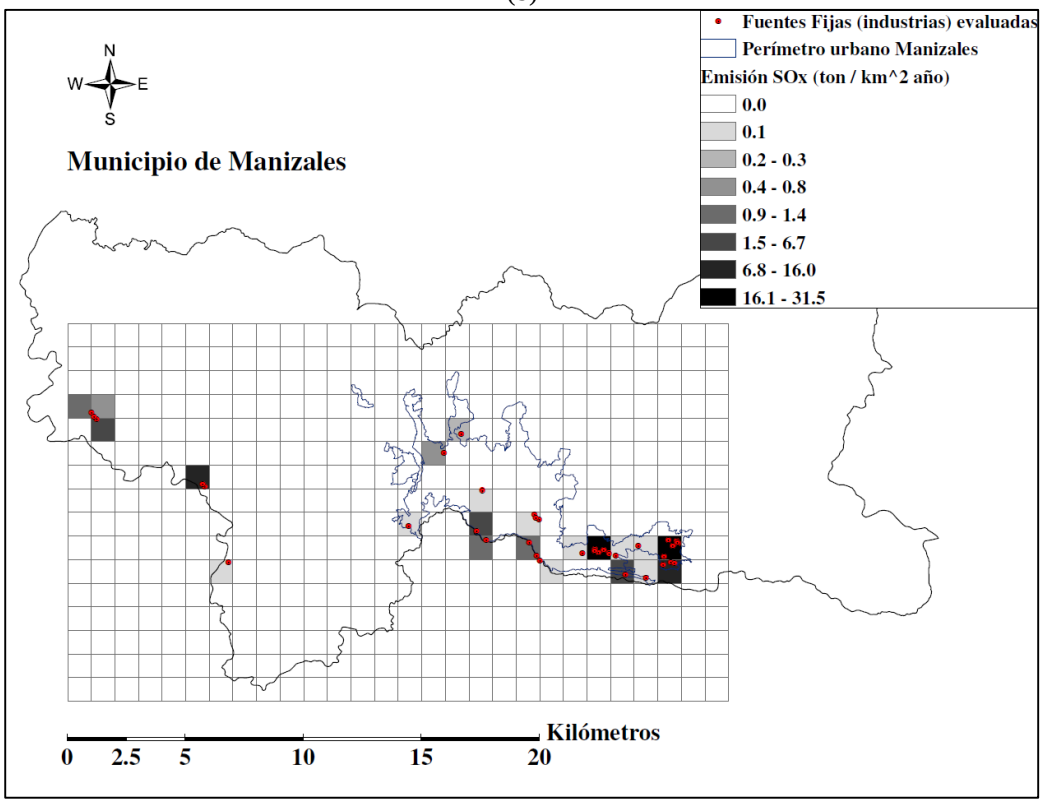
La Figura 5.6 muestra las emisiones desagregadas en el espacio para los contaminantes CO (Fig. 5.6a), NO_X (Fig. 5.6b), SO_X (Fig. 5.6c), TSP (Fig. 5.6d) y CO_2 (Fig. 5.6e). Los resultados para los demás contaminantes se incluyen en el Anexo 5.2. Se observa como la zona industrial ubicada al oriente del área urbana de Manizales agrupa los mayores valores de emisión de los contaminantes evaluados. Lo anterior teniendo en cuenta que la mayoría de industrias y procesos industriales se establecen en esta zona.



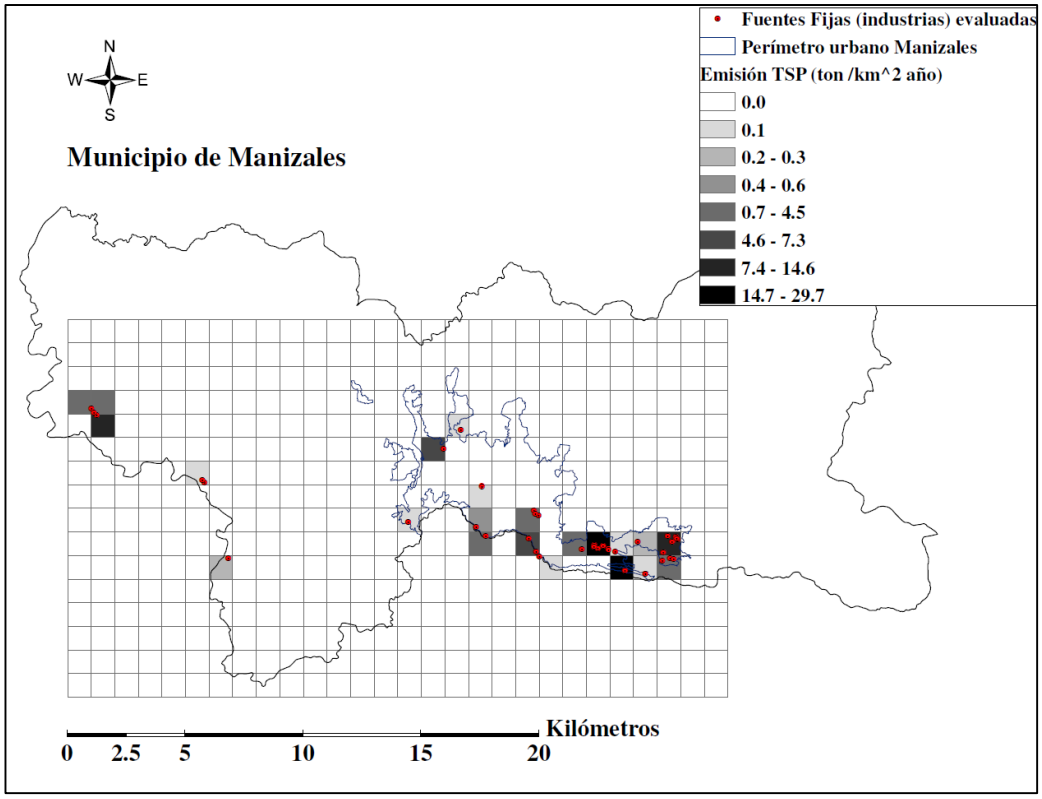
(a)


Fuentes Fijas (industrias) evaluadas
Perímetro urbano Manizales
Emisión NOx (ton / km^2 año)
0.0
0.1 - 0.2
0.3 - 0.7
0.8 - 2.3
2.4 - 4.4
4.5 - 8.5
8.6 - 14.4
14.5 - 32.6
N
W
E
S
Municipio de Manizales
Kilómetros
0
2.5
5
10
15
20

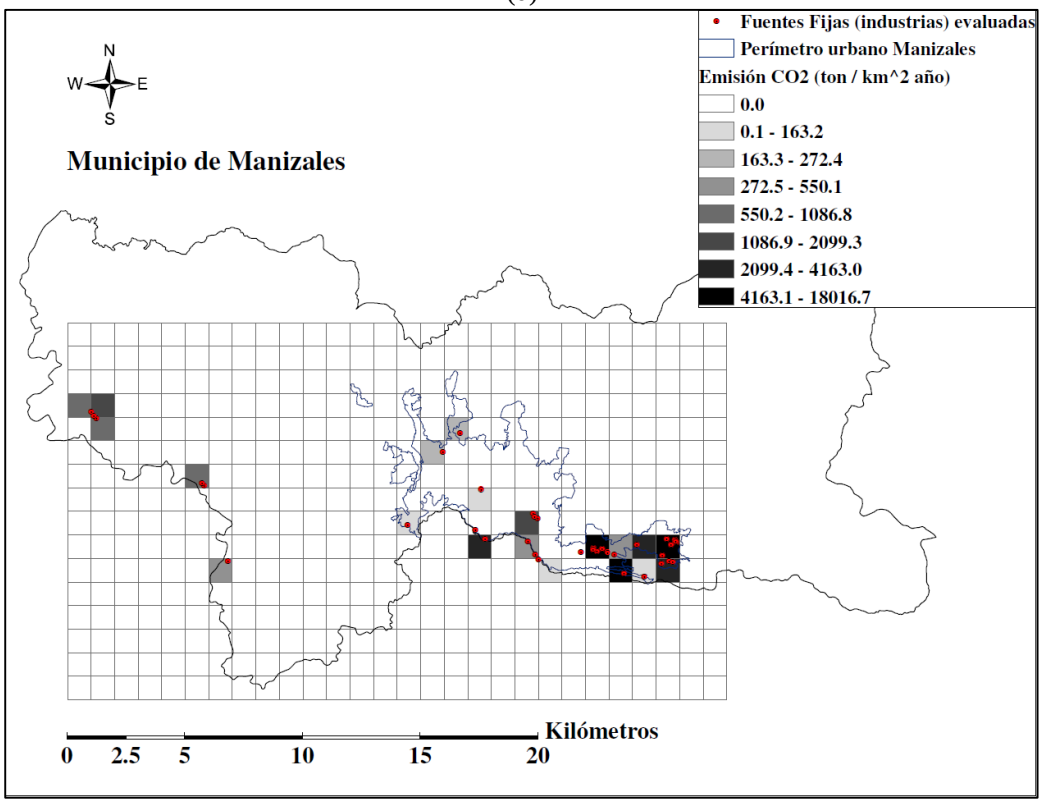
(b)


Fuentes Fijas (industrias) evaluadas
Perímetro urbano Manizales
Emisión SOx (ton / km^2 año)
0.0
0.1
0.2 - 0.3
0.4 - 0.8
0.9 - 1.4
1.5 - 6.7
6.8 - 16.0
16.1 - 31.5
N
W
E
S
Municipio de Manizales
Kilómetros
0
2.5
5
10
15
20

(c)



(d)



(e)

Figura 5.6. Distribución espacial de emisiones obtenidas en el inventario de emisiones por fuentes fijas puntuales para Manizales. a) CO. b) NO_X. c) SO_X. d) TSP. e) CO_2.

5.4. Conclusiones

Se realizó la estimación del inventario de emisiones por fuentes fijas puntuales año base 2014 a partir de la consulta de información secundaria que reposa en la Corporación Ambiental. Este inventario se basó en la revisión de información para 39 empresas generadoras de emisiones atmosféricas en Manizales, Villamaría y Chinchiná. Entre estas industrias, 28 reportan estudios isocinéticos y la información de las 11 industrias restantes fue obtenida de los expedientes ambientales y del RUA. Con la información consultada se conformó una base de datos que soporta los cálculos y la información base del inventario de emisiones por fuentes fijas puntuales año base 2014. Se aclara que año base especificado hace referencia a la información actualizada disponible en los expedientes ambientales, hasta el año 2014 (incluido). Lo anterior, teniendo en cuenta que no todas las empresas están obligadas a actualizar sus estudios de emisión año a año. Por lo tanto, para aquellas industrias que no contaban con estudios isocinéticos en el año 2014, se utilizó como información para el inventario el estudio más reciente. Esta información se registró en la base de datos diseñada para soportar el inventario por fuentes fijas, con el fin de tener información precisa para futuras actualizaciones.

En el inventario de emisiones por fuentes fijas puntuales para Manizales y Villamaría predominan las emisiones de CO, SO_X y TSP con 219, 113 y 120 ton/año respectivamente, para el grupo de contaminantes criterio. En el grupo de gases efecto invernadero, se obtuvo una emisión predominante de CO_2 con 64077 ton/año.

Dentro del grupo de fuentes puntuales de emisión que hacen parte de los municipios de Manizales y Villamaría, la industria de bebidas y alimentos es la mayor aportante a las emisiones de NO_X (45%), SO_X (55%), PM_{10} (63%), TSP (38%), CO_2 (42%) y CH_4 (31%). El otro tipo de industria de importancia corresponde a la industria de fundición con los mayores aportes en las emisiones de CO (73%), VOC (47%), metales (43%) y N_2O (41%).

La combustión de gas natural, combustible predominante entre las fuentes de emisión con un 55% del total de fuentes, es responsable de las mayores emisiones de NO_X (37%), CH_4 (40%) y N_2O (59%). Se destacan las emisiones asociadas a combustibles de menor uso como el carbón, que comprende un 10% de las fuentes, y contribuye con las mayores emisiones de SO_X (62%), PM_{10} (86%), TSP (46%), metales (43%) y CO_2 (35%). Emisiones asociadas al proceso productivo específico aportan el 73% de las emisiones de CO y 47% de las emisiones de VOC.

6. COMPONENTE MONITOREO Y APOYO AL SISTEMA DE VIGILANCIA DE CALIDAD DEL AIRE

6.1. Presentación

El monitoreo de contaminantes atmosféricos es fundamental para establecer diagnósticos y lineamientos en centros urbanos, dentro de la conformación de Planes de Gestión de Calidad del Aire (MAVDT, 2009, 2010).

La ciudad de Manizales cuenta actualmente con un sistema de vigilancia de calidad del aire (SVCA) operado por la autoridad ambientar departamental: CORPOCALDAS. Este sistema se enfoca en el seguimiento de material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$, aplicando técnicas de monitoreo activo (mediante el uso de equipos High-Vol y Low-Vol), así como en el seguimiento de los gases SO_2, O_3 y CO, por medio de monitoreo activo automático.

El Grupo de Trabajo Académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental GTAIHA – Línea de investigación en calidad del aire – apoya las actividades del SVCA mediante el monitoreo activo de PM_{10} en dos puntos de monitoreo (estaciones Nubia y Palogrande). El GTAIHA también soporta el monitoreo de los gases contaminantes SO_2, O_3 y CO desde la estación automática ubicada en el edificio de la Gobernación de Caldas. El monitor de monóxido de carbono (CO) de la estación automática, pertenece a CORPOCALDAS y se instaló con el apoyo de esta entidad. La ejecución de estas labores contribuye además a la generación de conocimiento científico, a través de la vinculación de docentes y estudiantes de pregrado y posgrado en dichas actividades.

La Tabla presenta el conjunto de estaciones en las cuales se lleva a cabo el seguimiento de los contaminantes atmosféricos PM_{10}, $PM_{2.5}$, SO_2, O_3 y CO, dentro del SVCA de Manizales.

Tabla 6.1 Contaminantes monitoreados actualmente en Manizales por CORPOCALDAS y la Universidad Nacional

Contaminante	Estación de monitoreo	Ubicación	Encargado	Año reciente de inicio monitoreo continuo	Periodicidad de registros	Estación meteorológica asociada o cercana
PM_{10}	Liceo	Colegio Liceo Isabel La Católica – sector Fundadores	CORPOCALDAS - SVCA Manizales	2000	Diarios (24h)	Liceo (CORPOCALDAS)
	Gobernación	Terraza Edificio Gobernación de Caldas		2009		

Contaminante	Estación de monitoreo	Ubicación	Encargado	Año reciente de inicio monitoreo continuo	Periodicidad de registros	Estación meteorológica asociada o cercana
	Milán	Empresa Invermec – Sector Milán		2013		Niza (Red Manizales)
	Palogrande	UN sede Manizales – Campus Palogrande	UN – GTAIHA	2010		Posgrados (Red Manizales)
	Nubia	UN sede Manizales – Campus La Nubia		2010		Enea (Red Manizales)
$PM_{2.5}$	Gobernación	Terraza Edificio Gobernación de Caldas	CORPOCALDAS - SVCA Manizales	2009	Diarios (24h)	Liceo (CORPOCALDAS)
SO_2			UN – GTAIHA[1]	2014	5 minutos	Liceo (CORPOCALDAS)
O_3						
CO						
PST	Liceo	Colegio Liceo Isabel La Católica – sector Fundadores	CORPOCALDAS - SVCA Manizales	2000	Diarios (24h)	Liceo (CORPOCALDAS)
	Maltería	Sector industrial Maltería		2003		Recinto del Pensamiento (Red Manizales)

[1]*Monitor de CO es propiedad de CORPOCALDAS. El monitoreo es apoyado por la UN.*

Los procesos de dispersión de contaminantes en el aire se ven influenciados principalmente por la presencia y ubicación de fuentes de emisiones, así como por las condiciones atmosféricas. Las fuentes de origen antropogénico más comunes se originan en las actividades industriales y el transporte. Las variables meteorológicas como la temperatura, la precipitación, los patrones de vientos y la radiación solar, representan las condiciones atmosféricas de mayor influencia (IDEAM, 2010; Tiwary & Colls, 2010). Manizales cuenta con una amplia red de monitoreo de variables meteorológicas conformada por 18

estaciones meteorológicas e hidrometeorológicas que complementa el seguimiento y análisis de los contaminantes del aire a nivel local.

En el tratamiento y análisis de datos meteorológicos y de calidad del aire, las herramientas computacionales se convierten en apoyo fundamental, debido al alto volumen de datos que suelen manejarse, así como a la posibilidad de identificar y establecer tendencias temporales, datos atípicos y correlaciones estadísticas. Los software diseñados para correlacionar variables meteorológicas y de calidad del aire, permiten estudiar con mayor profundidad la problemática de la contaminación atmosférica a nivel local y regional, comprender la dinámica y procesos de dispersión de los contaminantes atmosféricos, identificar fuentes de contaminación locales y regionales, evaluar el cumplimiento de normativa ambiental, determinar zonas con niveles críticos de contaminación, y contribuir a la aplicación de otras herramientas como los modelos de dispersión de contaminantes (Slini et al., 2001; Cortés, et al., 2013).

Con miras a dar cumplimiento a los objetivos planteados en el Convenio de Investigación establecido entre CORPOCALDAS y la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales (Convenio 130-2014), para el componente de fortalecimiento del sistema de vigilancia de calidad del aire, se empleó el software R y su librería openair en el análisis de bases de datos correspondientes al monitoreo de variables de calidad del aire y meteorología en la ciudad de Manizales.

6.2. Metodología componente apoyo y fortalecimiento del SVCA de Manizales

La metodología aplicada durante la ejecución total del proyecto para el componente de apoyo y fortalecimiento del SVCA, se puede clasificar en tres componentes:

- Monitoreo de contaminantes del aire (PM_{10}, $PM_{2.5}$, SO_2, O_3 y CO) y actualización de bases de datos con información de calidad del aire y meteorología.
- Análisis de datos de calidad del aire y meteorología mediante el uso de software especializados.
- Monitoreo pasivo de los gases SO_2, O_3 y NO_X, y análisis conjunto de resultados obtenidos.

6.2.1 Metodología sobre el monitoreo de calidad del aire y actualización de bases de datos

Durante el periodo de ejecución del Convenio 130-2014, el GTAIHA realizó el monitoreo de material particulado menor a 10 micrómetros (PM_{10}) en las estaciones Nubia y Palogrande. Así mismo, se realizó el monitoreo de los gases dióxido de azufre (SO_2), ozono troposférico (O_3) y monóxido de carbono (CO) desde la estación automática ubicada en el edificio de la Gobernación de Caldas.

Paralelamente, se realizó la actualización de las bases de datos de calidad del aire con información de material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$) de las estaciones Gobernación, Milán, Liceo, Nubia y Palogrande, hasta el 30 de abril de 2016. Las bases de datos de los gases contaminantes SO_2, O_3 y CO, también se actualizaron hasta el 30 de abril de 2016. Se incluyeron también los resultados de un estudio adelantado desde el GTAIHA, en el cual se analiza la relación entre las concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10}, medidos en la estación Gobernación. Como complemento al análisis de datos de calidad del aire, se incorporaron los Índices de Calidad del Aire (ICA) para material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$) y para gases (SO_2, y O_3), calculados dentro de la Fase III del proyecto de "Estructuración de la Línea Base Ambiental del Departamento de Caldas" (Convenio Interadministrativo de Asociación No. 139-2014 establecido entre la Universidad Nacional de

Colombia Sede Manizales y CORPOCALDAS), disponibles en el Centro de Datos e Indicadores Ambientales de Caldas (CDIAC).

En las actividades de actualización de bases de datos también se incluyó la información meteorológica correspondiente a las estaciones Liceo, Ingeominas, Hospital, Posgrados, Niza y Enea, hasta el 30 de abril de 2016. Dentro de las bases de datos, se entrega información de la estación meteorológica móvil instalada en Gobernación, la cual está en operación desde el mes de febrero de 2015.

6.2.2 Metodología sobre el uso de R y Openair para análisis de datos de calidad del aire y meteorología

R está definido como un lenguaje computacional de programación de acceso libre, desarrollado específicamente para el análisis de datos (Carslaw, 2015). Esta herramienta se caracteriza por ser un sistema de cálculos estadísticos y gráficos. R se desarrolló en USA en la década de los años 70 del siglo XX, donde inicialmente fue llamado S. Aproximadamente diez años después, el software sufrió modificaciones y mejoras, lo cual llevó a sus creadores a denominarlo R (The R Foundation for Statistical Computing, 2014).

Además de ser un software de acceso libre, entre las ventajas asociadas a su uso se encuentra la posibilidad de ejecutarlo desde distintas plataformas tales como Windows, Mac OS y Linux. Esto último otorga flexibilidad y portabilidad a la herramienta. R fue diseñado con el objetivo de tratar altos volúmenes de datos, por lo cual se caracteriza por ser rápido, efectivo y confiable, así como por el amplio rango de aplicaciones estadísticas que tiene incorporadas.

R puede ser empleado para múltiples aplicaciones de tratamiento de datos, sin embargo, una de las aplicaciones de mayor interés al interior de GTAIHA, es el análisis de datos de contaminación del aire y meteorología. Para dicho fin, se emplea la librería Openair, un paquete desarrollado para análisis de datos de calidad del aire, y usado generalmente en aplicaciones de ciencias atmosféricas (Carslaw y Ropkins, 2012).

Openair está compuesto por funciones especializadas para el análisis de datos de contaminación atmosférica. Al igual que el software R, Openair es un paquete de acceso libre que constantemente está siendo actualizado y mejorado. La herramienta fue desarrollada en el año 2008 como un proyecto conjunto entre las universidades King's College London y University of Leeds, con la financiación de la institución Department of Environment, Food and Rural Affairs, junto a Natural Environment Research Council (The Openair Project, 2015).

Diversos estudios alrededor del mundo emplearon Openair para estudiar la calidad del aire en regiones específicas. Es el caso de la región de Greater Wellington en Nueva Zelanda, donde se estudió el comportamiento de los contaminantes CO, NO_2 y PM_{10}, demostrando un aumento en la concentración de PM_{10} en el aire ambiente, debido al uso de chimeneas durante la época de invierno en 2009 (Tamsin, 2009). En Bogotá, se empleó el paquete openair para procesar datos de calidad del aire de la ciudad, con el fin de comprender de mejor manera la relación entre las fuentes de emisiones y las concentraciones de contaminantes en el aire ambiente local (García, 2013). Así mismo, el estudio "Global Comparison of VOC and CO Observations in Urban Areas" de Von Schneidemesser (2010), implementó Openair para espacializar los compuestos orgánicos volátiles (VOC) y el monóxido de carbono (CO) en el centro de Londres, desde 1998 hasta 2008 (Cortés, et al., 2013).

La metodología ejecutada en esta sección, se enfocó en la aplicación de R y Openair para el análisis de las bases de datos de calidad del aire y meteorología actualizadas hasta el 30 de abril de 2016. Los análisis comprenden la representación gráfica de series temporales de concentraciones de los contaminantes PM_{10}, $PM_{2.5}$, SO_2, O_3 y CO, así como la aplicación de los análisis estadísticos de datos, propuestos en el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire (MAVDT, 2010).

A continuación se describen las etapas y comandos empleados para el manejo de R y Openair en el tratamiento de la información de material particulado, gases y variables meteorológicas.

Inicialmente, fue necesario instalar el paquete Openair desde el software R, asegurando que las funciones de esta herramienta se activen y puedan usarse en el análisis de datos de meteorología y calidad del aire. Se debe tener en cuenta que el análisis de datos en Openair requiere que los archivos en los que están contenidas las bases de datos, se encuentres disponibles en un formato compatible con el lenguaje R. Generalmente, los archivos .txt o .CSV son reconocidos por el software.

Las funciones estadísticas y los comandos que se emplearon para analizar las bases de datos de calidad del aire y meteorología durante la ejecución del proyecto se describen a continuación.

- **Función boxplot**: comando útil para obtener *gráficos de cajas* o *cajas de Tukey*. Estos gráficos permiten representar series de datos de tal forma que se visualice la simetría, la dispersión y el sesgo en el conjunto de datos analizados. Al realizar gráficos de cajas, el usuario reconoce la mediana, el primer y el tercer cuartil de datos, así como los valores máximos y mínimos de los datos que se consideran dentro de un rango uniforme (o atípicos leves), representados por los "bigotes" superior e inferior. Los gráficos de cajas muestran también aquellos datos atípicos que se encuentran fuera del rango, ubicándolos por fuera de los bigotes. Esta función se empleó para observar la variación anual (2010-2016) y del periodo total de análisis (2009 a diciembre 2015) de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en las estaciones de monitoreo del SVCA, así como en el análisis de datos de las series temporales de los gases SO_2 y O_3.
- **Función windRose**: permite representar la rosa de vientos que se construye a partir de los registros de las variables velocidad y dirección del viento. El software permite representar rosas de vientos diarias, mensuales o anuales, recurso importante para observar la variación temporal en el comportamiento de los vientos. La información es resumida por intervalos de grados de dirección del viento, donde cada 30 grados hay una línea que muestra la frecuencia media ocurrida en ese intervalo y los rangos de velocidades que se presentan en el mismo. Las gráficas también cuentan con unas líneas de porcentaje, donde se muestra la proporción de tiempo que se presentan los diferentes intervalos de dirección y velocidad del viento. Esta función se utilizó para obtener las rosas de vientos de las estaciones Hospital, Liceo e Ingeominas, del periodo 2011-2013; proceso realizado para analizar el comportamiento de la estación Liceo. Así mismo se empleó esta función para analizar vientos de la estación Gobernación durante el periodo 2015-2016.
- **Función pollutionRose**: es una variante de la rosa de vientos, útil para representar el cambio en la concentración de un contaminante de acuerdo con los registros de dirección del viento, durante intervalos de tiempo expresados en porcentaje. Lo que hace esta función es reemplazar los datos de velocidad del viento por otra variable, que en este caso son las concentraciones de contaminante. La función también puede utilizar datos de una tercera variable, ya sea de calidad del aire o de meteorología, de la cual se generan cuartiles dependiendo de los niveles que alcance dicha variable.

Es posible entonces representar las concentraciones del contaminante de interés en función de estos cuartiles (aplicados a la tercera variable), y observar la posible influencia de la tercera variable sobre los niveles reportados del contaminante de interés. Esta función fue empleada para el análisis conjunto de la influencia de variables meteorológicas sobre los niveles de los gases contaminantes SO_2, O_3 y CO medidos en la estación Gobernación.

- **Función selectByDate**: permite extraer variables de una base de datos, correspondientes a un periodo acotado más pequeño que el periodo total de la base. Por ejemplo, si se dispone de una base de datos recolectados durante 5 años desde el 2010 hasta el 2014, el comando permite disponer independientemente de las variables correspondientes al año 2011. Se empleó esta función para analizar independientemente el comportamiento anual de concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$, gases, y variables meteorológicas.
- **Función summary**: función estadística básica de R que entrega un resumen con los valores máximos, mínimos, cuartiles, medianas y datos no válidos de las variables que conforman la base de datos que se esté analizando. Es útil para obtener una primera vista general del conjunto de datos analizado, en función del análisis estadístico.
- **Función timeVariation**: comando que facilita el análisis del comportamiento temporal de una variable meteorológica o de calidad del aire, con respecto a distintos periodos temporales de carácter cíclico (ciclo diurno, semanal y mensual). La función permite realizar una gráfica compuesta, con la evolución semanal del parámetro seleccionado, dividida por días de la semana y, a su vez en horas del día. Adicionalmente, la función realiza una gráfica resumen donde se presenta la evolución de la variable analizada en las horas del día, lo cual permite identificar las horas donde se presentan los mayores y menores valores del contaminante o variable meteorológica. La función también construye una gráfica con la variación mensual que permite identificar niveles críticos, y verificar la existencia de alguna clase de estacionalidad. Finalmente, con timeVariation se puede obtener una gráfica resumen de evolución de las concentraciones por días de la semana, que vendrá a recopila las concentraciones por día, pudiendo observarse cómo evolucionan a lo largo de la semana.

Se entrega en el Anexo 6.3 un script de código R como soporte para el uso de la librería Openair, con base en los análisis realizados a las bases de calidad del aire y meteorología en el desarrollo total del Convenio.

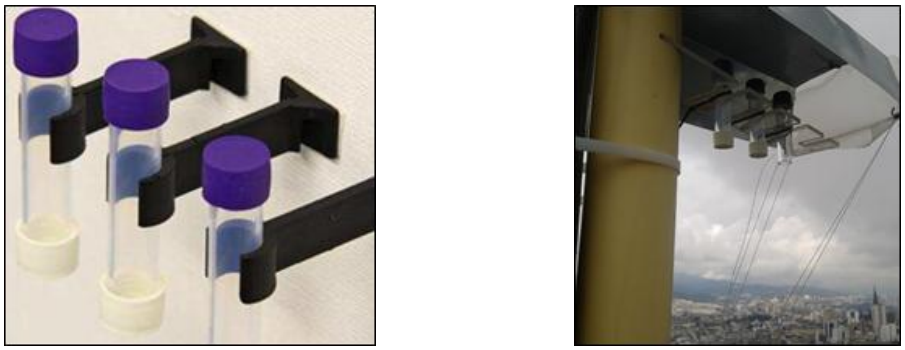
6.2.3 Metodología monitoreo pasivo de gases contaminantes SO_2, NO_X y O_3

El monitoreo pasivo de contaminantes atmosféricos permite establecer tendencias temporales y espaciales de contaminación, convirtiéndose en un indicador y complemento para las actividades de monitoreo activo. El principio del monitoreo pasivo radica en la forma como se toma la muestra de aire y el tiempo que dura el muestreo. Los contaminantes son recolectados en un material absorbente por medio de un proceso de difusión molecular a través de una capa estática de aire, o por la permeación de una membrana selectiva. Este tipo de monitoreo no requiere del funcionamiento de una bomba para succionar el aire, y permite conocer la concentración de contaminantes en el aire para periodos de días, semanas o meses (Salter, 2005; Salem et al., 2008; Seethapathy et al., 2007).

El GTAIHA realizó en 2015 dos campañas de monitoreo pasivo, y una tercera campaña en 2016, para determinar la variación espacial y temporal de concentraciones de los gases dióxido de azufre (SO_2), ozono troposférico (O_3) y óxidos de nitrógeno (NO_X) en Manizales. Cada campaña tuvo una duración aproximada de cuatro semanas. La primera de ellas se ejecutó en el mes de febrero de 2015, la segunda tuvo lugar en

noviembre del mismo año, y la tercera campaña se realizó en febrero de 2016. La selección de estos periodos se realizó considerando el comportamiento de las lluvias en la región, para evaluar variación en las concentraciones de los tres gases, entre periodos predominantemente secos (como febrero) y periodos predominantemente lluviosos (como noviembre). La ejecución de las campañas en meses distintos también permitió evaluar el posible impacto del cambio en la actividad volcánica sobre las concentraciones de SO_2.

Los muestreadores pasivos empleados en las campañas de monitoreo fueron adquiridos de un proveedor estadounidense, con experiencia en su fabricación y comercialización. Los muestreadores de SO_2 y O_3 empleados son tubos cilíndricos de etileno fluorado, los muestreadores de NO_X son tubos de acrílico. Los tres tipos de tubos miden 71 mm de largo y 11 mm de ancho. Para su implementación en el monitoreo no fue necesario calibrarlos ni medir volúmenes de aire para conocer la concentración de los gases de interés. El montaje de la estación consta de un soporte con tres ranuras para insertar los tubos, un techo protector de zinc, y un tubo de PVC que funcionaba como soporte (Ver Figura 6.1).



(a) (b)

Figura 6.1. Muestreadores pasivos empleados en las campañas de monitoreo. (a) Muestreadores pasivos de dióxido de azufre (Tomado de: http://www.ormantineusa.com/). (b) Montaje estación de monitoreo pasivo (Imagen propia).

En las tres campañas de monitoreo se instalaron doce estaciones, cada una compuesta por tres muestreadores pasivos, diseñados para captar los contaminantes de interés (SO_2, O_3 y NO_X). Las estaciones se distribuyeron entre la zona urbana de Manizales y la zona rural del municipio de Villamaría, Caldas, en zonas cercanas al volcán Nevado del Ruíz, con el objetivo de evaluar la influencia de esta fuente natural en las concentraciones de SO_2, y al mismo tiempo evaluar las concentraciones de NO_X y O_3 en un área poco influenciada por actividades antropogénicas.

La Tabla 6.2 presenta el listado de las estaciones de monitoreo pasivo, su ubicación y características principales. Entre la primera y la segunda campaña de monitoreo, dos de las doce estaciones fueron reubicadas, gracias al análisis de los resultados obtenidos en la primera campaña. Específicamente, las estaciones Peralonso y La Palma, se trasladaron pasando a ser las estaciones Piamonte y Policía Maltería, en la segunda campaña. La estación Peralonso, ubicada en el Cuerpo de Bomberos Voluntarios de Manizales sobre la Avenida Kevin Ángel, se reubicó debido a que posiblemente la recarga de extintores afectó los niveles de NO_X detectados por el muestreador. Por otro lado, la estación La Palma, ubicada en una finca de Villamaría, se trasladó ya que se observó poca influencia de fluidos volcánicos en este punto. Dicha estación se alejaba de la ruta habitual seguida por los gases emitidos por el volcán Nevado del Ruíz, presentando muy bajas concentraciones de SO_2. Al estar ubicada sobre la zona rural, la estación La Palma también presentó bajas concentraciones de NO_X, aunque sí presentó un alto nivel de O_3. La estación Piamonte, nueva en la segunda campaña, se ubicó dentro de un conjunto residencial contiguo a la Avenida Kevin Ángel, para

continuar evaluando la influencia del flujo vehicular sobre los niveles de contaminantes en este sector. La estación Policía Maltería, se ubicó sobre la vía Manizales – Bogotá, en un sector influenciado por la actividad industrial. Además, se ubica mejor sobre la línea que cubre la dispersión de gases del volcán Nevado del Ruíz. Las dos nuevas estaciones se conservaron durante la ejecución de la tercera campaña.

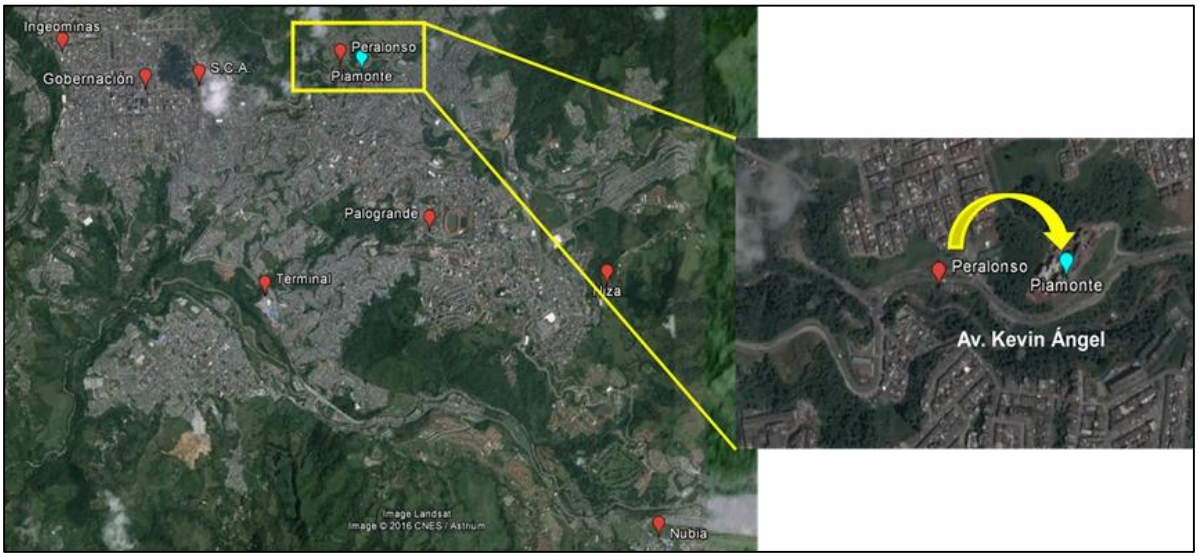
Tabla 6.2 Estaciones de monitoreo pasivo

Estación de Monitoreo Pasivo		Campaña Monitoreo Pasivo	Tipo de Sector	Principal Fuente de Influencia	Coordenadas Geográficas	Altura (m.s.n.m.)	Distancia aproximada al volcán NR (Km)
1	La Fonda	C1 C2 C3	Rural	Volcán	4°52’11.1”N 75°24’7.3”W	3647	9.36
2	Hostal	C1 C2 C3	Rural	Volcán	4°55’53.8”N 75°28’1.4”W	2350	17.71
3	La Palma	C1	Rural	Volcán	4°59’48.7”N 75°30’23.2”W	2307	25.49
4	H. Termales del Ruíz	C1 C2 C3	Rural	Volcán	4°58’3.2”N 75°31’27.6”W	3661	11.40
5	Ingeominas	C1 C2 C3	Residencial	Tráfico Vehicular	5°4’17.4”N 75°28’35.4”W	2219	29.52
6	Peralonso	C1	Residencial	Tráfico Vehicular	5°3’51.9”N 75°29’17.5”W	2088	27.15
7	Palogrande	C1 C2 C3	Residencial	Tráfico Vehicular	5°3’22.4”N 75°29’31.3”W	2154	26.69
8	Niza	C1 C2 C3	Residencial	Zona industrial Milán	5°3’5.3”N 75°28’35.4”W	2251	25.03
9	Gobernación	C1 C2 C3	Comercial	Tráfico Vehicular	5°4’6.5”N 75°31’1.7”W	2258	29.42
10	S.C.A.[a]	C1 C2 C3	Comercial	Tráfico Vehicular	5°4’7.7”N 75°30’44.6”W	2161	28.77
11	Terminal	C1 C2 C3	Comercial/ Residencial	Tráfico Vehicular	5°3’2.5”N 75°30’25.2”W	1893	26.61
12	Nubia	C1 C2 C3	Industrial/ Residencial	Tráfico Vehicular	5°1’47.0”N 75°28’18”W	2091	22.49

Estación de Monitoreo Pasivo		Campaña Monitoreo Pasivo	Tipo de Sector	Principal Fuente de Influencia	Coordenadas Geográficas	Altura (m.s.n.m.)	Distancia aproximada al volcán NR (Km)
13	Piamonte	C2 C3	Residencial	Tráfico Vehicular	5°1'47.0"N 75°28'18"W	2087	28.75
14	Policía Maltería	C2 C3	Industrial	Zona Industrial Maltería	5°2'11.4"N 75°25'51.5"W	2325	21.2

a. *Sociedad Colombiana de Arquitectos*
C1: 1ª campaña de monitoreo, febrero 2015.
C2: 2ª campaña de monitoreo, noviembre 2015.
C3:3ª campaña de monitoreo, febrero 2016.

La Figura 6.2 muestran la ubicación de las estaciones de monitoreo de la primera y segunda campaña. Se indica con flechas la reubicación de las estaciones Peralonso (Figura 6.2a) y La Palma (Figura 6.2b). En azul se identificaron las dos nuevas estaciones Piamonte y Policía Maltería.



(a)

(b)

Figura 6.2. Ubicación estaciones de monitoreo pasivo, 1ª y 2ª campaña. a) Reubicación estación Peralonso. b) Reubicación estación La Palma. Tomado y Adaptado de: Google Earth

Las estaciones que se presentan en la Figura 6.2b se conservaron para el monitoreo pasivo de la tercera campaña.

6.3. Resultados

En esta subsección se presenta inicialmente un reporte del estado y funcionamiento reciente de algunas estaciones de calidad del aire que conforman y apoyan el SVCA de Manizales.

Posteriormente, se muestra gráficamente la distribución temporal de las concentraciones de los contaminantes PM_{10}, $PM_{2.5}$, SO_2, O_3 y CO, y el análisis estadístico de las concentraciones de dichos contaminantes. Además, se presentan los Índices de Calidad del Aire (ICA), calculados para PM_{10}, $PM_{2.5}$, SO_2 y O_3, obtenidos del Centro de Datos e Indicadores Ambientales de Caldas (CDIAC).

Dentro de los resultados también se incluye un análisis de las variables meteorológicas de la estación Liceo, la cual estuvo fuera de operación temporalmente debido a fallas técnicas. Posteriormente esta estación fue reparada y puesta en operación en Octubre de 2016. Se evaluaron las mediciones comparando con la estación meteorológica Hospital y Gobernación (estación móvil instalada por la Universidad Nacional). Se incluye un análisis conjunto de variables meteorológicas y de calidad del aire, a partir de rosas de contaminantes para SO_2, O_3 y CO, en función de los vientos, la temperatura, la radiación solar, y la humedad relativa, medidas en la estación Gobernación.

Finalmente se muestran los resultados consolidados de las tres campañas de monitoreo pasivo ejecutadas entre 2015 y 2016, para monitorear las concentraciones SO_2, O_3 y NO_X en la zona urbana de Manizales, y rural de Villamaría (cercanías al volcán Nevado del Ruíz).

6.3.1 Operación de estaciones Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire de Manizales

La disponibilidad de datos de calidad del aire depende en primera instancia, de la óptima y continua operación de las estaciones de monitoreo de contaminantes. Las entidades a cargo del funcionamiento de estas estaciones, hacen esfuerzos para garantizar el correcto funcionamiento de las mismas sin embargo, por diversas razones como ausencia de fluido eléctrico, fallas mecánicas, retraso en operaciones de mantenimiento y/o logística, no es posible garantizar la operación óptima y constante de las estaciones, lo cual impide disponer del 100% de los datos que se pretende recolectar en un periodo determinado de tiempo.

Lo anterior puede limitar el análisis de la variación temporal de las concentraciones de contaminantes en el aire, por lo cual se ha querido poner en evidencia algunos acontecimientos que han impedido la idónea operación de las estaciones del SVCA, durante el periodo de ejecución del Convenio No. 130-2014 (Tabla 6.3).

Tabla 6.3. Novedades estaciones del SVCA de Manizales

Estación	Contaminante Monitoreado	Propietario	Novedad	Estado Actual
Gobernación	SO_2 y O_3	U.N.	Falla en operación de sistemas de bombeo de la estación. Ausencia de datos durante (d/m/a): 02/10/2015 - 1/03/2016 Mantenimiento: 28/01/2016	En funcionamiento (transmitiendo datos válidos desde 1/03/2016)
Gobernación	CO	CORPOCALDAS	Fallas en operación de la estación por falta de equipos para realizar calibración de cero y span. Mantenimiento: en espera de la realización del span. Se tiene hasta la fecha el equipo para calibración del cero.	En funcionamiento (transmitiendo datos inválidos)
Gobernación	$PM_{2.5}$	CORPOCALDAS	Falla en operación de la estación. Mantenimiento: **en espera**	Detenido (desde junio 2015)
Palogrande	PM_{10}	U.N.	Dificultades de acceso. Ausencia de datos durante (d/m/a): 01/01/2016 - 24/04/2016	En funcionamiento (desde abril de 2016)
Liceo	Meteorológica	CORPOCALDAS – AyV Ingeniería	Anomalías detectadas en medición de dirección del viento. Anomalías en validez de variables medidas. Mantenimiento (m/a): 10/2015	En funcionamiento: datos válidos de presión barométrica, temperatura y velocidad de viento desde diciembre de 2015 hasta junio de 2016. A partir de junio de 2016 se realizó una modificación del sistema de la estación, por lo cual los datos transmitidos de las demás

Estación	Contaminante Monitoreado	Propietario	Novedad	Estado Actual
				variables ya son considerados válidos.* Los datos válidos de Liceo obtenidos a partir de junio 2016 no se analizaron en este informe final.

** Información suministrada por funcionaria de la Red Meteorológica e Hidrometeorológica Telemétrica de Caldas.*

6.3.2 Material Particulado

Criterio de representatividad, concentraciones de material particulado

Previo al análisis de series temporales de material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$), se evaluó el criterio de representatividad establecido por el MAVDT en el Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire, según el cual, "se considera posible realizar un promedio anual de PM_{10} y $PM_{2.5}$ si para cada uno de los trimestres de un año, se dispone por lo menos de un 75% de los datos de concentración de 24 horas para ese periodo, equivalente al porcentaje de datos capturados" (MAVDT, 2010). Este porcentaje se calcula de acuerdo a la ecuación (6.1) establecida en el mencionado Protocolo:

$$\%Datos_{cap} = \frac{d}{N} * 100 \qquad (6.1)$$

Donde $\%Datos_{cap}$ indica el porcentaje de datos capturados por el equipo de medición, *d* es el número total de datos capturados por el equipo durante el periodo de tiempo definido, y *N* es el número de datos máximos que pudieron ser capturados en el periodo de tiempo definido. En un año, el valor de N equivale a 121 datos, considerando que el monitoreo de PM_{10} y $PM_{2.5}$ se debe realizar cada tres días, según la normatividad colombiana (MAVDT, 2010).

La Tabla 6.4 muestra el número de datos capturados *d* y porcentaje de datos capturados que se registraron en cada una de las estaciones de monitoreo de material particulado del SVCA de Manizales, por cada año del periodo de análisis (2009-2016). Se especifica si la estación cumplió o no con el criterio de representatividad, año a año.

Tabla 6.4. Cumplimiento de criterio de representatividad en estaciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$

Año	Estación											
	Gobernación PM_{10}		Palogrande PM_{10}		Nubia PM_{10}		Milán PM_{10}		Liceo PM_{10}		Gobernación $PM_{2.5}$	
2009	d	91	d	19	d	13	d	--	d	--	d	63
	$\%Datos_{cap}$	75	$\%Datos_{cap}$	16	$\%Datos_{cap}$	11	$\%Datos_{cap}$	--	$\%Datos_{cap}$	--	$\%Datos_{cap}$	52
Cumple	SI		NO		NO		--		--		NO	
2010	d	103	d	93	d	91	d	--	d	97	d	103
	$\%Datos_{cap}$	85	$\%Datos_{cap}$	77	$\%Datos_{cap}$	75	$\%Datos_{cap}$	--	$\%Datos_{cap}$	80	$\%Datos_{cap}$	85

Año	Estación											
	Gobernación PM_{10}		Palogrande PM_{10}		Nubia PM_{10}		Milán PM_{10}		Liceo PM_{10}		Gobernación $PM_{2.5}$	
Cumple	SI		SI		SI		--		SI		SI	
2011	d	107	d	91	d	91	d	--	d	98	d	97
	$\%Datos_{cap}$	88	$\%Datos_{cap}$	75	$\%Datos_{cap}$	75	$\%Datos_{cap}$	--	$\%Datos_{cap}$	81	$\%Datos_{cap}$	80
Cumple	SI		SI		SI		--		SI		SI	
2012	d	113	d	92	d	95	d	10	d	86	d	111
	$\%Datos_{cap}$	93	$\%Datos_{cap}$	76	$\%Datos_{cap}$	79	$\%Datos_{cap}$	8	$\%Datos_{cap}$	71	$\%Datos_{cap}$	92
Cumple	SI		SI		SI		NO		NO		SI	
2013	d	101	d	97	d	4	d	93	d	94	d	91
	$\%Datos_{cap}$	83	$\%Datos_{cap}$	80	$\%Datos_{cap}$	3	$\%Datos_{cap}$	77	$\%Datos_{cap}$	78	$\%Datos_{cap}$	75
Cumple	SI		SI		NO		SI		SI		SI	
2014	d	103	d	92	d	98	d	91	d	92	d	104
	$\%Datos_{cap}$	85	$\%Datos_{cap}$	76	$\%Datos_{cap}$	81	$\%Datos_{cap}$	75	$\%Datos_{cap}$	76	$\%Datos_{cap}$	86
Cumple	SI		SI		SI		SI		SI		SI	
2015	d	91	d	71	d	76	d	71	d	72	d	39
	$\%Datos_{cap}$	75	$\%Datos_{cap}$	59	$\%Datos_{cap}$	63	$\%Datos_{cap}$	59	$\%Datos_{cap}$	60	$\%Datos_{cap}$	32
Cumple	SI		NO		NO		NO		NO		NO	

En la Tabla 6.4 se observa que algunas estaciones no cumplen con el criterio de representatividad equivalente al número mínimo de datos requerido para calcular un promedio anual y comparar con el valor máximo anual establecido en la Resolución 610 de 2010 (MAVDT, 2010). Este es el caso de las estaciones Palogrande y Nubia que durante el año 2009 no registraron el número de datos mínimo (75% de datos de un año), con un porcentaje de datos capturados de 16% y 11%, respectivamente, debido a que las estaciones empezaron su operación en septiembre de ese año. En 2009, el equipo de medición de $PM_{2.5}$ ubicado en Gobernación, tampoco igualó el umbral del 75% de datos anuales, registrando un total de 52% de datos capturados; se desconoce la causa de este bajo nivel de captura de datos. En 2012, la estación Milán sólo registró el 8% de datos que deben ser capturados en un año, los cuales no son suficientes para representar un promedio anual, y se atribuye a que la operación de la estación inició en el mes de septiembre de 2012. En ese mismo año, la estación Liceo presentó un porcentaje de captura del 71%. En 2013, la estación Nubia presentó un porcentaje de captura igual al 3%. Durante este año la estación tuvo que ser suspendida para llevar a cabo adecuaciones y así cumplir con los estándares de seguridad exigidos para realizar trabajo en alturas. En 2015, las estaciones de PM_{10} Palogrande, Nubia, Milán y Liceo, no capturaron el 75% de los datos requeridos anuales, con porcentajes de 59, 63, 59 y 60, respectivamente. En el mismo año, la estación de $PM_{2.5}$ de Gobernación, registró sólo el 32% de captura de datos, ya que ésta operó hasta el mes de junio debido a fallas técnicas.

A pesar de no cumplir en algunos casos con el criterio de representatividad, se calcularon los promedios anuales de todas las estaciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$, y se compararon con el límite máximo permitido anual

(MAVDT, 2010), para el periodo 2009-2015. Al momento de realización de este informe (mayo de 2016), no se han generado datos suficientes para calcular un promedio anual del año 2016, por lo cual no se realiza comparación para este año.

Variación temporal de las concentraciones diarias y anuales durante el periodo 2009 - 2016

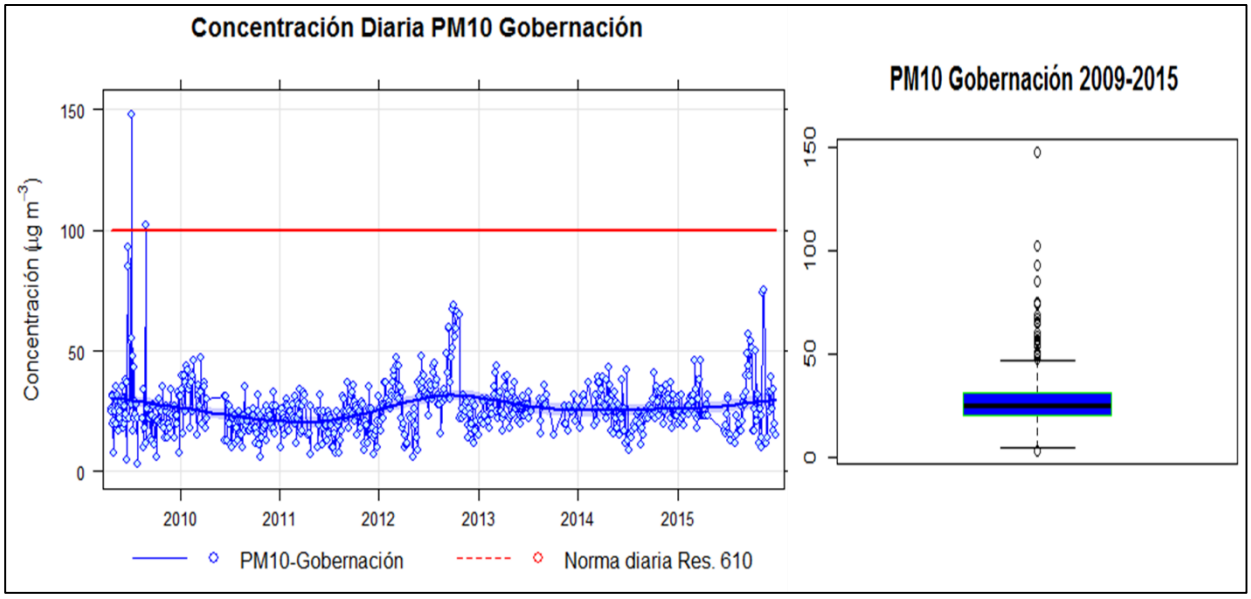
Las Figuras 6.3 a 6.7 presentan la variación media anual y diaria de las concentraciones de material particulado menor a 10 micrómetros (PM_{10}), para el periodo comprendido entre el año 2009 y abril de 2016. Este análisis incluye mediciones de PM_{10} en las estaciones Gobernación, Palogrande, Nubia, Milán y Liceo. El comportamiento de las concentraciones de material particulado menor a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$) se muestra en la Figura 6.8 para el periodo comprendido entre el año 2009 y el año 2015 (al momento de realización de este informe el equipo de monitoreo de $PM_{2.5}$ no se encuentra en funcionamiento, desde una falla técnica presentada en junio de 2015).

Las concentraciones diarias de PM_{10} y $PM_{2.5}$ se compararon con los límites diarios máximos permitidos, según la Resolución 610 de 2010 del MAVDT. Los promedios anuales también se compararon con la norma colombiana, a pesar que en algunos años las estaciones no cumplieron con el criterio de representatividad (Tabla 6.4), que establece el porcentaje mínimo de datos que deben ser recolectados para calcular un promedio anual en una estación. Esta comparación se realizó con el fin de observar un patrón de variación interanual y cumplimiento de la norma. Las bases de datos que contienen las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ medidas en Gobernación, Palogrande, Nubia, Milán y Liceo, se entregan actualizadas hasta abril de 2016 en el Anexo 6.1.

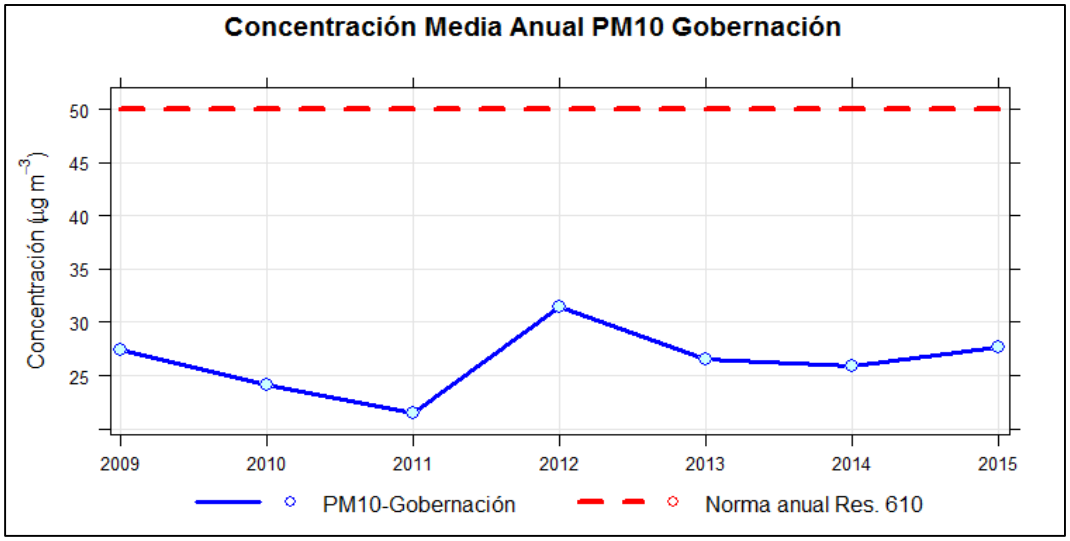
Estación Gobernación – PM_{10}

El comportamiento de las concentraciones de PM_{10} durante el periodo 2009-2016, se muestra en la Figura 6.1. La concentración diaria máxima permitida de PM_{10} según la Resolución 610 del MAVDT (actualmente Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible), es igual a 100 µg/m^3. Durante el periodo de análisis la mayoría de las estaciones midieron concentraciones inferiores al límite máximo permitido, a excepción de la estación Gobernación que en el año 2009 sobrepasó el límite diario permitido, con concentraciones de hasta 150 µg/m^3 (Figura 6.3a). En general, la concentración diaria de PM_{10} en la estación Gobernación no supera los 50 µg/m^3. Concentraciones superiores a los 50 µg/m^3, se registraron durante 2012 y 2015, con valores alrededor de 60 y 70 µg/m^3.

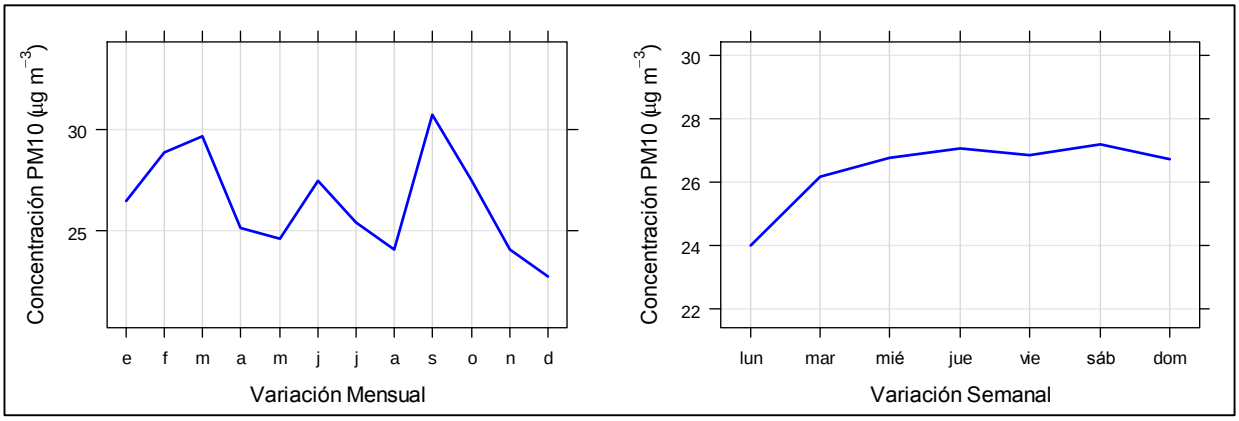
Mediante el gráfico de cajas se representó la variación de las concentraciones diarias de PM_{10} en la estación Gobernación para todo el periodo analizado (abril 2009 - abril 2016), evidenciando la presencia de datos atípicos que superaron los niveles máximos representados por los bigotes de la caja, alcanzando valores de hasta 150 µg/m^3. En la Resolución 610 también se establece la concentración de PM_{10} anual máxima permitida, equivalente a 50 µg/m^3. Como se observa en la Figura 6.1 ninguna de las concentraciones anuales de PM_{10} en Gobernación ha superado los límites máximos permitidos. Se evidenció una disminución en la concentración de PM_{10} durante el periodo 2009-2011 (Figura 6.3b). Dicha disminución se podría relacionar con la restricción en la circulación de buses en la carrera 21, impuesta en el año 2010. En la estación Gobernación se observó además un pico de concentración en 2012, al igual que en las estaciones Palogrande y Nubia (Figuras 6.4b y 6.5b). Dicho nivel de concentración podría estar relacionado con el aumento de la actividad volcánica del Nevado del Ruíz durante este año. A partir del año 2013, la concentración de PM_{10} disminuyó en Gobernación, probablemente relacionado con las medidas de reducción del nivel de azufre en el diésel, ejecutadas por Ecopetrol, pasando de 500 ppm a 50 ppm a finales de 2012 (Ecopetrol, 2013).



(a)



(b)



(c)

Figura 6.3. Variación de concentraciones de PM_{10} en la estación Gobernación (azul). Comparación con el nivel máximo permisible diario y anual de la Resolución 610 de 2010 (rojo). a) Concentraciones diarias. b) Promedios anuales. c) Promedios mensuales y semanales.

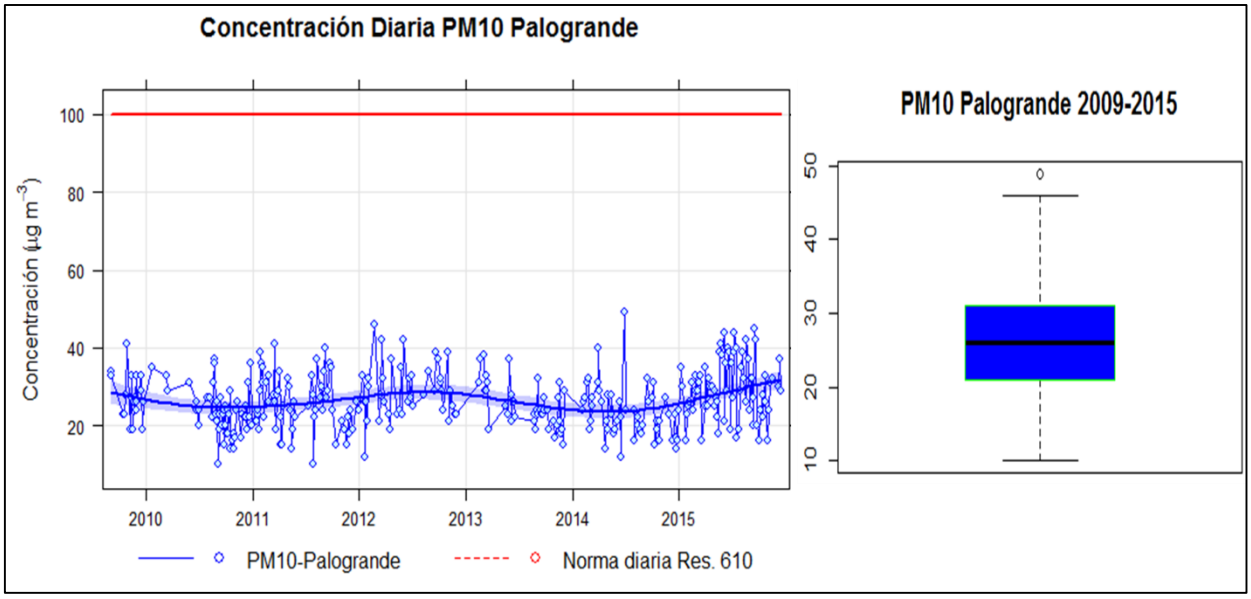
Desde el año 2014 hasta 2015, las concentraciones de PM_{10} en Gobernación se han mantenido alrededor de los 30 µg/m^3.

La Figura 6.3c muestra la variación mensual de las concentraciones PM_{10} en Gobernación. Se observa que durante el periodo de análisis existe una fluctuación reflejada en mayores concentraciones en mayo, junio y septiembre, siendo diciembre el mes con menores niveles de PM_{10} en la estación. Se muestra también el comportamiento semanal promedio de las concentraciones de PM_{10} en esta estación. Se observa que en promedio, los días lunes las concentraciones de PM_{10} son inferiores a los demás días de la semana, incluyendo los sábados y domingos. Este comportamiento pareciera no ser coherente con la dinámica de las fuentes móviles, a las que se les atribuyen los niveles de material particulado registrados en este sector de la ciudad, pues es sabido que el flujo vehicular disminuye durante los fines de semana y es mayor durante los días laborales (lunes a viernes). Como posible causa, se estima que la baja carga de contaminación del fin de semana influye en las concentraciones medidas los días lunes. Es posible que las bajas emisiones del domingo contribuyan a una atmósfera menos saturada que permite equilibrar la concentración de PM_{10} a inicio de la semana. Esta observación se discutirá con la Corporación.

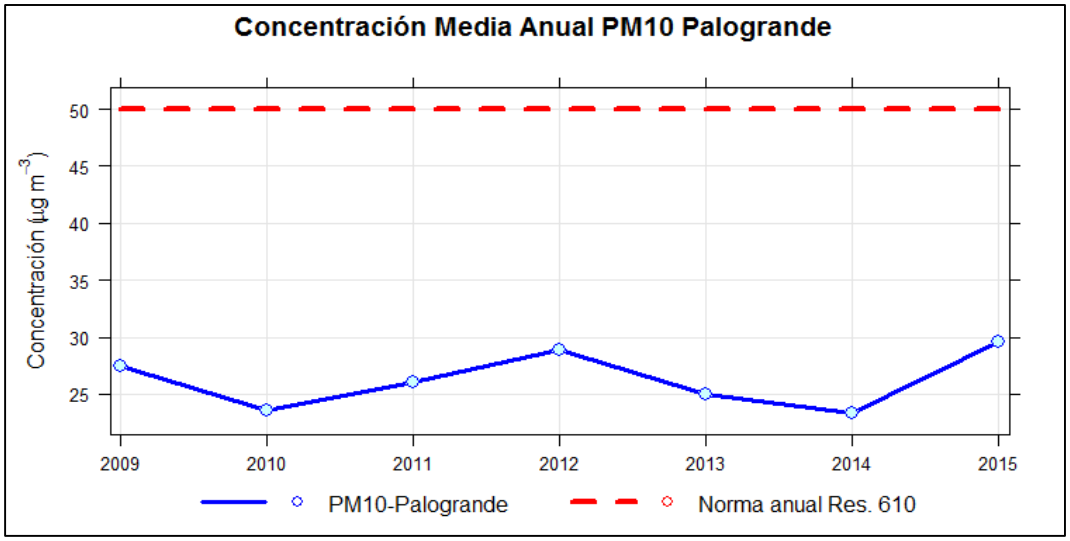
Estaciones Nubia y Palogrande – PM_{10}

Las estaciones de PM_{10} Nubia y Palogrande operadas por el GTAIHA, presentaron un comportamiento similar a lo largo del periodo de análisis (Figuras 6.4 a 6.5). La concentración diaria en ambas estaciones osciló entre los 20 y 40 µg/m^3, sin superar el límite establecido por la normatividad nacional colombiana equivalente a 100 µg/m^3 (Figuras 6.4a y 6.5a). Los gráficos de cajas representan la variación total de la concentración del contaminante durante todo el periodo. Para los registros de ambas estaciones se observa la existencia de algunos datos atípicos por encima de los 40 µg/m^3, que se presentaron en 2010, 2012, 2014 y 2015 en Nubia, y en 2012, 2014 y 2015 en Palogrande.

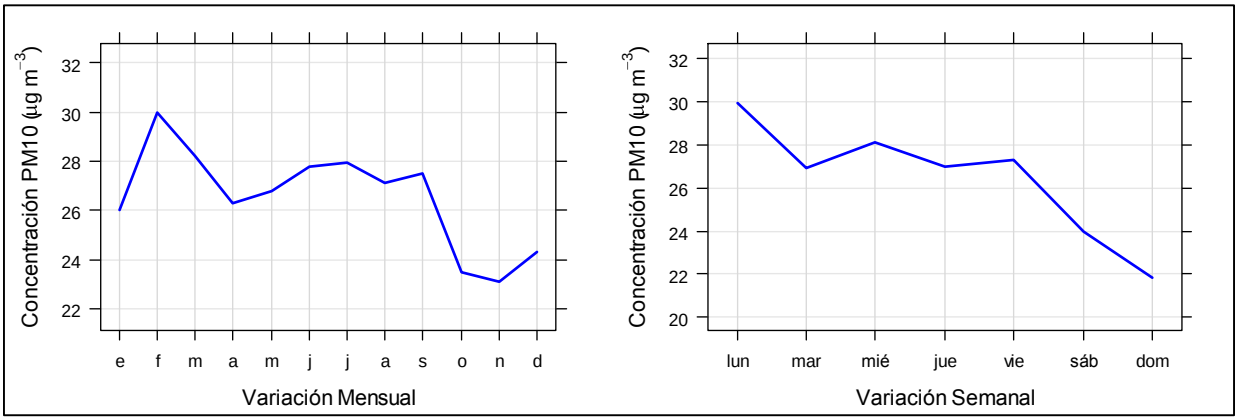
La Figuras 6.4b y 6.5b muestran los promedios anuales en Palogrande y Nubia, respectivamente, con una variación entre los 20 y 30 µg/m^3, sin superar el límite máximo permitido anual en ninguna de las dos estaciones. La ausencia de datos en la estación Nubia se ve reflejada en la discontinuidad en el promedio anual de 2013. La estación en ese año presentó una muy baja operación, debido la realización de adecuaciones con miras a cumplir con los estándares de seguridad para el personal encargado de su operación. Se evidenció una disminución del promedio anual después del año 2012, y un aumento en 2015. Este hecho podría asociarse con el evidente aumento de actividad del volcán Nevado del Ruíz, tal como se reporta en los boletines del Servicio Geológico Colombiano (S.G.C., 2015). La variación promedio semanal, muestra mayores concentraciones durante días laborales, y una notable disminución los fines de semana, dejando en evidencia la influencia del flujo vehicular en las concentraciones de ambas estaciones.



(a)

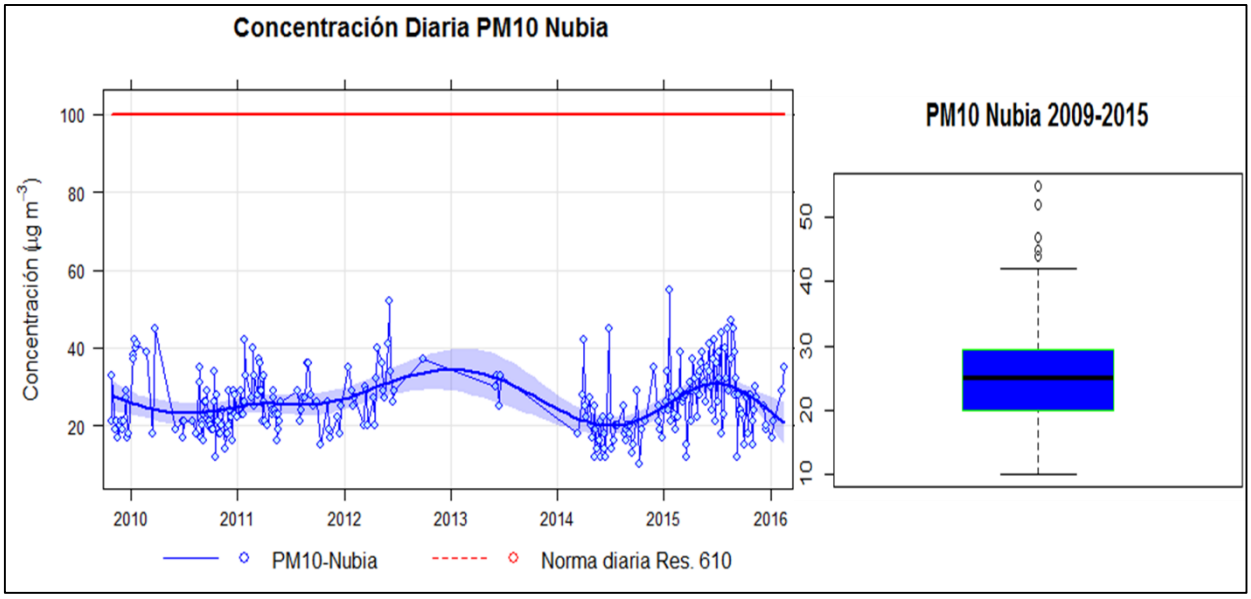


(b)

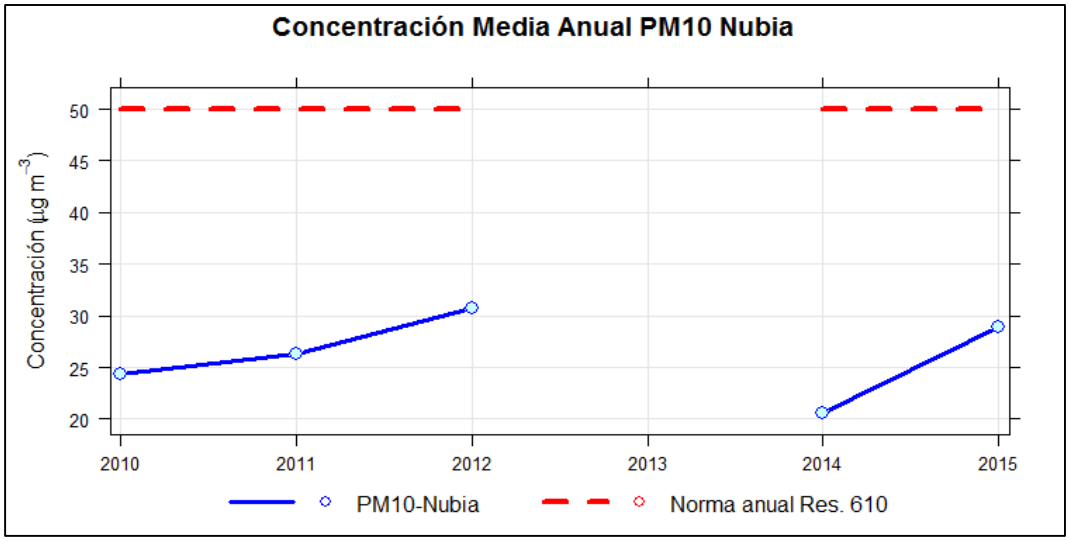


(c)

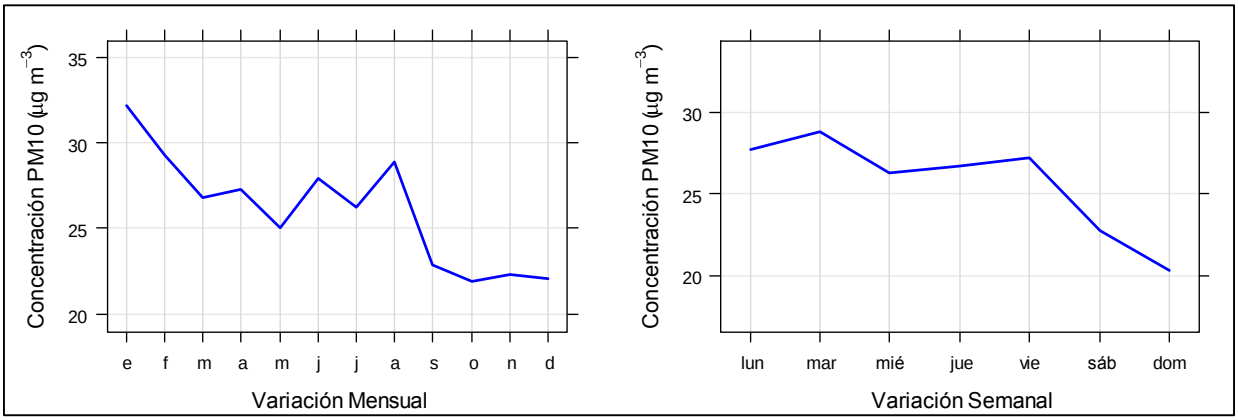
Figura 6.4. Variación de concentraciones de PM_{10} en la estación Palogrande (azul). Comparación con el nivel máximo permisible diario y anual de la Resolución 610 de 2010 (rojo). a) Concentraciones diarias. b) Promedios anuales. c) Promedios mensuales y semanales.



(a)



(b)



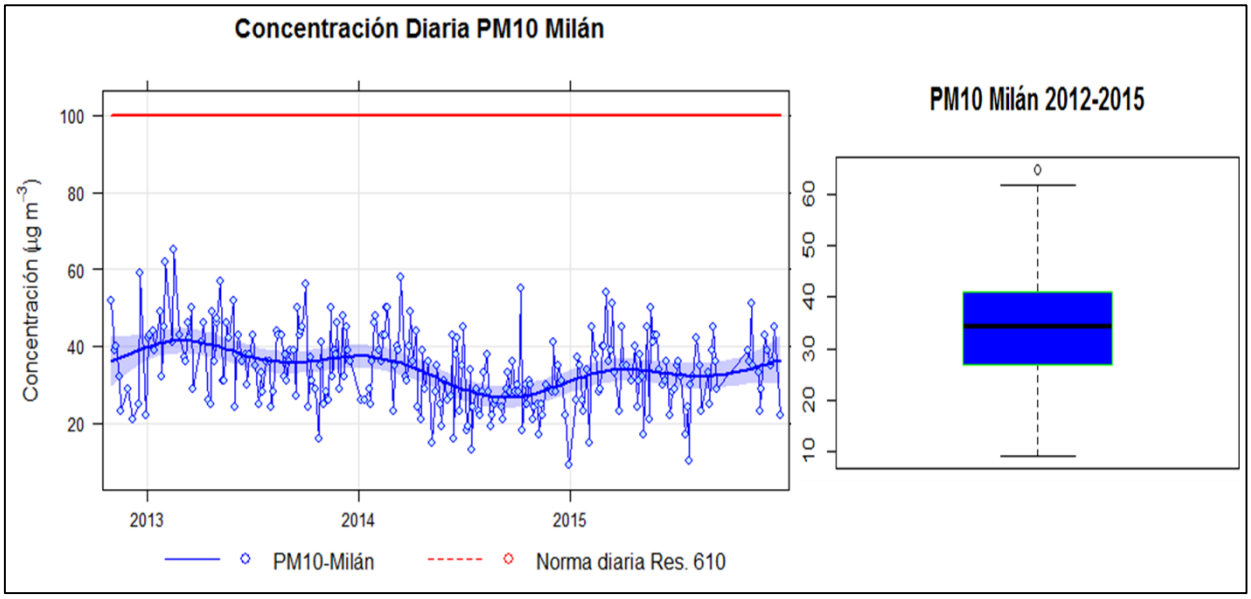
(c)

Figura 6.5. Variación de concentraciones de PM_{10} en la estación Nubia (azul). Comparación con el nivel máximo permisible diario y anual de la Resolución 610 de 2010 (rojo). a) Concentraciones diarias. b) Promedios anuales. c) Promedios mensuales y semanales.

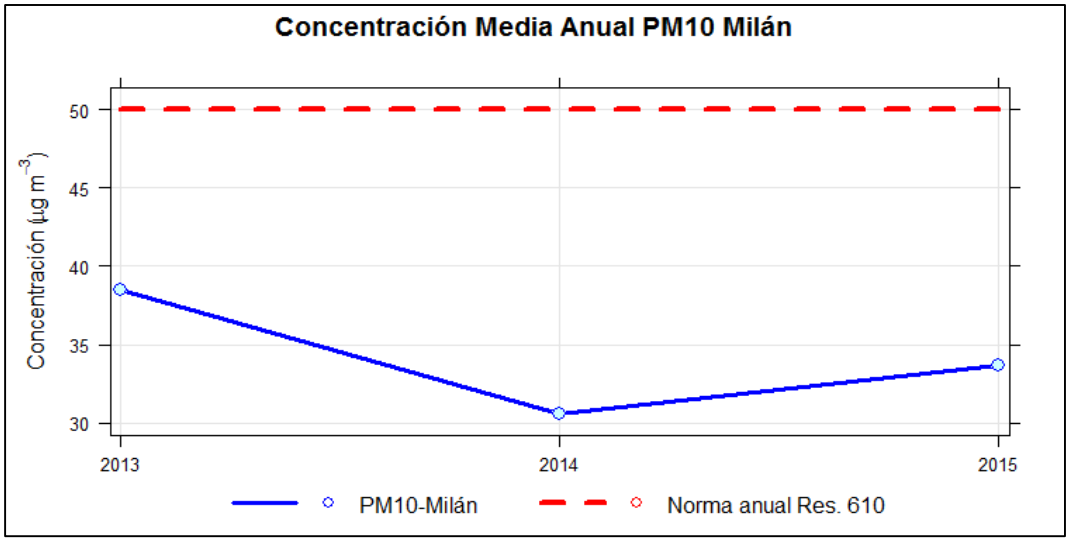
Estación Milán – PM_{10}

Los datos disponibles de la estación Milán del periodo 2012 a 2016 también se representaron gráficamente para evidenciar su variación temporal y se compararon las concentraciones diarias y su promedio anual, con los niveles máximos permisibles (Figura 6.6). Se encontró que las concentraciones diarias no superaron el máximo establecido en la Resolución 610, y que algunos días durante el año 2013, superaron los 60 µg/m^3 (Figura 6.6a). En el gráfico de cajas correspondiente a la estación, se observa como los valores máximos y mínimos (asociados al intervalo de valores típicos) de PM_{10} medido durante todo el periodo, corresponden a 10 µg/m^3 y 60 µg/m^3, aproximadamente. La elaboración del grafico de cajas para Milán permitió evidenciar la presencia valores atípicos durante el periodo de análisis, correspondiente a concentraciones superiores a 60 µg/m^3. Respecto al límite permitido anual, las concentraciones medidas desde la estación Milán no sobrepasan los 50 µg/m^3. Se encontró una disminución en la media anual del año 2014, respecto a la media del año 2013, lo cual se podría atribuir a las modificaciones en la composición del diésel y la variación en la actividad del volcán Nevado del Ruíz. En 2015 la concentración media anual presentó un aumento respecto a la variación de 2014 con un valor promedio cerca de los 34 µg/m^3.

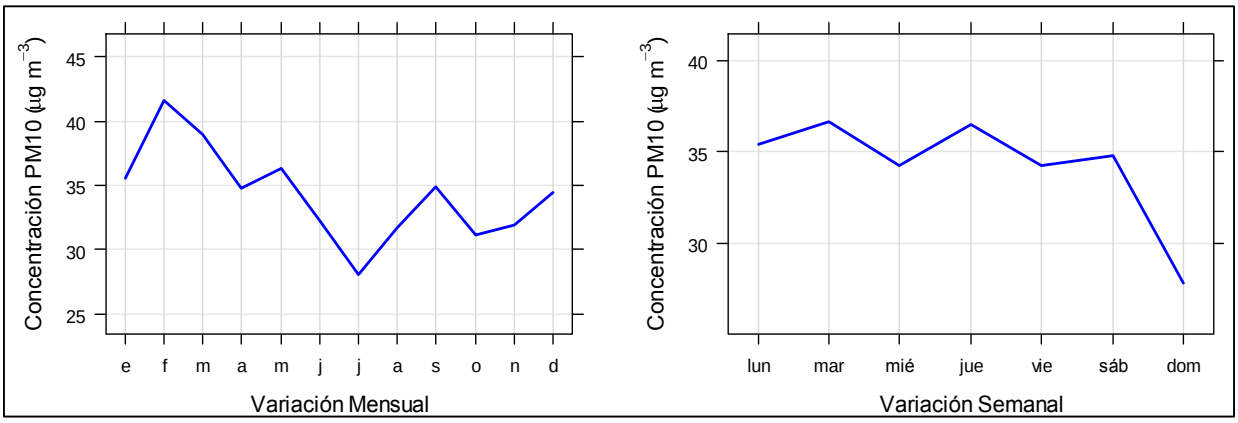
La variación mensual promedio (Figura 6.6c) muestra que durante el periodo de análisis, las mayores concentraciones suelen presentarse en febrero, seguido de una notable disminución hasta llegar a las mínimas concentraciones en julio. Mayo y septiembre presentan también picos de altas concentraciones, y octubre y enero presentan los valores más bajos después de julio. El comportamiento semanal promedio (Figura 6.6c) muestra que las mayores concentraciones tienen lugar durante los días laborales, con una notable disminución los domingos. Lo anterior supone la influencia de la dinámica de las fuentes móviles y las fuentes fijas cercanas a la estación Milán.



(a)



(b)

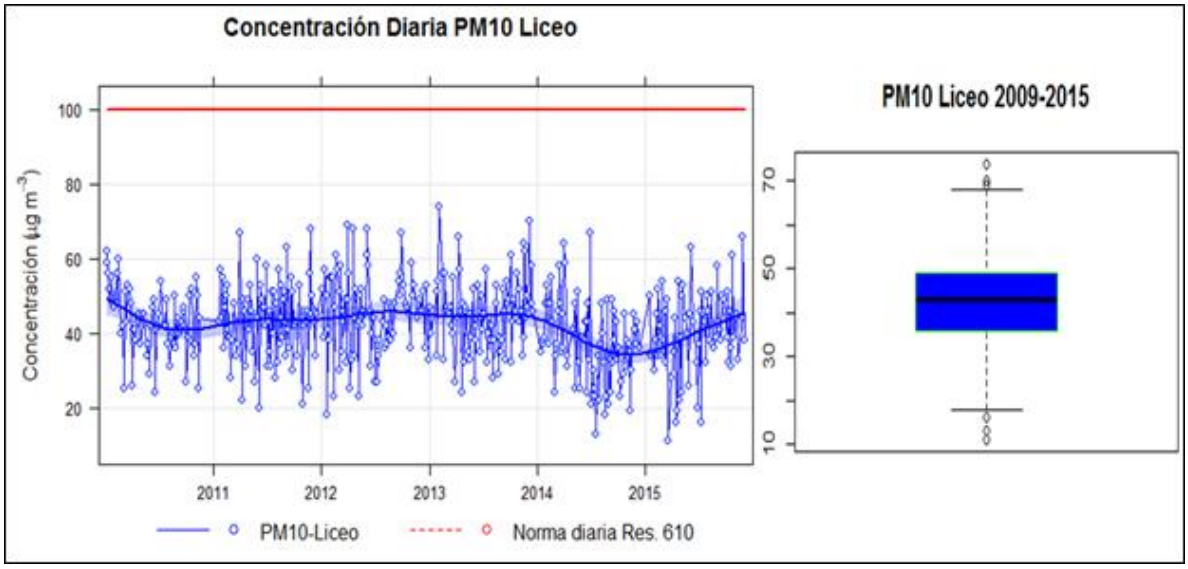


(c)

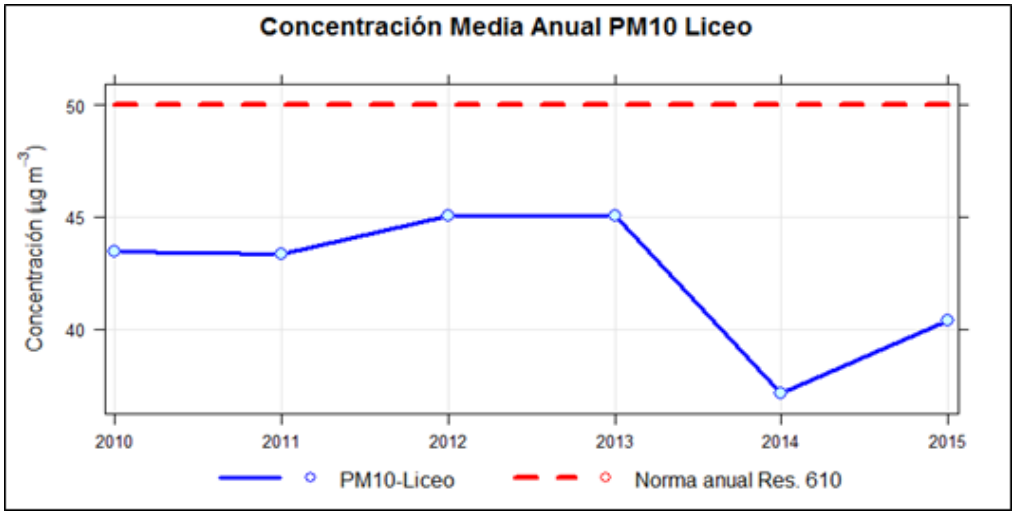
Figura 6.6. Variación de concentraciones de PM_{10} en la estación Milán (azul). Comparación con el nivel máximo permisible diario y anual de la Resolución 610 de 2010 (rojo). a) Concentraciones diarias. b) Promedios anuales. c) Promedios mensuales y semanales.

Estación Liceo – PM_{10}

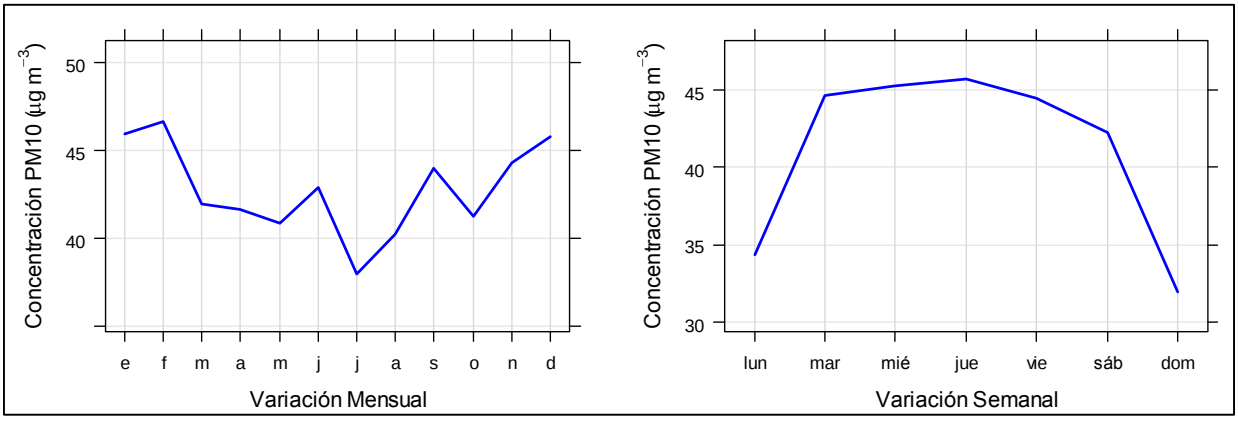
La Figura 6.7 muestra el comportamiento de la concentración de PM_{10} en la estación Liceo. Se observó que la concentración diaria no superó el límite máximo permitido de 100 µg/m^3, y osciló en el rango de 20 a 70 µg/m^3 (Figura 6.7a). La concentración media anual se acercó de manera importante al límite permitido anual durante los años 2011 y 2012, alcanzando valores de hasta 45 µg/m^3. El alto flujo vehicular que circula en el sector Fundadores podría estar relacionado con los niveles de material particulado registrados y se esperaría que la importante actividad volcánica del año 2012 haya influenciado las concentraciones de PM_{10} durante este año. La media anual del año 2014 muestra un decrecimiento en la concentración registrada en esta estación; dicho comportamiento obedece posiblemente a la disminución en la concentración de azufre en el diésel, pasando de 500 ppm a solo 50 ppm a finales de 2012, así como a la disminución de la actividad volcánica. Durante el año 2015, las concentraciones de PM_{10} en la estación muestran un leve incremento en comparación con el año inmediatamente anterior, esto podría asociarse con la fuerte reactivación de las emisiones del volcán Nevado del Ruíz.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.7. Variación de concentraciones de PM_{10} en la estación Liceo (azul). Comparación con el nivel máximo permisible diario y anual de la Resolución 610 de 2010 (rojo). a) Concentraciones diarias. b) Promedios anuales. c) Promedios mensuales y semanales.

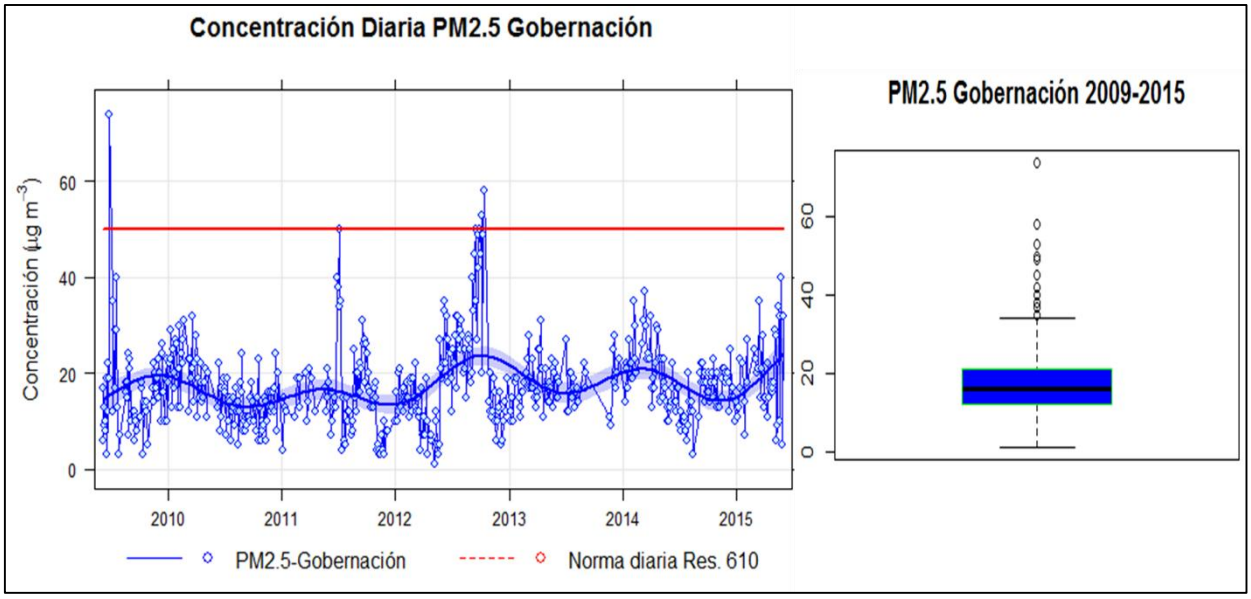
La Figura 6.7c presenta la variación media mensual durante el periodo de análisis para la estación Liceo. Se encontraron mayores concentraciones en febrero, junio, septiembre y diciembre. Similar a lo observado en la estación Milán, las menores concentraciones se presentaron en los meses de julio. Respecto a la variación media semanal, se evidenciaron mayores concentraciones entre martes y sábado, y los menores valores los días lunes y domingo. La poca concentración de los días lunes contradice el efecto que el flujo vehicular ejerce sobre las concentraciones del contaminante en este punto de la ciudad. Como posible causa, se estima que la baja carga de contaminación del fin de semana influye en las concentraciones medidas los días lunes. Es factible que las bajas emisiones del domingo contribuyan a una atmósfera menos saturada que permite equilibrar la concentración de PM_{10} a inicio de la semana. Esta observación se discutirá con la Corporación.

Estación Gobernación - $PM_{2.5}$

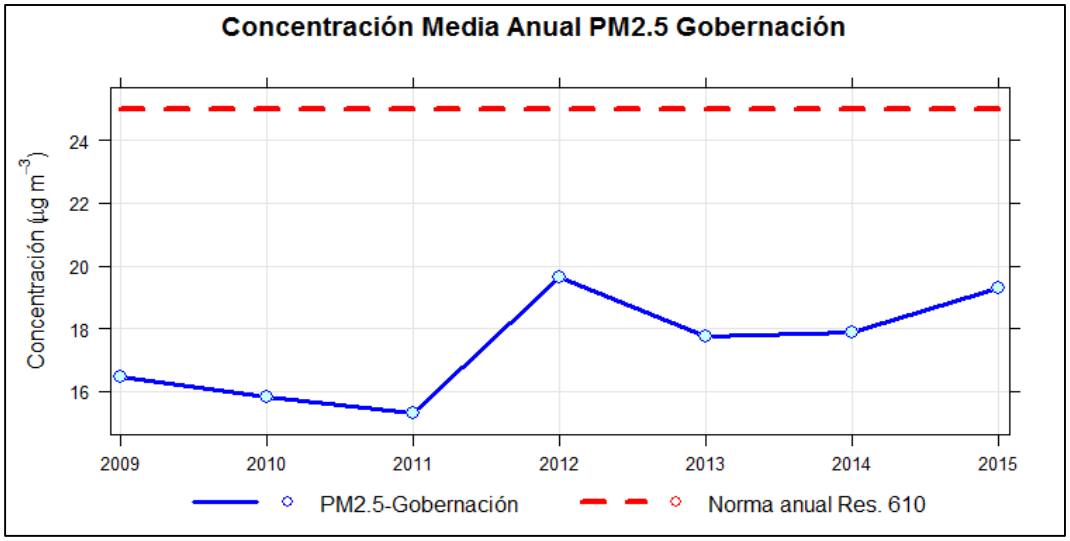
La Figura 6.8 representa la variación en las concentraciones de $PM_{2.5}$ medidas en la estación Gobernación. Se evidenció que el límite diario establecido en la Resolución 610, fue superado en varias ocasiones durante los años 2009, 2011 y 2012 (Figura 6.8a). Durante 2015, las concentraciones de $PM_{2.5}$ presentaron una tendencia a incrementar, hecho que podría asociarse con la fuerte actividad del volcán Nevado del Ruíz en este año, evidenciada en altos flujos de gases y ceniza (S.G.C., 2015).

Los promedios anuales de $PM_{2.5}$ registrados en la estación Gobernación, desde el año 2010 hasta el año 2015, se compararon también con el nivel máximo permitido anual para Colombia, establecido en 25 $\mu g/m^3$ (Figura 6.8b). Como se observa en esta figura, la concentración de $PM_{2.5}$ no superó la concentración máxima permitida anual durante el periodo 2010 - 2015. Es importante resaltar el pico de concentración que se registró en el año 2012, cercano a los 20 $\mu g/m^3$. En este análisis, se podría correlacionar dicho aumento con factores como el aumento de la actividad del volcán Nevado del Ruíz. Por otra parte, la disminución de concentración de $PM_{2.5}$ en 2013, donde alcanzó un valor inferior a los 18 $\mu g/m^3$, manteniéndose casi constante hasta el año 2014, podría asociarse con las variaciones en las características del combustible diésel, medidas como el Pico y Placa a vehículos de transporte público y la reducción de la actividad volcánica del Nevado del Ruíz con respecto al año 2012. Los valores que se registraron en 2015 de $PM_{2.5}$, mostraron un leve incremento respecto al año anterior.

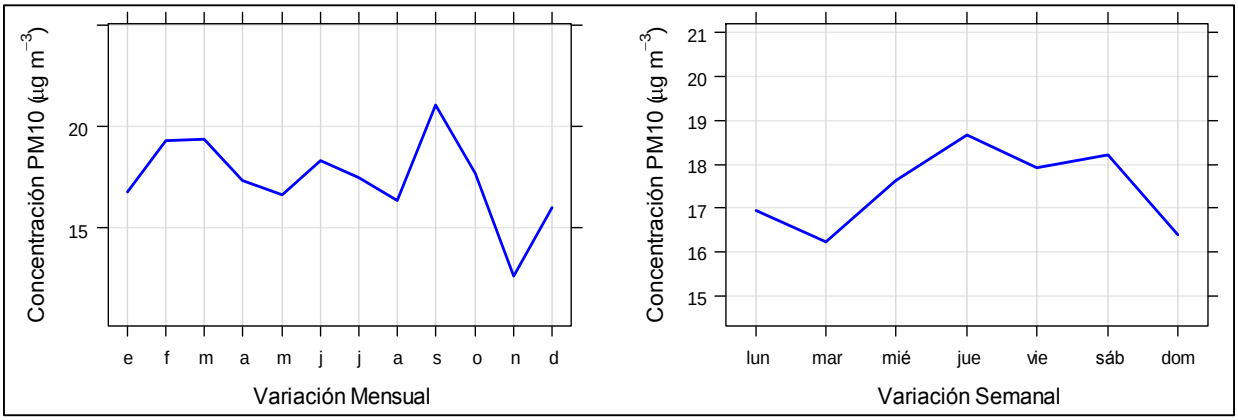
En el análisis de la variación de concentraciones medias mensuales (Figura 6.8c), mostró valores más altos en febrero, marzo y septiembre, mientras que las concentraciones más bajas se presentan por lo general, en el mes de noviembre. La variación promedio semanal mostró mayores niveles del contaminante durante los días laborales, a excepción del día martes, con una leve disminución. Los menores valores se registraron los días domingo, donde desciende el flujo vehicular tanto de transporte público como particular.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.8. Variación de concentraciones de $PM_{2.5}$ en la estación Gobernación (azul). Comparación con el nivel máximo permisible diario y anual de la Resolución 610 de 2010 (rojo). a) Concentraciones diarias. b) Promedios anuales. c) Promedio mensual y semanal.

Representación de concentraciones de material particulado mediante diagramas de cajas

Los diagramas o gráficos de cajas representan el comportamiento de series de datos en un solo elemento. Funcionan como complemento estadístico, donde se dividen los datos en cuatro áreas de igual frecuencia, una caja central dividida en dos áreas por una línea vertical, y otras dos al lado de la caja (Llinás y Rojas, 2006). Es posible visualizar la mediana de los datos (línea que corta la caja), el límite inferior de la caja muestra el primer cuartil (Percentil 25), el límite superior de la caja muestra el tercer cuartil (Percentil 75), los valores máximos y mínimos del intervalo de valores típicos se representan en los bigotes superior e inferior, y los datos atípicos son los puntos ubicados por fuera de los bigotes. En la Figura 6.9 se puede apreciar un esquema de este tipo de gráficos.

Los estadísticos que se representan mediante los gráficos de cajas, se definen así:

- Cuartil 1 = [Q1]: Valor máximo del 25% de los datos.
- Mediana = Cuartil 2 = [Q2]: Valor máximo del 50% de los datos.
- Cuartil 3 = [Q3]: Valor máximo del 75% de los datos.
- Rango Intercuartílico = [RI] = [Q3] – [Q1]
- Valor mínimo de la serie de valores típicos = Bigote inferior = [Q1] - 1.5*[RI]
- Valor máximo de la serie de valores típicos = Bigote superior = [Q3] + 1.5*[RI]

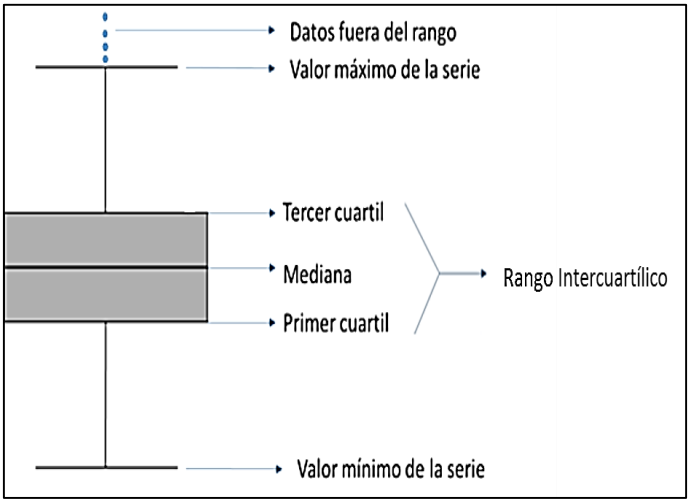


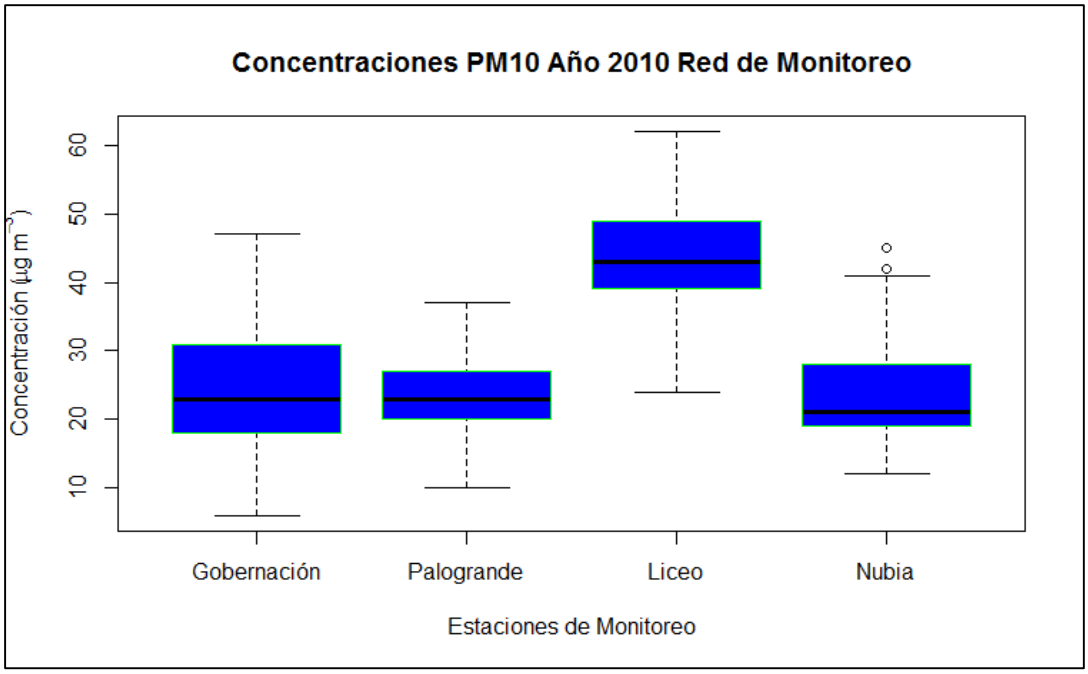
Figura 6.9. Esquema general y componentes de los gráficos de cajas. Adaptado de: Lenguaje R aplicado al análisis de datos de Calidad del Aire – Manual de usuario R y Openair.

La variación de concentraciones de material particulado desde el año 2010 a 2016 en las cinco estaciones de monitoreo analizadas (Gobernación, Palogrande, Liceo, Nubia y Milán) fue representada mediante gráficos de cajas, como se observa en la Figura 6.10a-g. Se realizó un análisis año a año con el fin de comparar la variación entre estaciones. Vale la pena aclarar que los diagramas de cajas para el año 2016 se incluyeron con el fin de observar el comportamiento de las concentraciones en la ciudad, en el periodo enero-abril de 2016, datos disponibles al momento de realización de este informe.

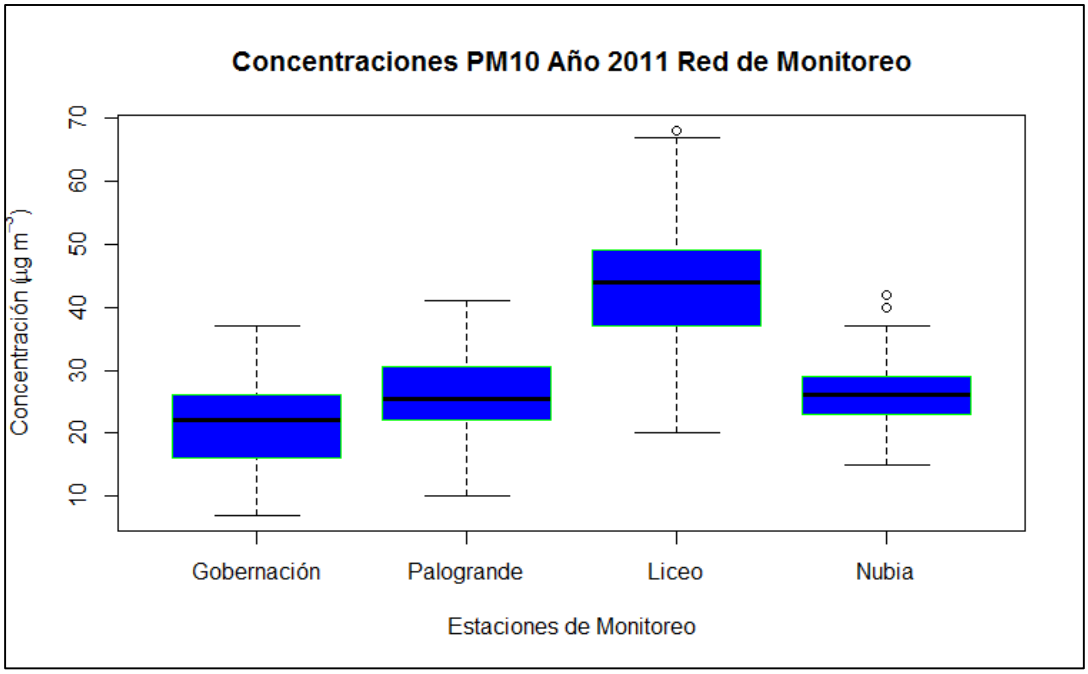
Durante el periodo 2010-2015, la estación Liceo registró los valores más altos de PM_{10}, alcanzando valores máximos (por día) mayores a 60 µg/m^3. Para esta estación, la mayor concentración dentro del 25% de los registros (primer cuartil), se mantuvo cerca de los 35-45 µg/m^3 durante el periodo total, mientras que la mayor concentración del 75% de los datos medidos (tercer cuartil), estuvo cercano a 50 µg/m^3. La mediana o segundo cuartil de los datos de concentración, se encontró alrededor de los 45 µg/m^3. Lo anterior representa nuevamente como las mayores concentraciones de material particulado de las zonas monitoreadas de Manizales, se registran en este punto, ubicado sobre el importante corredor vial de la Avenida Santander en el sector Fundadores.

Las concentraciones de las estaciones Gobernación y Milán se ubican en posición intermedia durante el periodo analizado. La concentración máxima del primer cuartil de datos en la estación Gobernación, estuvo cerca de los 20 µg /m^3 (durante todo el periodo), mientras que del 75% de las mediciones, la mayor concentración alcanzó valores entre 30 y 35 µg/m^3, valores obtenidos en 2012, y relacionados posiblemente con el incremento en la actividad volcánica registrado en ese año. En Milán, la mayor concentración de PM_{10} sobre el 25% de las concentraciones medidas entre 2013 y 2015, estuvo entre 23 y 38 µg/m^3, mientras que del 75% de los datos, se registraron máximas concentraciones cercanas a los 40 µg/m^3. Del 50 % de los registros de concentración, el mayor valor medido se mantuvo alrededor de 25 µg/m^3 en Gobernación y 30 µg/m^3 aproximadamente en Milán.

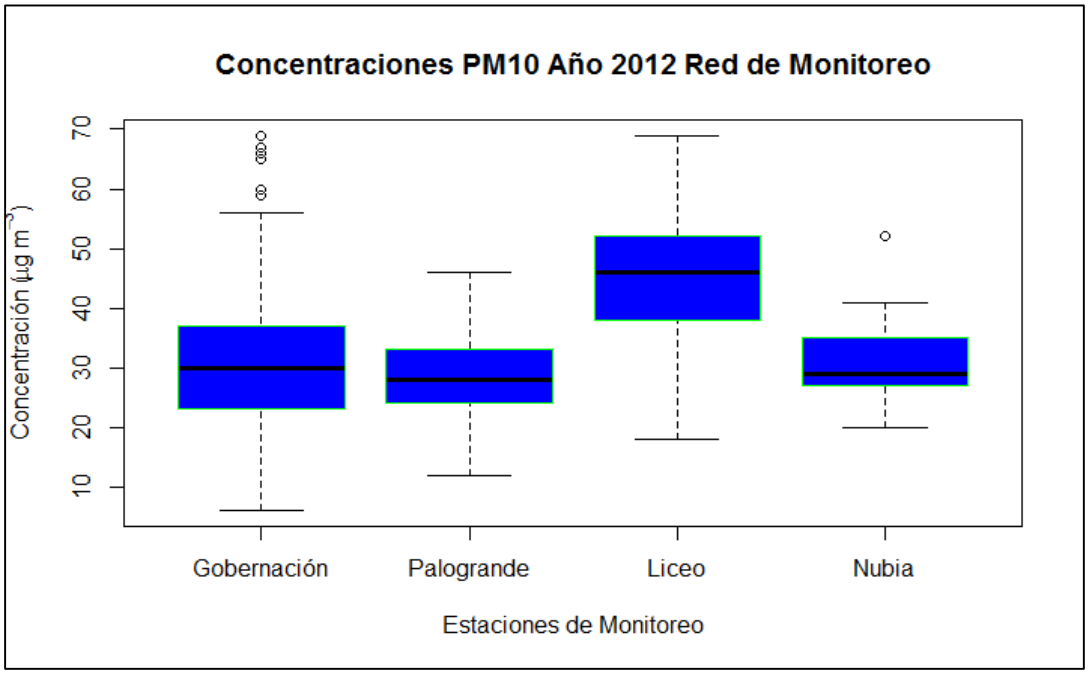
Con respecto a las estaciones Nubia y Palogrande, se observó que en general estas estaciones midieron las menores concentraciones anuales de PM_{10}, en comparación con las demás estaciones de la red de monitoreo. La mayor concentración de PM_{10} dentro del 25% de los datos, se ubicó entre 16 y 27 µg/m^3 en Nubia, y alrededor de 20 µg/m^3 en Palogrande. La mediana de las concentraciones varió entre 20 y 25 µg/m^3 en la estación Nubia, y estuvo alrededor de los 25 µg/m^3 en la estación Palogrande. Finalmente, del 75% de los datos registrados, se encontraron máximas concentraciones alrededor de 25-30 µg/m^3 en Nubia y 30 µg/m^3 en Palogrande.



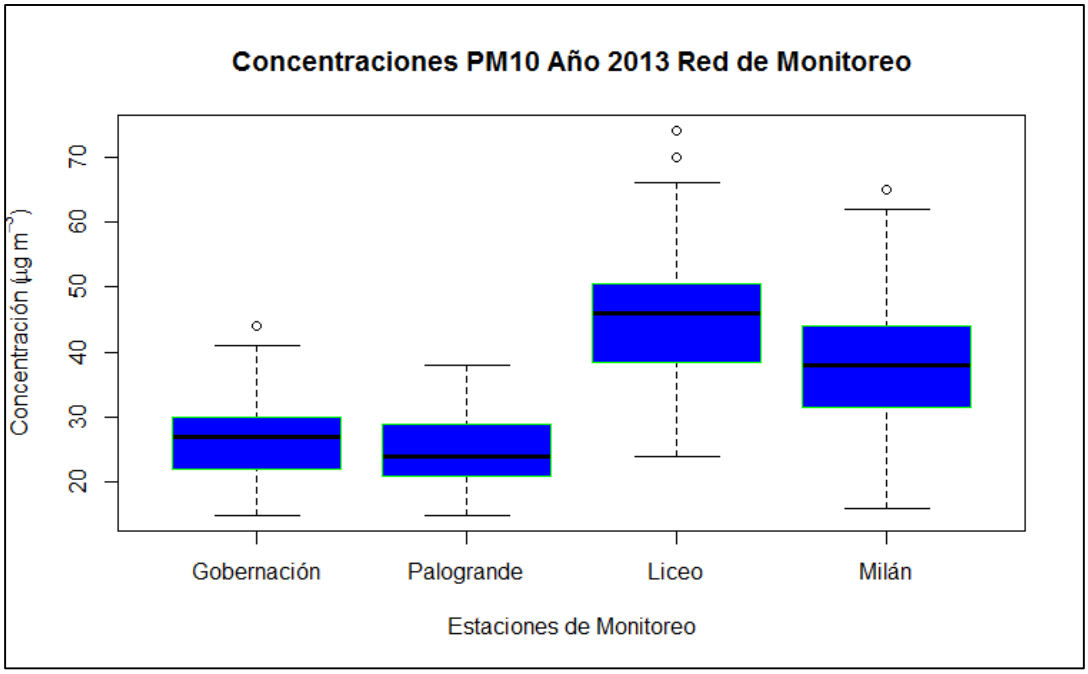
(a)


Concentraciones PM10 Año 2011 Red de Monitoreo
Concentración (µg m⁻³)
10
20
30
40
50
60
70
Gobernación
Palogrande
Liceo
Nubia
Estaciones de Monitoreo

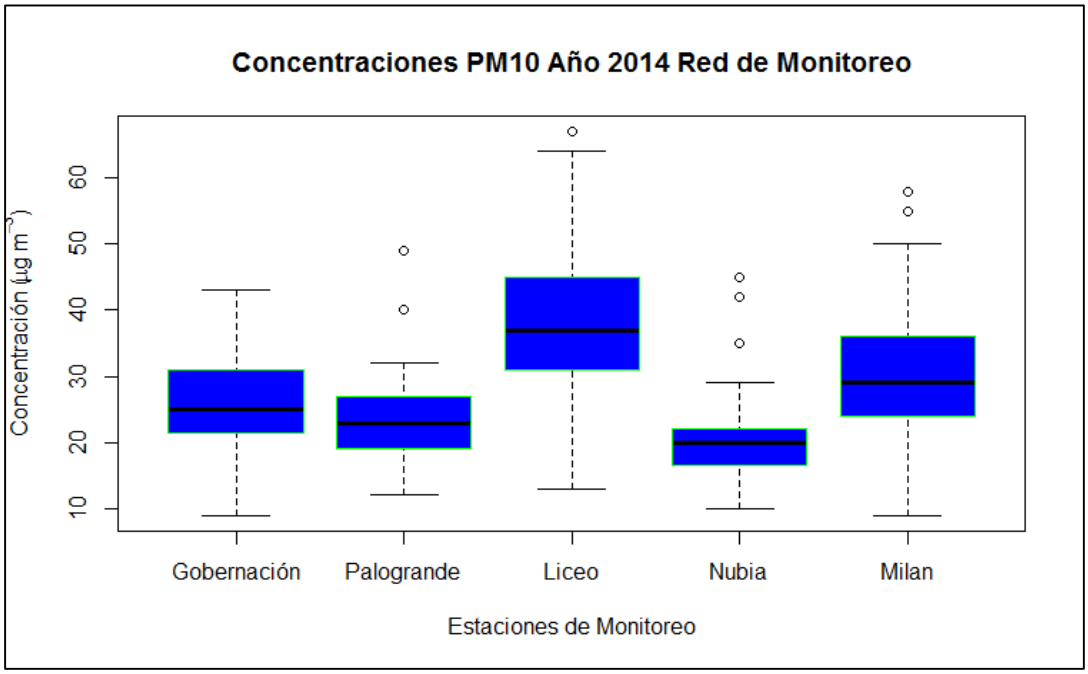
(b)


Concentraciones PM10 Año 2012 Red de Monitoreo
Concentración (µg m⁻³)
10
20
30
40
50
60
70
Gobernación
Palogrande
Liceo
Nubia
Estaciones de Monitoreo

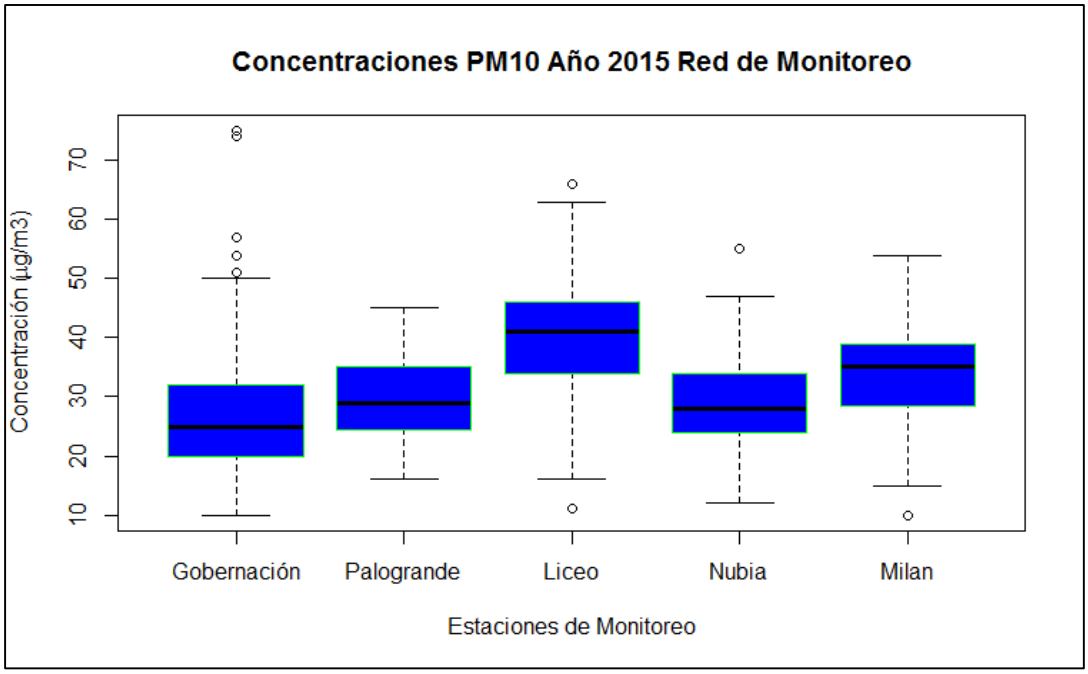
(c)


Concentraciones PM10 Año 2013 Red de Monitoreo
Concentración (µg m⁻³)
20
30
40
50
60
70
Gobernación
Palogrande
Liceo
Milán
Estaciones de Monitoreo

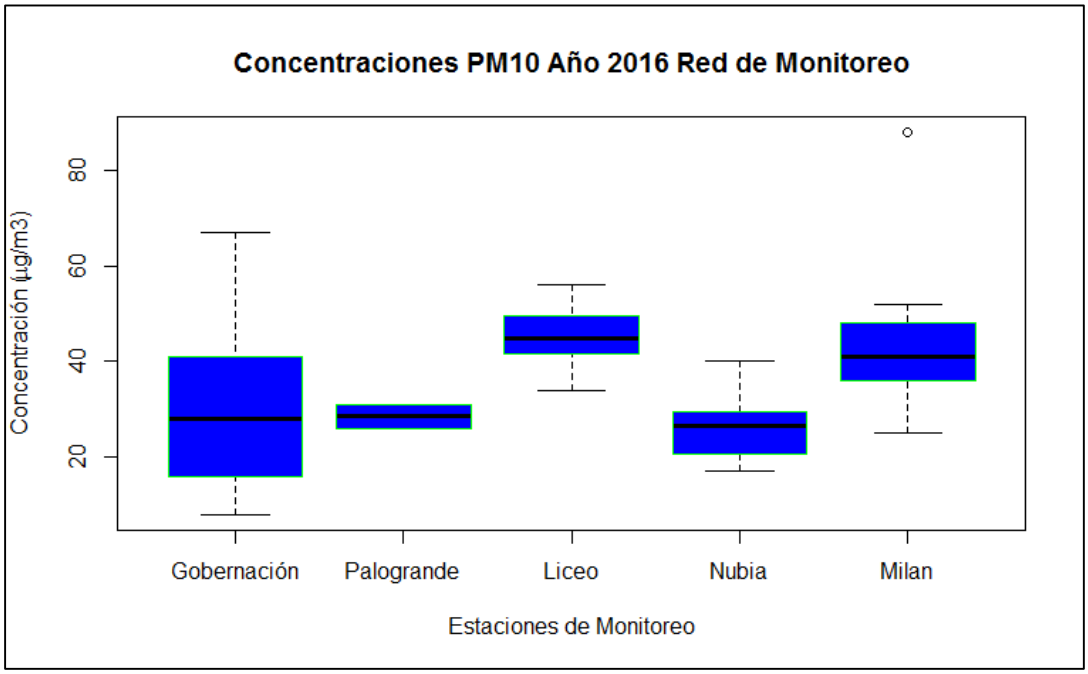
(d)


Concentraciones PM10 Año 2014 Red de Monitoreo
Concentración (µg m⁻³)
10
20
30
40
50
60
Gobernación
Palogrande
Liceo
Nubia
Milan
Estaciones de Monitoreo

(e)



(f)



(g)

Figura 6.10. Gráficos de Cajas de las concentraciones de PM_{10} en el SVCA Manizales. Comparación por año de las estaciones de monitoreo. a) Año 2010. b) Año 2011. c) Año 2012. d) Año 2013. e) Año 2014. f) Año 2015. g) Año 2016

Resumen de estadísticos descriptivos principales para las concentraciones de PM_{10}

Como complemento al análisis gráfico y estadístico de concentraciones de material particulado que se presentaron en las Figuras 6.8 y 6.10, la Tabla 6.5 muestra los estadísticos principales anuales para el periodo 2010 a 2015, de estas concentraciones. Los estadísticos calculados fueron: promedio aritmético, desviación estándar, concentración mínima, concentración máxima, y los percentiles 75 y 95.

En ningún año del periodo evaluado se superó la norma anual colombiana establecida en 50 µg/m^3 para PM_{10} y 25 µg/m^3 para $PM_{2.5}$. Sin embargo, la estación Liceo en particular presentó promedios anuales cercanos al límite máximo permitido con valores de 43 µg/m^3 en 2010 y 2011, 45 µg/m^3 en 2012 y 2013, y 40 µg/m^3 en 2015. Las concentraciones medias anuales de $PM_{2.5}$ medidas en la estación Gobernación, también se acercaron al límite máximo permitido con concentraciones de 19 µg/m^3 en 2012 y 2015.

Las estaciones que registraron las mayores desviaciones sobre los valores medios de PM_{10} (representadas por los valores de la desviación estándar), fueron: Milán (10.18 µg/m^3), Liceo (10.06 µg/m^3) y Gobernación (9.12 µg/m^3).

Tabla 6.5. Estadísticos principales para material particulado en Manizales durante 2010-2015

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Total
	Gobernación PM_{10} (µg/m^3 estándar)						
Promedio	24	21	31	26	26	25	***26***
Desviación Estándar	9.08	7.07	13.08	6.09	7.40	12.35	***9.12***
Min.	6	7	6	15	9	10	***6***
Max.	47	37	69	44	43	75	***75***
Percentil 75%	31	26	37	30	31	32	***31.2***
Percentil 95%	40	32	59.40	37.40	38	50.45	***42.88***
	Palogrande PM_{10} (µg/m^3 estándar)						
Promedio	24	26	29	25	23	30	***26***
Desviación Estándar	6.03	6.94	6.94	5.67	6.65	7.55	***6.63***
Min.	10	10	12	15	12	16	***10***
Max.	37	41	46	38	49	45	***49***
Percentil 75%	26.75	30.25	32.75	29	27	35	***30.13***
Percentil 95%	35.55	37.10	41.85	37	32	42	***37.58***
	Nubia PM_{10} (µg/m^3 estándar)						
Promedio	24	26	30	--	20	29	***26***
Desviación Estándar	7.88	5.97	7.73	--	6.92	8.38	***7.38***
Min.	12	15	20	--	10	12	***10***
Max.	45	42	52	--	45	55	***55***
Percentil 75%	28	29	35	--	22	34	***29.6***
Percentil 95%	40.4	36.5	41	--	33.2	44.15	***39.05***
	Milán PM_{10} (µg/m^3 estándar)						
Promedio	--	--	34	38	30	34	***34***
Desviación Estándar	--	--	13.14	9.14	9.56	8.86	***10.18***
Min.	--	--	21	16	9	10	***9***
Max.	--	--	59	65	58	54	***65***
Percentil 75%	--	--	39.75	44	36	39	***39.69***

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Total
Percentil 95%	--	--	55.85	51.80	48.50	47.25	***50.85***
	Liceo PM_{10} (µg/m^3 estándar)						
Promedio	43	43	45	45	37	40	***42***
Desviación Estándar	8.50	9.81	10.61	9.84	10.72	10.87	***10.06***
Min.	24	20	18	24	13	11	***11***
Max.	62	68	69	74	67	66	***74***
Percentil 75%	49	49	52	50.25	44.50	46	***48.46***
Percentil 95%	56	57	61	61.85	54.90	55.60	***57.73***
	Gobernación $PM_{2.5}$ (µg/m^3 estándar)						
Promedio	16	15	19	18	18	19	***17***
Desviación Estándar	6.22	8.99	11.95	4.58	6.18	8.34	***7.71***
Min.	5	3	1	9	3	5	***1***
Max.	32	50	58	31	37	40	***38***
Percentil 75%	20	19	25	20	22	23	***21.5***
Percentil 95%	27	34	47	25	30	34	***32.83***

Índices de Calidad del Aire (ICA) para Material Particulado

El Índice de Calidad del Aire (ICA) es otra herramienta útil para establecer el estado de la calidad del aire de una región específica, de acuerdo a un rango establecido para cada contaminante y a un código de colores. En Colombia, el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire (MAVDT, 2010), presenta una metodología y forma de interpretación de los ICA, a partir en los límites establecidos por la United States Environmental Protection Agency (EPA, 2011).

El cálculo de estos indicadores se incluyó en el Centro de Datos e Indicadores Ambientales de Caldas (CDIAC) (Universidad Nacional de Colombia & CORPOCALDAS, 2015), desarrollado por los grupos de investigación GTAIHA (Grupo de Trabajo Académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental) y GAIA. (Grupo de Ambientes Inteligentes Adaptativos), de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, en Convenio con CORPOCALDAS. Según la normativa establecida, el cálculo de los ICA se realiza mediante la ecuación (6.2), empleada en el CDIAC:

$$I_{cont} = \frac{I_{Hi} - I_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}}(C_{cont} - BP_{Lo}) + I_{Lo} \qquad (6.2)$$

Donde:

I_{cont} = Índice para el contaminante analizado
I_{Hi} = Valor del Índice de Calidad del Aire correspondiente a BP_{Hi}
BP_{Hi} = Punto de corte mayor o igual a C_{cont}
C_{cont} = Concentración medida para el contaminante analizado
I_{Lo} = Valor del Índice de Calidad del Aire correspondiente a BP_{Lo}
BP_{Lo} = Punto de corte menor o igual a C_{cont}

La Tabla 6.6 presenta los valores y clasificación (puntos de corte) de los ICA para PM_{10}, $PM_{2.5}$, establecidos por la EPA y empleados de igual forma en Colombia. Estos valores y su clasificación también han sido establecidos para los gases SO_2, CO, O_3 y NO_2, y se evaluarán más adelante para los gases SO_2 y O_3 en la sección 6.3.3.

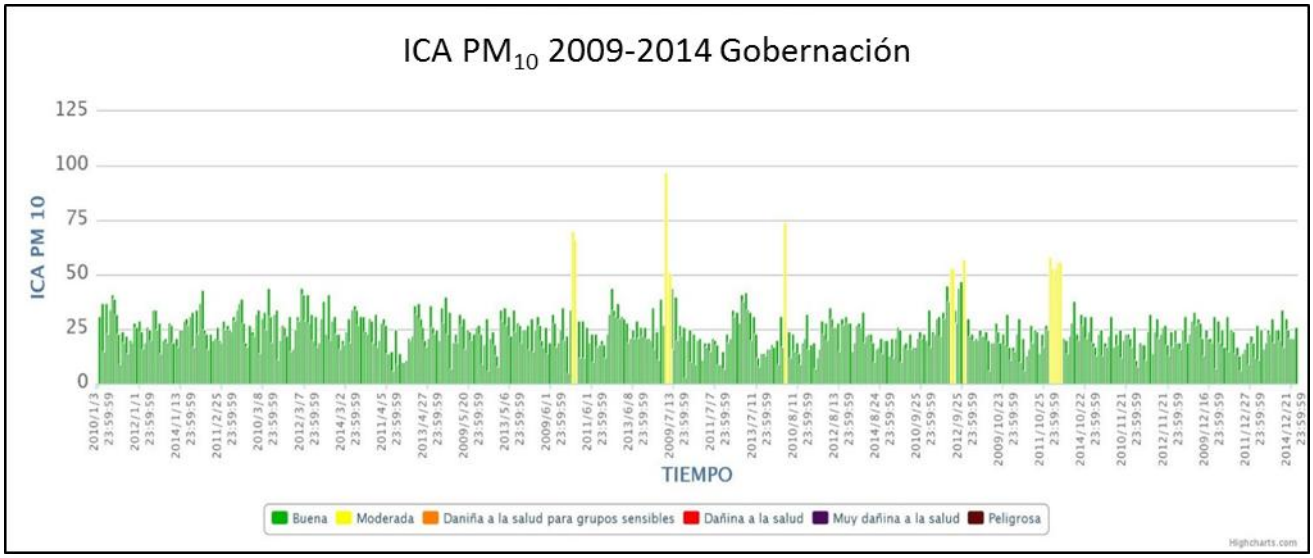
Tabla 6.6. Puntos de Corte ICA (EPA, 2011)

ICA	Color	Clasificación	PM_{10} 24h µg/m^3	$PM_{2.5}$ 24h µg/m^3
0-50	Verde	Buena	0 54	0 15.4
51-100	Amarillo	Moderada	55 154	15.5 40.4
101-150	Naranja	Dañina a la salud para grupos sensibles	155 254	40.5 65.4
151-200	Rojo	Dañina a la salud	255 354	65.5 150.4
201-300	Púrpura	Muy dañina a la salud	355 424	150.5 250.4
301-400	Marrón	Peligrosa	425 504	250.5 350.4
401-500	Marrón	Peligrosa	505 604	350.5 500.4

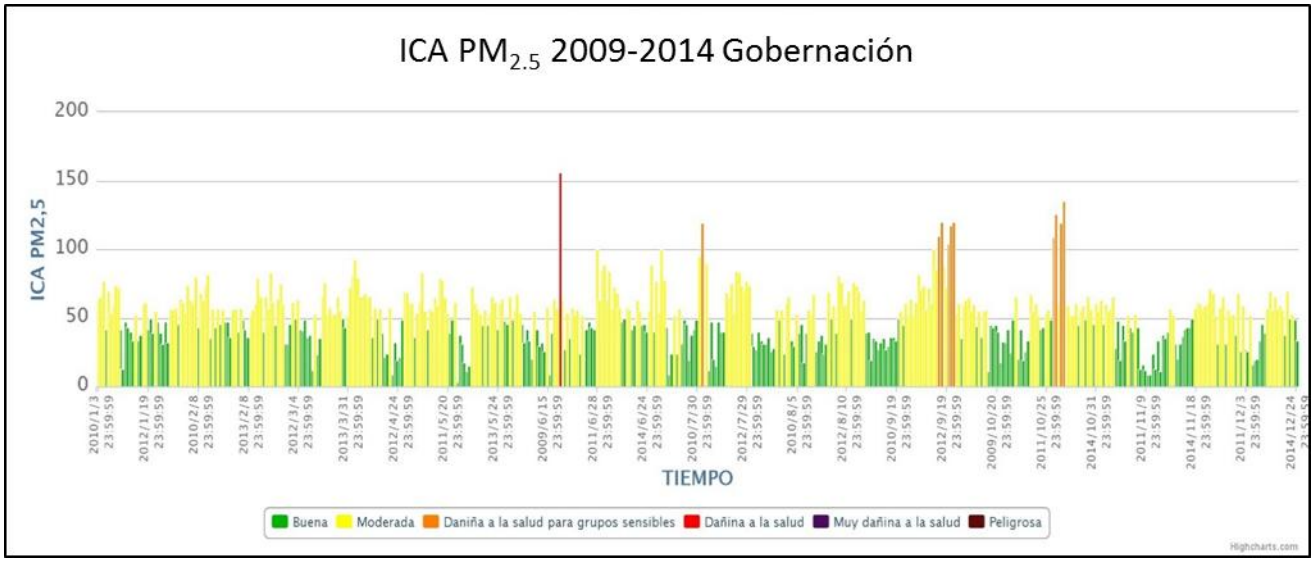
En el CDIAC, los ICA se representan mediante tablas y gráficos. La Figura 6.11a representa la variación de los ICA de PM_{10} para la estación Gobernación, desde el año 2009 hasta 2014, obtenido directamente desde el portal web del Centro de Datos (los ICA de 2015 y 2016 no han sido incluidos en el CDIAC al momento de redacción de este informe). Se observa que la condición de calidad del aire predominante es “Buena”, con algunas ocurrencias de clasificación “Moderada”.

En la Figura 6.11b se muestra el comportamiento de los ICA de $PM_{2.5}$ para la estación Gobernación, desde el año 2009 hasta 2014 (los datos de 2015 y 2016 no han sido actualizados en la Bodega de Datos del CDIAC al momento de redacción de este informe). Esta Figura también se obtuvo desde el portal web del Centro de Datos. En el caso de los ICA $PM_{2.5}$, los índices calculados en su mayoría indicaron calidad del aire “Moderada”, y en algunas ocasiones “Dañina para la salud de grupos sensibles” y “Dañina para la salud”, lo cual deja ver de nuevo los altos valores que se han alcanzado para este contaminante en el sector del Centro.

Los valores de ICA de material particulado para las estaciones Gobernación, Palogrande, Nubia, Liceo y Milán se presentan en tablas el Anexo 6.2 para el periodo 2009 - 2014. Al analizar los valores que se presentan allí, los ICA de PM_{10} calculados para las estaciones Palogrande, Nubia, Milán y Liceo, presentaron en su mayoría Índices de Calidad “Buena”, y en algunas ocasiones “Moderada”.



(a)



(b)

Figura 6.11. Variaciones ICA para material particulado Estación Gobernación 2009-2014. a) PM_{10}. b) $PM_{2.5}$

Análisis relación $PM_{2.5}/PM_{10}$ de la estación Gobernación

Como análisis complementario a los datos de material particulado, se analizó la posible relación $PM_{2.5}/PM_{10}$, a partir de concentraciones medidas en la estación Gobernación durante el periodo enero de 2010 a diciembre de 2014. Se emplearon coeficientes de correlación de Pearson y un modelo de regresión simple para establecer las relaciones cuantitativas entre ambos contaminantes. Además se realizó un análisis de la simetría de los datos para eliminar datos atípicos. Los cálculos y gráficos se realizaron utilizando el software estadístico R y el paquete Openair.

La relación $PM_{2.5}/PM_{10}$ fue representada en un diagrama de cajas, como se muestra en la Figura 6.12. Los resultados arrojaron algunos valores para la relación mayores a 1, los cuales fueron eliminados junto con los respectivos valores de concentración de ambos contaminantes debido a que la concentración de $PM_{2.5}$

debe ser menor o igual a la concentración de PM_{10}. Estos errores pueden presentarse debido a tiempos de muestreo de PM_{10} inferiores a 24 horas o errores en el análisis de las muestras durante el pesaje de filtros a nivel de laboratorio. Para realizar la eliminación de los datos atípicos, se realizó un análisis de simetría de los datos, el mismo realizado por el software R para realizar el diagrama de cajas, en el cual se calculan los límites inferior y superior a partir de los cuartiles 1 y 3.

Una vez los datos depurados se encontraban disponibles, se calcularon las relaciones $PM_{2.5}/PM_{10}$ para cada año durante el periodo de muestreo (Tabla 6.7). Los datos mostraron poca variabilidad por lo cual es posible establecer una relación $PM_{2.5}/PM_{10}$ promedio para la ciudad de Manizales igual a 0.63. Esta relación obtenida es comparable con las reportadas para las ciudades de Bogotá, Bucaramanga, Medellín y Cali, 0.60. 0.61, 0.60 y 0.59, respectivamente (Larsen, 2004), y otras ciudades alrededor del mundo como Ciudad de México (0.5 – 0.7), Santiago de Chile (0.4 – 0.6), Birmingham, Reino Unido, (0.5 – 0.8) y Atenas, Grecia, (0.49 – 0.62) (Romieu et al., 1997; Harrison et al., 1997; Chaloulakou et al., 2003). Estas ciudades tienen en particular que son centros densamente poblados con alto flujo vehicular. Relaciones de $PM_{2.5}/PM_{10}$ cercanas a 0.60 indican que las concentraciones están bajo la influencia directa de procesos de combustión (Querol et al., 2006), como podría ser la combustión interna de los vehículos. Estudios previos en la ciudad de Manizales han sugerido que las fuentes de emisión vehiculares son las principales fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos, debido a que se ha demostrado la presencia de sulfatos provenientes del azufre contenidos en el diésel y la gasolina (Aristizábal et al., 2011; González y Aristizábal, 2012; Velasco, 2012).

Tabla 6.7. Resumen de estadísticos para relación $PM_{2.5}/PM_{10}$

Año	2010	2011	2012	2013	2014	Total
	Gobernación $PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$ estándar)					
Promedio	15.67	13.63	19.65	17.93	17.9	***17.17***
Desviación Estándar	6.46	6.27	12.01	4.31	5.88	***8.25***
Min.	5	3	1	10	8	***1***
Max.	32	27	58	28	37	***58***
Percentil 75%	20	18	25	21	22	***21***
Percentil 95%	27.5	24.65	47.2	25	30	***31***
Datos totales	103	79	111	72	104	***469***
Datos eliminados	12	11	1	18	16	***58***
	Gobernación PM_{10} ($\mu g/m^3$ estándar)					
Promedio	24.37	22.53	31.44	27.7	26.7	***26.9***
Desviación Estándar	9.01	7.08	12.69	6.04	7.51	***9.78***
Min.	6	8	6	17	9	***6***
Max.	47	37	69	44	43	***69***
Percentil 75%	31	27	37	31.75	32	***32***
Percentil 95%	40	33.65	59	39.35	38.65	***43.5***
Datos totales	93	107	113	77	103	***493***
Datos eliminados	2	39	3	23	15	***82***
	Relación $PM_{2.5}$/ PM_{10}					

Año	2010	2011	2012	2013	2014	Total
Promedio	0.65	0.60	0.60	0.66	0.68	***0.64***
Desviación Estándar	0.13	0.19	0.21	0.14	0.15	***0.17***
Min.	0.32	0.09	0.17	0.33	0.36	***0.09***
Max.	1	1	0.96	0.93	1	***1***
Percentil 75%	0.72	0.72	0.76	0.75	0.78	***0.74***
Percentil 95%	0.85	0.85	0.91	0.87	0.99	***0.91***

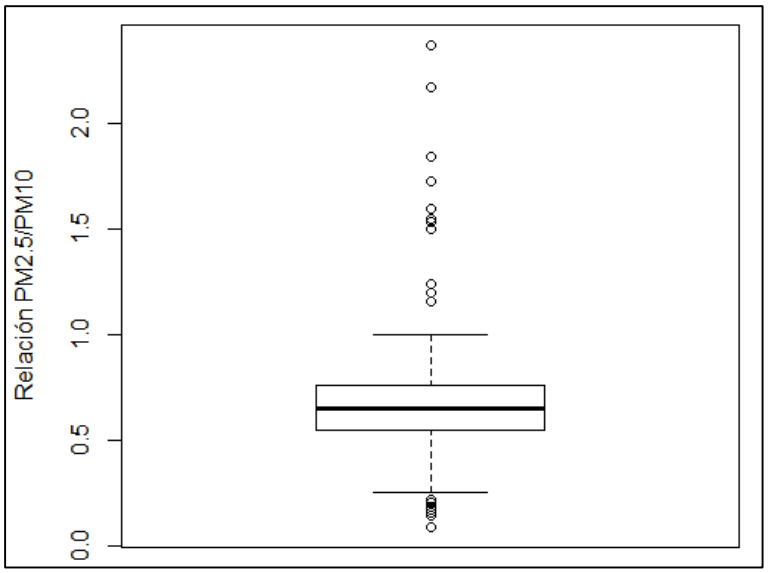


Figura 6.12. Distribución de la relación $PM_{2.5}/PM_{10}$

Para evaluar la correlación entre $PM_{2.5}$ y PM_{10} se realizó una regresión lineal entre las concentraciones obtenidas para estos dos contaminantes durante el periodo de muestreo, mediante el uso de un diagrama de dispersión como se muestra en la Figura 6.13. Existe una correlación lineal positiva entre los dos contaminantes, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.66, que sugiere que las concentraciones $PM_{2.5}$ y PM_{10} podrían estar relacionadas con el mismo fenómeno de emisión. El coeficiente de correlación de Pearson (R) para esta relación fue de 0.81, demostrando linealidad y fortaleciendo la hipótesis de que el mismo fenómeno de emisión influye en las concentraciones de ambos contaminantes (Rojas y Galvis, 2005). Sin embargo, no es posible realizar una predicción de las concentraciones de $PM_{2.5}$ a partir de las concentraciones de PM_{10}. La información de la correlación lineal de resume en la Tabla 6.8.

Tabla 6.8. Análisis de correlación lineal entre $PM_{2.5}$ y PM_{10}

Coeficiente de determinación (R^2)	Coeficiente de Pearson (R)	Intervalo de confianza 95%
0.66	0.81	0.78 - 0.84

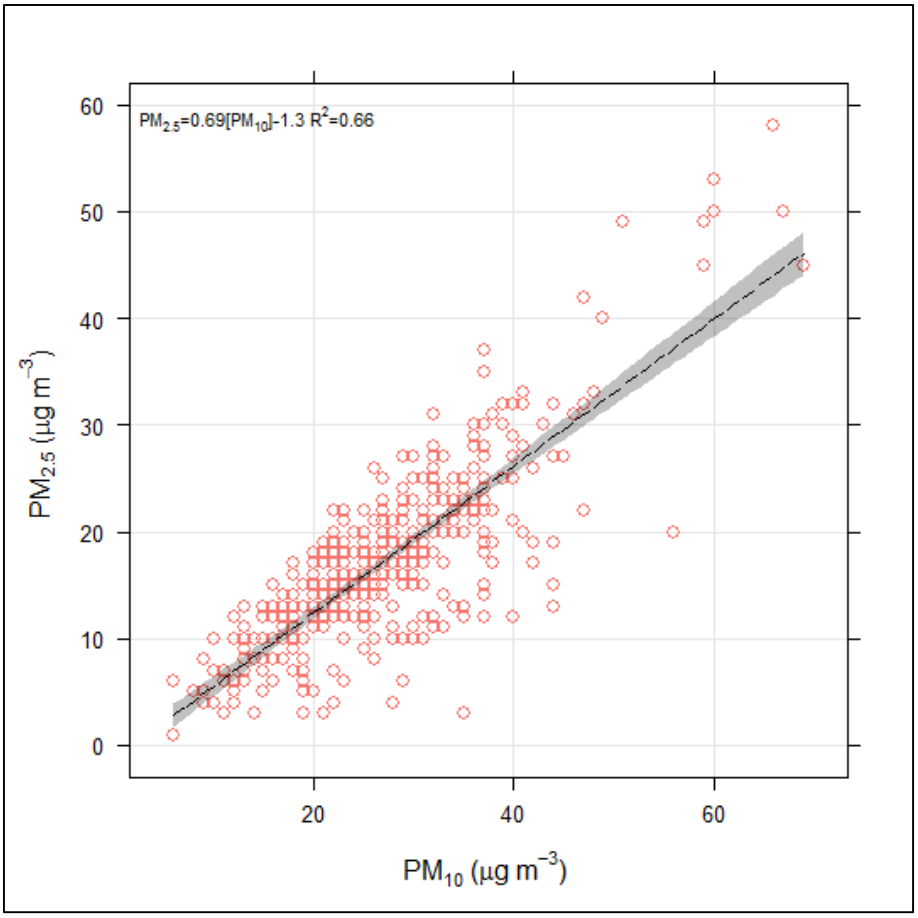


Figura 6.13 Análisis de correlación lineal entre $PM_{2.5}$ y PM_{10}

6.3.3 Monitoreo Activo de los Gases SO_2, O_3 y CO

Criterio de representatividad, concentraciones de gases

El Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire del Ministerio de Ambiente de Colombia, presenta una serie de análisis estadísticos que permiten conocer el estado de las bases de datos de calidad del aire y determinar si éstas son aptas para comparar con los estándares establecidos en la Resolución 610 de 2010 (MAVDT, 2010). Se calculó el porcentaje de datos capturado y el porcentaje de datos válidos, para los datos totales por año (2014 y 2015), registrados en el monitoreo de gases de la estación Gobernación. Se considera posible realizar un promedio anual de los gases analizados (gases dióxido de azufre (SO_2), ozono troposférico (O_3) y monóxido de carbono (CO)), si se dispone al menos de un 75% de datos válidos de concentración, sobre el total que debería registrarse para todo el periodo. El porcentaje de datos capturados se calcula de acuerdo a la ecuación 6.3:

$$\%Datos_{cap} = \frac{d}{N} * 100 \qquad (6.3)$$

Donde $\%Datos_{cap}$ indica el porcentaje de datos capturados por el equipo, d es el número total de datos capturados por el equipo durante el periodo de tiempo definido, y N es el número de datos máximo que pudieron ser capturados en el periodo de tiempo definido.

Así mismo, se calculó el porcentaje de datos válidos como se especifica en el Protocolo del Ministerio de Ambiente, ya que la captura de datos no garantiza que estos sean datos válidos. La ecuación (6.4) muestra la forma de cálculo de este parámetro:

$$\%Datos_{val} = \frac{V}{N} * 100 \qquad (6.4)$$

Donde $\%Datos_{val}$ indica el porcentaje de datos válidos capturados por el equipo, *V* es el número total de datos aceptados como válidos y que pueden ser empleados en análisis y cálculos posteriores, y *N* es el número de datos máximos que pudieron ser reportados en el periodo de tiempo definido.

Considerando que la captura de datos se debe hacer cada cinco minutos, en un año el valor de N siempre es igual a 105120 datos. Este valor es el mismo tanto para el cálculo del porcentaje de datos capturados como para el porcentaje de datos válidos. La Tabla 6.9 muestra el valor de *d*, que es el número de datos capturados, el valor de *V* que es el número de datos válidos, el porcentaje de datos capturados y el porcentaje de datos válidos, correspondiente a cada monitor de los gases SO_2, O_3 y CO, para los años 2014 y 2015.

Tabla 6.9. Porcentaje de datos capturados y datos válidos de los gases SO_2, O_3 y CO

Año	Gases					
	SO_2		O_3		CO	
2014	d	48528	d	50637	d	42482
	V	2425	V	119	V	11010
	$\%Datos_{cap}$	46	$\%Datos_{cap}$	48	$\%Datos_{cap}$	40
	$\%Datos_{val}$	98	$\%Datos_{val}$	100	$\%Datos_{val}$	90
2015	d	78624	d	78624	d	--
	V	75620	V	77192	V	--
	$\%Datos_{cap}$	75	$\%Datos_{cap}$	75	$\%Datos_{cap}$	--
	$\%Datos_{val}$	72	$\%Datos_{val}$	73	$\%Datos_{val}$	--

La Tabla 6.9 indica que para los años 2014 y 2015 los porcentajes de datos capturados no alcanzaron el 75%. En el caso de los monitores de SO_2 y O_3, en 2014 los porcentajes de captura de 46 y 48%, respectivamente, se originó en que estos monitores empezaron a operar de manera estable desde julio de ese año. En 2015, la captura de datos se realizó de forma continua entre enero y septiembre, lo cual se vio reflejado en porcentajes de captura de 75% en ambos monitores. En octubre de ese año, ambos equipos presentaron fallas técnicas que obligaron a detener su funcionamiento entre octubre y febrero de 2016 (ver Tabla 6.3). El porcentaje de datos capturados por el monitor de CO en 2014 fue del 40%. Se omitió el cálculo de los porcentajes de datos válidos y capturados para este monitor en 2015, ya que en informes anteriores a éste se evidenció que el monitor de CO opera irregularmente debido a fallas en la calibración del equipo, lo cual se ve representado en concentraciones que han ido en aumento desde su puesta en operación (Figura 6.23).

Se evidenció también que el porcentaje de datos válidos de SO_2 y O_3 del total de datos capturados, fue en 2014 superior al 90%, lo que se asume como un buen indicador. En 2015, el porcentaje de datos válidos del total de datos capturados, fue un poco mayor al 70%, sin superar el 75% de umbral.

A pesar de lo mencionado, a modo ilustrativo se calcularon los promedios anuales de concentraciones de SO_2, O_3 y CO, y estos se compararon con los niveles máximos permitidos que se establecen en la Resolución 610.

Variación temporal de las concentraciones de gases

El monitoreo activo de los gases contaminantes del aire SO_2, O_3 y CO, se realiza en Manizales en la estación Gobernación, ubicada en el centro administrativo de la ciudad, desde el mes de julio del año 2014 hasta la fecha de entrega de este informe (mayo 2016). La Resolución 610 de 2010 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, establece los niveles máximos permisibles para cada uno de estos gases, incluidos dentro del grupo de Contaminantes Criterio. Los niveles máximos permitidos se muestran en la Tabla 6.10.

Tabla 6.10. Niveles máximos permisibles de los gases SO_2, O_3 y CO
Resolución 610 de 2010 (MAVDT, 2010)

Contaminante	Tiempo de Exposición	Nivel Máximo Permisible
SO_2 (µg/m^3)	Anual	80
	24 horas	250
	3 horas	750
O_3 (µg/m^3)	8 horas	80
	1 hora	120
CO (µg/m^3)	8 horas	10000
	1 hora	40000

El análisis del comportamiento temporal de las concentraciones de gases en Gobernación se llevó a cabo con base en la comparación entre los niveles de concentración registrados y los niveles máximos permisibles de cada uno de los gases, para el periodo de julio de 2014 - abril de 2016.

Dióxido de Azufre (SO_2)

La Figura 6.15 muestra la variación de la concentración de SO_2 medida cada 5 minutos.

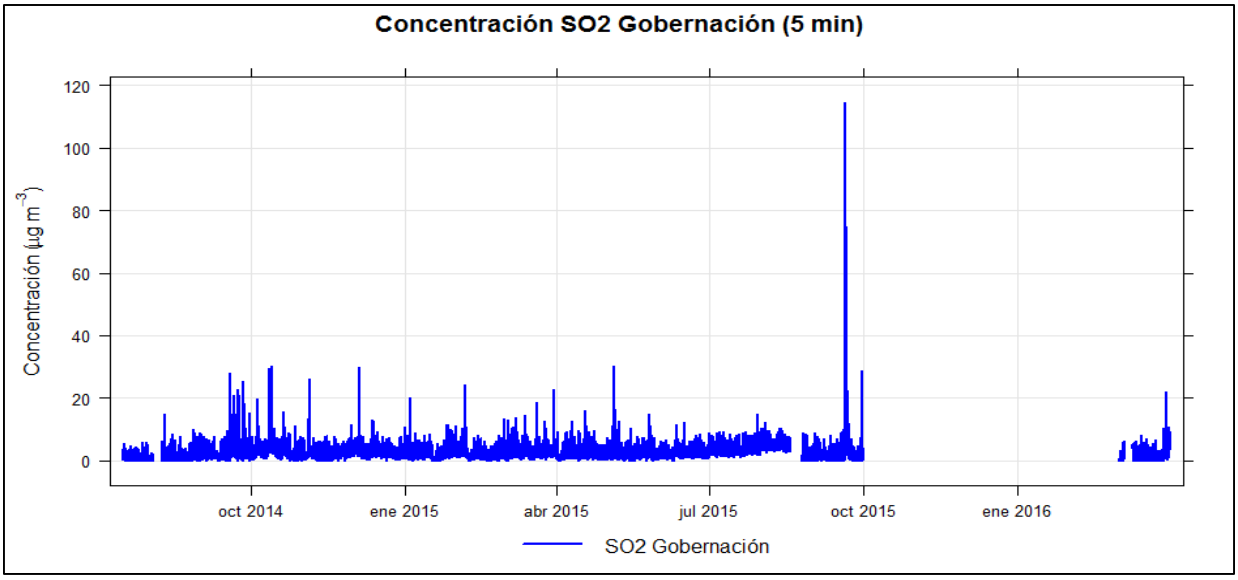
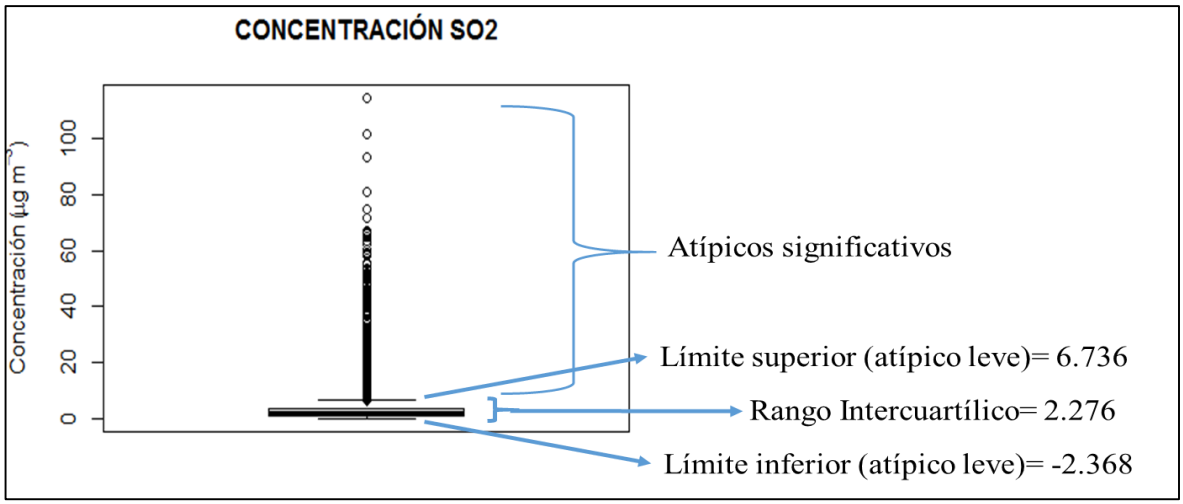


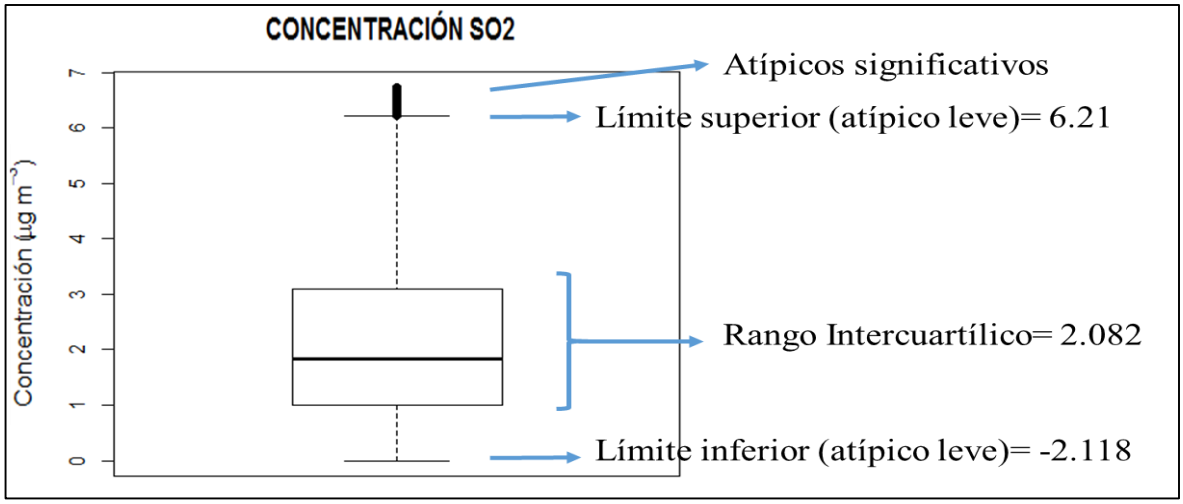
Figura 6.15 Variación de las concentraciones de dióxido de azufre (SO_2) estación Gobernación (5 Minutos)

La representación gráfica de las concentraciones de SO_2 medidas cada 5 minutos (Figura 6.11), deja en evidencia la presencia de datos atípicos que se enmascaraban al realizar gráficas de promedios para periodos más grandes (día, mes, año). Lo anterior incentivó la realización de un análisis de datos atípicos, empleando los diagramas de cajas (Figura 6.16).

En la Figura 6.16a, se presenta el diagrama de cajas para los datos de la serie de concentraciones de SO_2 5-minutal. Se observa la presencia de un importante grupo de datos atípicos (4894 atípicos de un total de 140000 datos), ubicados por encima de los 6.73 µg/m^3, valor que es considerado como el máximo atípico leve que debería considerarse en la serie, de acuerdo a la definición del análisis de cajas.



(a)



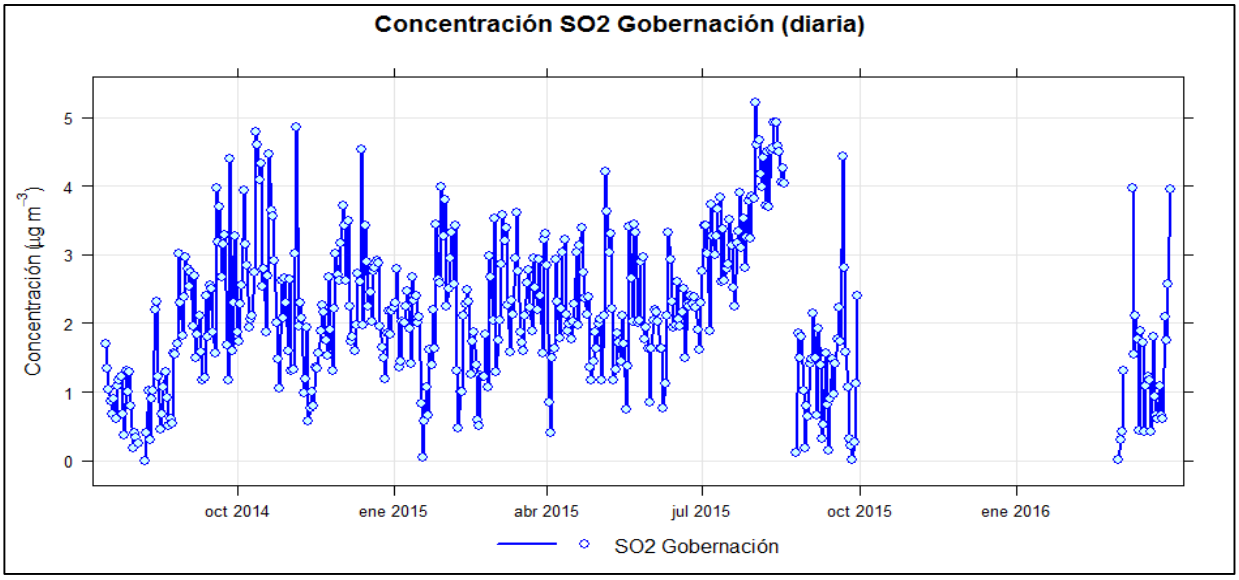
(b)

Figura 6.16 Diagramas de cajas concentraciones de dióxido de azufre (SO_2) de la estación Gobernación. a) Serie completa - 5 min. b) Serie sin datos atípicos - 5 min.

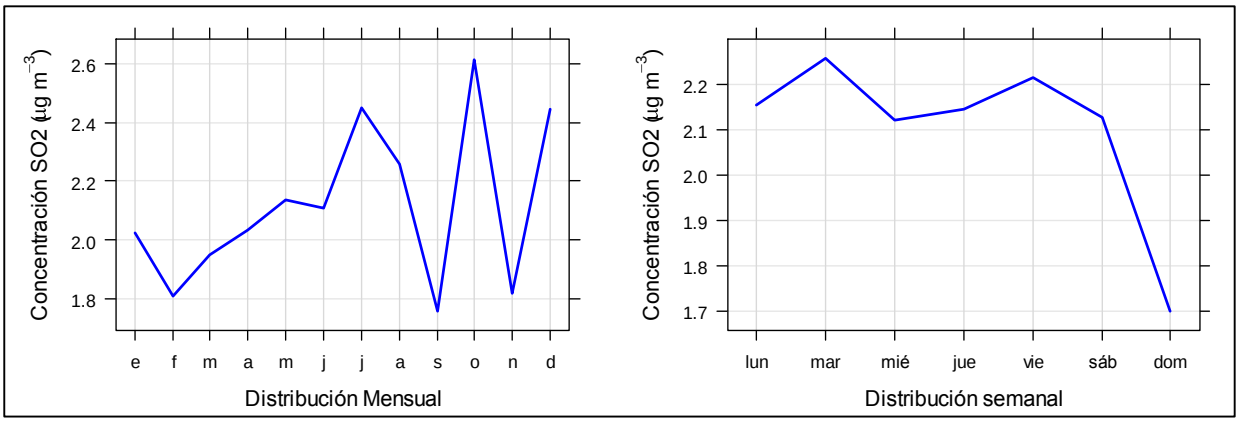
A partir del análisis anterior, la base de datos de SO_2 fue depurada y los valores atípicos fueron retirados de la serie para realizar los análisis que se presentarán a continuación. Sin embargo, en el Anexo 6.1 se hace entrega de las dos bases de datos: con datos atípicos (original), y sin datos atípicos (depurada).

La Figura 6.17 presenta la variación promedio diaria de las concentraciones de SO_2 (sin datos atípicos), durante el periodo de análisis, así como la distribución promedio en la semana. La concentración promedio diaria del gas varió entre 0 y 5 µg/m^3. A finales del mes de julio del año 2015 se presenta una interrupción en los datos registrados, debido a problemas que presentó el equipo durante el proceso de calibración. Estos datos no se consideraron representativos, por lo cual se eliminaron de la base de datos, considerándose como datos no válidos.

Con respecto a la variación mensual (Figura 6.17b), se encontraron mayores concentraciones del gas durante los meses de julio, octubre y diciembre, comprendidos en el periodo de recolección y análisis de datos (julio 2014 – abril 2016). Las menores concentraciones se presentaron en febrero, septiembre y noviembre. Se estima que en cierta medida, la variación en la actividad volcánica ha influenciado la variación mensual de las concentraciones de SO_2, hecho que se evaluará con más detalle más adelante. El comportamiento semanal muestra que las concentraciones de SO_2 tienden a ser más altas durante los días laborales, en comparación con los fines de semana, especialmente el día domingo. Este comportamiento permite afirmar que la dinámica en las fuentes móviles en el sector del Centro de la ciudad, influyen notablemente en las concentraciones medidas del gas, ya que los vehículos emiten, entre otros contaminantes, SO_2.



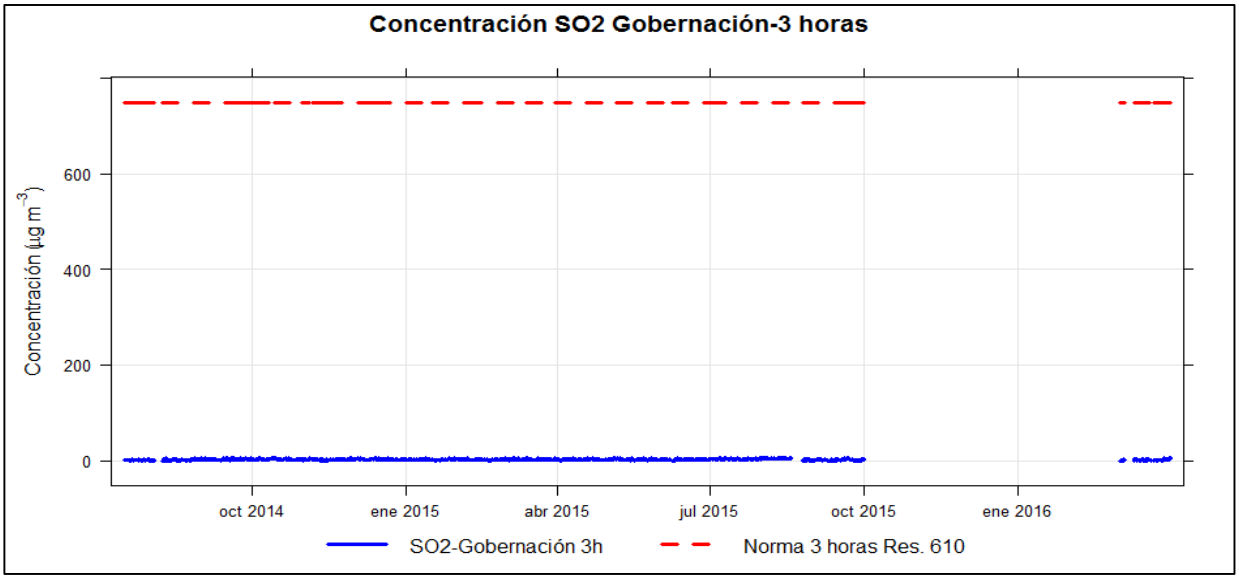
(a)



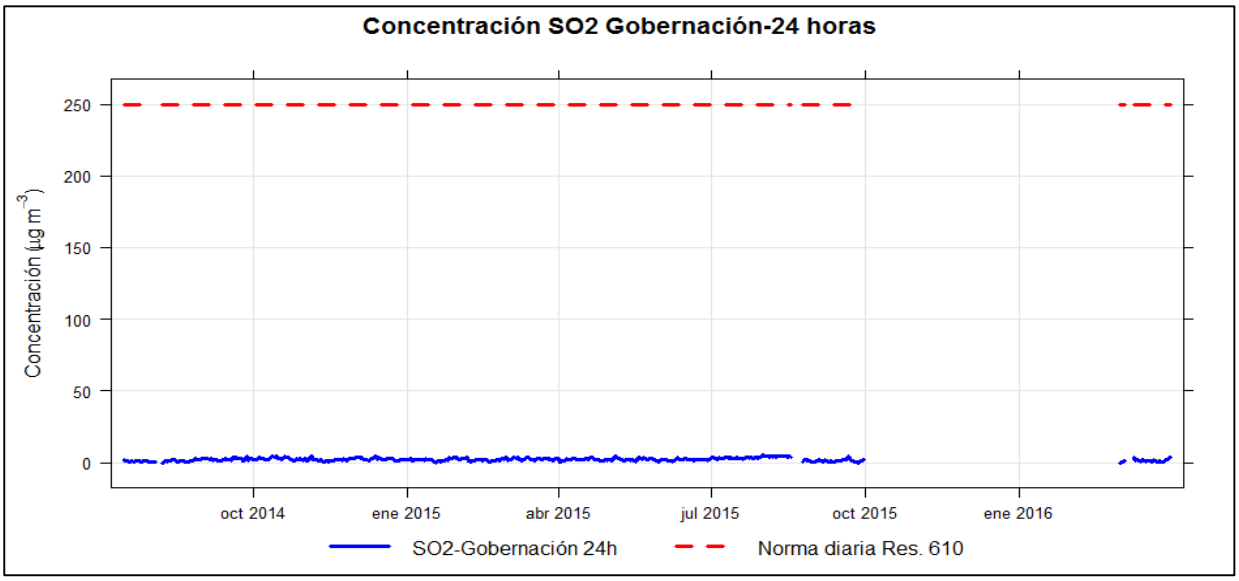
(b)

Figura 6.17 Variación diaria y semanal de concentraciones de dióxido de azufre (SO_2) estación Gobernación (sin datos atípicos). a) Promedio diario. b) Promedio días de la semana.

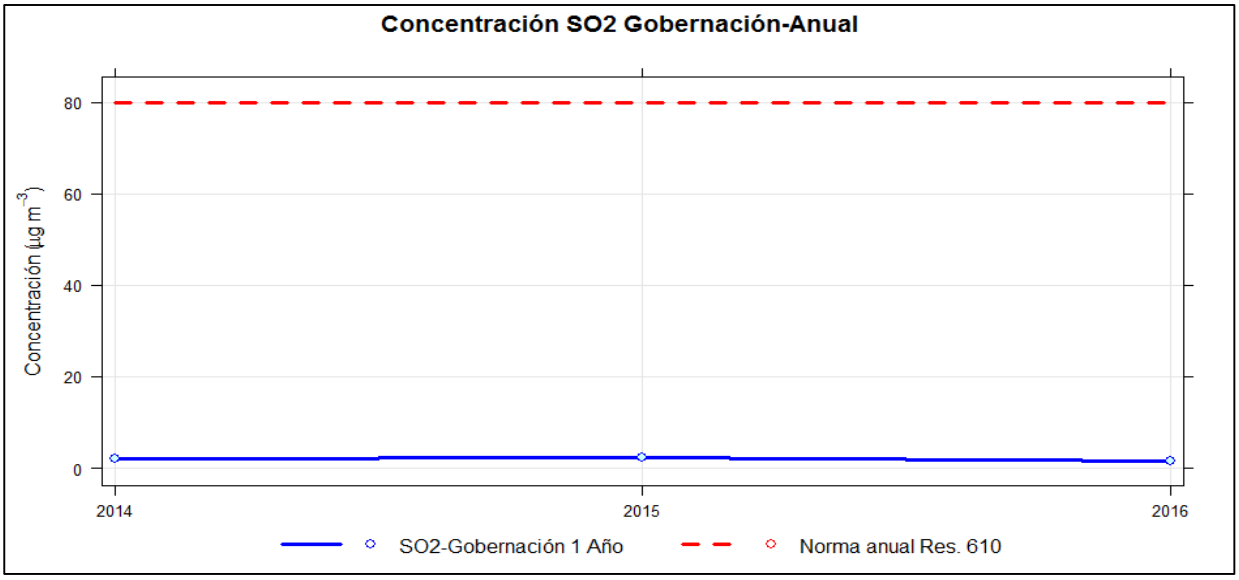
En las Figuras 6.18a-b se compararon las concentraciones medias de los periodos de exposición de 3 horas y 24 horas, con los límites establecidos en la Resolución 610 de 2010 del MAVDT, siguiendo el procedimiento especificado en el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire (2010). Según lo indicado por el MAVDT, se debe emplear la media móvil de 3 horas, para comparar con el límite máximo permisible de 3 horas (750 µg/m^3). Es posible observar que las concentraciones medidas de SO_2 no superaron los límites máximos establecidos en la normativa nacional para promedios de 3 y 24 horas. Adicionalmente se comparó la concentración media anual de SO_2 con la concentración máxima permitida, a pesar del no cumplimiento del criterio de representatividad. El resultado se muestra en la Figura 6.18c, donde se observa que el promedio anual no sobrepasa el valor máximo permitido en la Resolución 610, equivalente a 80 µg/m^3.


Concentración SO2 Gobernación-3 horas
Concentración (µg m-3)
600
400
200
0
oct 2014
ene 2015
abr 2015
jul 2015
oct 2015
ene 2016
SO2-Gobernación 3h
Norma 3 horas Res. 610

(a)


Concentración SO2 Gobernación-24 horas
Concentración (µg m-3)
250
200
150
100
50
0
oct 2014
ene 2015
abr 2015
jul 2015
oct 2015
ene 2016
SO2-Gobernación 24h
Norma diaria Res. 610

(b)



(c)

Figura 6.18. Variación de las concentraciones de dióxido de azufre (SO_2) estación Gobernación. Comparación con niveles máximos permisibles de la Resolución 610 de 2010. a) Promedio 3 horas SO_2-azul y Norma 3 horas Res. 610-rojo. b) Promedio 24 horas SO_2-azul y Norma 24 horas Res. 610-rojo. c) Promedio Anual SO_2-azul y Norma anual Res. 610-rojo.

Análisis concentraciones de SO_2 y emisión volcánica de SO_2

Considerando la presencian del volcán activo Nevado del Ruíz (a 27 km del casco urbano de Manizales), se evaluó de forma gráfica el posible impacto de la emisión volcánica de gases como el SO_2, sobre las concentraciones de medidas del contaminante en la estación Gobernación.

La Figura 6.19 muestra la variación diaria de la emisión de SO_2 del volcán (Ton/día), obtenida a partir de mediciones que realiza el Servicio Geológico Colombiano, mediante la técnica DOAS (S.G.C., 2015). También se graficó la variación promedio diaria de la concentración de SO_2 (µg/m^3) medidas en la estación Gobernación. Las líneas en color claro representan la serie total de datos. Las líneas más oscuras representan la media móvil de los datos, la cual permite evidenciar de mejor manera las tendencias en las emisiones volcánicas y las concentraciones de SO_2 durante el periodo de análisis.

Durante algunos periodos, se observa que aumentos en emisión volcánica (línea roja) son precedidos por aumentos en las concentraciones de SO_2 (línea gris). Esto se puede observar en los datos de agosto, septiembre y noviembre de 2014, junio y septiembre de 2015. En otros periodos, altas concentraciones medidas del gas no están precedidas o acompañadas por aumento en la emisión volcánica, como sucedió en diciembre de 2014, marzo y abril de 2015. La emisión diaria de SO_2 del volcán varía entre 900 y 20000 Ton/día, sin embargo puede alcanzar valores de hasta 30000 Ton/día. La influencia de esta fuente natural de gases y ceniza, sobre la calidad del aire de Manizales, depende en gran medida de las condiciones meteorológicas que promuevan el direccionamiento de la pluma volcánica hacia Manizales, e impidan la dispersión del gas mediante condiciones reducidas de turbulencia.

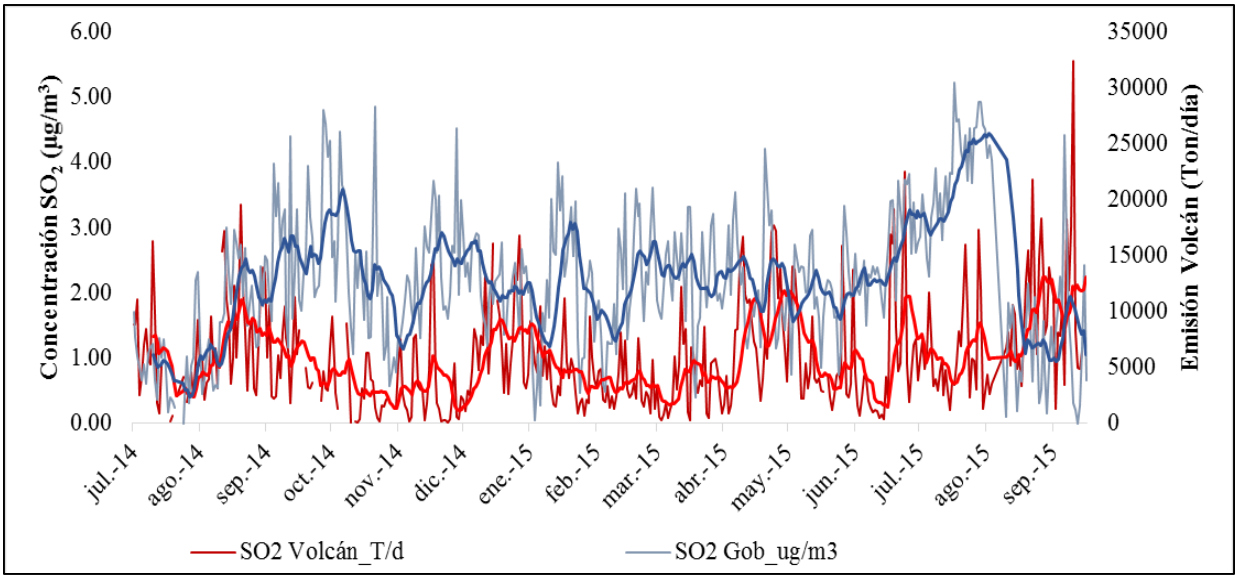


Figura 6.19. Variación de las concentraciones de dióxido de azufre (SO_2) y la emisión volcánica de dióxido de azufre (SO_2) del Nevado del Ruíz

Ozono troposférico (O_3)

La Figura 6.20 muestra la variación de la concentración de O_3 medida cada 5 minutos en Gobernación.

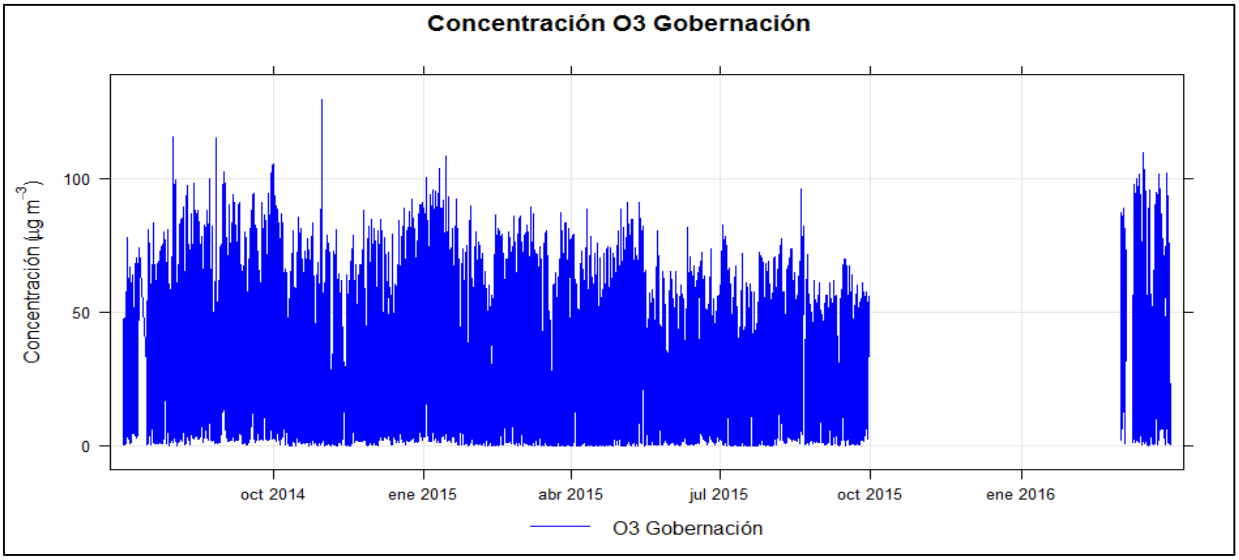


Figura 6.20. Variación de las concentraciones de ozono troposférico (O_3) en la estación Gobernación (5 Minutos)

Debido al amplio rango de variación en las concentraciones de éste contaminante, es difícul identificar a simple vista la presencia de datos atípicos. Para evaluarlo de mejor manera, se realizó un gráfico de cajas con los valores de toda la serie de datos analizada (Figura 6.21).

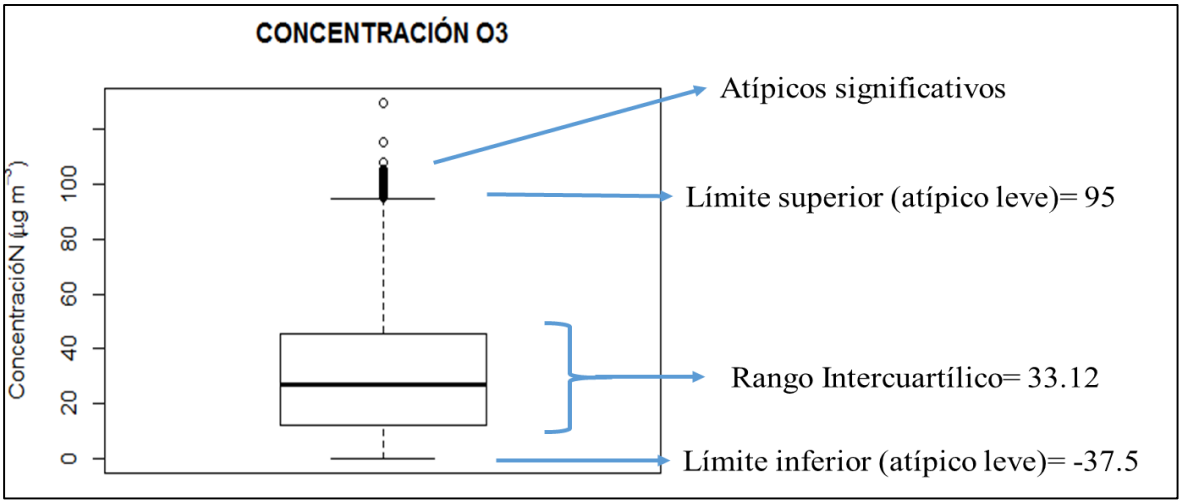
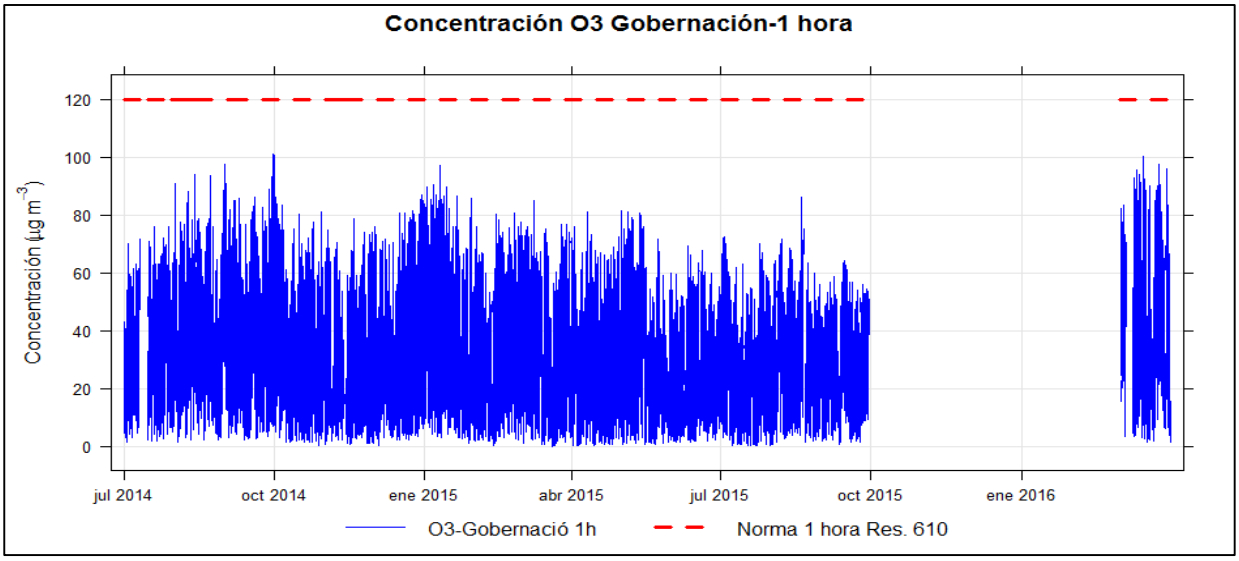


Figura 6.21. Diagrama de cajas concentraciones de ozono troposférico (O_3) de la estación Gobernación.

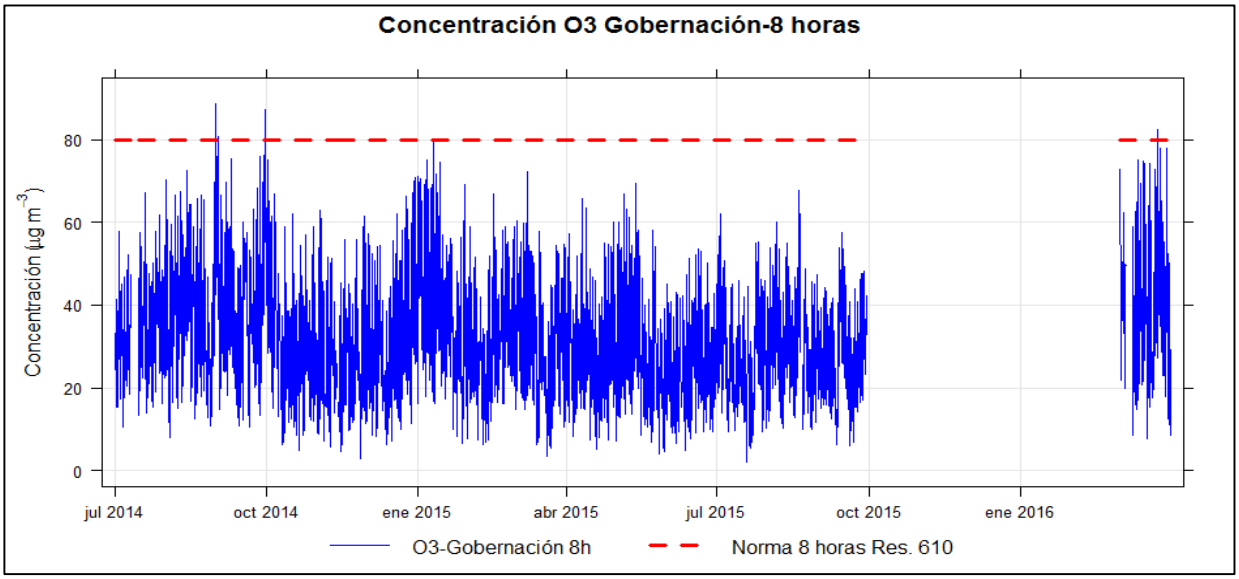
El diagrama de cajas para O_3, a diferencia del diagrama de SO_2, muestra la presencia de menos datos atípicos (152 en total de 140000 datos), que se ubican por encima de los 95 µg/m^3 (atípico leve superior). El comportamiento observado a partir de este diagrama permite asumir que la serie de datos de O_3 puede analizarse sin necesidad de eliminar datos atípicos.

La Figura 6.22a y 622.b presentan la variación de la concentración del ozono en espacios 1 hora y 8 horas, así como la comparación con los límites establecidos en la Resolución 610 de 2010 para cada periodo de exposición (Tabla 6.7). Se empleó la media móvil de 8 horas, para comparar con el límite máximo permisible de 8 horas (80 µg/m^3), como lo indica el MAVDT. La concentración por hora se calculó mediante el promedio aritmético. La Figura 6.22c muestra la variación promedio semanal y mensual de las concentraciones del contaminante.

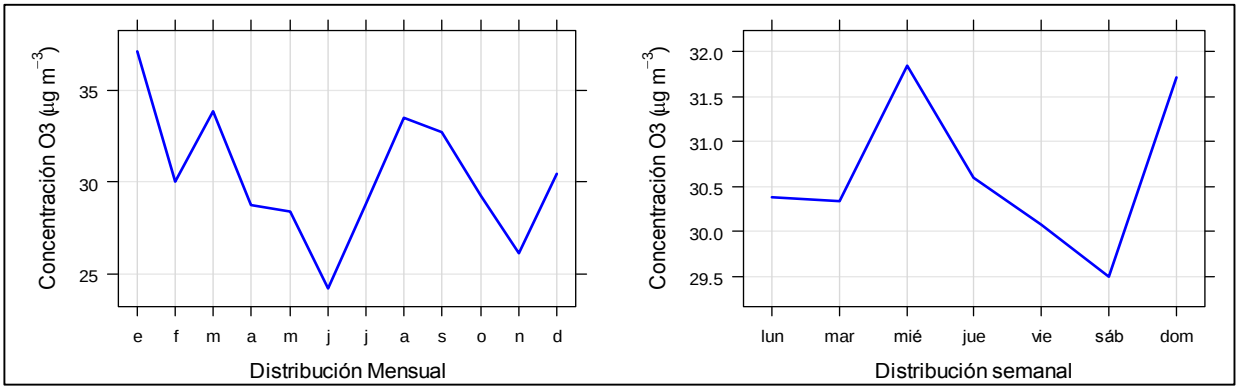
La concentración máxima permisible para un periodo de exposición de 1 hora equivalente a 120 µg/m^3, no fue superada durante el periodo de monitoreo del ozono. Las máximas concentraciones horarias se presentaron durante los meses de septiembre y octubre de 2014, y enero de 2015, cercanas a los 100 µg/m^3. En la Figura 6.22b se evidencia que el límite máximo permitido para 8 horas de exposición, ha sido superado en distintas ocasiones a lo largo del periodo de análisis. Según la variación mensual, mayores concentraciones de O_3 se registraron en enero, marzo, agosto y septiembre. Los meses de enero y agosto coinciden con los meses donde se registra mayor radiación solar en las estaciones meteorológicas de Manizales (Ocampo & Vélez, 2015), hecho que favorece la formación del contaminante a partir de reacciones químicas. La variación promedio semanal muestra que picos máximos en las concentraciones del contaminante ocurren los días miércoles y domingo. Menores concentraciones tienen lugar los días sábado.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.22. Variación de las concentraciones de ozono troposférico (O_3) en la estación Gobernación. Comparación con niveles máximos permisibles de la Resolución 610 de 2010. a) Promedio 1 hora O_3-azul y Norma 1 hora Res. 610-rojo. b) Promedio 8 horas O_3-azul y Norma 8 horas. Res. 610-rojo. c) Variación mensual y semanal

Monóxido de Carbono (CO)

La Figura 6.23 muestra la variación de la concentración de CO medida cada 5 minutos.

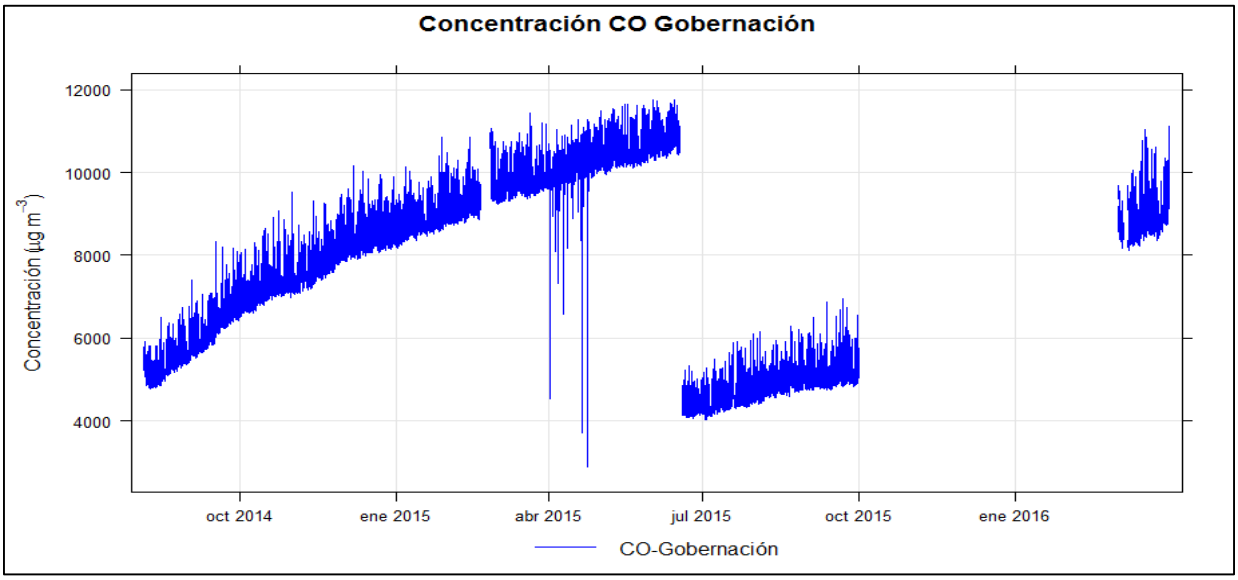
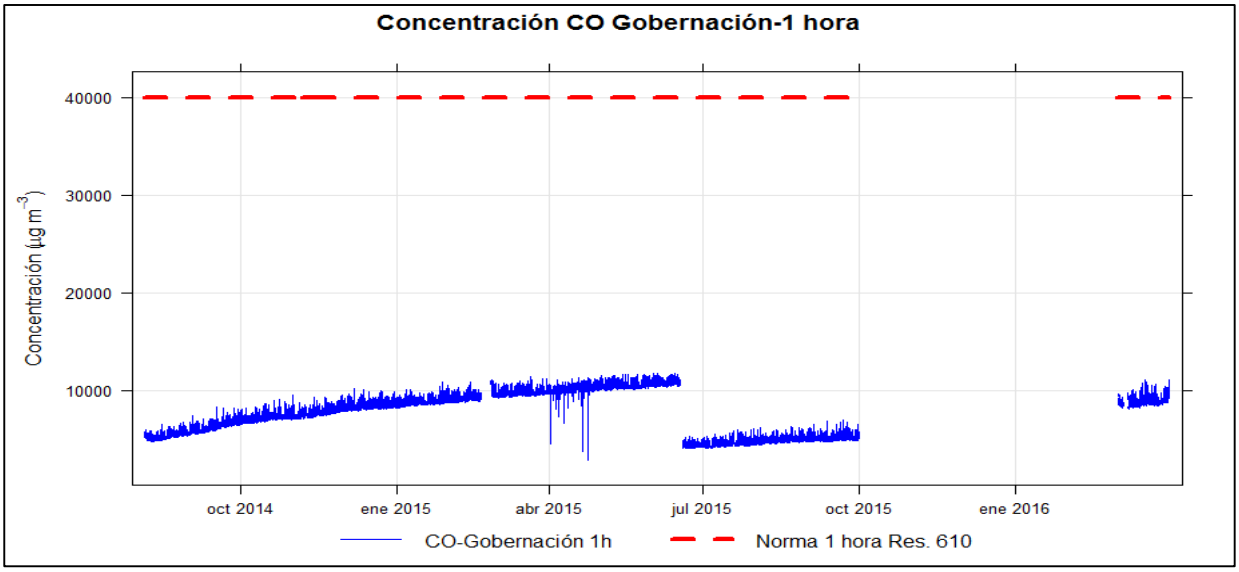


Figura 6.23. Variación de las concentraciones de monóxido de carbono (CO) en la estación Gobernación (5 Minutos)

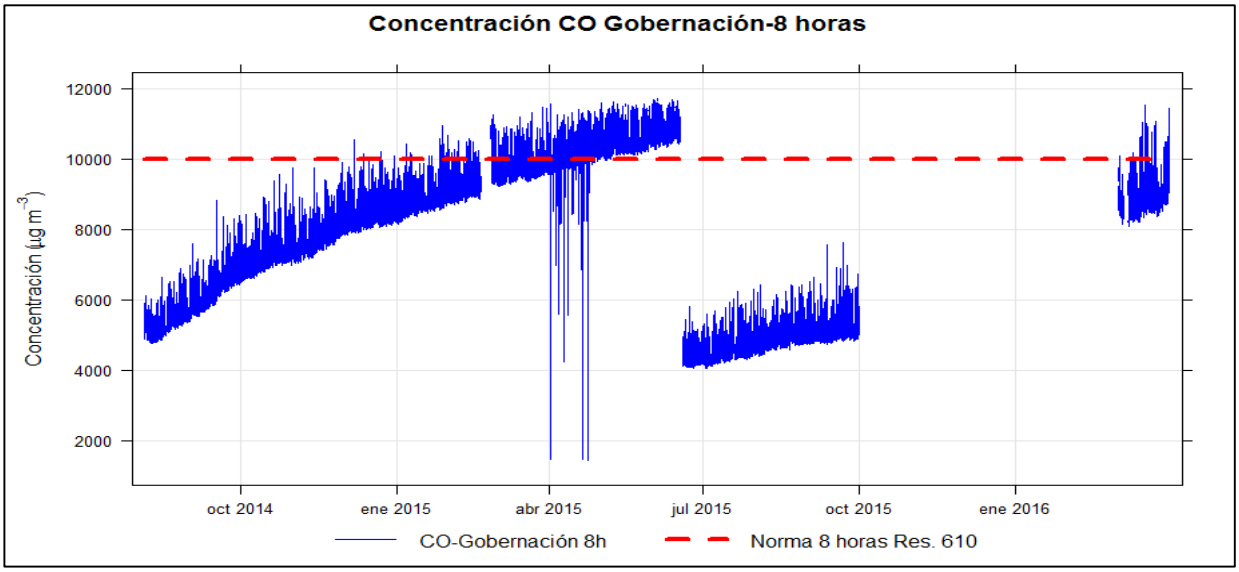
En la Figura 6.23 se evidencia la inestabilidad de las concentraciones medidas de CO desde 2014. Desde la puesta en funcionamiento del monitor en agosto de 2014, las concentraciones medidas mostraron una tendencia a incrementar, lo cual sugirió deficiencias en el correcto funcionamiento del equipo. Después de un primer mantenimiento realizado en junio del año 2015, las concentraciones registradas disminuyeron, sin embargo mostraron de nuevo la tendencia observada inicialmente, ya que la acción de calibración no fue efectiva. Posteriormente, el monitor de CO estuvo fuera de operación durante el periodo de octubre de 2015 a febrero de 2016, de la misma forma que los monitores de SO_2 y O_3. Se reinició la operación del monitor en marzo de 2016, sin embargo el inconveniente de asociado a la correcta calibración se ha mantenido, por lo que se considera que los datos capturados siguen siendo inválidos. La Corporación adelanta trámites para realizar la calibración del equipo en busca de obtener mediciones confiables.

De forma ilustrativa, las concentraciones medidas de CO se compararon con los límites de 1 hora y 8 horas, especificados por el MAVDT (2010) en la Resolución 610. Vale la pena aclarar que este ejercicio puede incurrir errores debido a la baja confiabilidad que presentan los datos dado el funcionamiento defectuoso del monitor.

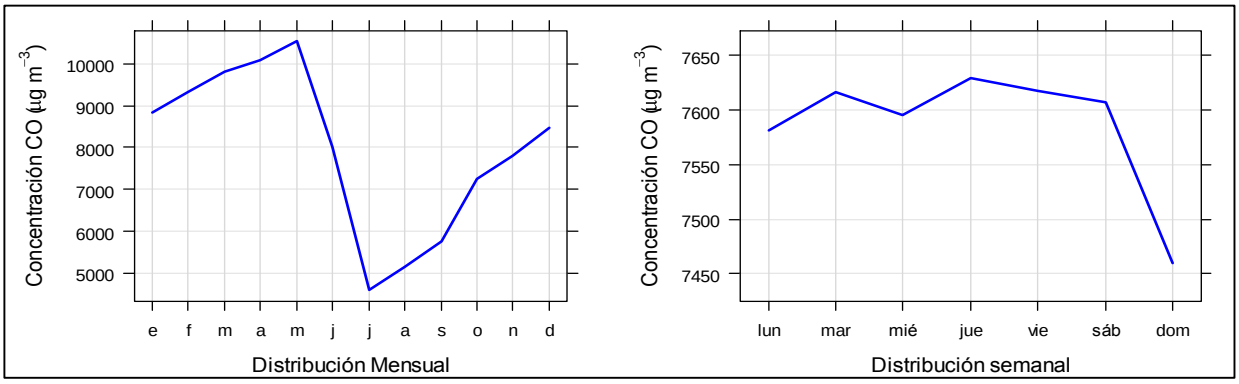
La Figura 6.24a presenta la concentración media de 1 hora y se compara con el valor máximo permitido por la normatividad colombiana (40000 µg/m^3). Se observa que este límite no ha sido superado. En la Figura 6.24b se realiza la comparación de la concentración de CO para un periodo de exposición de 8 horas, con lo máximo permitido en la normatividad colombiana (10000 µg/m^3). En el cálculo de la concentración para periodos de 8 horas se empleó la media móvil, tal como se especifica en el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire (MAVDT, 2010). Contrario a lo que se observó con la concentración horaria, los límites para 8 horas aparentemente se han sobrepasado.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.24. Variación de las concentraciones de monóxido de carbono (CO) en la estación Gobernación. Comparación con niveles máximos permisibles de la Resolución 610 de 2010. a) Promedio 1 hora CO-azul y Norma 1 hora Res. 610-rojo b). Promedio 8 horas CO-azul y Norma 8 horas. Res. 610-rojo. c) Variación mensual y semanal.

Índices de Calidad del Aire (ICA) para Gases

Se presentan los Índices de Calidad del Aire (ICA) de los gases SO_2 y O_3, obtenidos desde el CDIAC. Como se describió en la sección 6.3.2, la metodología de cálculo implementada se rige por lo establecido en el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire (MAVDT, 2010).

La Tabla 6.11 presenta los valores y clasificación (puntos de corte) de los ICA para SO_2 y O_3, establecidos por la EPA y empleados en Colombia, de acuerdo a periodos de exposición específicos.

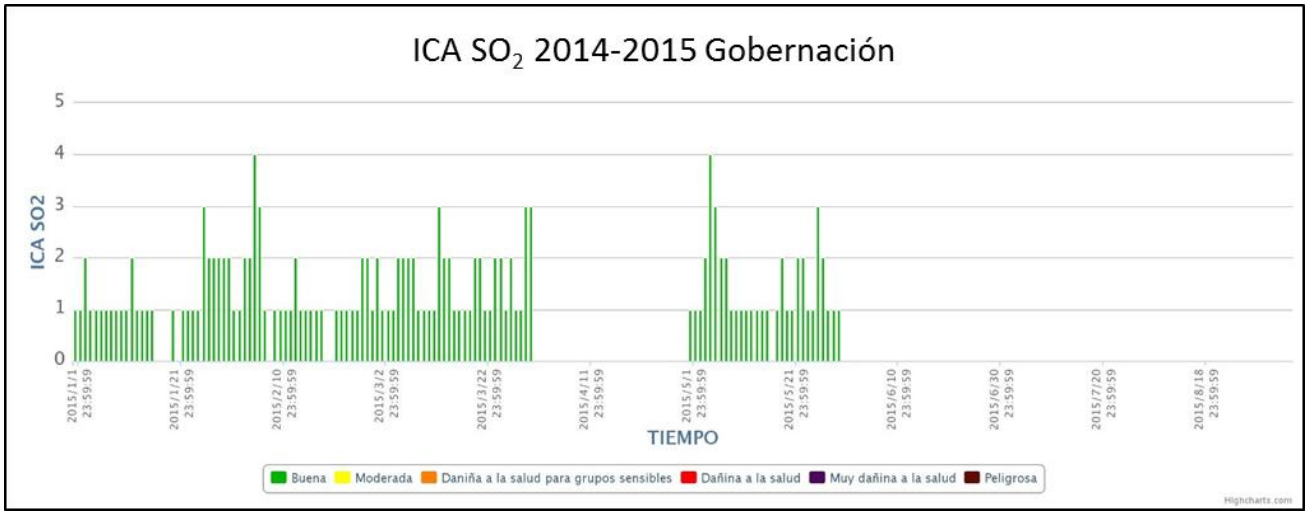
Tabla 6.11. Puntos de Corte ICA (EPA, 2011)

ICA	Color	Clasificación	O_3 8h ppm	O_3 1h ppm	CO 8h ppm	SO2 24h ppm
0-50	Verde	Buena	0 0.059	-	0 4.4	0 0.034
51-100	Amarillo	Moderada	0.060 0.075	-	4.5 9.4	0.0335 0.144
101-150	Naranja	Dañina a la salud para grupos sensibles	0.076 0.095	0.125 0.164	9.5 12.4	0.145 0.224
151-200	Rojo	Dañina a la salud	0.096 0.115	0.165 0.204	12.5 15.4	0.225 0.304
201-300	Púrpura	Muy dañina a la salud	0.116 0.374	0.205 0.404	15.5 30.4	0.305 0.604
301-400	Marrón	Peligrosa	a.	0.405 0.504	30.5 40.4	0.605 0.804
401-500	Marrón	Peligrosa	a.	0.505 0.604	40.5 50.4	0.805 1.004

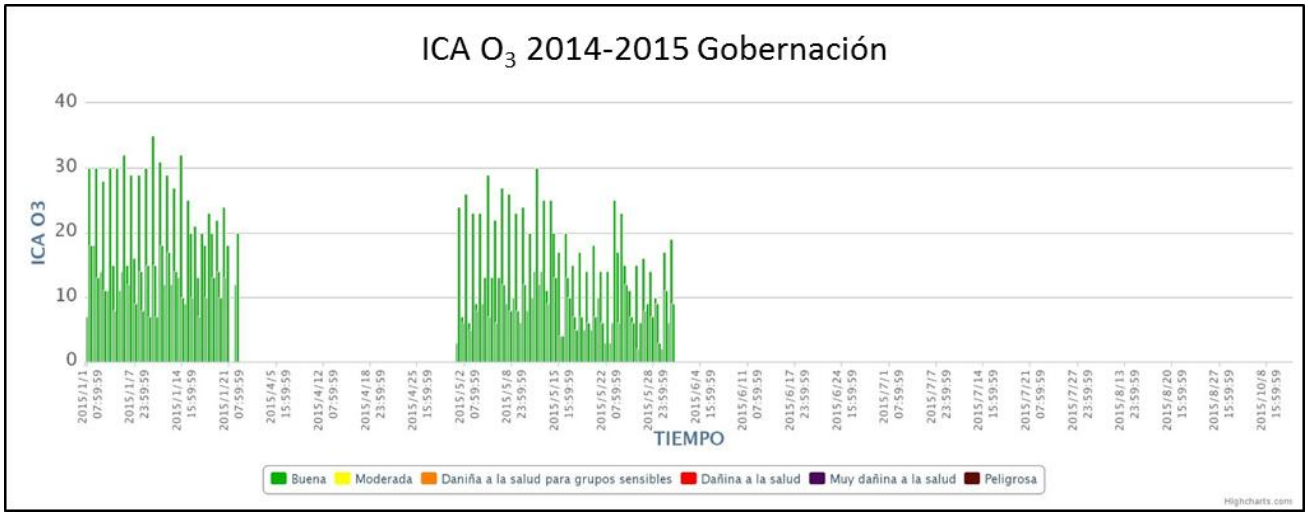
a. *Valores de 8h de O_3 no definen valores más altos de ICA (>301). Los valores de ICA ≥301 son calculados con las concentraciones de 1 hora.*

Los valores de ICA se calculan en el CDIAC a partir de las concentraciones de gases medidas en la estación Gobernación. En el Centro de Datos se encuentran disponibles los ICA para SO_2 de 24 horas, para O_3 de 8h, y para CO de 8h, todos para los años 2014 y 2015. La Figura 6.25 muestra la variación de los ICA para SO_2, y O_3 y CO del año 2015. A pesar de la baja confiabilidad de las mediciones del monitor de CO, se incluyó la representación gráfica de los índices para este contaminante, a modo ilustrativo. Se observa que para este compuesto, el índice de calidad predominante es “Moderada” y “Dañina para la salud”. En el caso del SO2 y O3, se encontró que la condición de calidad del aire predominante es “Buena”, con valores de ICA entre 0 y 50.

El Anexo 6.2 contiene los ICA calculados para los dos gases, en el periodo 2014 - 2015.



(a)



(b)

Figura 6.25. Variaciones ICA para gases estación Gobernación 2009-2014. a) SO_2. b) O_3.

6.3.4 Comparación de concentraciones de los gases SO_2 y O_3 entre ciudades

En esta subsección se compararon los promedios anuales de las concentraciones de los gases SO_2 y O_3 medidas en el aire ambiente de Manizales, con las concentraciones medidas de estos mismos gases en Bogotá, Cali, Valle de Aburrá y Bucaramanga, para 2014 y 2015. Los resultados se muestran en las Tablas 6.12 y 6.13.

Tabla 6.12. Comparación concentraciones de SO_2 Manizales y otras ciudades

Ciudad	SO_2 (promedio anual µg/m^3)	
	2014	2015
Manizales	1.98	2.26
Bogotá	1.7 – 7.3 [a]	NR
Cali	3 – 8 [b]	4 – 10 [b]

Ciudad	SO_2 (promedio anual µg/m^3)	
	2014	2015
Valle de Aburrá	5.3 - 15.6 [c]	11.14
Bucaramanga	NR	NR

a. Rango de concentraciones medidas entre las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá
b. Rango de concentraciones medidas en las estaciones del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire de Cali
c. Rango de concentraciones medidas entre las estaciones de la Red de Calidad del Aire del Valle de Aburrá
NR: No Reportado

Tabla 6.13. Comparación concentraciones de O_3 Manizales y otras ciudades

Ciudad	O_3 (promedio móvil 8 horas µg/m^3)	
	2014	2015
Manizales	32.38	28.83
Bogotá	14 – 31[a]	NR
Cali	NR	NR
Valle de Aburrá	RVM	RVM
Bucaramanga	66 [b]	NR

a. Rango de concentraciones promedio medidas por las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá
b. Promedio anual calculado con promedios horarios de la estación Centro del SVCA de Bucaramanga
NR: No Reportado
RVM: Reporta Valores Máximos

En la Tabla 6.12 se observa la comparación de los promedios anuales de concentraciones de SO_2, medidas en Manizales, Bogotá, Cali y Valle de Aburrá. En 2014, las mayores concentraciones se registraron en el Valle de Aburrá, con valores medios que alcanzaron los 15 µg/m^3 en algunas estaciones de la red de calidad del aire de este sector del país. En segundo lugar, después de las concentraciones del Valle de Aburrá se ubican las concentraciones de Cali, donde se presentaron concentraciones anuales entre 3 y 8 µg/m^3 entre las estaciones de la red. En tercer lugar se ubica Bogotá, con concentraciones anuales que variaron en 2014 entre 1.7 y 7.3 µg/m^3, entre las estaciones de la red de la ciudad. Manizales ocupa el último lugar con una concentración promedio anual de 1.98 µg/m^3, medida en la estación Gobernación.

En 2015, la tendencia de 2014 se mantuvo, ubicando el primer lugar el Valle de Aburrá con una concentración media anual de 11.14 µg/m^3, seguido por Cali con un rango de concentraciones medias anuales entre 4 y 10 µg/m^3 (variación entre estaciones de la red). En último lugar se ubica Manizales con una concentración media de 2.26 µg/m^3.

Por otro lado, la Tabla 6.13 presenta la comparación en las concentraciones medias octohorarias de ozono medidas en las ciudades de en Manizales, Bogotá, Valle de Aburrá y Bucaramanga. En 2014, las mayores concentraciones se registraron en Bucaramanga, con un valor de 66 µg/m^3. En segundo lugar se ubicó Manizales, con valores de 32.38 µg/m^3, seguido por Bogotá con una variación entre 14 y 31 µg/m^3. Los reportes de las ciudades para 2015 no se encontraron disponibles al momento de redacción de este informe final, por lo cual no fue posible establecer una comparación.

6.3.5 Meteorología y Calidad del Aire

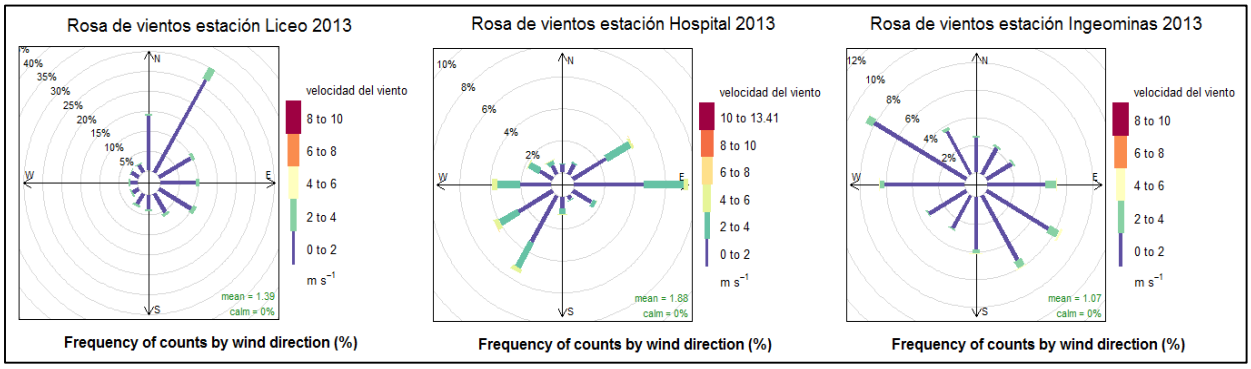
Comparación de rosas de vientos estaciones Liceo, Hospital e Ingeominas

Previo a la instalación de la estación meteorológica móvil de Gobernación, los datos de calidad del aire medidos en Gobernación (gases y material particulado), se relacionaban con datos meteorológicos de las estaciones más cercanas: Liceo, Hospital e Ingeominas. Con el objetivo de definir la estación meteorológica más indicada para el análisis combinado entre las variables de calidad del aire y meteorología, se realizó una comparación entre las variables medias por las tres estaciones meteorológicas en mención.

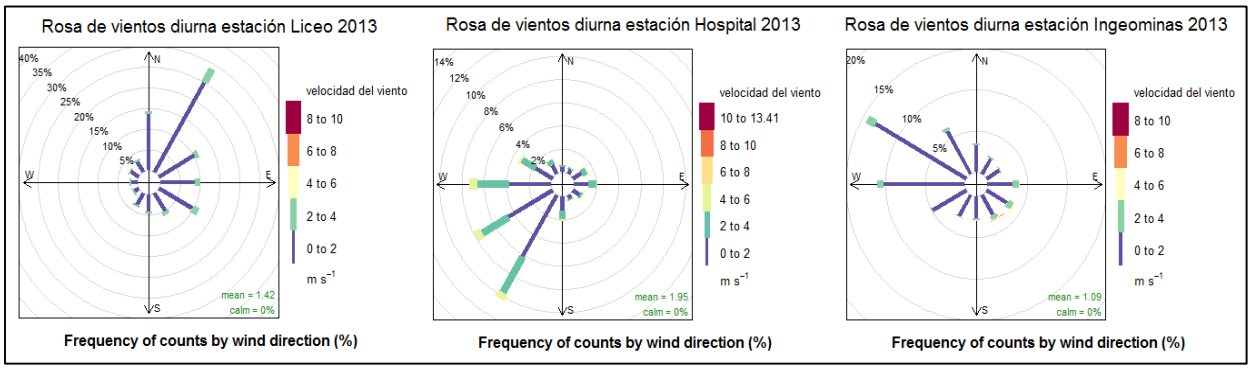
Dos de los parámetros meteorológicos de mayor interés son la dirección y la velocidad del viento, registradas por las tres estaciones Liceo, Hospital e Ingeominas. Para observar el comportamiento de estas variables en las tres estaciones y evaluar patrones diurno-nocturno, se realizaron rosas de vientos para los años 2013 y 2014, empleando el software R y su librería Openair. Las rosas de vientos anuales se presentan en las Figuras 6.26 y 6.27.

En ambas Figuras es evidente que la estación meteorológica de Liceo presenta algunas fallas técnicas, ya que esta reporta el mismo patrón de vientos en todos los períodos (diurno y nocturno), mientras que en las estaciones meteorológicas Hospital e Ingeominas se puede observar un perfil de vientos que varía para el día y la noche. Esto se concluye ya que es muy poco probable que en la zona de Liceo no exista un cambio en el perfil de vientos, teniendo en cuenta que las estaciones Hospital e Ingeominas presentan patrones de vientos similares entre sí, y se encuentran muy cercanas y a similares alturas de la estación Liceo. Los valores de velocidad del viento también presentan un comportamiento muy constante con registros alrededor de 1.33 m/s.

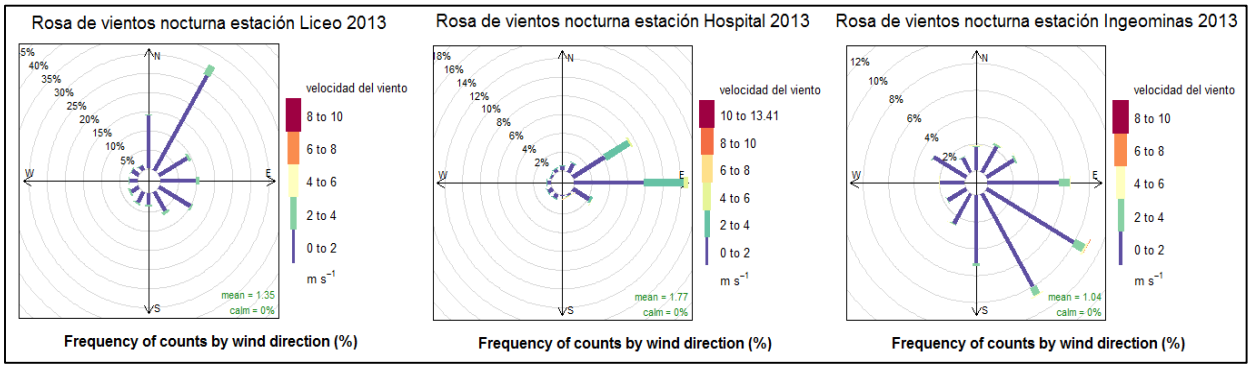
Debido a la evidencia encontrada por la Corporación del mal funcionamiento de la estación meteorológica Liceo, ésta estuvo fuera de operación desde febrero de 2015 hasta octubre de 2015, momento en el que se realizó mantenimiento. Sin embargo, según fue comunicado por una funcionaria de la Red Meteorológica e Hidrometeorológica Telemétrica de Caldas, desde su reparación hasta junio de 2016, las únicas variables que transmitieron datos confiables desde la estación fueron: temperatura, presión barométrica, velocidad del viento y nivel de ruido. Según la funcionaria, a partir de junio de 2016 los datos de las demás variables meteorológicas humedad relativa, dirección del viento, precipitación y radiación solar, son confiables. Pese a esta última modificación de la estación, los datos que son considerados válidos o confiables desde junio de 2016, no fueron analizados en el presente informe final ya que aún no se encuentran disponibles. En consecuencia, no se realizaron nuevas rosas de vientos para observar el comportamiento de las mediciones después de la reparación de la estación.



(a)

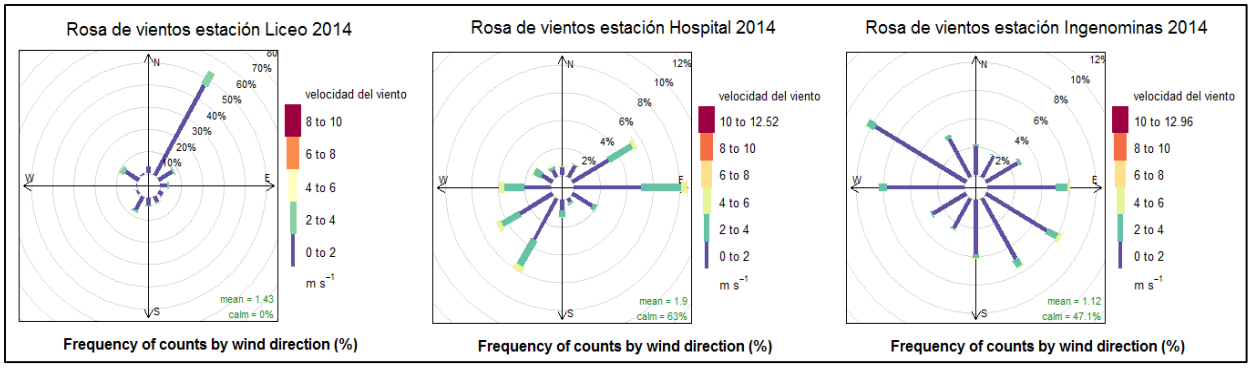


(b)

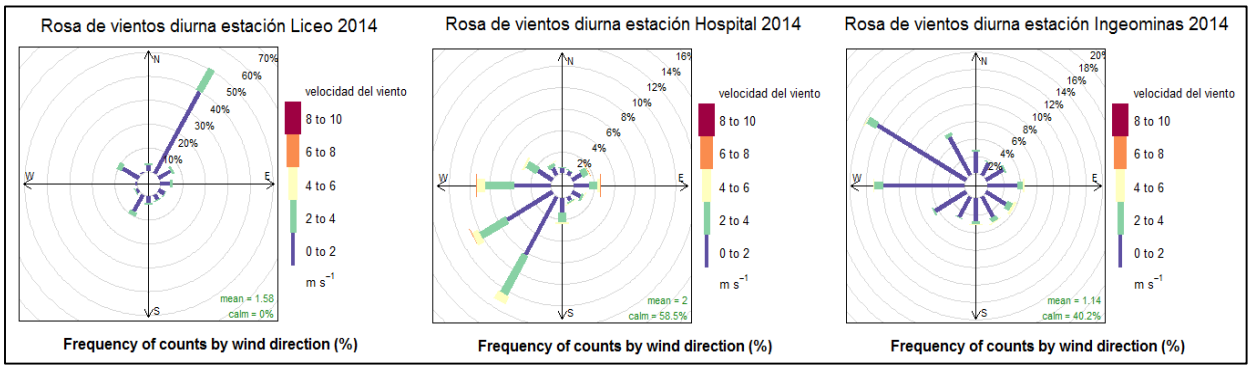


(c)

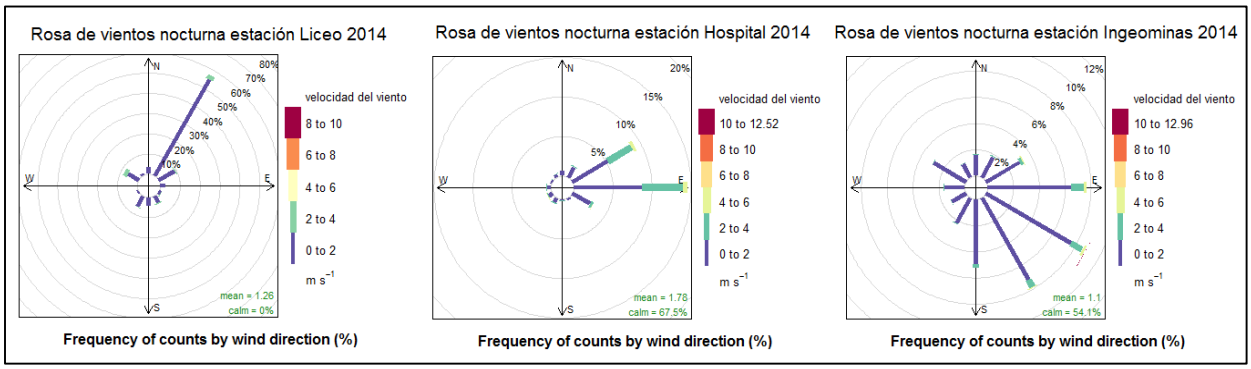
Figura 6.26. Comparación de las rosas de viento de las estaciones Liceo, Hospital e Ingeominas para el año 2013. a) Rosa de vientos para el total del año. b) Rosa de vientos para periodos diurnos (06:00 a 17:59 horas). c) Rosa de vientos para periodos nocturnos (18:00 a 05:59 horas).



(a)



(b)



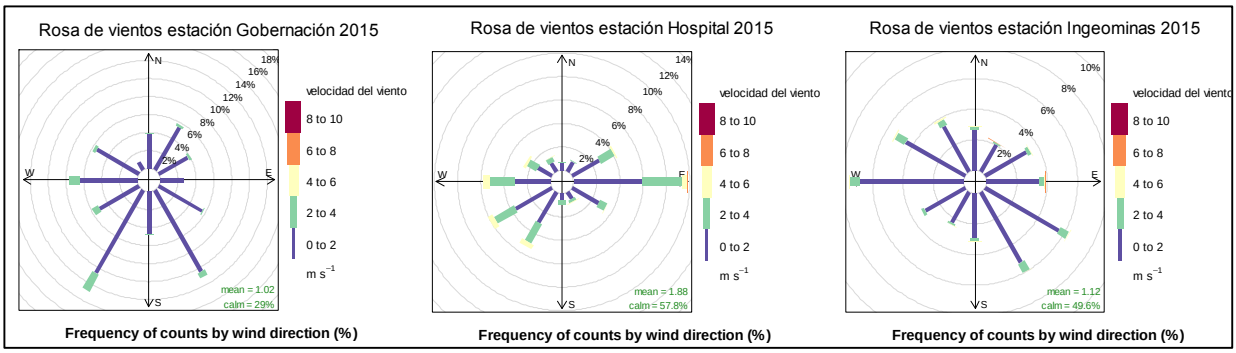
(c)

Figura 6.27. Comparación de las rosas de viento de las estaciones Liceo, Hospital e Ingeominas para el año 2014. a) Rosa de vientos para el total del año. b) Rosa de vientos para periodos diurnos (06:00 a 17:59 horas). c) Rosa de vientos para periodos nocturnos (18:00 a 05:59 horas).

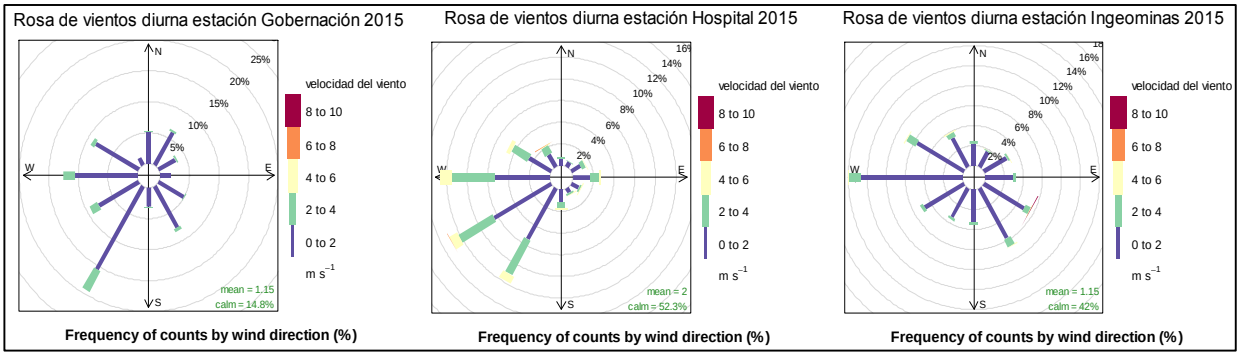
Comparación de rosas de vientos estaciones Gobernación, Hospital e Ingeominas

En el mes de febrero del año 2015, el GTAIHA instaló y puso en funcionamiento la estación meteorológica Gobernación, localizada en la terraza del edificio de la Gobernación de Caldas. La ubicación de esta estación tuvo como fin disponer de datos meteorológicos que pudieran compararse con los datos de calidad del aire de la estación automática (mediciones de los gases SO_2, O_3 y CO) y de los equipos Low-Vol (medición de PM_{10} y $PM_{2.5}$).

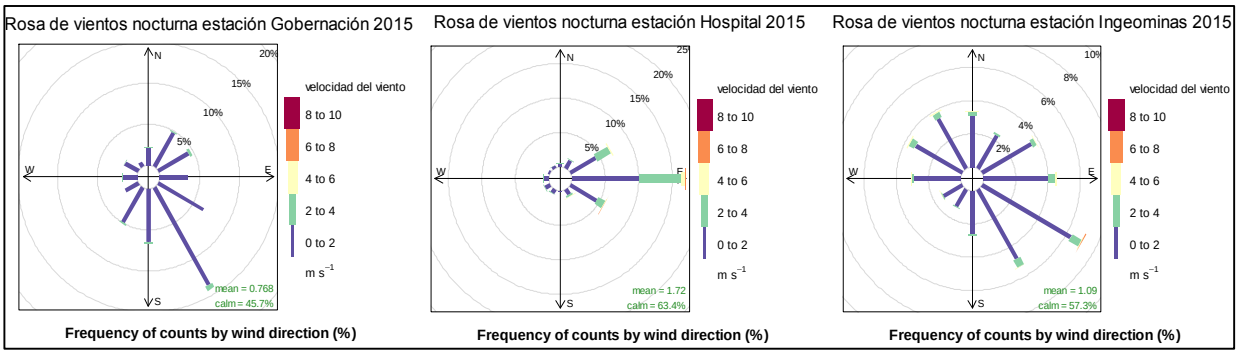
Con el fin de evaluar el desempeño de esta nueva estación, se realizaron rosas de vientos para comparar los patrones de vientos medidos en esta, con las mediciones de las estaciones meteorológicas Hospital e Ingeominas, las cuales se ubican en zonas muy cercanas a la estación Gobernación. La Figura 6.28 muestra las rosas de vientos total, diurna y nocturna, realizada con datos de estas tres estaciones meteorológicas para el año 2015.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.28. Comparación de las rosas de viento de las estaciones Gobernación, Hospital e Ingeominas para el año 2015. a) Rosa de vientos para el total del año. b) Rosa de vientos para periodos diurnos (06:00 a 17:59 horas). c) Rosa de vientos para periodos nocturnos (18:00 a 05:59 horas).

A partir del análisis de la velocidad y la dirección del viento se encontró que la recientemente instalada estación Gobernación realiza mediciones coherentes respecto a las mediciones de las estaciones Hospital e Ingeominas. Durante el periodo 02/2015-12/2015, la velocidad del viento media en la estación Gobernación fue 0.65 m/s. Para el mismo periodo, la velocidad media en la estación Hospital fue 0.78 m/s y en la estación Ingeominas fue de 0.53 m/s.

Las rosas de vientos de la estación Gobernación mostraron un comportamiento diferenciado de la dirección del viento, dependiendo del periodo diurno o nocturno. Durante las horas del día (Figura 6.28b), el viento proviene de una dirección suroeste, predominantemente. En la noche, la dirección predominante es sureste (Figura 6.28c). Un comportamiento similar se observa en las estaciones Hospital e Ingeominas, respecto a los periodos diurno y nocturno. En Hospital, el viento proviene de la dirección suroeste durante el día, y en la noche proviene de la dirección este, principalmente. En la estación Ingeominas, en horas diurnas el viento proviene principalmente de la dirección oeste y en la noche proviene de la dirección sureste.

A partir de este primer análisis, se puede inferir que los datos de la estación Ingeominas presentan un comportamiento similar a los datos de la estación Gobernación. Esto será útil cuando se requieran datos meteorológicos para análisis de calidad del aire, y la estación meteorológica de Gobernación se encuentre fuera de operación, pues su instalación en el edificio no es definitiva, ya que se trata de una estación móvil.

Rosas de contaminantes para el análisis conjunto de meteorología y calidad del aire

Las rosas de contaminantes permiten evaluar la influencia conjunta de los vientos y una variable meteorológica adicional, sobre las concentraciones de un contaminante de aire determinado. Se realizaron

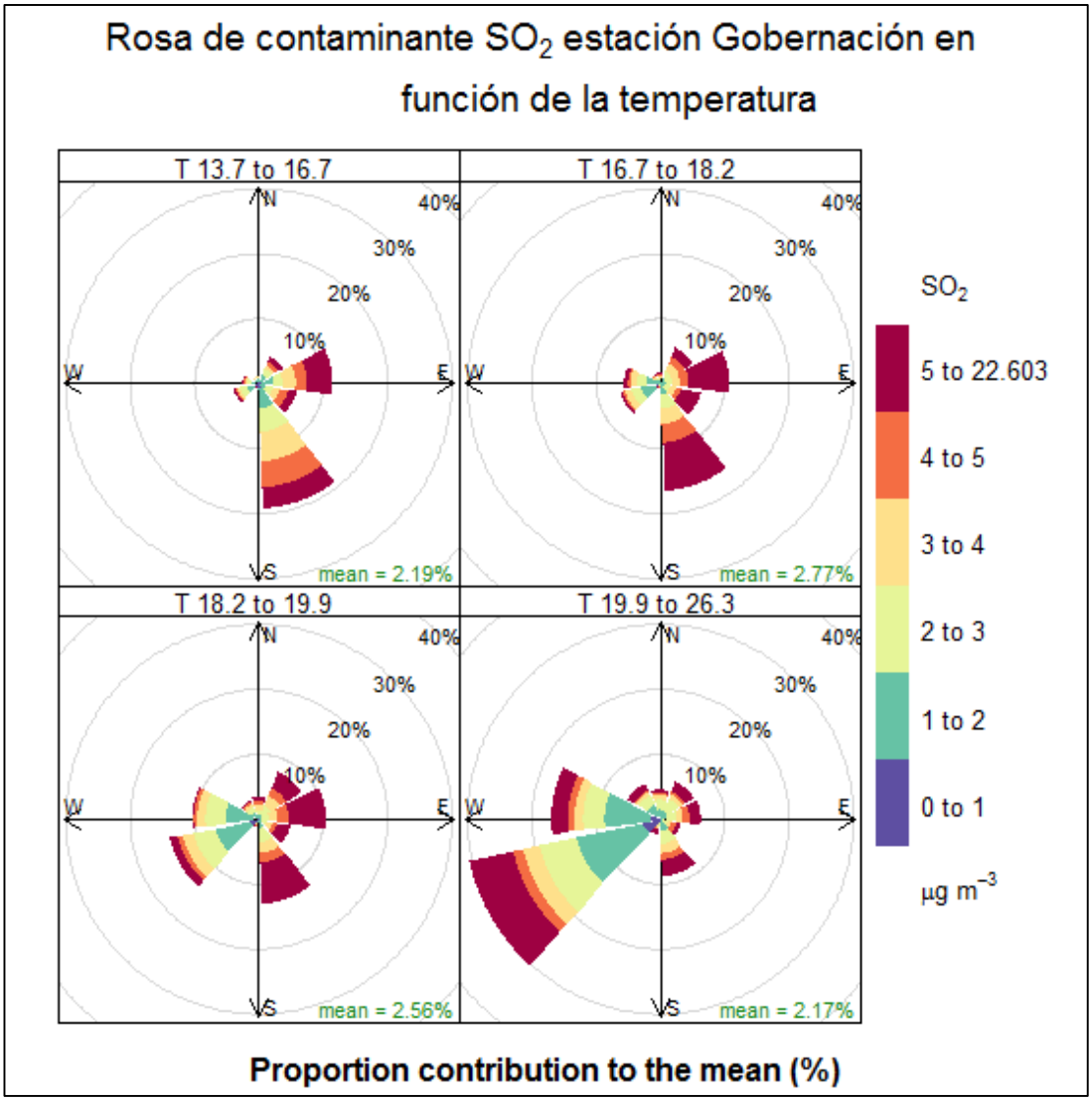
rosas de contaminantes para SO_2, CO y O_3, empleando datos del periodo febrero 2015 - abril 2016, en función de las variables meteorológicas (temperatura, radiación solar y humedad relativa) medidas en la estación meteorológica de Gobernación, instalada en febrero de 2015. Estudios previos han reportado que estas variables influencian considerablemente los niveles medidos de estos contaminantes en el aire ambiente de Manizales (González, 2012; González et al., 2015).

Las rosas de contaminantes elaboradas permiten:

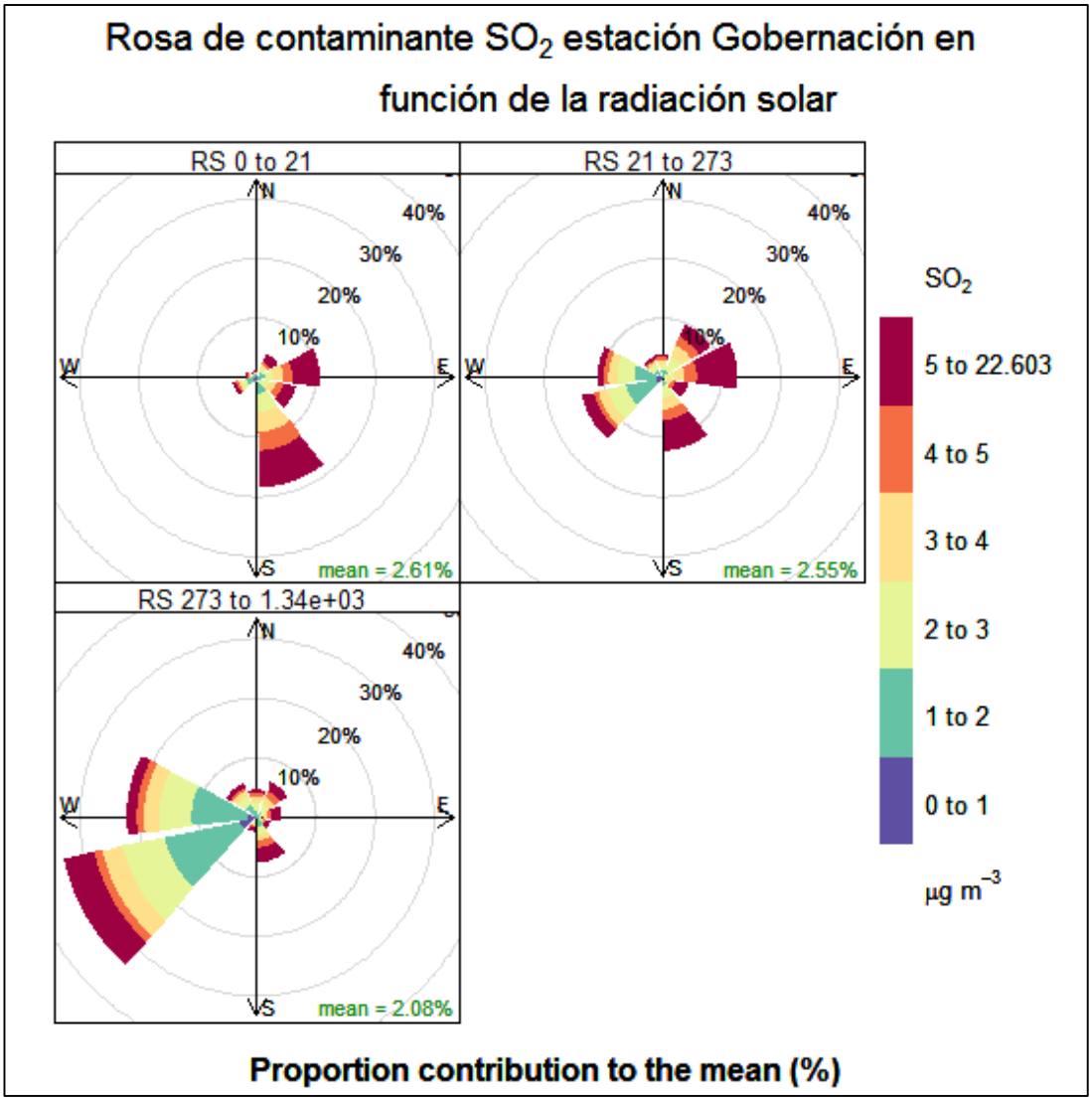
- Determinar concentraciones predominantes del contaminante evaluado en función de la dirección y velocidad del viento.
- Representar las concentraciones obtenidas del contaminante evaluado en función de distintos intervalos de una segunda variable meteorológica evaluada. En este caso se analizó la influencia de la temperatura, radiación solar y humedad relativa. En la fase posterior del proyecto se espera incluir la influencia de la precipitación, teniendo en cuenta que se tendrá información de calidad del aire (asociado a los gases medidos en gobernación) para un periodo más extenso de análisis.

Análisis para dióxido de Azufre (SO_2)

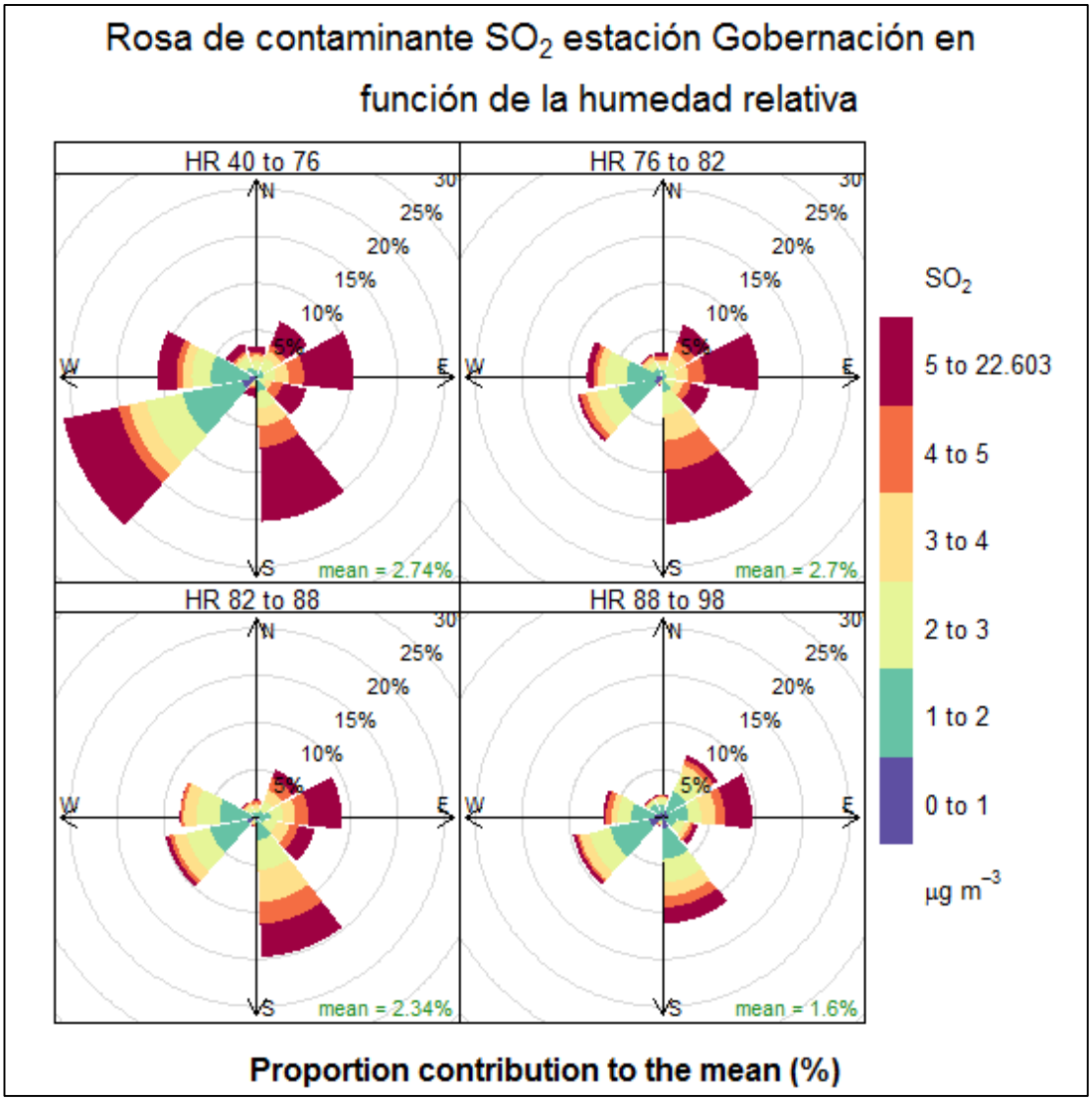
En las Figuras 6.29a-b-c se pueden observar las diferentes concentraciones de dióxido de azufre medidas en la estación Gobernación, en función de las diferentes direcciones del viento. Además se puede observar el comportamiento de este contaminante para diferentes valores de las variables meteorológicas temperatura (T), radiación solar (RS) y humedad relativa (HR), con el fin de buscar una relación entre la concentración de contaminante y la meteorología.


Rosa de contaminante SO_2 estación Gobernación en función de la temperatura
T 13.7 to 16.7
T 16.7 to 18.2
T 18.2 to 19.9
T 19.9 to 26.3
N
S
W
E
10%
20%
30%
40%
mean = 2.19%
mean = 2.77%
mean = 2.56%
mean = 2.17%
SO_2
5 to 22.603
4 to 5
3 to 4
2 to 3
1 to 2
0 to 1
µg m^{-3}
Proportion contribution to the mean (%)

(a)


Rosa de contaminante SO_2 estación Gobernación en función de la radiación solar
RS 0 to 21
RS 21 to 273
RS 273 to 1.34e+03
N
S
W
E
10%
20%
30%
40%
mean = 2.61%
mean = 2.55%
mean = 2.08%
SO_2
5 to 22.603
4 to 5
3 to 4
2 to 3
1 to 2
0 to 1
µg m^{-3}
Proportion contribution to the mean (%)

(b)



(c)

Figura 6.29. Rosas de contaminante de SO_2 estación Gobernación a) Función de la temperatura (T). b) Función de la radiación solar (RS). c) Función de la humedad relativa (HR).

Factores como la temperatura, humedad e intensidad de la luz pueden influir en las reacciones químicas del dióxido de azufre en la atmósfera (Manahan, 2007). En la Figura 6.29a se observa una relación inversa entre las concentraciones del SO_2 y la temperatura; normalmente en el periodo diurno se registran mayores temperaturas que en el nocturno, por lo tanto, asumiendo que las mayores temperaturas hacen referencia a las horas luz, se puede explicar la disminución de las concentraciones de SO_2 por la oxidación de este a SO_3 en presencia de la luz solar. De esta misma forma se puede explicar el comportamiento de la Figura 6.19b, la cual se encuentra en función de la radiación solar, que hace referencia a la energía emitida por el sol, precursora de las reacciones fotoquímicas que se dan en la atmósfera, entre ellas la oxidación del SO_2, dando como resultado una relación inversa entre la radiación solar y los niveles de SO_2 en el aire.

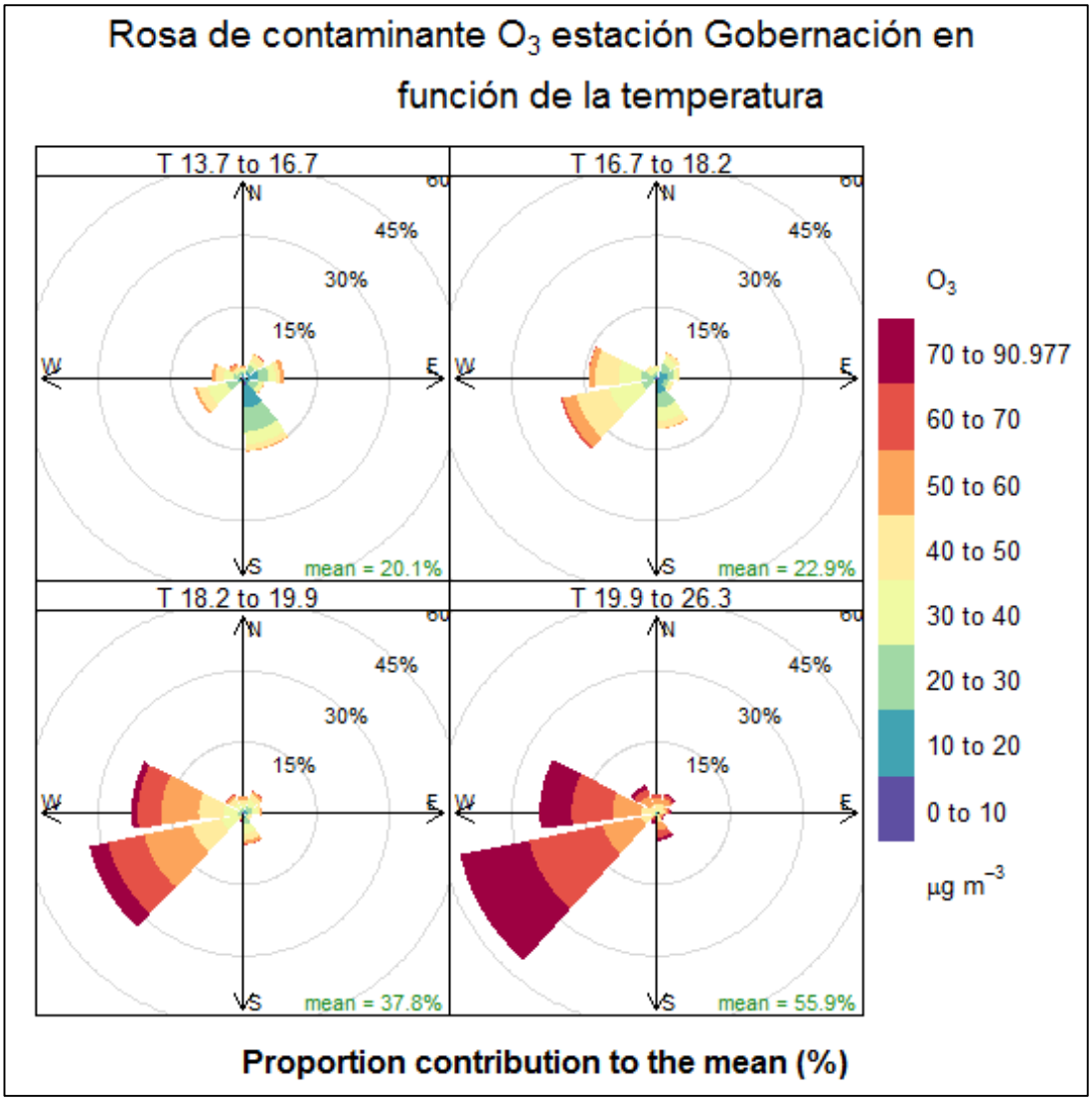
Existe una relación inversamente proporcional entre la humedad relativa y la temperatura del aire ambiente, es decir, a menor temperatura mayor humedad relativa, por lo que se ha mencionado en otros estudios (Luvsan *et al.*, 2012). A partir de lo anterior se puede inferir que existe una relación directa entre la humedad

relativa y las concentraciones de SO_2 en el aire, puesto que hay temperaturas más bajas y por ende disminuye la oxidación del dióxido de azufre. Este comportamiento se observa en la Figura 6.29c, donde las mayores concentraciones del gas tienen lugar cuando la humedad es más baja. Lo anterior puede estar relacionado a procesos de remoción húmeda en la atmósfera, ya que la humedad relativa se relaciona indirectamente con el fenómeno de precipitación, mostrando la influencia del fenómeno de lavado atmosférico sobre la inmisión de este contaminante.

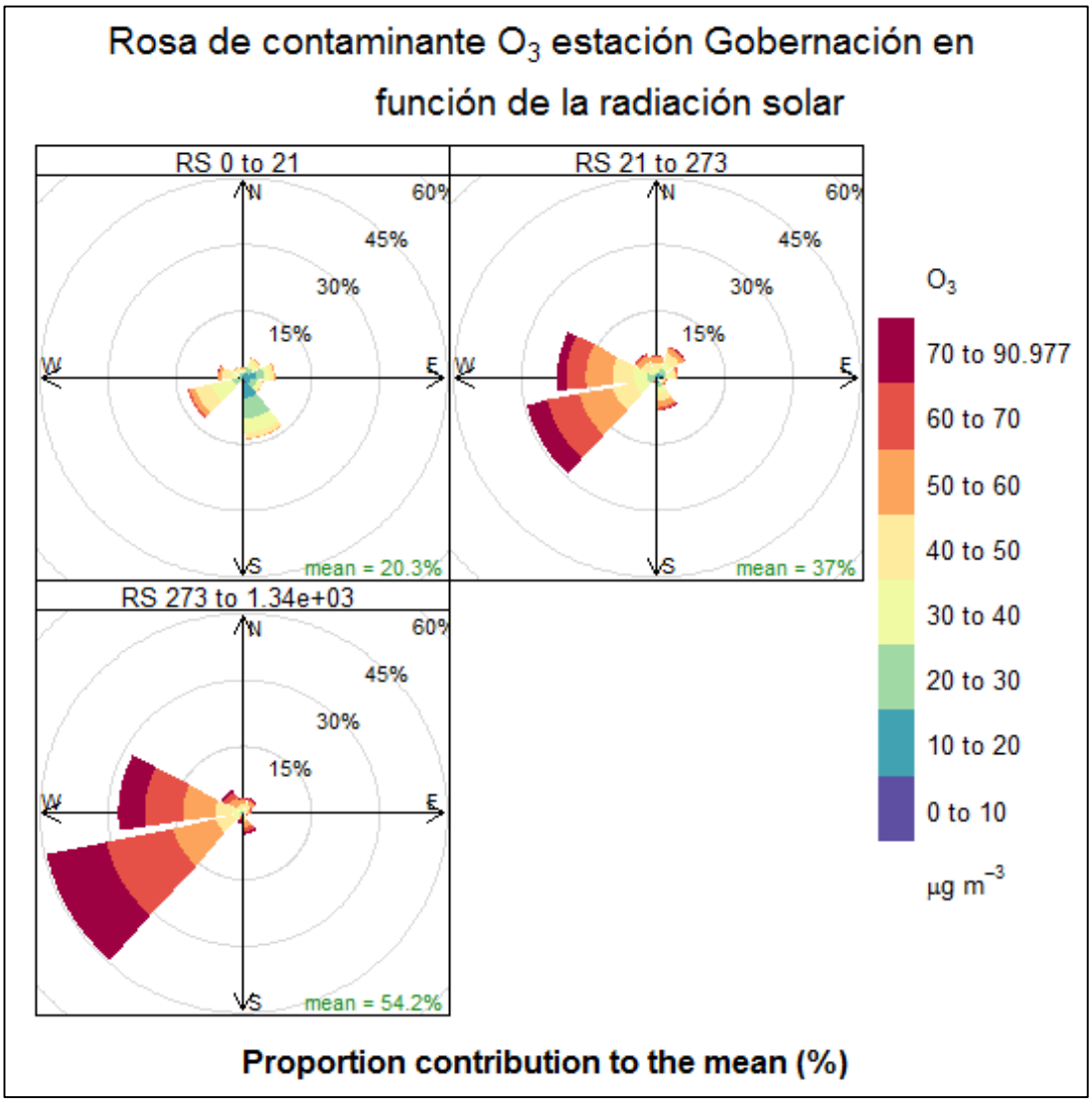
Análisis para el Monóxido de Carbono (CO)

El análisis de concentraciones de CO en función de las variables meteorológicas, no se presenta en este informe debido a la baja confiabilidad de los datos generados por el monitor de CO hasta el momento. El reajuste de los datos está sujeto a la correcta calibración del equipo con una concentración del gas menor o igual a 50 ppm, acción que requiere la finalización del trámite en curso al interior de la Corporación Ambiental.

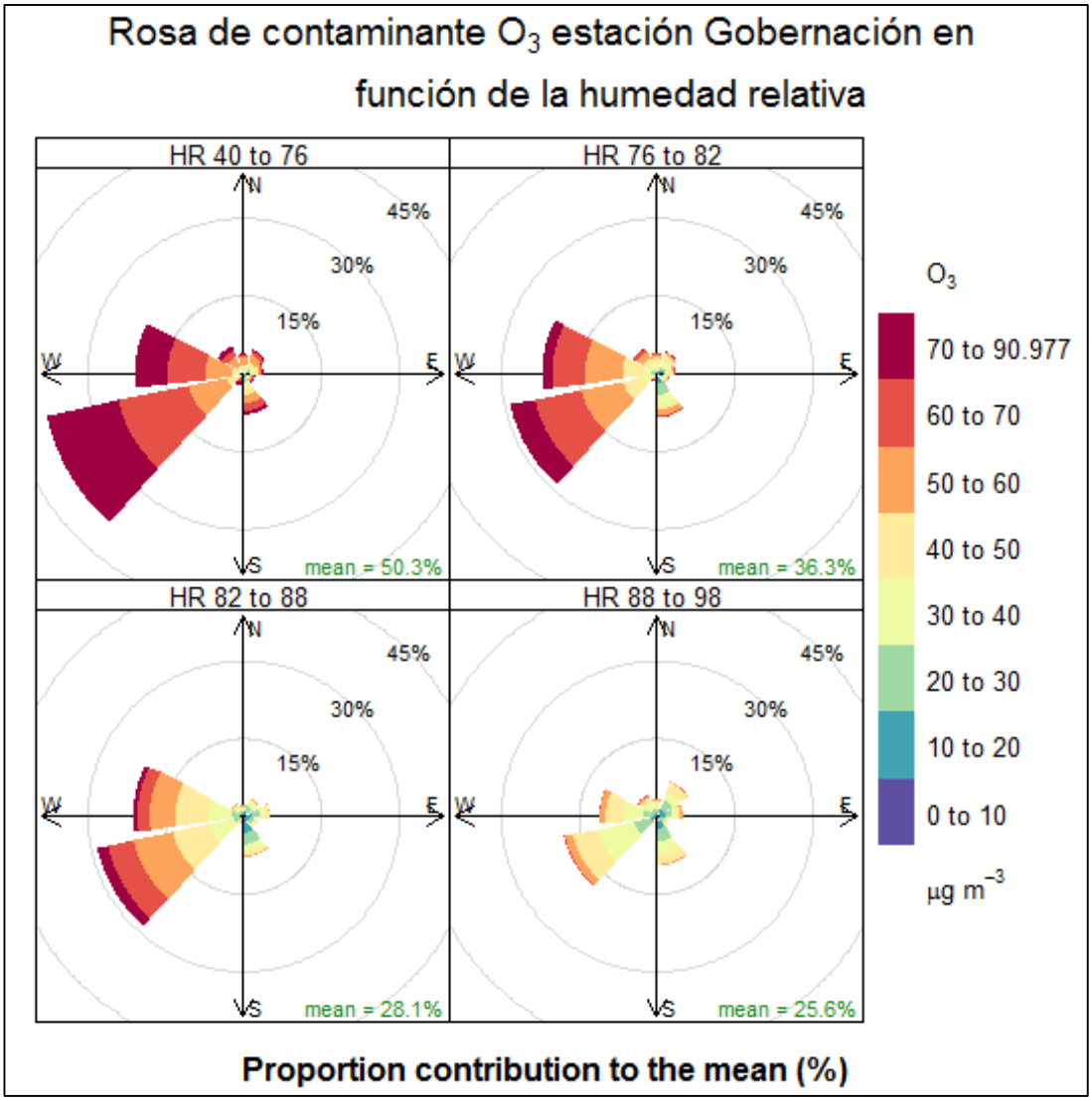
Análisis para el Ozono Troposférico (O_3)



(a)


Rosa de contaminante O_3 estación Gobernación en función de la radiación solar
RS 0 to 21
RS 21 to 273
RS 273 to 1.34e+03
N
S
W
E
15%
30%
45%
60%
mean = 20.3%
mean = 37%
mean = 54.2%
O_3
70 to 90.977
60 to 70
50 to 60
40 to 50
30 to 40
20 to 30
10 to 20
0 to 10
µg m^{-3}
Proportion contribution to the mean (%)

(b)



(c)

Figura 6.30. Rosas de contaminante de O_3 estación Gobernación a) Función de la temperatura (T). b) Función de la radiación solar (RS). c) Función de la humedad relativa (HR).

El ozono troposférico es un contaminante secundario, cuyos principales precursores son los óxidos de nitrógeno (NO_X) y los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV's) en presencia de luz solar. Con respecto los otros dos contaminantes analizados (CO y SO_2), es para el ozono donde se observa una mayor influencia de las variables meteorológicas. La Figura 6.30 muestra la influencia de la temperatura, la radiación solar y la humedad relativa en las concentraciones medidas del contaminante.

Ya que la formación del ozono se ve limitada por la presencia de luz solar, se encontró que las mayores concentraciones tienen lugar cuando las temperaturas y la radiación solar son más altas (Figura 6.30a-b), variables que exhiben sus mayores valores en horas diurnas. Específicamente, se observó que a temperaturas superiores a las 18°C, tienen lugar las concentraciones de ozono por encima de 50 µg/m^3. Un comportamiento similar ocurre cuando la radiación solar es superior a los 21 W/m^2.

Respecto a la humedad relativa, ya que esta es inversa a la temperatura y la radiación solar, el comportamiento del ozono es inverso (Figura 6.30c). Para los valores más bajos de humedad, de 40 a 76%, se presentan los valores más altos de O_3, siendo los de 70 a 90.97 µg/m^3 los que más resaltan. Estos disminuyen, conforme aumenta la humedad relativa del aire, hasta llegar a los valores de concentración más pequeños, que se presentan entre 88 y 98% de humedad, y corresponden a 0 - 50 µg/m^3 de O_3, en su mayoría.

6.3.6. Monitoreo Pasivo de los Gases SO_2, NO_X y O_3

La Tabla 6.14 muestra los niveles de concentración medidos para los gases SO_2, NO_X y O_3, durante cada una de las tres campañas de monitoreo, ejecutadas en febrero de 2015, noviembre de 2015, y febrero de 2016, respectivamente. Posteriormente se realiza un análisis de las concentraciones halladas de cada contaminante entre campañas.

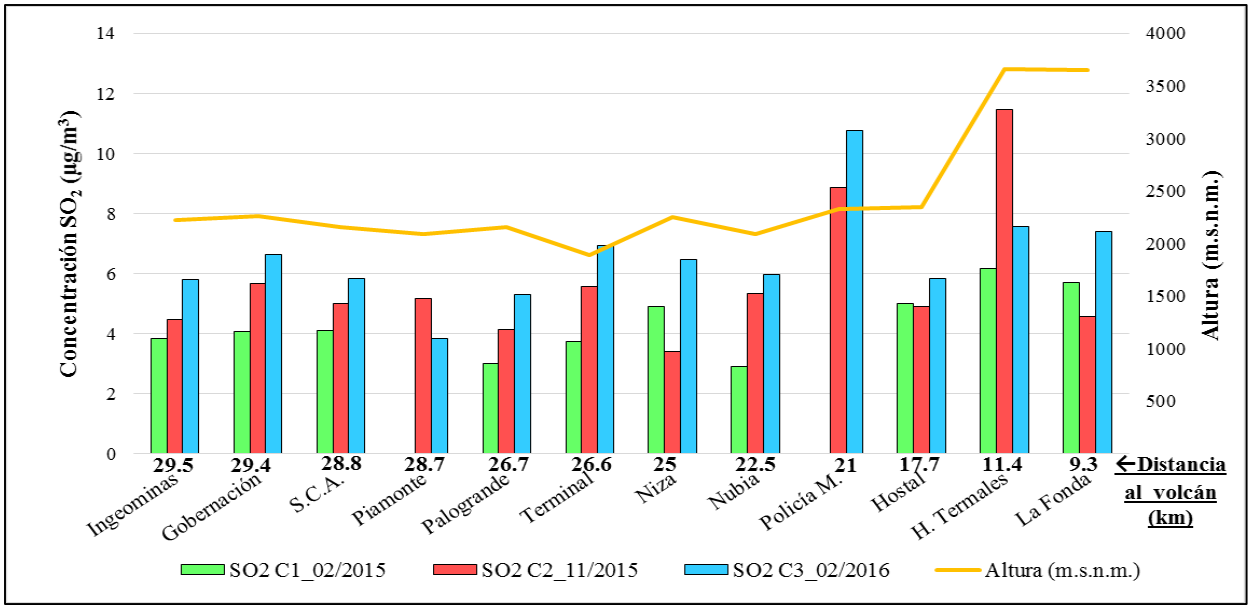
Tabla 6.14. Concentraciones de los gases SO_2, O_3 y NO_X determinadas por monitoreo pasivo

Estación de Monitoreo	SO_2 (µg/m^3)			NO_X (µg/m^3)			O_3 (µg/m^3)		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
Ingeominas	3.84	4.47	5.8	35.55	68.95	38.86	27.64	31.50	44.67
Gobernación	4.05	5.66	6.64	42.33	48.69	37.24	21.72	30.36	42.81
S.C.A. [a]	4.09	4.99	5.83	46.42	71.27	52.32	21.85	29.46	40.52
Piamonte	--	5.16	3.82	--	89.65	74.81	--	16.62	15.57
Peralonso	3.78	--	--	97.39	--	--	16.15	--	--
Palogrande	3.00	4.12	5.31	27.13	31.31	33.01	39.75	35.00	47.32
Terminal	3.72	5.57	6.92	47.67	77.02	53.54	14.65	18.09	27.82
La Palma	1.99	--	--	11.86	--	--	40.63	--	--
Niza	4.90	3.39	6.48	20.95	23.69	20.56	37.64	48.98	63.78
Nubia	2.91	5.32	5.98	17.81	22.33	18.13	34.22	35.23	57.00
Policía Maltería	--	8.86	10.75	--	48.90	34.47	--	32.93	40.85
Hostal	4.99	4.91	5.84	9.69	11.25	4.84	40.31	45.38	63.03
H. Termales del Ruíz	6.17	11.47	7.56	10.34	9.72	3.41	47.17	67.02	90.14
La Fonda	5.69	4.55	7.41	4.88	8.10	4.85	46.92	46.38	65.78

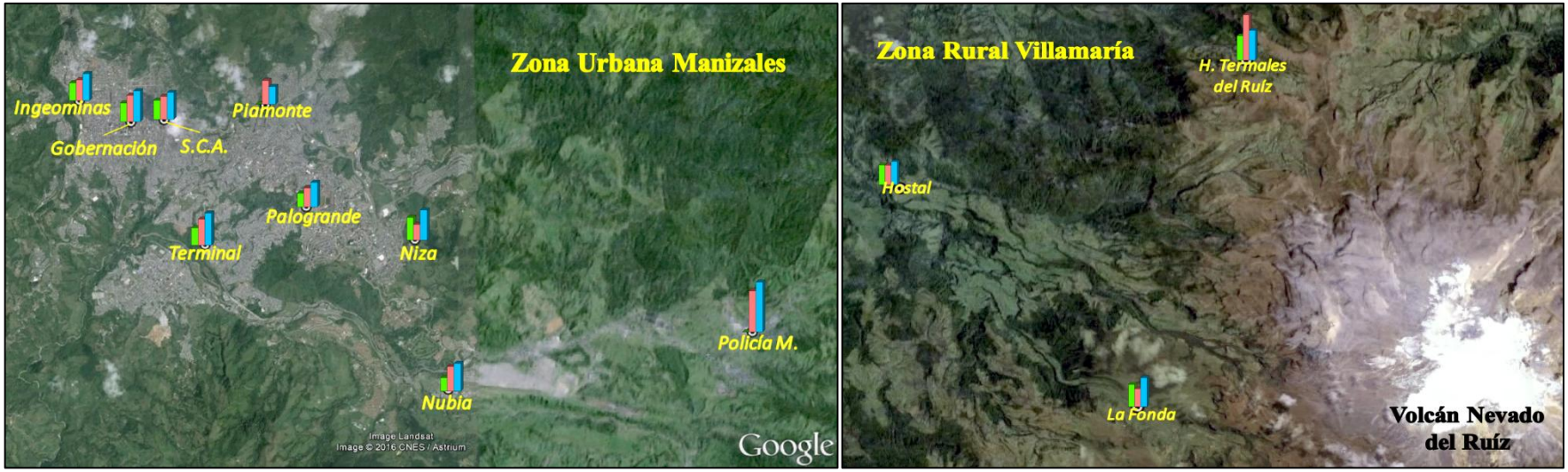
a. Sociedad Colombiana de Arquitectos
C1: Campaña 1
C2: Campaña 2
C3: Campaña 3

Dióxido de Azufre (SO_2)

La Figura 6.31 muestra la variación en las concentraciones de SO_2 medidas en las diez (10) estaciones de monitoreo que son comunes para las tres campañas (febrero de 2015, noviembre de 2015 y febrero de 2016), y se incluyen las estaciones Piamonte y Policía Maltería. En la Figura 6.31a, las estaciones de monitoreo pasivo están ordenadas de acuerdo a la distancia en km que hay entre cada una de ellas y el volcán Nevado del Ruíz, de menor a mayor distancia si se observa de derecha a izquierda.



(a)



(b)

Figura 6.31. Variación de concentraciones de dióxido de azufre (SO_2) entre campañas de monitoreo pasivo

Además, en esta Figura se incluye un indicador de altura que evidencia la variabilidad altitudinal entre las estaciones de monitoreo (entre 1890 y 3660 m.s.n.m.). A primera vista se observa que las concentraciones más altas de SO_2 medidas en toda la red de monitoreo pasivo, se presentaron en las estaciones más cercanas al volcán Nevado del Ruíz, un indicador de la influencia de esta fuente natural de SO_2 sobre las concentraciones del gas en el aire ambiente local.

Se evidencia que en la mayoría de las estaciones, las concentraciones de SO_2 aumentaron en la segunda campaña respecto a la primera, y en la tercera campaña respecto a la segunda. En la primera campaña de monitoreo, las concentraciones medidas del gas variaron entre 2.91 y 6.17 µg/m^3, en la segunda la variación se presentó entre 3.39 y 11.47 µg/m^3, y en el tercera el intervalo fue de 3.82 a 10.75 µg/m^3. En las tres campañas, las mayores concentraciones de SO_2 se encontraron en las estaciones Hacienda Termales del Ruíz y Policía Maltería. La estación Hacienda Termales se ubica en la zona rural del municipio de Villamaría, a 11.40 km aprox., al noroccidente del volcán Nevado del Ruíz. La concentración de SO_2 en esta estación aumentó en un 86% en la segunda campaña (de 6.17 en febrero de 2015, pasó a 11.47 µg/m^3 en noviembre de 2015), y disminuyó en un 34% en la tercera campaña respecto a la segunda (de 11.47 µg/m^3 en noviembre de 2015, pasó a 7.56 µg/m^3 en febrero de 2016). Las concentraciones en esta estación se relacionan directamente con la emisión volcánica de SO_2, debido a la baja actividad antropogénica del sector. La ubicación de esta estación se encuentra sobre una de las direcciones hacia donde se dispersa la pluma volcánica (noroccidente). La Tabla 6.15 presenta los registros de emisión volcánica reportados por el Servicio Geológico Colombiano en los Informes de Actividad Volcánica Segmento Norte de Colombia

Tabla 6.15. Concentraciones de los gases SO_2, O_3 y NO_X determinadas por monitoreo pasivo

Campaña	Campaña 1	Campaña 2	Campaña 3
Emisión SO_2 Promedio (Ton/día)	1252	3985	5539
Emisión SO_2 Máxima (Ton/día)	11229	9795	8784.5
Dirección Predominante del Viento (volcán)	Occidente Suroccidente Noroccidente	Occidente Noroccidente	Occidente Suroccidente

Fuente: (S.G.C., 2015; S.G.C., 2016)

Según los registros de emisión volcánica de SO_2, la emisión promedio más alta se presentó durante la tercera campaña de monitoreo, sin embargo la concentración más alta del gas en la estación Hacienda Termales tuvo lugar en la segunda campaña. Este comportamiento puede estar relacionado con la dirección predominante del viento a la altura del volcán, entre las tres campañas de monitoreo pasivo. Como se observa en la Tabla 6.15, la dirección predominante de la pluma volcánica durante la segunda campaña fue occidente y noroccidente, posición que favorece altas concentraciones de la estación Hacienda Termales, mientras que durante la tercera campaña la dirección predominante fue occidente y suroccidente, favoreciendo la dispersión de la pluma hacia la estación La Fonda y otros centros poblados como Santa Rosa de Cabal y Pereira.

Como se mencionó, altas concentraciones de SO_2 también se midieron en la estación Policía Maltería. Esta estación se ubica sobre el sector industrial de Maltería, muy cerca de la vía que conduce de Manizales a

Bogotá. Durante la 2 campaña de monitoreo, en la estación Policía se encontró la concentración más alta del gas entre todas las estaciones de la zona urbana de Manizales, incluso, superó las concentraciones de dos estaciones del área rural: La Fonda y Hostal. En la 3 campaña, la estación presentó la concentración más alta de toda la red de pasivos (10.75 µg/m^3). Los altos niveles del contaminante SO_2 encontrados en ésta estación están relacionados con la actividad industrial del sector. Se estima que emisiones difusas de industrias de curtiembre tienen una influencia en las mediciones de SO_2 en este punto.

La estación La Fonda de la zona rural, se ubicó en el tercer lugar de concentraciones de SO_2, después de Hacienda Termales y Policía Maltería. Las concentraciones medidas del gas en esta estación fueron 5.69 µg/m^3, 4.55 µg/m^3 y 7.41 µg/m^3, para la primera, segunda y tercera campaña, respectivamente. Estos datos presentan una disminución del 20% de la primera a la segunda campaña, y un aumento del 63% en la tercera campaña, respecto a la segunda. Por su ubicación, la mayor fuente de influencia de SO_2 en La Fonda, corresponde al Volcán Nevado del Ruíz, ubicad a 9.3 km de la estación.

Las estaciones Gobernación, S.C.A., Terminal y Niza, presentaron los niveles más altos de SO_2 después de las estaciones del área rural y la estación Policía Maltería. En Gobernación y S.C.A., las concentraciones del gas aumentaron en un 40 y 22%, respectivamente, entre la primera y la segunda campaña. Así mismo, al comparar las mediciones de la tercera campaña, se encontró en ambas un aumento del 17% respecto a la segunda. A diferencia de las estaciones rurales, la principal fuente de influencia de concentraciones de SO_2 en el sector del centro administrativo de Manizales, donde se ubican estas estaciones, son las fuentes móviles. Como se evidenció en la Sección 4 de este informe, las mayores emisiones vehiculares de SO_X se concentran en este sector, debido al alto flujo vehicular que circula sobre la Avenida del Centro y la Avenida Santander. Al igual que Gobernación y S.C.A., las concentraciones en la estación Terminal se ven influenciadas por el flujo de vehículos. Esta estación se ubicó contiguo a la Terminal de Transportes de Manizales, cerca de la Avenida Panamericana. Ambos factores favorecen las altas concentraciones de SO_2 encontradas allí, las cuales aumentaron en un 50% durante la segunda campaña, y en un 24% durante la tercera.

La estación Niza se ubicó en un sector muy poco transitado por vehículos, cerca de una vía terciaria. La concentración de SO_2 medida en este punto presentó una disminución del 31% durante la segunda campaña, y un aumento del 91% en la tercera. Se estima que las emisiones de fuentes fijas del sector de Milán son la principal influencia sobre las concentraciones de SO_2 registradas en esta estación.

La estación Piamonte, localizada contiguo a la Avenida Kevin Ángel, presentó una concentración de SO_2 más alta durante la segunda campaña, que durante la tercera, pasando de 5.16 a 3.82 µg/m^3. Se considera que las fuentes móviles ejercen mayor influencia sobre las concentraciones de SO_2 medidas en este sector.

En el caso de las estaciones Ingeominas, Palogrande y Nubia, que se ubicaron en sectores residenciales de Manizales, las concentraciones de SO_2 aumentaron durante la segunda campaña en 16, 37 y 83%, respectivamente. A pesar de su ubicación, las concentraciones en estas estaciones es afectada por el flujo vehicular de las Avenidas 12 de Octubre, Paralela y Vía al Aeropuerto, principalmente. Es posible que las emisiones industriales del sector de Maltería tengan un impacto adicional sobre las concentraciones medidas en la Nubia.

Óxidos de Nitrógeno (NO_X)

La Figura 6.32 muestra la variación en las concentraciones de NO_X medidas en las diez (10) estaciones de monitoreo pasivo, comunes para las tres campañas (febrero de 2015, noviembre de 2015 y febrero de 2016). En la Figura 6.32 se incluyen las estaciones Piamonte y Policía Maltería.

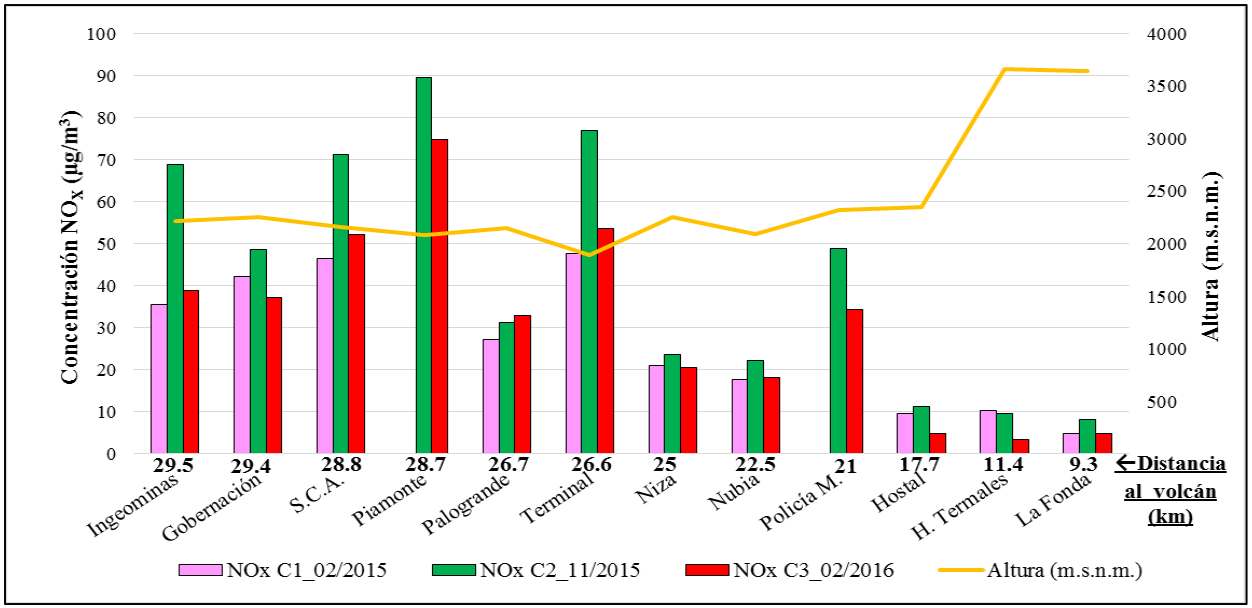
Las estaciones en la Figura 6.32a se organizaron de acuerdo a la distancia entre cada estación y volcán Nevado del Ruíz, de mayor a menor distancia al observar de izquierda a derecha. Se muestra también en la Figura la altura en m.s.n.m. de cada estación.

Las mayores concentraciones se presentaron en las estaciones de la zona rural, más alejadas del volcán Nevado del Ruíz y a menores alturas. Este corrobora la influencia de las fuentes antropogénicas sobre las concentraciones de NO_X medidas en aire ambiente. En general, se observó un aumento en las concentraciones del gas de la primera a la segunda campaña, y una disminución en las mediciones de la segunda a la tercera campaña de monitoreo.

En la primera campaña de monitoreo pasivo, la mayor concentración de NO_X se registró en la estación Terminal (47.67 µg/m^3). Esta estación es influenciada por el flujo de vehículos que entran y salen de la Terminal de Transportes de Manizales, así mismo por los vehículos que transitan por la Avenida Panamericana. Según reportes de su sitio web, cerca de 3’000.000 de pasajeros anuales transitan por la Terminal de Transportes. Las estadíasticas de esta entidad indican que durante el mes de febrero de 2015 se realizaron 23381 despachos con 198698 pasajeros. En noviembre de ese mismo año se realizaron 27049 despachos y 243328 pasajeros se movilizaron. Según estadísticas de 2016, en febrero de este año se realizaron 6903 despachos, movilizando 54894 pasajeros (T.T.M., 2016; T.T.M., 2016a).

La estación Piamonte registró las mayores concentraciones de NO_X desde que se incluyó en la red de monitoreo pasivo para la segunda campaña. Las concentraciones medidas en esta estación fueron de 89.65 µg/m^3 en la segunda campaña, y 74.81 µg/m^3 en la tercera campaña, equivalente a una disminución del 17%. Los vehículos que se movilizan sobre la Avenida Kevin Ángel, impactan sobre las concentraciones de NO_X medidas en esta estación, ubicada cerca de este corredor, que conecta la zona residencial con el centro administrativo de Manizales, así como con otros municipios como Neira, Caldas.

En orden de concentraciones, las estaciones S.C.A., Gobernación e Ingeominas, se ubican en tercer lugar después de Terminal y Piamonte. En particular, la dinámica vehicular de la Avenida del Centro (cerca a las estaciones SCA y Gobernación), y la Avenida 12 de Octubre (cerca a la estación Ingeominas), impacta en las concetraciones de NO_X medidas en estos tres puntos. La influencia de las avenidas sobre las concentraciones de NO_X radica en que la principal fuente de NO_X son las fuentes móviles. La concentración de NO_X en S.C.A. en la primera campaña, fue de 46.42 µg/m^3, en la segunda de 71.27 µg/m^3 y en la tercera de 52.32 µg/m^3. En S.C.A. la concentración de NO_X aumentó en un 54% en la segunda campaña, y disminuyó en un 27% en la tercera. En el caso de la estación Gobernación, la concentración de NO_X aumentó en la segunda campaña en un 15%, pasando de 42.33 a 48.69 µg/m^3. Entre la segunda y la tercera campaña, la concentración en este punto disminuyó un 24%, pasando de 48.69 a 37.24 µg/m^3. La estación Ingeominas ubicada en un sector residencial, pero influenciada por la presencia de una vía secundaria de importancia en el sector de Chipre, presentó también un aumento en los niveles de NO_X entre la primera y la segunda campaña, igual al 94%, pasando de 35.55 a 68.95 µg/m^3. De la segunda a la tercera campaña las concentraciones disminuyeron en un 44 %, pasando de 68.95 a 38.86 µg/m^3.



(a)

(b)

Figura 6.32. Variación de concentraciones de óxidos de nitrógeno (NO_X) entre campañas de monitoreo pasivo

La concentración de NO_X medida en la estación Policía Maltería durante la segunda y tercera campaña, ubican a la estación después de las estaciones Piamonte, Terminal, S.C.A., Gobernación e Ingeominas. Los niveles del gas medidos en Policía se relacionan con el flujo de vehículos, en gran medida de la categoría Pesados, que circulan por la vía que conduce de Manizales a Bogotá, cercana a la estación de monitoreo. La concentración de NO_X medida en la segunda campaña fue de 48.9 µg/m^3 y de 34.47 µg/m^3 en la tercera, representando una disminución del 30%.

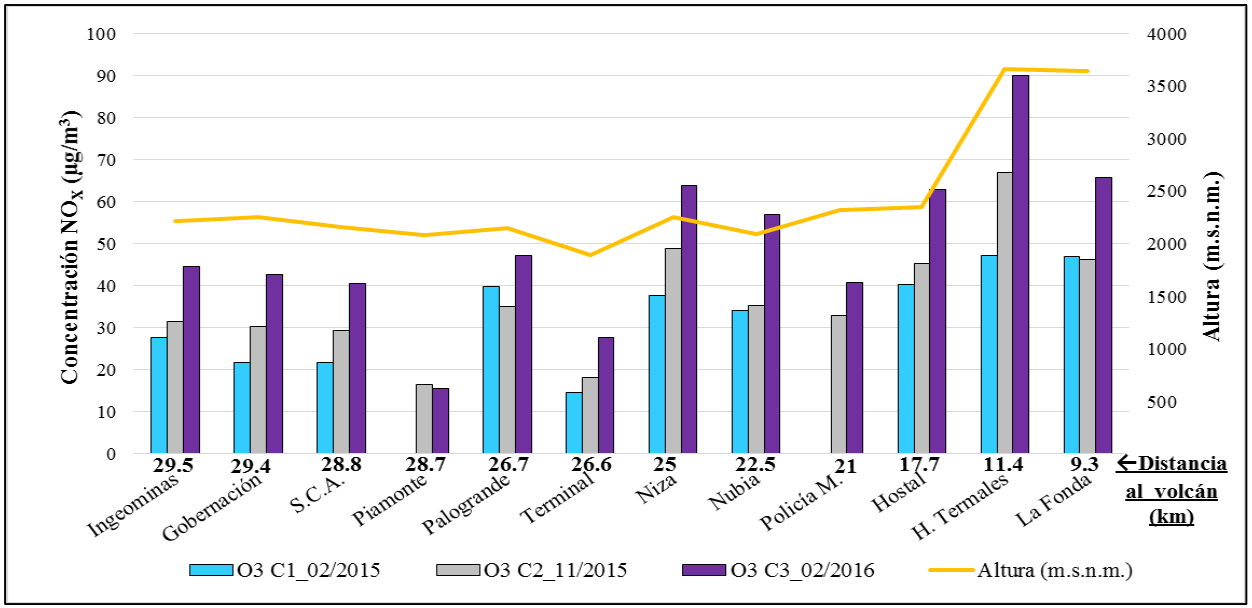
Las estaciones Niza, Nubia y Palogrande se ubican en quinta posición después de los grupos de estaciones mencionados de acuerdo a los niveles medidos de NO_X. Estas tres estaciones se ubican en zonas residenciales, lo cual implica un menor número de vehículos en circulación, si se compara con las estaciones del sector del centro de la ciudad. En el caso de la estación Niza las concentraciones de NO_X no presentaron una gran variación entre campañas, con valores de 20.95, 23.69 y 20.56 µg/m^3, en la primera, segunda y tercera campaña, respectivamente. El flujo vehicular que circula en las vías cercanas a Niza es mucho más bajo y esto se ve reflejado en las concentraciones medidas del gas. Por su parte, Palogrande presentó porcentajes de aumento en niveles de NO_X entre la primera y segunda campaña (15%) y la segunda y tercera campaña (5%). Los niveles de NO_X en Nubia mostraron el mismo patrón que se presentó en la mayoría de las estaciones, con un aumento para noviembre de 2015 (25%) y una disminución para febrero de 2016 (19%).

Las estaciones de la zona rural, Hostal, H. Termales del Ruíz y La Fonda, registraron las menores concentraciones de NO_X. La presencia de vehículos en esta zona rural de Villamaría es muy bajo, lo cual se ve reflejado en las bajas concentraciones de NO_X. En Hostal, la concentración pasó de ser 9.69 µg/m^3 en la primera campaña, a 11.25 en la segunda (aumento del 16%). La concentración en la tercera campaña de monitoreo pasivo fue igual a 4.84 (disminución del 57%). En H. Termales la concentración mantuvo una tendencia a disminuir de una campaña a otra, partiendo de 10.34 µg/m^3 en la primera, a 9.72 µg/m^3 en la segunda y finalmente 3.41 µg/m^3 en la tercera, equivalente a una reducción del 65%.

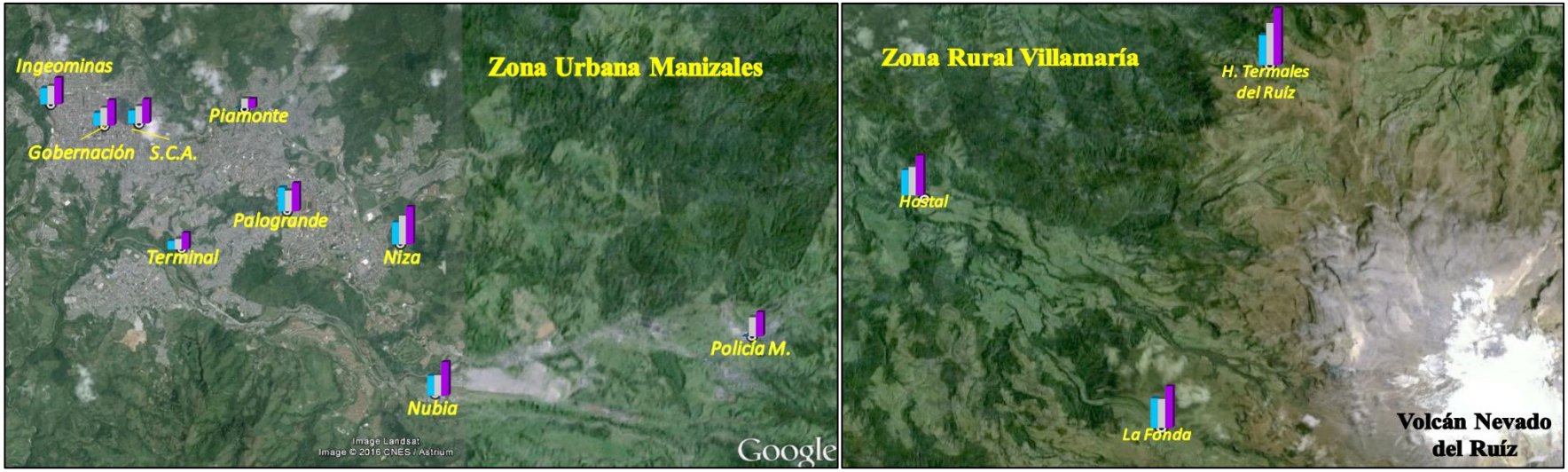
Ozono (O_3)

El ozono troposférico es un gas altamente oxidante que se produce a partir de reacciones químicas en la atmósfera, y no proviene directamente de una fuente de emisión. Sin embargo, sus precursores, los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV's), el Metano (CH_4) y los Óxidos de Nitrógeno (NO_X), si llegan a la atmósfera directamente desde de fuentes de emisión que pueden ser fijas, móviles o naturales. Así pues, el comportamiento en las concentraciones de O_3 está determinado por la presencia de los compuestos precursores y las condiciones meteorológicas, ya que es necesaria la presencia de luz solar para su formación (Seinfeld & Pandis, 2006).

La Figura 6.33 presenta la variación en las concentraciones medidas del contaminante, entre las tres campañas de monitoreo pasivo. Se incluyen las 10 estaciones de monitoreo comunes para las tres campañas, así como las estaciones Piamonte y Policía Maltería. Las estaciones en esta Figura se ordenaron de acuerdo con la cercanía del volcán Nevado del Ruíz, ubicando las más lejana en el costado izquierdo (Ingeominas a 29.5 km) y la más cercana en el extremo derecho (La Fonda a 9 km). Así mismo, en la figura de incluye una línea que representa la altura de cada estación de monitoreo.



(a)



(b)

Figura 6.33. Variación de concentraciones de ozono troposférico (O_3) entre campañas de monitoreo pasivo

A priori, se observa que las concentraciones de O_3 aumentaron de la primera a la segunda campaña y de la segunda a la tercera, conservando la tendencia. Durante la primera campaña, las concentraciones de O_3 se encontraron en el rango 14.65 a 47.17 µg/m^3. Respecto a la segunda campaña, el ozono troposférico varió entre 16.63 y 67.02 µg/m^3. Finalmente, las concentraciones del contaminante variaron entre 15.57 y 90.14 µg/m^3, durante la tercera campaña.

A partir de la Figura 6.33 se evidencia que las mayores concentraciones de O_3 se registraron en área rural en las estaciones más cercanas al volcán Nevado del Ruíz (a mayores alturas): H. Termales del Ruíz, La Fonda y Hostal. En particular, las mayores concentraciones medidas en toda la red de monitoreo pasivo se midieron en H. Termales, con un aumento del 42% en la segunda campaña (de 47.17 µg/m^3 en la primera campaña, a 67.02 µg/m^3), seguido por un aumento del 34% en la tercera campaña (paso a 90.14 µg/m^3). En La Fonda se registró una concentración casi constante entre la primera y segunda campaña, de 46.92 µg/m^3 y 46.38 µg/m^3, respectivamente. En la tercera campaña un aumento del 42% tuvo lugar en esta estación, con una medición de 65.78 µg/m^3. Para el caso de Hostal, las concentraciones medidas en cada campaña fueron de 40.31, 45.38 y 63.03 µg/m^3. Esto representó un aumento del 13% en la segunda campaña y del 39% en la tercera.

Para comprender por qué las mayores concentraciones de O_3 se encontraron en la zona rural, es importante describir el mecanismo de formación de O_3 en la tropósfera, representado en las siguientes reacciones químicas (Guicherit & Roemer, 2000).

$$NO_2 + hv \rightarrow NO + O(^3P) \qquad \Lambda \leq 400 \text{ nm} \quad (1)$$

$$O(^3P) + O_2 + (M) \rightarrow O_3 + (M) \quad (2)$$

En presencia de NO, el O_3 reacciona con éste para producir NO_2 nuevamente:

$$O_3 + NO \rightarrow NO_2 + O_2 \quad (3)$$

Las reacciones (1) a (3) por si mismas, en ausencia de CO o compuestos orgánicos, no producen una gran cantidad de ozono, ya que en realidad se trata de un mecanísmo que recicla ozono y óxidos de nitrógeno. En la realiadad, las masas de aire suelen estar contaminandas por la presencia de CO y compuestos orgánicos, en estas circunstancias las reacciones involucradas son:

$$CO + OH + O_2 \rightarrow CO_2 + HO_2 \quad (4)$$

$$RH + OH \rightarrow R + H_2O \qquad (5)$$

$$R + O_2 + (M) \rightarrow RO_2 + (M) \quad (6)$$

$$RO_2 + NO \rightarrow RO + NO_2 \quad (7)$$

$$RO + O_2 \rightarrow HO_2 + CARB \quad (8)$$

$$HO_2 + NO \rightarrow OH + NO_2 \quad (9)$$

$$NO_2 + hv \rightarrow NO + O \qquad (1)$$

$$O + O_2 + (M) \rightarrow O_3 + (M) \quad (2)$$

Donde:

RH= compuestos orgánicos (metano (CH_4) y compuestos orgánicos volátiles no metanos (COVNM));

M= molécula necesaria para estabilizar los intermediarios excitados que se forman (Finlayson-Pitts & Pitts, 1993);
CARB= una especie carbonilo (RCHO) o una cetona (RCRO)

En el mecanismo anterior, se observa que las reacciones (1) y (2) finalizan en el ciclo de formación, sin embargo, los compuestos orgánicos volátiles (RH) actúan como inicializadores de la cadena de formación de O_3.

Según la reacción (4) es necesaria la presencia de iones hidroxilo (OH) para la oxidación del monóxido de carbono, así como para la oxidación de los compuestos orgánicos volátiles. No obstante, se ha encontrado que, a nivel troposférico, los COV's y los NO_X compiten por los radicales OH. La reacción OH-NO_2 remueve los iones OH e impide que éstos ingresen a la ruta descrita a partir de la reacción (5) en la cual oxidarían los compuestos orgánicos, retardando así la formación de ozono. Se ha demostrado que bajo ciertas condiciones los iones OH pueden preferir reaccionar con los COV's, lo cual favorece directamente la formación de O_3 (Seinfeld & Pandis, 2006). La ruta seguida por los iones OH depende de la relación inicial de concentraciones COV's/NO_X. Bajo una relación COV's/NO_X alta, la reacción OH-COV se ve favorecida, formando así ozono troposférico; bajo una relación COV's/NO_X baja, la reacción OH-NO_2 se favorecerá, lo cual puede disminuir la tasa de formación de ozono.

Según Finlayson-Pitts & Pitts (1993), las altas relaciones COV's/NO_X son típicas en áreas suburbanas y rurales, mientras que bajas relaciones COV's/NO_X suelen ocurrir en centros urbanos. Así pues, si se analizan las concentraciones encontradas de O_3 en función de las concentraciones de NO_X medidas por monitoreo pasivo, se podría decir que en la zona rural del área de estudio, prevalece una relación COV's/NO_X alta, es decir, las concentraciones de los COV's son mayores que las concentraciones de NO_X, hecho que resulta coherente con las bajas concentraciones del compuesto, que se registraron en las estaciones rurales (ver Figura 6.32). Así mismo, diversos estudios alrededor del mundo han demostrado que las fuentes biogénicas (bosques, cultivos, pastizales, etc.) son grandes contribuyentes en emisiones de COV's (EPA, 2016; Atkinson & Arey, 2003). Este tipo de fuentes se encontraron en abundancia en el área rural del municipio de Villamaría donde se ubicaron las estaciones de monitoreo pasivo

La influencia de las concentraciones iniciales de COV's y los NO_X, sobre la formación y concentraciones de O_3, se puede ver representada a través de los diagramas de *Isopletas de Ozono*, los cuales muestran una relación establecida entre las concentraciones de los precursores y la concentración del O_3, a través de líneas de isoconcentración (Seinfeld & Pandis, 2006). La Figura 6.34 muestra el diagrama de isopleta, donde se evidencia que una alta relación COV's/NO_X, pueden favorecer concentraciones de O_3 entre 40 y 50 $\mu g/m^3$, similares a las concentraciones encontradas en la zona rural de este estudio, donde se conoció que la concentración media de NO_X para la zona rural es 10 $\mu g/m^3$ aproximadamente. Dicha concentración de NO_X se representa mediante la línea roja horizontal trazada sobre la isopleta de O_3.

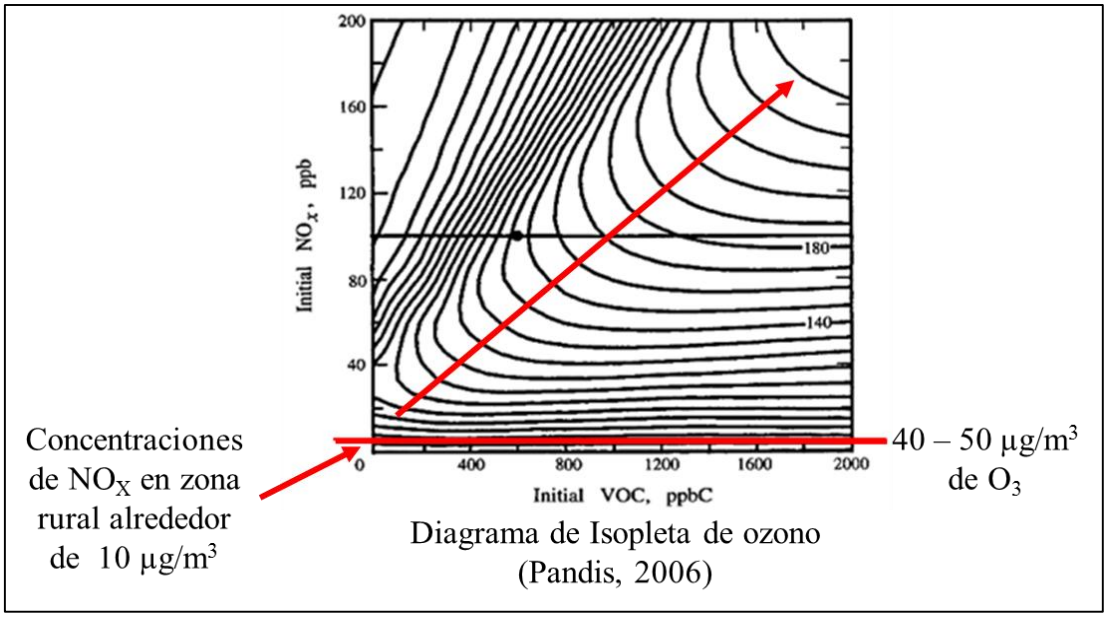


Figura 6.34. Diagrama de Isopleta de ozono. (Tomado de: Seinfeld & Pandis, 2006)

Las menores concentraciones de O_3 registradas en las estaciones de la zona urbana de Manizales están relacionadas con la disponibilidad de precursores. Aunque en éstas estaciones las concentraciones de NO_X fueron más altas, como se describió el mecanismo de reacción favorece mayores concentraciones de O_3 bajo altas concentraciones iniciales de COV's.

Las estaciones Niza y Nubia presentaron las mayores concentraciones de O_3 en la zona urbana. La concentración de O_3 en Niza durante la primera campaña fue de 37.64 µg/m^3, y pasó a ser igual a 48.98 µg/m^3 en la segunda campaña, y 63.78 µg/m^3 en la tercera. Ambos aumentos fueron del 30%. Por su parte, la concentración en Nubia fue de 34.22 µg/m^{3}para la primera campaña, de 35.23 µg/m^3 en la segunda y 57 µg/m^3 en la tercera. En esta estación los aumentos de concentraciones fueron del 3% y del 62%.

De acuerdo a las medidas de concentración, en tercer lugar se ubica el grupo de estaciones conformado por Ingeominas, Gobernación, Palogrande, S.C.A. y Policía Maltería. En este grupo las concentraciones de O_3 oscilaron entre 20 y 40 µg/m^3 aproximadamente, durante las tres campañas de monitoreo pasivo.

Finalmente, las menores concentraciones de O_3 se midieron en Piamonte y Terminal. En particular, estas dos estaciones presentaron las más altas concentraciones de NO_X, durante las campaña de monitoreo pasivo. Lo anterior deja de nuevo en evidencia la importancia de los precursores dominantes en el ciclo de formación de O_3. En la estación Piamonte, la concentración de ozono en la segunda campaña fue igual a 16.63 µg/m^3, e igual a 15.57 µg/m^3, con una leve disminución del 6%. En la estación Terminal, la primera campaña mostró una concentración de 14.65 µg/m^3, pasando a 18.09 µg/m^3 en la segunda y finalmente 27.82 µg/m^3 en la tercera campaña de monitoreo pasivo. Los porcentajes de aumento en esta estación fueron 23 y 54%.

Análisis de condiciones meteorológicas durante las campañas de monitoreo pasivo

La Organización Panamericana de la Salud (OPS) afirma que las condiciones meteorológicas desempeñan un rol fundamental en la calidad del aire, ya que de éstas depende el transporte y dispersión de los contaminantes emitidos (Cortés et al., 2015). Las principales variables meteorológicas que afectan la movilidad de contaminantes en el aire son la velocidad y la dirección del viento. Otras variables como la

precipitación, la humedad, la temperatura y la radiación solar, influyen en las transformaciones químicas y la deposición húmeda y seca de estos compuestos (Tiwary & Colls, 2012).

Siete estaciones meteorológicas e hidrometeorológicas fueron seleccionadas para analizar el comportamiento de las variables temperatura, dirección y velocidad del viento, humedad relativa, radiación solar y precipitación, durante las tres campañas de monitoreo pasivo, con el objetivo de evaluar el posible impacto de estas variables sobre las concentraciones medidas de los contaminantes SO_2, NO_X y O_3. Las estaciones meteorológicas e hidrometeorológicas empleadas para este análisis pertenecen a la red de monitoreo de Caldas y a las redes de la Unidad del Gestión del Riesgo y de monitoreo de quebradas de Manizales. La selección de estas estaciones se basó en su cercanía a las estaciones de monitoreo pasivo, lo que permitiese representar de la forma más acertada las condiciones predominantes en cada estación de monitoreo pasivo durante las campañas. Otro factor determinante en la selección de las estaciones meteorológicas e hidrometeorológicas, fue la disponibilidad de datos meteorológicos correspondientes a los periodos del monitoreo pasivo.

La Tabla 6.16 presenta la lista de estaciones meteorológicas e hidrometeorológicas seleccionadas. Las estaciones hidrometeorológicas han sido instaladas con el objetivo de monitorear ríos y quebradas, por esto, las variables medidas en estas estaciones son menos al compararlas con estaciones meteorológicas: temperatura, precipitación, caudal y nivel.

Tabla 6.16. Estaciones meteorológicas e hidrometeorológicas para análisis durante monitoreo pasivo

Estación	Tipo	Coordenadas	Variables Medidas
Hospital	Meteorológica	5° 3’ 46.6” N 75° 30’ 2.1” W	Temperatura (°C) Dirección (grados) y Velocidad del Viento (m/s) Humedad Relativa Radiación Solar (W/m^2) Precipitación (total mm)
Niza	Meteorológica	5° 3’ 15.57” N 75° 28’ 47.67” W	Temperatura (°C) Dirección (grados) y Velocidad del Viento (m/s) Humedad Relativa Radiación Solar (W/m^2) Precipitación (total mm)
Quebrada Palogrande-Terminal de Transportes	Meteorológica	5° 3’ 0.69” N 75° 30’ 23.16” W	Temperatura (°C) Dirección (grados) y Velocidad del Viento (m/s) Humedad Relativa Radiación Solar (W/m^2) Precipitación (total mm)
Enea	Meteorológica	5° 1’ 44.1” N 75° 28’ 20” W	Temperatura (°C) Dirección (grados) y Velocidad del Viento (m/s)

Estación	Tipo	Coordenadas	Variables Medidas
			Humedad Relativa Radiación Solar (W/m^2) Precipitación (total mm)
Subestación Peralonso CHEC	Meteorológica	5° 4’ 26.16” N 75° 29’ 57.82” W	Temperatura (°C) Dirección (grados) y Velocidad del Viento (m/s) Humedad Relativa Radiación Solar (W/m^2) Precipitación (total mm)
Finca La Paz	Meteorológica	5° 2’ 3.39” N 75° 25’ 9.27” W	Temperatura (°C) Precipitación (total mm)
Molinos	Hidrometeorológica	4° 54’ 53.8” N 75° 21’ 55.7” W	Temperatura (°C) Precipitación (total mm)

En las Tablas 6.17 y 6.18 se presentan los valores máximos, mínimos y promedio de las variables temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar y precipitación, medidas en las siete estaciones meteorológicas e hidrometeorológicas, durante las tres campañas de monitoreo pasivo. La información fue recolectada desde el Centro de Datos e Indicadores Ambientales de Caldas (CDIAC), las bases de datos meteorológicas incluidas en el Anexo 6.1, y el sitio web del Instituto de Estudios Ambientales de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales (IDEA).

La tercera campaña de monitoreo pasivo fue más cálida que la primera y segunda campaña. Las temperaturas máximas en esta campaña alcanzaron hasta los 29°C en algunas estaciones, en comparación con los 25°C de la primera y 26°C de la segunda. Evidentemente, factores de variabilidad climática como lo es el Fenómeno del Niño, influenciaron el comportamiento de esta variable de un año a otro. De la misma manera, los valores de radiación solar fueron más altos en la campaña de febrero de 2016, con valores medios entre 120 y 390 W/m^2. Mayor radiación solar fue medida en las estaciones Enea, Niza y Hospital. Durante la primera campaña, la radiación solar promedio entre estaciones varió en el rango de 310 a 360 W/m^2 aprox., y en la segunda campaña la variación se encontró entre 100 y 320 W/m^2 aprox. En general, los monitoreos realizados en febrero estuvieron acompañados por temperaturas y valores de radiación solar ligeramente más altos que en noviembre, asociado con procesos variabilidad climática intra-anual.

Mayores valores de radiación solar favorecen la formación de ozono. Se observó que en general las concentraciones medidas de este contaminante aumentaron en la segunda y tercera campaña de monitoreo pasivo. El aumento en las concentraciones de este contaminante pudo estar asociado con variación en los precursores y aumentos en la radiación solar, principalmente en la tercera campaña, donde se registraron los valores más altos del gas.

Tabla 6.17. Valores mensuales de temperatura y humedad relativa durante campañas de monitoreo pasivo

Estación Meteorológica	Estación de Monitoreo Pasivo Asociada	Temperatura (°C)									Humedad Relativa (%)								
		Máxima			Mínima			Media			Máxima			Mínima			Media		
		C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
Hospital	Gobernación	23.7	23.3	27	14.6	13.8	15.3	17.4	16.9	19.5	99	93	92	49	63	48	85	87	80
	Palogrande																		
	S.C.A.																		
Niza	Niza	25.9	25.2	27.2	14.8	13.9	15.6	18.8	18.1	19.5	87	83	86	44	63	54	81.5	80	80
Quebrada Palogrande-Terminal de T. Aranjuez	Terminal	--	26.5	29.5	--	14.1	15.3	--	18.6	19.8	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Enea	Nubia	25.6	22.6	26	10.2	7.1	7	18.7	14.4	16	100	100	100	40	57	48	84	89	85
Subestación Peralonso CHEC	Piamonte	NA	23.7	26.3	NA	12.3	13.2	NA	13.6	14.8	NA	93	93	NA	56	49	NA	87.6	87
Finca La Paz	Policía Maltería	NA	20.9	22.4	NA	10.6	11.1	NA	14	15.2	NA	99	99	NA	61	66	NA	94	89
Molinos	La Fonda	--	10.3	13.1	--	0	2.3	--	4.9	6.9	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Hostal																		
	H. Termales																		

C1: 1ª Campaña de monitoreo
C2: 2ª Campaña de monitoreo
C3: 3ª Campaña de monitoreo
NA: No Aplica. Estación de monitoreo pasivo no operó en esa campaña. --: Dato no disponible/no reportado

Tabla 6.18. Valores mensuales de velocidad del viento, radiación solar y precipitación durante campañas de monitoreo pasivo

Estación Meteorológica	Estación de Monitoreo Pasivo Asociada	Velocidad del Viento (m/s)[a]						Radiación Solar (W/km^2)[a]						Precipitación Total (mm)		
		Máxima			Media			Máxima			Media					
		C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
Hospital	Gobernación Palogrande S.C.A.	7.2	6.7	--	1.8	1.8	--	1239	1290	1366	314	274	334	83.8	136.6	207
Niza	Niza	5.4	6.7	4.9	1.5	1.5	0.4	1354	1334	1248	337	301	350	44.2	182.6	74.2
Quebrada Palogrande-Terminal de T. Aranjuez	Terminal	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	39.8	118.4	159.8
Enea	Nubia	6.3	5.8	7.6	1.9	1.7	1.8	1178	1227	1230	368	324	397	42.3	106.1	--
Subestación Peralonso CHEC	Piamonte	NA	4.5	4	NA	0.3	0.5	NA	1099	1116	NA	107	125.8	NA	93.2	181.2
Finca La Paz	Policía Maltería	NA	6.7	5.4	NA	0.4	0.3	NA	1104	168.8	NA	98.9	136.7	NA	116.2	146.4
Molinos	La Fonda Hostal H. Termales	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	93	63

C1: 1ª Campaña de monitoreo
C2: 2ª Campaña de monitoreo
C3: 3ª Campaña de monitoreo

a. Valor mínimo de esta variable no se presenta porque es igual a cero
b. NA: No Aplica. Estación de monitoreo pasivo no operó en esa campaña. --: Dato no disponible/no reportado

La campaña 2 ejecutada en noviembre de 2015 fue la más húmeda (87-94 %) y con mayores precipitaciones entre las tres campañas (precipitación total variando entre 83 y 182 mm según la estación meteorológica). En la estación Niza por ejemplo, la precipitación total del periodo fue de 182.6 mm, mientras que la misma estación registro valores de precipitación iguales a 44.2 mm y 74.2 mm en las campañas 1 y 3, respectivamente. La información de la estación Molinos, asociada con las estaciones de monitoreo pasivo de la zona rural, mostró también una mayor precipitación durante la segunda campaña (93 mm), en comparación con la tercera (63 mm) (no existen datos disponibles de la primera campaña). La precipitación y la humedad pueden contribuir a la deposición húmeda de contaminantes atmosféricos como el SO_2. Este compuesto puede reaccionar en el agua para formar sulfatos y ácido sulfúrico, componentes de la lluvia ácida. En el caso de la estación Niza por ejemplo, las concentraciones del contaminante presentaron una leve disminución en la segunda campaña (pasando de 4.9 µg/m^3 en la primera campaña a 3.39 µg/m^3 en la segunda), la cual estuvo acompañada por mayores lluvias (83 a 182 mm).

Diferentes estudios han puesto en evidencia que mayores concentraciones de NO_X tienen lugar en días más húmedos y con bajos valores de temperatura y radiación solar (Elminir, 2005; Kalbarczyk & Kalbarczyk, 2007; Hosseinibalam & Hejazi, 2012), debido a la fotoquímica asociada con la conversión de los NO_X en compuestos como el O_3. Los resultados de las campañas de monitoreo coinciden con lo reportado en la literatura, puesto que las más altas concentraciones del gas, tanto en la zona urbana (22.33 – 77.02 µg/m^3) como en la zona rural (8.10 – 11.25 µg/m^3), se presentaron durante el periodo más húmedo correspondiente a noviembre 2015 (87-94 %).

6.4 Conclusiones

Los análisis sobre las concentraciones de material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$, demostraron en general incrementos en el año 2012. Se encontraron mayores concentraciones de los compuestos, en zonas con mayor impacto por influencia de emisiones antropogénicas provenientes de fuentes móviles (como es el caso de la estación Liceo), con un valor de concentración media para el periodo analizado de 41.87 µg/m^3, y posiblemente fuentes fijas en la zona industrial de Milán donde se obtuvo un valor de concentración media para el periodo analizado de 33.88 µg/m^3. Fue posible establecer un diagnóstico comparando los niveles de PM_{10} y $PM_{2.5}$ medidos en las estaciones Palogrande, Nubia, Gobernación, Milán y Liceo, con los niveles máximos permisibles establecidos en la Resolución 610 de 2010 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Se observó que en ninguna de las estaciones se superaron los límites anuales establecidos en la normatividad vigente. La variación mensual de las concentraciones de material particulado, mostró que en los meses de febrero altas concentraciones en de material particulado se registran en las estaciones de monitoreo del SVCA, y menores concentraciones se registran en los meses de diciembre. La distribución de concentraciones promedio semanal mostró en general mayores valores durante los días laborales, y una disminución los fines de semana. Sin embargo, las estaciones Gobernación y Liceo presentaron bajas concentraciones los días lunes, hecho que no corresponde a las dinámicas vehiculares que influyen en las concentraciones de material particulado en estos puntos. El origen de dicho comportamiento se discutirá con la Corporación.

Se realizó también un análisis que para estimar la relación entre las concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10}. Se encontró una buena correlación lineal entre estos dos contaminantes por lo cual es posible predecir

las concentraciones de $PM_{2.5}$ a partir de concentraciones de PM_{10}, además, un coeficiente de correlación de Pearson igual a 0.90 sugiere que ambos contaminantes provienen de la misma fuente de emisión. Esto puede representar un ahorro en costos de operación del equipo o una oportunidad para trasladarlo a otros puntos de la ciudad y realizar este análisis. La relación $PM_{2.5}/PM_{10}$ fue igual a 0.63, similar a las reportadas para ciudades principales del país y otras ciudades alrededor del mundo. Este valor sugiere que el material particulado es emitido por procesos de combustión, siendo el principal, los procesos de motores de combustión interna, lo cual había sido sugerido por estudios anteriores.

La Resolución 610 establece también los niveles máximos permisibles para los gases SO_2, CO y O_3. Se encontró que el gas SO_2 no supera los niveles máximos reglamentados, establecidos en 250 µg/m^3 y 750 µg/m^3, para periodos de exposición de 24 horas y 3 horas, respectivamente. La concentración media para 3 horas de exposición fue de 2.52 µg/m^3 de SO_2, y la concentración media para 24 horas fue de 2.51 µg/m^3. En el caso del O_3, se observó que el gas no superó las concentraciones máximas permitidas para los periodos de 1 y 8 horas, con valores promedio de 32.52 µg/m^3 y 32.46 µg/m^3, respectivamente. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2005), el límite máximo recomendado para SO_2 en aire ambiente es de 20 µg/m^3 para un periodo de exposición de 24 horas, límite que no ha sido superado en Manizales. Para O_3 el límite recomendado por la OMS es 100 µg/m^3 en un periodo de 8 horas. El límite máximo establecido por dicha entidad para O_3 no ha sido superado en Manizales. En el caso del monóxido de carbono, las guías de calidad del aire no presentan concentraciones máximas recomendadas.

No es preciso dar una conclusión sobre el comportamiento de concentraciones de CO, debido a los inconvenientes con la correcta calibración del monitor de CO. El 17 de junio de 2015 se realizó la visita de mantenimiento a la estación automática que monitorea los gases SO_2, CO y O_3. En dicha oportunidad no fue posible calibrar completamente el monitor de CO. Actualmente CORPOCALDAS adelanta los trámites necesarios para lograr la calibración de este monitor. Una vez esto se realice, se ajustarán las concentraciones de CO registradas hasta la fecha.

Según las rosas de vientos obtenidas para la estación meteorológica Liceo en los diferentes períodos, se recomienda a la Corporación realizar una revisión de la veleta para medición de dirección de vientos de la estación, pues esta podría encontrarse averiada según los patrones de dirección y velocidad de vientos observados, los cuales no presentaban una variación importante en ninguno de los años analizados. Este comportamiento no concuerda con los resultados obtenidos para la estación Hospital e Ingeominas, los cuales si presentaban patrones diferenciados para período diurno y nocturno en los vientos.

La estación meteorológica móvil instalada en febrero de 2015 en Gobernación, mostró un buen desempeño en general y las variables medidas se encuentran dentro de los rangos registrados por las estaciones Hospital e Ingeominas. Se observó que en la estación meteorológica de Gobernación, también tiene lugar el cambio en los patrones de vientos del día y la noche, tal como lo registran las estaciones con las que se comparó la estación móvil. Los datos meteorológicos de esta nueva estación se emplearon satisfactoriamente para analizar datos de calidad del aire.

Los contaminantes SO_2 y O_3 medidos por monitoreo activo en la estación Gobernación, mostraron variaciones importantes en relación con las variables meteorológicas dirección del viento, temperatura, radiación solar y humedad relativa. Para SO_2 se registraron mayores valores cuando los vientos provenían del sureste y suroeste mostrando la posible influencia tanto de la zona industrial de la ciudad como de las emisiones del Volcán Nevado del Ruiz. También se observó una reducción en este contaminante cuando se presentaba un mayor valor de humedad relativa, la cual se relaciona indirectamente con el fenómeno de precipitación, mostrando la influencia del fenómeno de lavado atmosférico sobre la inmisión de este contaminante. Para el O_3, al ser un contaminante secundario, producido por la reacción de los NO_X con los COV's, en presencia de luz solar, se encontró una fuerte influencia de las variables meteorológicas estudiadas sobre los niveles de inmisión, evidenciando también la relación directa que hay entre las variables temperatura y la radiación solar, e inversa entre estas y la humedad relativa. A mayores valores de temperatura y radiación solar y menores valores de humedad relativa se midieron los mayores niveles de ozono troposférico.

A nivel global, el análisis estadístico de datos demostró la importancia del correcto funcionamiento de los equipos encargados del monitoreo de los contaminantes atmosféricos PM_{10}, $PM_{2.5}$, SO_2, O_3 y CO, ya que esto permite consolidar bases de datos de calidad del aire y analizar el comportamiento de los contaminantes en el tiempo, así como comparar con los niveles máximos establecidos en la Resolución 610 de 2010. Se espera que tanto la Corporación Ambiental de Caldas como el Grupo de Trabajo Académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental, trabajen para que los equipos operen correctamente y durante los periodos requeridos, con el fin de cumplir con los porcentajes de captura y validez de datos establecidos en el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire (MAVDT, 2010).

Según la comparación de concentraciones de SO_2 y O_3 medidas en Manizales, Bogotá, Cali, Valle de Aburrá y Bucaramanga, se encontró que respecto al gas SO_2 en 2014 y 2015, Manizales se ubicó en cuarto lugar, con una concentración media anual de 1.98 y 2.26 $\mu g/m^3$ en 2014 y 2015, después de Valle de Aburrá con concentraciones de SO_2 de 15.6 y 11.14 $\mu g/m^3$ en 2014 y 2015, respectivamente, Cali con concentraciones de 8 y 10 $\mu g/m^3$ en 2014 y 2015, respectivamente, y Bogotá con concentraciones de 7.3 $\mu g/m^3$ en 2014. Para este contaminante, las concentraciones de SO_2 en Bucaramanga no fueron reportadas. En el caso de O_3, fue posible comparar las concentraciones de Manizales en 2014 con las concentraciones medidas en Bogotá y Bucaramanga. Para este contaminante, la ciudad de Manizales ocupó el segundo lugar con una concentración media para un periodo de 8 horas, equivalente a 32.38 $\mu g/m^3$. En primer lugar se ubicó Bucaramanga, con una concentración de 66.$\mu g/m^3$ y en tercer lugar se encontró Bogotá, con concentración de 31 $\mu g/m^3$ en 2014.

7. RECOMENDACIONES PARA LA CORPORACIÓN AMBIENTAL PRODUCTO DEL TRABAJO DESARROLLADO DURANTE EL CONVENIO

Esta sección pretende consolidar una lista de recomendaciones para revisión por parte de la Corporación, con el fin de garantizar el funcionamiento adecuado del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire de Manizales, y disponer de información útil para evaluaciones futuras sobre el diagnóstico y seguimiento de la calidad del aire a nivel local, a través de la actualización de inventarios de emisiones y la continuidad en los monitoreos (activo y pasivo) de contaminantes atmosféricos.

7.1. Recomendaciones en el componente de Inventario de Emisiones por Fuentes Móviles

Uno de los aspectos de mayor relevancia en la conformación del inventario de emisiones por fuentes móviles es la definición de la distribución tecnológica del parque automotor. Este proceso se realizó principalmente a partir de revisión de información secundaria suministrada por los Centros de Diagnóstico Automotor (CDAs). La información de los CDAs fue suministrada por la Corporación, teniendo en cuenta que estos centros están obligados a reportar la lista de vehículos que son sometidos a revisión tecnicomecánica y los resultados de dicha revisión.

Entre la información que suministran los CDAs hay información relevante para el cálculo de las emisiones por fuentes móviles, la cual tiene que ver con características propias de los vehículos (Tabla 7.1). Sin embargo, la mayoría de CDAs consultados solo reportaron la información que se cataloga como general y no reportaron datos específicos de los vehículos, por lo que fue necesario consultar otras fuentes para completar la base de datos que permitiera definir la distribución tecnológica de la flota. Este proceso requirió un gran esfuerzo por parte del grupo de trabajo ya que se debieron complementar uno a uno los registros reportados por los CDAs.

También es importante garantizar la continua actualización del inventario de emisiones que permita hacer un seguimiento y evaluar el impacto de las políticas asociadas con el sector de transporte y movilidad de la ciudad. Además, que sirvan como insumo para la modelación de la calidad del aire de la ciudad, actividad que se está ejecutando en el marco de una tesis de doctorado de un estudiante perteneciente al GTAIHA y que es de suma importancia continuar realizando.

Recomendación:

- Que la Corporación solicite a los Centros de Diagnóstico Automotor que incluyan en las bases de datos que entregan, la información general y específica descrita en la Tabla 7.1. Este proceso no constituye un requerimiento imposible para estos CDA, ya que están en capacidad de registrar toda la información disponible del vehículo. Así lo demuestra el CDA Canguro para el cual se disponía de la mayoría de información, faltando únicamente el peso bruto vehicular (GVWR) que se consultó de fuentes alternas.

Tabla 7.1. Campos de información que se recomienda solicitar a los CDAs.

Información general del vehículo	Información específica del vehículo
- Placa - Marca y línea del vehículo - Año modelo - Tipo de combustible - Tipo de servicio (particular o público) - Municipio donde está registrado	- Cilindraje - Tipo de motor (solo para motos – 2 Tiempos o 4 Tiempos) - Kilometraje total registrado en el odómetro - Peso bruto vehicular

- Los conteos vehiculares realizados para los estudios de ruido ambiental fueron un componente importante en la distribución espacial y temporal de las emisiones. Pensando en el uso alternativo que se le puede dar a estos conteos, es importante que la Corporación recomiende a las empresas de consultoría contratadas para estos estudios, establecer puntos de conteo con una mayor distribución en las zonas residenciales de la ciudad de Manizales y que estos tengan consistencia en los días de medición, lo cual permita establecer diferencias y relaciones en el comportamiento del tráfico entre días hábiles y fines de semana.

- Que la Corporación, a través de alianzas interinstitucionales, promueva la actualización del modelo de tráfico vehicular desarrollado para la formulación del Plan de Movilidad del año 2010, el cual permitiría la estimación de un inventario de emisiones con menor incertidumbre, aplicando aproximaciones “bottom-up”, y con el cual se pudiera desarrollar un modelo acoplado de inventario de emisiones vehiculares para la ciudad de Manizales y el municipio de Villamaría.

7.2. Recomendaciones en el componente de Inventario de Emisiones por Fuentes Fijas Puntuales

Las recomendaciones principales para este componente están asociadas a dos campos: actualización del inventario a futuro y complementar la base de datos con otras fuentes de emisión y con empresas de otros municipios del departamento. Como se mencionó en el capítulo 5, la base de datos generada para soportar el inventario de emisiones por fuentes fijas puntuales, pretende ser flexible en su implementación para años base posteriores y se generó con el fin de incluir, o eliminar según sea el caso, otras fuentes de emisión no solo puntuales sino otro tipo como fuentes de área (por ejemplo la inclusión de estaciones de servicio de combustible).

Recomendación:

- En el tema de actualización, se recomienda a la Corporación realizar la revisión y actualización del inventario cada dos años (por ejemplo una próxima actualización para el año base 2016). Se recomienda que esta actualización se genere sobre la base de datos desarrollada en este proyecto, en una nueva hoja de cálculo para conservar el inventario del año base 2014. Esto permitirá realizar comparaciones y análisis de cambios temporales y espaciales en las emisiones y las variables asociadas de importancia como uso de combustible, consumos de materia prima, entre otros.

- Se recomienda además continuar con los esfuerzos de cooperación con el GTAIHA con el fin de ampliar el horizonte del inventario para futuras actualizaciones, incluyendo otros municipios de Caldas en el análisis de fuentes de emisión y abarcando otro tipo de fuentes, por ejemplo las fuentes de área de importancia en el departamento como las estaciones de servicio de combustible.

7.3. Recomendaciones en el componente de Apoyo al SVCA

Las recomendaciones para este componente tienen que ver con el funcionamiento de equipos del SVCA, el uso de una estación meteorológica alterna y la calibración del monitor de CO.

Recomendación:

- Procurar mantener la operación regular de los equipos de medición de PM_{10} y $PM_{2.5}$, de forma tal que se cumpla con el porcentaje mínimo de datos requerido para calcular los promedios anuales y comparar con los valores máximos establecidos en la Resolución 610.
- Con base en los resultados obtenidos en el análisis de estaciones meteorológicas cercanas a Gobernación, se recomienda a la Corporación hacer uso de los datos de la estación móvil de Gobernación para efectos del cálculo de las concentraciones de material particulado en Gobernación y Liceo, si el análisis corresponde al periodo de inoperatividad de la estación Liceo. Para años previos al 2015 y cuando la estación Gobernación no esté en funcionamiento (por efectos de mantenimiento u otro factor), se recomienda utilizar los datos reportados por la estación Ingeominas o en su defecto la estación Hospital.
- Continuar con los trámites para realizar la correcta calibración cero y span del monitor de CO que se encuentra en la estación Gobernación. Esta calibración permitirá ajustar los datos que se han venido recopilando en la estación desde el mes de agosto de 2014 y tener información más certera sobre el comportamiento de este contaminante.

8. CONCLUSIONES GENERALES

En el componente del inventario de emisiones por fuentes móviles se obtuvieron las emisiones totales de contaminantes criterio y gases de efecto invernadero provenientes de vehículos particulares, motocicletas, buses de transporte público y vehículos pesados. Las emisiones totales de contaminantes criterio fueron: 43396 ton/año de CO, 9646 ton/año de VOC, 4890 ton/año de NO_X, 26 ton/año de SO_X y 765 ton/año de PM_{10}. Las emisiones totales de gases de efecto invernadero fueron 454441 ton/año de CO_2, 11 ton/año de N_2O, 2860 ton/año de CH_4. Además, se realizó la distribución espacial y temporal de las emisiones, donde se encontró que las zonas con mayor influencia de las emisiones fueron el centro y zona comercial de la ciudad, donde se concentró el 50% de las emisiones, y las horas del día en donde se presentan los picos de máxima emisión, 7:00, 12:00 y 18:00. Finalmente, se aplicaron metodologías de distribución espacial alternativas con el fin de generar herramientas que simplifiquen el cálculo y los recursos necesarios para este objetivo, encontrando que se puede hacer una buena aproximación a partir del uso de una red vial simplificada, en la cual las vías terciarias son omitidas.

En lo que concierne al inventario de emisiones por fuentes fijas, se conformó la base de datos con los campos de información del inventario de emisiones por fuentes fijas puntuales año base 2014. El inventario se realizó a partir de la recopilación de información secundaria de las principales industrias generadoras de emisiones en Manizales y aquellas de importancia los municipios de Chinchiná y Villamaría. Sumado a esto se aplicó la metodología de factores de emisión en la estimación del inventario de emisiones.

Según el inventario estimado para los municipios de Manizales y Villamaría, que comprenden la zona de influencia objeto de estudio en el Convenio de investigación, las fuentes fijas puntuales de tipo industriales emiten predominantemente CO_2 (64077 ton/año), CO (219.1 ton/año) TSP (120.1 ton/año), SO_X (113.5 ton/año) y NO_X (89.5 ton/año).

En el componente de apoyo y fortalecimiento del sistema de vigilancia de calidad del aire de Manizales, las actividades durante la ejecución del Convenio, se enfocaron en el monitoreo de material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ (estaciones Nubia y Palogrande), y gases SO_2, O_3 y CO (estación Gobernación). Además se realizó la actualización y análisis gráfico y estadístico de las bases con información de calidad del aire del SVCA y meteorología, para el periodo 2009 – 2016 (abril), empleando el software R y su librería Openair. Las concentraciones de material particulado no superaron los límites máximos permitidos por la Resolución 610 de 2010, para periodos de 24 horas y un año. En el caso de los gases SO_2 y el O_3, los límites establecidos en la normatividad nacional bajo diferentes periodos de exposición, no fueron sobrepasados. Debido a que no se ha logrado con éxito la calibración del monitor de CO con una concentración del gas menor o igual a 50 ppm, no es posible dar una conclusión acertada sobre el comportamiento de las concentraciones del gas respecto a los límites máximos permitidos por la normatividad colombiana (MAVDT, 2006), ya que los datos medidos por el monitor no son confiables. Se podrán realizar análisis completos al garantizar la correcta calibración del equipo.

Se evidenció que las actividades antropogénicas como el uso de vehículos motorizados y la industria, tienen un nivel de influencia sobre las concentraciones registradas de material particulado (PM_{10} y

$PM_{2.5}$) y gases (SO_2, O_3 y CO) en la ciudad. Las mayores concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ se midieron en el sector del Centro, en Manizales. Así mismo, se observó que la actividad volcánica tiene un impacto aparente sobre los niveles de estos compuestos en el aire ambiente local, principalmente en el caso del material particulado y el SO_2, debido a la expulsión de gases y ceniza.

A partir de las campañas de monitoreo pasivo se estableció una línea base sobre la distribución espacial de las concentraciones de SO_2, NO_X y O_3. Mayores concentraciones de SO_2 se registraron en el área rural de Villamaría, influenciada por el volcán Nevado del Ruíz. En la zona urbana, las más altas concentraciones se encontraron en las zonas con mayor influencia de emisiones vehiculares. En el caso de los NO_X, se evidenció la influencia directa de las fuentes móviles, pues las mayores concentraciones se registraron en estaciones cercanas a importantes corredores viales de la ciudad. Los niveles más altos de O_3 se encontraron en el área rural, lo que se atribuye a la disponibilidad de precursores químicos para su formación en esta zona.

El análisis de concentraciones de gases contaminantes medidas por medio de monitoreo pasivo, presentó una notable relación con las condiciones meteorológicas de Manizales y la zona rural de Villamaría. La temperatura, la humedad relativa, la dirección y velocidad del viento, humedad y precipitación, son variables de influencia sobre los niveles de contaminantes, ya que pueden favorecer procesos de reacción química, deposición húmeda y deposición seca de contaminantes del aire.

9. REFERENCIAS

AMVA - Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2013. Inventario de Emisiones Atmosféricas del Valle de Aburrá, año base 2011. Convenio de Asociación No. 243 de 2012. Colombia.

Araya Csaszar, A. D., 2008. Tesis de Pregrado. Metodología de cálculo de emisiones vehiculares basada en modos de conducción y potencia especifica vehicular. Universidad de Chile. Santiago de Chile, Chile.

Aristizábal, B.H., González, C.M., Morales, L., Abalos, M., Abad, E., 2011. Polychlorinated dibenzo-p-dioxin and dibenzofuran in urban air of an Andean city. Chemosphere 85, 170-178.

Atkinson, R., Arey, J., 2003. Gas-phase tropospheric chemistry of biogenic volatile organic compounds: a review. Atmospheric Environment, 37, 197-219.

Buitrago, J.H., 2003. Tesis de Maestría. Aplicación del modelo Gaussiano para determinar la calidad del aire en la ciudad de Manizales. Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Manizales, Colombia.

Cant, N.W., Angove, D.E., Chambers, D.C., 1998. Nitrous oxide formation during the reaction of simulated exhaust streams over rhodium, platinum and palladium catalysts. Appl. Catalysis B 17, 63-73.

Clarke, a. G., Ko, Y.-H., 1996. The relative significance of vehicular emissions and other emissions of volatile organic compounds in the urban area of Leeds, UK. Sci. Total Environ. 189-190, 401–407.

Carslaw, D. C., 2015. Manual. The openair manual - open-source tools for analyzing air pollution data. King's College London. Londres, Inglaterra.

Carslaw, D. C., Ropkins, K., 2012. Openair - An R Package for Air Quality Data Analysis. Environmental Modelling & Software 27-28, 52-61.

Chaloulakou, A., Kassomenos, P., Spyrellis, N., Demokritou, P., Koutrakis, P., 2013. Measurements of PM10 and PM2.5 particle concentrations in Athens, Greece. Atmospheric Environment 37 649–660.

CORPOCALDAS, 2014. Medición de ruido ambiental en la ciudad de Manizales. Manizales, Colombia.

CORPOCALDAS, 2015. Mediciones de ruido ambiental y elaboración del plan de descontaminación por ruido en Villamaría, Caldas. Bogotá, Colombia.

Cortés, J., González, C., Arias, A., Orozco, M., Aristizábal, B., 2015. Capítulo de Libro. Análisis de Datos de Calidad del Aire en la Ciudad de Manizales Utilizando Matlab y Openair. Universidad Nacional de Colombia, Manizales.

Costa, M., Baldasano, J.M., 1996. Development of a source emission model for atmospheric pollutants in the Barcelona area. Atmos. Environ. 30, 309–318.

Davis, N., Lents, J., Osses, M., Nikkila, N., Barth, M., 2005. Development and Application of an International Vehicle Emissions Model. TRB Paper 05-1844.

Ecopetrol, 2013. Calidad del Diésel en Colombia, 2013.

Elminir, H., 2005. Dependence of urban air pollutants on meteorology. Science of the Total Environment. 350, 225-237.

EPA – Environment Protection Agency, 2016. Volatile Organic Compounds. Disponible en: http://www3.epa.gov/cgi-bin/broker?_service=data&_debug=0&_program=dataprog.national_1.sas&polchoice=VOC. Consultado el: 08 de febrero de 2016.

ERG, 2013. Openair project. Consultado el 03/06/2013, disponible en www.openair-project.org

Finlayson-Pitts & Pitts, 1993. Atmospheric Chemistry of Tropospheric Ozone Formation: Scientific and Regulatory Implications. Air and Waste, 43, 1091-1100.

García, P. A., 2013. Tesis de Maestría. Openair para el procesamiento y análisis de la información de la base de datos de la red de calidad de aire de Bogotá. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C., Colombia.

Giraldo, L.A., 2005. Tesis de Maestría. Estimación del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá e identificación de variables pertinentes. Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia.

González, C.M., Aristizábal, B.H., 2012. Acid rain and particulate matter dynamics in a mid-sized Andean city: The effect of rain intensity on ion scavenging. Atmospheric Environment 60, 164-171.

González, C. M., Cortés, J., Aristizábal, B. H., 2015. Influence of meteorology and source variation on airborne PM10 levels in a high relief tropical Andean city. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia 74, 200-212.

Guicherit, R., Roemer, M., 1999. Tropospheric ozone trends. Chemosphere, 2, 167-183. 3rd International Conference on Biology, Environment and Chemistry, 46, 7-12.

Harrison, R.M., Deacon, A.R., Jones, M.R., 1997. Sources and processes affecting concentrations of PM10 and PM2.5 particulate matter in Birmingham (U.K.). Atmospheric Environment 31, 4103- 4117.

Henríquez, P., 2007. Tesis de Pregrado. Estudio comparativo de actividad vehicular y modelación de emisiones para Santiago y Buenos Aires. Universidad de Chile. Santiago de Chile, Chile.

Hosseinibalam, F., Azadeh, H., 2012. Influence of Meteorological Parameters on Air Pollution in Isfahan.

IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2010. Informe. Análisis descriptivo de variables meteorológicas que influyen en la calidad del aire de los principales centros industriales del país. Bogotá D.C., Colombia.

ISSRC, C. I., 2008. Modelo Internacional de Emisiones Vehiculares. Consultado el 20/04/2015, disponible en www.issrc.org

Jenks, G.F., 1963. GENERALIZATION - IN - STATISTICAL - MAPPING - PB - Routledge. Ann. Assoc. Am. Geogr. 53, 15.

Jiménez-Palacios, J.L., 1999. PhD. Thesis. Understanding and Quantifying Motor Vehicle Emissions with Vehicle Specific Power and TILDAS Remote Sensing. Massachusetts Institute of Technology.

Kalbarczyk, R., Kalbarczyk, E., 2007. Influence of meteorological conditions on the concentration of NO_2 and NO_X in northwest Poland in relation to wind direction. Land Reclamation, 38, 81-94.

Larsen, B., 2004. Cost of environmental damage: A socioeconomic and environmental health risk assessment. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Llinás, C., Rojas C., 2006. Libro. Estadística descriptiva y distribuciones de probabilidad. Ediciones Uninorte. Colombia.

Loibl, W., Orthofer, R., Winiwarter, W., 1993. Spatially disaggregated emission inventory for anthropogenic NMVOC in Austria. Atmos. Environ. Part A. Gen. Top. 27, 2575–2590.

Luvsan, M. E., Shie, R. H., Purevdorj, T., Badarch, L., Baldorj, B., & Chan, C. C., 2012. The influence of emission sources and meteorological conditions on SO_2 pollution in Mongolia. *Atmospheric Environment*, *61*, 542-549.

Londoño, J., Correa, M.A., Palacio, C.A., 2011. Estimación de las emisiones de contaminantes Atmosféricos provenientes de fuentes móviles en el área urbana de Envigado, Colombia. Revista EIA 16, 149-162.

Manahan, S. E., 2007. Introducción a la química ambiental. Reverté.

MAVDT - Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2009. Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire - Manual para la elaboración de Planes de Gestión de la Calidad del Aire. Bogotá, D.C., Colombia.

MAVDT - Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010. Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire - Manual de diseño de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire. Bogotá, D.C., Colombia.

MAVDT - Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010. Resolución 610 de 2010. Bogotá, D.C., Colombia.

Muñoz, C., 2008. Tesis Especialización en Ingeniería Ambiental. Inventario y análisis de emisiones atmosféricas de las fuentes fijas ubicadas en la microcuenca de la Quebrada Manizales. Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, Manizales, Colombia.

Ocampo, O., Vélez, J., 2015. Capítulo de Libro. Análisis climatológico para el departamento de Caldas. Universidad Nacional de Colombia, Manizales.

OMS – Organización Mundial de la Salud, 2005. Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Ediciones de la OMS, Ginebra.

Ossés de Eicker, M., Zah, R., Triviño, R., Hurni, H., 2008. Spatial accuracy of a simplified disaggregation method for traffic emissions applied in seven mid-sized Chilean cities. Atmospheric Environment 42, 1491–1502.

Parra, R., Jiménez, P., Baldasano, J.M., 2006. Development of the high spatial resolution EMICAT2000 emission model for air pollutants from the north-eastern Iberian Peninsula (Catalonia, Spain). Environ. Pollut. 140, 200–219.

Peñalosa, N.E., 2010. Tesis de Maestría. Distribución espacial y temporal del inventario de emisiones provenientes de las fuentes móviles y fijas de la ciudad de Bogotá, D.C. Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá. Bogotá, Colombia.

Querol, X., Alastuey, A., Ruiz, C.R., Artiñano, B., Hansson, H.C., Harrison, R.M., Buringh, E., ten Brink, H.M., Lutz, M., Bruckmann, P., Straehl, P., Schneider, J., 2006. Speciation and origin of PM10 and PM2.5 in selected European cities. Atmospheric Environment 38, 6547-6555.

Rojas, N., Galvis, B. 2005. Relación entre $PM_{2.5}$ y PM_{10} en la ciudad de Bogotá. Revista de Ingeniería, Universidad de los Andes, 22, 55-60.

Romieu, I., Borja, V., 1997. Particulate air pollution and daily mortality: Can results be generalized to Latin American countries? Salud Pública en México 39, 403-411.

Rodríguez, P., & Behrentz, E., 2009. Actualización del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá a través de mediciones directas. Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia.

Salguero, Y., 2014. Tesis de Pregrado. Inventario preliminar de emisiones por fuentes móviles para la ciudad de Manizales. Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Manizales, Colombia.

Salem, A., Soliman, A., El-Haty, I., 2009. Determination of nitrogen dioxide, sulfur dioxide, ozone, and ammonia in ambient air using the passive sampling method associated with ion chromatographic and potentiometric analyses. Air Quality, Atmosphere and Health 2, 133-145.

Saide, P., Zah, R., Osses, M., Ossés de Eicker, M., 2009. Spatial disaggregation of traffic emission inventories in large cities using simplified top–down methods. Atmospheric Environment 43, 4914–4923.

Salter, E., 2005. Active versus Passive Air Sampling. SKC Limited.

Seethapathy, S., Górecki, T., Li, X., 2007. Passive sampling in environmental analysis. Journal of Chromatography A. 1184, 234-253.

Seinfeld, J., & Pandis, S., 2006. Libro. Atmospheric Chemistry and Physics. Hoboken: John Wiley & Sons Inc.

S.G.C. - Servicio Geológico Colombiano, 2015. Informes de Actividad Volcánica Segmento Norte de Colombia. Consultado el 10/03/2016, disponible en http http://www2.sgc.gov.co/Manizales/Publicaciones/Informes-tecnicos/Informe-Mensual.aspx

S.G.C. - Servicio Geológico Colombiano, 2016. Informes de Actividad Volcánica Segmento Norte de Colombia. Consultado el 05/05/2016, disponible en http http://www2.sgc.gov.co/Manizales/Publicaciones/Informes-tecnicos/Informe-Mensual.aspx

Slini, T., Karatzas, K., & Moussiopoulos, N., 2001. Statistical analysis of environmental data as the basis of forecasting: an air quality application. The Science of the Total Environment, 227-237.

Tamsin, M., 2009. Annual air quality monitoring report for the Wellington region. Consultado el 20/04/2015, disponible en http://www.gw.govt.nz/document-library-2/category/7.

T.T.M. - Terminal de Transportes de Manizales, 2016. Cifras Operativas. Consultado el: 05 de febrero de 2016. Disponible en: http://www.terminaldemanizales.com.co/Cifras.html.

Terminal de Transportes de Manizales, 2016a. Cifras Operativas. Consultado el: 07 de mayo de 2016. Disponible en: http://www.terminaldemanizales.com.co/ESW/Files/cons_cen_mix_2016_2015.pdf.

The R Foundation for Statistical Computing, 2014. Informe. R: Software Development Life Cycle. A Description of R's Development, Testing, Release and Maintenance Processes. Viena, Austria.

The Openair Project, 2015. Consultado el 20/04/2015, disponible en http://www.openair-project.org.

Tolvett, S., 2009. Tesis de Maestría. Análisis de emisiones en ruta de vehículos diesel en Ciudad de México, Santiago y Sao Paulo. Universidad de Chile. Santiago de Chile, Chile.

Tiwary, A., & Colls, J., 2010. Air Pollution: Measurement, Modelling and Mitigation. Routledge.

Tuia, D., Ossés de Eicker, M., Zah, R., Osses, M., Zarate, E., Clappier, A., 2007. Evaluation of a simplified top-down model for the spatial assessment of hot traffic emissions in mid-sized cities. Atmospheric Environment 41, 3658–3671.

UNAL - Universidad Nacional de Colombia, 2010. Formulación del Plan de Movilidad para el Municipio de Manizales. Manizales, Colombia.

Velasco, M., 2012. Informe de calidad del aire. Corporación Autónoma Regional de Caldas.

Von Schneidemesser, 2010. Global comparison of VOC and co observations in urban areas. Atmospheric Environment, 44, 5053–5064

Winiwarter, W., Dore, C., Hayman, G., Vlachogiannis, D., Gounaris, N., Bartzis, J., Ekstrand, S., Tamponi, M., Maffeis, G., 2003. Methods for comparing gridded inventories of atmospheric emissions - Application for Milan province, Italy and the Greater Athens Area, Greece. Sci. Total Environ. 303, 231–243.

ANEXOS

Anexo 4.1. Digital. Formatos de campo diseñados para recopilar información en campaña de Fuentes Móviles.

Anexo 4.2. Digital. Conteos vehiculares consolidados.

Anexo 4.3. Digital. Información base utilizada para complementar la información de tecnología vehicular.

Anexo 4.4. Digital. Polígonos de Thiessen construidos para la asignación de conteos vehiculares.

Anexo 4.5. Digital. Resultados desagregación temporal de emisiones vehiculares.

Anexo 4.6. Digital. Mapas de factores de desagregación generados para cada categoría vehicular.

Anexo 4.7. Digital. Resultados desagregación espacial y temporal de emisiones vehiculares.

Anexo 5.1. Digital. Base de datos información Inventario de Emisiones por Fuentes Fijas Puntuales.

Anexo 6.1. Digital. Bases de datos con información meteorológica y de calidad del aire.

Anexo 6.2. Digital. Bases de datos con valores de ICA para PM_{10}, $PM_{2.5}$, SO_2, O_3 y CO.

Anexo 6.3. Digital. Script de código R para análisis de bases de datos de calidad del aire y meteorología.

Anexo 7. Digital. Cuadro resumen de reuniones realizadas durante la ejecución del Convenio.

Anexo 8. Digital. Cuadro resumen de resultados totales.