



**ALCALDÍA MAYOR
DE BOGOTÁ D.C.**

SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE

Informe anual de calidad del aire de Bogotá

Año 2014

**Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá
(RMCAB)**

Bogotá D.C. 2015

126PM04-PR84-M-A2-V2.0





Gustavo Francisco Petro Urrego
Alcalde Mayor de Bogotá D.C.

Susana Muhamad
Secretaria Distrital de Ambiente

Ramón Eduardo Villamizar Maldonado
Subsecretario Distrital de Ambiente

Andrea Cortés Salazar
Directora de Control Ambiental

Rodrigo Alberto Manrique Forero
Subdirector de Calidad del Aire, Auditiva y Visual

John Freddy Grajales
Coordinador RMCAB

Helberth Santiago Morales Pinilla
Nicolás Cuadros Rubio
Oscar Julián Guerrero Molina
Grupo de Validación y Análisis de la RMCAB

Darío Alejandro Gómez Flechas
Diana María Rodríguez Alaguna
Héctor Alejandro Beltrán
Henry Ospino Dávila
Luz Dary González González
Oscar Eduardo Arredondo Pescador
Grupo de Operación de la RMCAB

Secretaría Distrital de Ambiente
– SDA –

© Mayo de 2015, Bogotá - Colombia
Informe Anual de la Red de Monitoreo de Calidad de Aire de Bogotá D.C.

Año 2015.
Impreso en Colombia – Printed in Colombia

Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá D.C.

Informe Anual 2014

Mayo de 2015

126PM04-PR84-M-A2-V2.0

Tabla de Contenido

Resumen ejecutivo	15
Introducción	21
1. Generalidades	22
1.1. Normatividad vigente	25
2. Indicadores de operación y desempeño	27
2.1. Porcentaje de captura de datos	27
2.2. Porcentaje de datos válidos	30
3. Evaluación y análisis de contaminantes.....	32
3.1. Material particulado – MP o PM (<i>Particulate Matter</i>)	32
3.1.1. Comportamiento de la concentración de PST.....	33
3.1.2. Comportamiento de la concentración de PM ₁₀	35
3.1.3. Comportamiento de la concentración de PM _{2.5}	51
3.1.4. Relación de concentración PM _{2.5} /PM ₁₀	66
3.2. Gases contaminantes	67
3.2.1. Comportamiento de la concentración de O ₃	68
3.2.2. Comportamiento de la concentración de NO ₂	81
3.2.3. Comportamiento de la concentración de SO ₂	93
3.2.4. Comportamiento de la concentración de CO	107
3.3. Índices de calidad del aire	116
3.3.1. Índice de calidad del aire para PM ₁₀	117
3.3.2. Índice de calidad del aire para PM _{2.5}	121
3.3.3. Índice de calidad del aire para ozono (O ₃), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO ₂) y dióxido de nitrógeno (NO ₂).....	125
3.4. Síntesis de resultados	127
4. Evaluación y análisis de variables meteorológicas.....	138
4.1. Precipitación	139
4.2. Vientos	149
4.3. Temperatura Superficial.....	156
4.4. Radiación solar	161
4.5. Presión Atmosférica.....	163
4.6. Humedad Relativa	164
5. Meteorología y Calidad del Aire	166
5.1. Análisis de vientos vs. Material particulado.....	166
5.2. Estudio de caso: días de máxima concentración	172

5.2.1. Evento de incendio de llantas en Fontibón	172
5.2.2. Transporte de polvo del Sahara a Suramérica en junio de 2014.....	177
Bibliografía.....	183
Glosario	185
Anexos	190

Índice de figuras

Figura 1-1. Distribución de las estaciones de la RMCAB en el año 2014.....	23
Figura 2-1. Porcentaje de captura de datos por parámetro. Año 2014.....	28
Figura 2-2. Porcentaje de captura de datos por estación. Año 2014.....	29
Figura 2-3. Porcentaje de datos válidos por parámetro. Año 2014.....	30
Figura 2-4. Porcentaje de datos válidos por estación. Año 2014.....	31
Figura 3-1. Concentración máxima de PST (TSP) durante el año 2014. Base diaria.	34
Figura 3-2. Promedios anuales de PM ₁₀ durante el año 2014 por estación de monitoreo.	36
Figura 3-3. Material particulado (PM ₁₀) con base en la interpolación espacial por el método <i>Kriging</i> de los promedios de las estaciones con cobertura temporal superior a 75%. Año 2014.	37
Figura 3-4. Número de excedencias y máximos de PM ₁₀ por estación durante el año 2014. El nivel máximo permisible diario es 100 µg/m ³ (Resolución 610 de 2010).....	38
Figura 3-5. Diagrama calendario para PM ₁₀ durante el año 2014 en la estación Carvajal-Sevillana. Los valores mostrados corresponden a la concentración. Se resaltan los días que superaron el límite normativo de 100 µg/m ³	41
Figura 3-6. Diagrama calendario para PM ₁₀ durante año 2014 en la estación Suba. Los valores mostrados corresponden a la concentración. Se resaltan dos días que excedieron el límite máximo permisible de 100 µg/m ³	42
Figura 3-7. Diagrama calendario para PM ₁₀ durante el año 2014 en la estación Usaqué. Los valores mostrados corresponden a la concentración. Se resalta el único día que excedió el límite máximo permisible de 100 µg/m ³ en esta estación correspondiente al 27 de junio de 2014.....	43
Figura 3-8. Diagramas de caja de las concentraciones diarias de PM ₁₀ en función de las estaciones de monitoreo y de los días de la semana para el año 2014.	44
Figura 3-9. Diagramas de caja de las concentraciones diarias de PM ₁₀ en función de las estaciones de monitoreo y de los meses del año 2014.	45
Figura 3-10. Comportamiento de la concentración de PM ₁₀ en el ciclo semanal para 11 estaciones de la RMCAB, las cuales tienen cobertura temporal superior a 75%. Cada promedio se presenta con un intervalo de 95% de confianza.	46
Figura 3-11. Ciclo diario de PM ₁₀ para 11 estaciones de la RMCAB, las cuales tienen una cobertura temporal superior a 75%. Se muestra el promedio y el intervalo de confianza de 95%.	47
Figura 3-12. Ciclo anual (año 2014) de PM ₁₀ para 11 estaciones de la RMCAB, las cuales tienen una cobertura temporal superior a 75%. Se muestra el promedio y el intervalo de confianza de 95%.	48
Figura 3-13. Gráfico de <i>boxplot</i> para las concentraciones diarias de PM ₁₀ por estación de monitoreo en los años 2010 a 2014.	49
Figura 3-14. Promedios anuales de PM _{2.5} durante el año 2014 por estación de monitoreo.	52
Figura 3-15. Material particulado (PM _{2.5}) con base en la interpolación espacial por el método <i>Kriging</i> de los promedios de las estaciones con cobertura temporal superior a 75%. Año 2014. Se incluyen las estaciones Las Ferias y San Cristóbal como referencia porque no cumplen con el criterio de cobertura temporal de 75% (68% y 65% con promedios anuales de 18 µg/m ³ y 9 µg/m ³ , respectivamente)	53
Figura 3-16. Máximo y excedencias de PM _{2.5} en base diaria para el año 2014.....	54
Figura 3-17. Diagrama calendario para PM _{2.5} durante el año 2014 en la estación Carvajal-Sevillana. Los valores mostrados corresponden a la concentración.	57

Figura 3-18. Diagrama calendario para PM _{2.5} durante el año 2014 en la estación Suba. Los valores mostrados corresponden a la concentración.	58
Figura 3-19. Diagrama calendario para PM _{2.5} durante el año 2014 en la estación Usaqué. Los valores mostrados corresponden a la concentración.....	59
Figura 3-20. Diagramas de caja con la distribución de las concentraciones diarias de PM _{2.5} en función de los días de la semana y de las estaciones de monitoreo con cobertura temporal suficiente.....	61
Figura 3-21. Diagramas de caja con la distribución de las concentraciones diarias de PM _{2.5} en función de los meses del año 2014 y de las estaciones de monitoreo con cobertura temporal suficiente.....	61
Figura 3-22. Comportamiento de las concentraciones de PM _{2.5} en el ciclo semanal. Cada promedio diario se presenta con un intervalo de 95% de confianza.....	62
Figura 3-23. Ciclos diarios de las concentraciones de PM _{2.5} por estación en el año 2014. Se muestra el intervalo de 95% de confianza.....	63
Figura 3-24. Ciclo anual (año 2014) de PM _{2.5} para 7 monitores de la RMCAB, las cuales tienen una cobertura temporal superior a 75%, con excepción de Ministerio de Ambiente con 74%. Se muestra el promedio y el intervalo de confianza de 95%.	64
Figura 3-25. Gráfico de <i>boxplot</i> de las concentraciones diarias de PM _{2.5} en función de las estaciones de monitoreo con cobertura temporal superior a 75% para los años 2010 a 2014.	65
Figura 3-26. Máximos y excedencias de la norma de O ₃ en base horaria por estación durante el año 2014.....	69
Figura 3-27. Concentraciones máximas y excedencias de la norma de O ₃ (80 µg/m ³) en base de promedios móviles de 8 horas por estación durante el año 2014.	72
Figura 3-28. Superficie de concentración de ozono en Bogotá a partir de la interpolación espacial por el método Kriging de los promedios móviles de 8 horas en cada una de las estaciones de monitoreo con cobertura temporal superior a 75%.....	74
Figura 3-29. Diagramas de caja con el comportamiento de las concentraciones de ozono (promedios móviles de 8 horas) en función de los días de la semana y de las estaciones de monitoreo para año 2014.....	75
Figura 3-30. Diagramas de caja con el comportamiento de las concentraciones de ozono (promedios móviles de 8 horas) en función de los meses de 2014 y de las estaciones de monitoreo.....	76
Figura 3-31. Ciclos semanales de las concentraciones de ozono por estación de monitoreo y por día de la semana.	77
Figura 3-32. Ciclos diarios de las concentraciones de ozono por estación de monitoreo y por hora del día.....	78
Figura 3-33. Ciclo anual de las concentraciones de ozono en base mensual para el año 2014.	78
Figura 3-34. Gráfico de <i>boxplot</i> de O ₃ en función de las estaciones entre los años 2010 y 2014 (con base en promedios móviles de 8 horas).....	79
Figura 3-35. Concentración promedio anual de dióxido de nitrógeno para las estaciones de la RMCAB con cobertura temporal igual o superior a 75% durante el año 2014.	82
Figura 3-36. Máximos y excedencias de los datos horarios de NO ₂ por estación durante el año 2014.....	84
Figura 3-37. Excedencias y concentraciones máximas de NO ₂ en base diaria por estación para año 2014.....	85

Figura 3-38. Diagrama calendario para NO ₂ durante el año 2014 en la estación Puente Aranda. Los valores mostrados corresponden a la concentración. El límite normativo es 150 µg/m ³ .	86
Figura 3-39. Diagrama calendario para NO ₂ durante el año 2014 en la estación Guaymaral. Los valores mostrados corresponden a la concentración. El límite normativo es 150 µg/m ³ .	87
Figura 3-40. Diagramas de caja con el comportamiento de las concentraciones diarias de NO ₂ en función de los días de la semana y de las estaciones de monitoreo con cobertura temporal superior a 75%. Año 2014.	88
Figura 3-41. Diagramas de caja con el comportamiento de las concentraciones diarias de NO ₂ en función de los meses del año 2014 y de las estaciones de monitoreo con cobertura temporal superior a 75%.	89
Figura 3-42. Ciclos semanales de las concentraciones de NO ₂ para cada uno de los monitores con representatividad temporal igual o superior a 75% en el año 2014. Se indica además el intervalo de confianza de 95%.	90
Figura 3-43. Ciclos diarios de las concentraciones de NO ₂ para los monitores con cobertura temporal igual o superior a 75% en el año 2014. Se indica el intervalo de confianza de 95%.	90
Figura 3-44. Ciclos anuales de las concentraciones de NO ₂ con base en promedios mensuales. Año 2014. En cada mes se muestra el intervalo de confianza de 95%.	91
Figura 3-45. Gráfico de <i>boxplot</i> para NO ₂ por estaciones en base diaria entre los años 2010 y 2014.	92
Figura 3-46. Concentración promedio anual de dióxido de nitrógeno para las estaciones de la RMCAB con cobertura temporal igual o superior a 75% durante el año 2014.	94
Figura 3-47. Máximos y número de excedencias de SO ₂ en base de promedios móviles de 3 horas por estación durante el año 2014.	95
Figura 3-48. Concentraciones máximas y número de excedencias de SO ₂ en base diaria por estación para el año 2014.	97
Figura 3-49. Diagrama calendario para SO ₂ durante el año 2014 en la estación Suba. Los valores mostrados corresponden a la concentración. Debe tenerse en cuenta que el límite normativo es 250 µg/m ³ .	99
Figura 3-50. Diagrama calendario para SO ₂ durante el año 2014 en la estación San Cristóbal. Los valores mostrados corresponden a la concentración. El límite máximo permisible es 250 µg/m ³ .	100
Figura 3-51. Comportamiento de las concentraciones diarias de SO ₂ en función de los días de la semana por estación de monitoreo para el año 2014.	101
Figura 3-52. Comportamiento de las concentraciones diarias de SO ₂ en función de los meses de 2014 por estación de monitoreo.	102
Figura 3-53. Ciclos semanales de las concentraciones de SO ₂ para las estaciones de monitoreo con cobertura temporal superior a 75% en el año 2014. Se indica el intervalo de confianza de 95%.	103
Figura 3-54. Ciclos diarios de las concentraciones de SO ₂ para las estaciones de monitoreo con cobertura temporal superior a 75% en el año 2014. Se indica el intervalo de confianza de 95%.	103
Figura 3-55. Ciclos anuales de las concentraciones de SO ₂ con base en promedios mensuales. Año 2014. En cada mes se muestra el intervalo de confianza de 95%.	104
Figura 3-56. Gráfico de <i>boxplot</i> para SO ₂ en base diaria por estación de monitoreo entre los años 2010 y 2014.	105

Figura 3-57. Concentraciones máximas y excedencias de CO en base horaria para el año 2014.	108
Figura 3-58. Concentraciones máximas y número de excedencias en base de 8 horas para CO por estación durante el año 2014.	110
Figura 3-59. Comportamiento de las concentraciones de CO en base de 8 horas (móvil) en función de los días de la semana por estación de monitoreo para el año 2014.	111
Figura 3-60. Comportamiento de las concentraciones de CO en base de 8 horas (móvil) en función de los meses por estación de monitoreo para el año 2014.	111
Figura 3-61. Ciclos semanales de las concentraciones de CO por estación de monitoreo con cobertura temporal igual o superior a 75% para el año 2014. Se indica el intervalo de confianza de 95%.	112
Figura 3-62. Ciclos diarios de las concentraciones de CO para el año 2014 para los monitores con cobertura temporal igual o superior a 75%. Se indica el intervalo de confianza de 95%.	113
Figura 3-63. Ciclos anuales de monóxido de carbono con base en promedios mensuales en las estaciones de monitoreo con una cobertura temporal igual o superior a 75%. Año 2014. Se presenta el intervalo de confianza de 95% en cada promedio mensual.	113
Figura 3-64. Gráfico de <i>boxplot</i> para CO en base de 8 horas (promedios móviles) por estación de monitoreo entre los años 2010 y 2014.	114
Figura 3-65. Proporción relativa de las categorías del Índice de Calidad del Aire (ICA) por estación para el año 2014.	118
Figura 3-66. Proporción relativa del Índice de Calidad del Aire (ICA) para los meses de 2014.	119
Figura 3-67. Proporción relativa del Índice de Calidad del Aire (ICA) por día de la semana para durante el año 2014.	119
Figura 3-68. Índice de Calidad del Aire promedio de PM ₁₀ para las estaciones de la RMCAB durante el año 2014.	120
Figura 3-69. Proporción relativa de las categorías del Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM _{2.5} por estación para el año 2014.	121
Figura 3-70. Proporción relativa del Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM _{2.5} para los meses de 2014.	122
Figura 3-71 Índice de Calidad del Aire (ICA) de PM _{2.5} por día de la semana para el año 2014.	123
Figura 3-72. Índice de calidad del aire (ICA) promedio por estación para PM _{2.5} durante el año 2014.	124
Figura 3-73. Índice de Calidad del Aire promedio para ozono (O ₃). Base de 8 horas.	126
Figura 3-74. Índice de Calidad del Aire promedio para monóxido de carbono (CO). Base de 8 horas.	126
Figura 3-75. Índice de Calidad del Aire promedio para dióxido de azufre (SO ₂). Base diaria.	126
Figura 4-1. Esquematización hora-mes de la precipitación en la estación del aeropuerto El Dorado en Bogotá. (Instituto de hidrología meteorología y estudios ambientales, 2013)	139
Figura 4-2. Acumulado promedio de precipitación de las estaciones de la RMCAB del periodo 1998-2013, promedio histórico estación del aeropuerto El Dorado del IDEAM y el promedio registrado trimestralmente por la RMCAB.	141
Figura 4-3. Promedio de los acumulados de precipitación trimestral desde 1998 hasta 2014.	141

Figura 4-4. Acumulado de precipitación promedio en 2014 (el eje de las abscisas representa la hora mientras que el de las ordenadas presenta el mes).	144
Figura 4-5. Precipitación promedio acumulada de las estaciones en 2014	144
Figura 4-6. Acumulados multianuales del promedio de las estaciones de la RMCAB. ...	145
Figura 4-7. Número de días y promedio diario de precipitación en 2014.....	146
Figura 4-8. Mapa de acumulado de precipitación de las estaciones de la RMCAB en el año 2014.	147
Figura 4-9. Mapa de acumulado de precipitación de las estaciones de la RMCAB trimestrales en 2014.	148
Figura 4-10. Anomalía de precipitación anual entre 1998 – 2013 y 2014 para las estaciones de la RMCAB.	149
Figura 4-11. Velocidad del viento mensual promedio y máxima relativa de las estaciones de monitoreo de la SDA.....	150
Figura 4-12. Velocidad del viento multianual promedio por trimestre y horario multianual de las estaciones de monitoreo de la SDA.....	151
Figura 4-13. Rosa de los vientos para las estaciones de la RMCAB; Porcentaje de vientos en calma (< 0.5 m/s), velocidad y dirección de los vientos.	152
Figura 4-14. Velocidad del viento y rosa de los vientos en la estación del aeropuerto EIDorado de Bogotá en el periodo 1971- 2000 (el eje de las abscisas representa el mes mientras que el de las ordenadas presenta la hora). Fuente IDEAM	153
Figura 4-15. Velocidad del viento promedio de las estaciones en 2014 (el eje de las abscisas representa el mes mientras que el de las ordenadas presenta la hora).	154
Figura 4-16. Velocidad (Superficie en colores y vectores) y dirección (vectores) del viento en Bogotá durante 2014.	155
Figura 4-17. Temperatura promedio mensual de las estaciones de la RMCAB en el periodo 1998- 2013, IDEAM EIDorado 1980-2010 y RMCAB 2014.....	156
Figura 4-18. Temperatura trimestral media de las estaciones de la RMCAB en el periodo 1998- 2014.	157
Figura 4-19. Temperatura máxima y mínima relativa mensual de las estaciones de la RMCAB en el periodo 1998- 2013, IDEAM EIDorado 1980-2010 y en 2014.	158
Figura 4-20. Temperatura promedio de las estaciones en 2014. (La escala de colores tiene unidades de °C, el eje de las abscisas representa el mes y el de las ordenadas presenta la hora).	159
Figura 4-21. Mapa de Temperatura superficial de las estaciones de la RMCAB en 2014.	160
Figura 4-22. Acumulado de radiación de las estaciones (el eje de las abscisas representa el mes mientras que el de las ordenadas presenta la hora).	162
Figura 4-23. Radiación trimestral de los últimos años.	163
Figura 4-24. Radiación mensual de los últimos años.	163
Figura 4-25. Presión atmosférica mensual de las estaciones de la RMCAB.	164
Figura 4-26. Humedad relativa mensual media del periodo 2008- 2013 y su comparación con los meses de 2014	165
Figura 5-1. PM ₁₀ (Superficie en colores figura de la izquierda); Coeficiente de correlación de Pearson (Superficie en colores figura de la derecha) velocidad y dirección (vectores) del viento en Bogotá, horas de la madrugada del año 2014.	168
Figura 5-2 . PM ₁₀ (Superficie en colores figura de la izquierda); Coeficiente de correlación de Pearson (Superficie en colores figura de la derecha) velocidad y dirección (vectores) del viento en Bogotá, horas de la mañana año 2014.	169

Figura 5-3 . PM ₁₀ (Superficie en colores figura de la izquierda); Coeficiente de correlación de Pearson (Superficie en colores figura de la derecha) velocidad y dirección (vectores) del viento en Bogotá, horas de la tarde año 2014.....	170
Figura 5-4. PM ₁₀ (Superficie en colores figura de la izquierda); Coeficiente de correlación de Pearson (Superficie en colores figura de la derecha) velocidad y dirección (vectores) del viento en Bogotá, horas de la noche año 2014.	171
Figura 5-5. Perfil vertical atmosférico medido por la radiosonda del IDEAM el 6 de noviembre de 2014, en el aeropuerto internacional EIDorado. Tomado de la Universidad de Wyoming.	173
Figura 5-6 PM ₁₀ (Superficie en colores figura); velocidad y dirección (vectores) del viento en Bogotá para el 6 de noviembre de 2014.	174
Figura 5-7. PM ₁₀ (Superficie en colores figura); velocidad y dirección (vectores) del viento en Bogotá para el 6 de noviembre de 2014 en horas de la madrugada, mañana, tarde y noche.....	175
Figura 5-8. Rosas de contaminación de material particulado (a) PM ₁₀ y (b) PM _{2.5} para el día 6 de junio de 2014.	176
Figura 5-9. Corriente de polvo proveniente del Sahara con dirección a Suramérica. Fuente: NASA Earth Observatory (http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=83966). Imagen del 24 de junio de 2014.	179
Figura 5-10. Índice de aerosoles del 25 de junio de 2014. Fuente: NASA Ozone Mapping and Profiler Suite. Fuente: http://ozoneaq.gsfc.nasa.gov/omps/blog/2014/06/saharan-dust	179
Figura 5-11. Perfil vertical atmosférico medido por la radiosonda del IDEAM el 27 de junio de 2014, en el aeropuerto internacional EIDorado. Tomado de la Universidad de Wyoming.	180
Figura 5-12 PM ₁₀ (Superficie en colores figura); velocidad y dirección (vectores) del viento en Bogotá para el 27 de junio de 2014.	181
Figura 5-13. PM ₁₀ (Superficie en colores figura); velocidad y dirección (vectores) del viento en Bogotá para el 27 de junio de 2014 en horas de la madrugada, mañana, tarde y noche.	182
Figura 0-1. Gráfico de <i>boxplot</i> con una descripción de sus componentes.....	190
Figura 0-2. Diagrama de cajas con el ciclo diario de PM ₁₀ por estación durante el año 2014.	192
Figura 0-3. Diagrama de cajas con el ciclo diario de PM _{2.5} por estación durante el año 2014.	192
Figura 0-4. Diagrama de cajas con el ciclo diario de O ₃ por estación durante el año 2014.	193
Figura 0-5. Diagrama de cajas con el ciclo diario de NO ₂ por estación durante el año 2014.	193
Figura 0-6. Diagrama de cajas con el ciclo diario de CO por estación durante el año 2014.	194
Figura 0-7. Diagrama de cajas con el ciclo diario de SO ₂ por estación durante el año 2014.	194

Índice de tablas

Tabla 1-1. Características generales de las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá y variables medidas en cada una de estas en el año 2014.	24
Tabla 1-2. Técnicas de medición automáticas de los equipos de la RMCAB y métodos de referencia asociados de la EPA (<i>Environmental Protection Agency</i>).....	25
Tabla 1-3. Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio. Resolución 610 de 2010.	26
Tabla 2-1. Fechas de inicio de monitoreo de PM _{2.5} en cuatro equipos instalados durante el año 2014.....	27
Tabla 2-2. Resumen del porcentaje de datos capturados por estación y por parámetro. .	29
Tabla 2-3. Resumen del porcentaje de datos válidos por estación y por parámetro.....	31
Tabla 3-1. Resumen de datos diarios de PST para el año 2014.	34
Tabla 3-2. Promedio anual de PM ₁₀ durante los años 2013 y 2014 y cambio de concentración entre los dos años. Se resaltan las estaciones que superan la norma anual correspondiente a 50 µg/m ³	35
Tabla 3-3. Representatividad temporal, promedio, excedencias y máximos de los datos diarios de PM ₁₀ durante el año 2014.....	39
Tabla 3-4. Número de excedencias de la norma diaria de PM ₁₀ (100 µg/m ³) por estación y por mes para el año 2014.	40
Tabla 3-5. Resumen de máximos de las concentraciones diarias de PM ₁₀ en entre los años 2010 y 2014.....	50
Tabla 3-6. Promedio anual de PM _{2.5} durante los años 2013 y 2014. Se resaltan las estaciones que superan la norma anual correspondiente a 25 µg/m ³ . Base de tiempo diaria.	51
Tabla 3-7. Resumen de datos diarios de PM _{2.5} para el año 2014. Base de tiempo diaria. 55	55
Tabla 3-8. Número de excedencias de la norma diaria de PM _{2.5} (50 µg/m ³) por estación y por mes para el año 2014.	56
Tabla 3-9. Resumen histórico de concentraciones máximas de PM _{2.5} entre los años 2010 y 2014. Solamente se considera la estación Kennedy entre 2010 y 2013.	65
Tabla 3-10. Relación de concentraciones entre PM _{2.5} y PM ₁₀ para las estaciones de la RMCAB que midieron ambos contaminantes durante el año 2014 y que tienen cobertura temporal superior a 75%. Como excepción y referencia, se incluye Ministerio de Ambiente con una cobertura temporal de 74% en PM _{2.5}	66
Tabla 3-11. Resumen descriptivo de los datos horarios de O ₃ por estación para el año 2014.	68
Tabla 3-12. Porcentaje de datos válidos, excedencias, máximos y respectivos periodos de ocurrencia, de las concentraciones de O ₃ en base 8 horas durante el año 2014.	71
Tabla 3-13. Número de excedencias y días de excedencias de la norma de 8 horas de O ₃ (80 µg/m ³) por estación y por mes para el año 2014.....	72
Tabla 3-14. Resumen histórico de las concentraciones máximas de O ₃ en promedios móviles de 8 horas entre los años 2010 y 2014.	80
Tabla 3-15. Concentraciones promedio anuales de NO ₂ con base en promedios diarios para los años 2013 y 2014 y cambio entre estos dos años.	81
Tabla 3-16. Resumen de datos horarios de NO ₂ por estación para el año 2014.	83
Tabla 3-17. Resumen de datos diarios de NO ₂ por estación para el año 2014.	84
Tabla 3-18. Resumen histórico de máximos de las concentraciones de NO ₂ en base diaria entre los años 2010 y 2014.....	92

Tabla 3-19. Concentraciones promedio anuales de SO ₂ con base en promedios diarios para los años 2013 y 2014 y cambio entre estos dos años.	93
Tabla 3-20. Resumen de datos de SO ₂ en base de 3 horas por estación para el año 2014.	95
Tabla 3-21. Resumen de datos en base diaria de SO ₂ por estación para el año 2014.	98
Tabla 3-22. Resumen estadístico histórico de los máximos diarios de SO ₂ entre los años 2010 y 2014.	106
Tabla 3-23. Resumen de datos horarios de CO por estación para el año 2014. Los promedios anuales son indicativos y no deben ser contrastados con los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 610 de 2010.	107
Tabla 3-24. Resumen de datos de CO por estación en el año 2014. Base de 8 horas.	109
Tabla 3-25. Resumen histórico de las concentraciones máximas de CO en promedios de 8 horas entre los años 2010 y 2014.	115
Tabla 3-26. Puntos de corte del ICA según la EPA. Fuente: Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).	116
Tabla 3-27. Consolidado de los promedios diarios de partículas suspendidas totales (PST), año 2014.	128
Tabla 3-28. Consolidado de los promedios diarios para material particulado inferior a 2,5 micrómetros (PM _{2.5}), año 2014.	128
Tabla 3-29. Consolidado de los promedios diarios para material particulado inferior a 10 micrómetros (PM ₁₀), año 2014.	129
Tabla 3-30. Consolidado de los promedios horarios de O ₃ , año 2014.	130
Tabla 3-31. Consolidado de los promedios móviles de 8 horas de O ₃ , año 2014.	131
Tabla 3-32. Consolidado de los promedios horarios de NO ₂ , año 2014.	132
Tabla 3-33. Consolidado de los promedios diarios de NO ₂ , año 2014.	133
Tabla 3-34. Consolidado de los promedios horarios de CO, año 2014.	134
Tabla 3-35. Consolidado de los promedios móviles de 8 horas de CO, año 2014.	135
Tabla 3-36. Consolidado de los promedios móviles de 3 horas de SO ₂ , año 2014.	136
Tabla 3-37. Consolidado de los promedios diarios de SO ₂ , año 2014.	137
Tabla 4-1. Acumulados de precipitación de las estaciones de la RMCAB mensuales durante 2014. (NA no cumple criterio de representatividad)	140
Tabla 4-2. Acumulados de los primeros trimestres multianuales y por estación.	142
Tabla 4-3. Acumulados de los segundos trimestres multianuales y por estación.	142
Tabla 4-4. Acumulados de los terceros trimestres multianuales y por estación.	143
Tabla 4-5. Acumulados de los cuartos trimestres multianuales y por estación.	143
Tabla 4-6. Acumulados de precipitación de las estaciones de la RMCAB desde 2000 hasta 2014.	145
Tabla 4-7. valores de velocidad promedio, máxima y de dirección del viento para las estaciones de la RMCAB.	150
Tabla 4-8. Promedio de velocidad del viento para las estaciones de la RMCAB desde 2000 hasta 2014.	151
Tabla 4-9. Promedios de temperatura media anual de las estaciones de la RMCAB en el periodo 2000-2014.	157
Tabla 4-10. Temperaturas máximas, mínimas y amplitud térmica registradas por la RMCAB en el año y su amplitud térmica.	158
Tabla 4-11. Radiación en W/m ² acumulada promedio trimestral y anual de la RMCAB .	161
Tabla 4-12. Presión atmosférica trimestral multianual de las estaciones de la RMCAB.	164

Tabla 4-13. Porcentaje de representatividad de los datos de humedad relativa en el año.	164
Tabla 5-1. Concentraciones de PM ₁₀ y de PM _{2.5} para el 27 de junio de 2014 en las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá. Fuente: Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá.	177
Tabla 0-1. Factores de conversión de unidades para gases contaminantes. Las unidades resultantes (mg/m ³ y µg/m ³) estarán en condiciones de referencia correspondientes a 25°C y 760 mm Hg.	191

Resumen ejecutivo

La Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) a través de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá D.C. (RMCAB) evalúa el cumplimiento de los estándares de calidad del aire de la ciudad dados por la Resolución 601 de 2006 del entonces Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) la cual fue modificada por la Resolución 610 de 2010. La RMCAB actualmente cuenta con 14 estaciones, ubicadas en puntos estratégicos de la ciudad que monitorean las concentraciones de material particulado (PM_{10} , $PM_{2.5}$, PST), de gases contaminantes (SO_2 , NO_2 , CO , O_3) y las variables meteorológicas de precipitación, velocidad y dirección de viento, temperatura, radiación solar, presión atmosférica y humedad relativa.

Entre los contaminantes monitoreados se destacan el material particulado de diámetro menor a 10 micrómetros conocido como PM_{10} , el material particulado menor a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$), las partículas suspendidas totales (PST) y el ozono (O_3), pues en algunas oportunidades sus concentraciones superan los límites máximos permisibles por la normatividad. Los demás contaminantes (CO , NO_2 y SO_2) están presentes en concentraciones bajas con respecto a la norma de calidad del aire establecida. Por tanto, en lo registrado por la RMCAB, no representan riesgo para la salud de la población. Vale aclarar que los análisis comparativos con respecto a la normatividad nacional se llevan a cabo no sólo con respecto al promedio en el periodo encontrado (por ejemplo el promedio anual o el diario) sino también con respecto a las excedencias presentadas en cada estación.

La norma diaria de PM_{10} ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) fue excedida en un 6% del total de datos registrados válidos, porcentaje equivalente a 222 valores, distribuidos entre las estaciones así: Carvajal-Sevillana (121), Kennedy (49), Puente Aranda (25), Tunal (13), Fontibón (4), San Cristóbal (2), Minambiente (2), Suba (2), Guaymaral (1), Usaquén (1), Las Ferias (1) y Centro de Alto Rendimiento (1). Todas las estaciones reportaron excedencias, un comportamiento que fue inusual, teniendo en cuenta que en 2013 hubo 104 excedencias y solo en 3 estaciones. Sin embargo, se debe destacar el evento de contaminación transfronteriza proveniente de las arenas del Sahara, razón por la cual en todas las estaciones se reportó como excedencia. Al hacer el análisis de la cantidad de datos que se encuentran entre el 90% y el 100% del valor de la norma diaria, es decir, mayores a $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y menores o iguales a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, se puede evidenciar que a excepción de las estaciones de Guaymaral y CDAR, las demás estaciones se encuentran en un rango próximo a empezar a exceder. Las mayores magnitudes reportadas por la RMCAB durante el año 2014 fueron $243 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en las estaciones Fontibón y Carvajal-Sevillana, respectivamente, valores que corresponden al 27 de junio en el evento de arenas del Sahara. Las tendencias observadas indican que las localidades más afectadas por concentraciones altas de PM_{10} en el año de 2014 fueron las ubicadas en el suroccidente y sur de la ciudad, especialmente Kennedy, Bosa, Ciudad Bolívar, Puente Aranda y Tunjuelito y las menos afectadas fueron las ubicadas al norte y al oriente. Se debe destacar la alta actividad industrial y de fuentes móviles, especialmente vehículos de carga pesada en la estación Carvajal-Sevillana, pues tanto el promedio como el número de excedencias difieren ampliamente de las demás estaciones de la ciudad. Este resultado destaca la importancia de no generalizar el comportamiento de la contaminación atmosférica sobre Bogotá con promedios globales, por lo cual es más recomendable su sectorización para los análisis respectivos. Por su parte, los meses más contaminados en PM_{10} se encontraron en

el primer semestre (a excepción de abril), sin embargo diciembre fue el mes con la mayor cantidad de excedencias de todo el 2014, caso contrario al comportamiento de julio, agosto y septiembre que tienen bajas excedencias. Los promedios anuales más altos de PM_{10} estuvieron en las estaciones Carvajal-Sevillana con 91, Kennedy con 71, Puente Aranda con 62, Tunal con 53 y Suba con 51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que las demás estaciones estuvieron por debajo de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En comparación con el año 2013, el monitor de Puente Aranda presentó un aumento significativo en 2014 de 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; mientras que las estaciones de Carvajal-Sevillana y Tunal tuvieron un aumento de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Por su parte las estaciones de Suba, Las Ferias y Minambiente presentaron reducciones en sus concentraciones y las estaciones de Usaquén y Kennedy se mantuvieron constantes. Con respecto al comportamiento semanal, el lunes resulta el día de menor concentración, debido a la presencia de festivos y a la baja influencia residual del día previo, mientras que el día de mayor concentración resultó el viernes (a excepción de Minambiente que resultó el jueves). Los domingos reportan los valores de concentración más bajos de toda la semana y para todas las estaciones, lo cual evidencia el fuerte impacto que tiene la actividad de la ciudad (fuentes fijas y móviles) en la concentración de PM_{10} . Vale destacar el comportamiento del día sábado, el cual no tiene gran diferencia con respecto a otros días de la semana. Con respecto al ciclo diario, se observan picos entre las 6 y 8 horas para descender a valores mínimos alrededor de las 11-13 horas (dependiendo la estación), estabilizándose y luego presentando otro aumento paulatino que va hasta las 20-22 horas e incluso continúa elevándose como en los casos de Guaymaral y CDAR que van hasta las 23-24 horas.

Con respecto al contaminante $PM_{2.5}$ el límite normativo anual es de 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y mide principalmente fuentes de combustión. En el año 2014 el $PM_{2.5}$ fue monitoreado por 10 estaciones, sin embargo no todas cumplen criterios de representatividad temporal, por entrar en operación durante el año. Las mayores concentraciones promedio se encontraron en Carvajal-Sevillana con 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y Kennedy con 32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (tendencia que es similar a la registrada para PM_{10}); mientras que la estación Usaquén, al norte de la ciudad, reportó los niveles más bajos con 13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En comparación a 2013, la estación Kennedy (la única que tuvo dato representativo ese año) tuvo una concentración promedio de 28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ lo que implica un aumento de 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Por primera vez, se presenta un mapa de tendencia con la concentración promedio de $PM_{2.5}$ para Bogotá, evidenciando un comportamiento similar a la registrada para PM_{10} , en donde el suroccidente de la ciudad tiene los valores más altos de concentración y el norte y oriente de la ciudad los valores más bajos. Con respecto al registro diario (el cual tiene un límite normativo de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), el valor máximo se presentó en Carvajal-Sevillana el 27 de junio de 2014 con 77 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, día en que ocurrió el evento de alta concentración de material particulado proveniente de las arenas del Sahara y que también reportó su máximo diario en las estaciones de Usaquén, Las Ferias y San Cristobal, con 46, 52 y 44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. También se destacan los días del 31 de marzo de 2014 en donde Suba y Kennedy presentaron sus registros máximos en el año, con 55 y 67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y el día del evento del incendio de llantas en Fontibón (6 de noviembre) en donde las estaciones de Centro de Alto Rendimiento y Minambiente presentaron sus máximos con 51 y 56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Por su parte, la cantidad de excedencias (superar el valor normativo de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) se dieron principalmente en las estaciones de Carvajal-Sevillana, Kennedy y Tunal con 28, 17 y 10, respectivamente. En términos generales los jueves y viernes resultan los peores días de la semana para $PM_{2.5}$. Los ciclos diarios evidencian picos de concentración en todas las estaciones entre 6 y 9 a.m. aunque su magnitud es variable dependiendo de las características específicas de cada una de las estaciones. Se destacan las tendencias de las estaciones Suba donde las concentraciones hasta el medio día tienen un descenso

abrupto (un comportamiento atípico) y son menores a las registradas en horas de la noche (posiblemente por actividades de tráfico pesado) y en Usaquén donde los niveles son bajos y el pico de concentración de la tarde es similar en magnitud y dispersión al de la mañana. Lo anterior evidencia la diferencia en las actividades de las diversas zonas de la ciudad, por lo cual no resulta conveniente generalizar el comportamiento espacial de Bogotá con promedios a nivel ciudad, sino que es necesario sectorizar para observar los comportamientos individuales y analizar situaciones particulares de contaminación atmosférica.

El ozono (O_3), un contaminante secundario producido a partir de la reacción de los óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles (COV) en presencia de radiación solar, en términos de la concentración octohoraria el O_3 en 2014 presentó 237 excedencias con respecto al límite máximo permisible de 8 horas el cual es de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ según la resolución 610 de 2010, sin embargo es importante precisar que es una normatividad muy exigente y se encuentra incluso por debajo de la recomendación de la Organización Mundial de la Salud, la cual normalmente es muy estricta y en la actualidad es de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Vale destacar que dicha recomendación no es adoptada en las legislaciones de calidad de aire, ni en los Estados Unidos ni tampoco por la Comunidad Europea. Al hacer la comparación con respecto a la norma de la OMS el número de excedencias desciende a 58, y con respecto a la normatividad de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, la cual es de $147 \mu\text{g}/\text{m}^3$, no se obtienen excedencias en Bogotá en 2014. También es importante destacar el episodio de contaminación de ozono ocurrido en marzo 29 de 2014, en el cual se registraron los máximos para 9 de las 11 estaciones durante el 2014 y que además en el análisis mensual se pueden ver excedencias muy marcadas en el primer trimestre y principalmente marzo, lo cual deja ver que dichas excedencias fueron por ocasionadas principalmente por temas meteorológicos a nivel regional o tal vez a escala global y no puntuales y generalizado durante todo el año. Por su parte el comportamiento espacial del O_3 en Bogotá, muestra una diferencia de las tendencias registradas con respecto a los demás contaminantes, pues mientras los contaminantes PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_2 , SO_2 y CO tienen concentraciones bajas al norte de la ciudad, el ozono resulta alto; mientras que al sur y suroccidente las concentraciones de ozono tienden a ser bajas y el resto de contaminantes tienden a ser altos, lo cual se asocia a su naturaleza de contaminante secundario. El día de mayor concentración de ozono resulta el domingo y los de menor los jueves y miércoles (tendencia contraria a los demás contaminantes). El valor de concentración máximo encontrado en 2014 para 8 horas de exposición fue de $133 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por su parte la concentración horaria de ozono, presentó excedencias en casi todas las estaciones de la RMCAB a excepción de Carvajal-Sevillana, sin embargo dichas excedencias ocurren en el evento de contaminación por ozono mencionado del 29 de marzo de 2014. Las estaciones con mayores excedencias a nivel horario fueron Usaquén, Centro de Alto Rendimiento y Fontibón. El máximo horario de ozono registrado por la RMCAB en 2014 fue $179 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la estación Usaquén. En comparación al año 2013, en donde se presentaron 28 excedencias, en el año 2014 se presentaron 74 excedencias, sin embargo esta atribuido puntualmente al evento del 29 de marzo.

El dióxido de nitrógeno NO_2 no supero los límites normativos nacionales ni para la exposición a 1 hora ni tampoco para 24 horas. El valor máximo encontrado para exposición horaria fue de $199 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (100 ppb) en la estación Carvajal-Sevillana, mientras que para exposición a 24 horas el valor máximo fue de $93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (47 ppb) en Las Ferias.

El análisis del ciclo semanal para este contaminante deja ver que los martes y los viernes presentan las mayores concentraciones, mientras que los domingos y los lunes las menores. Por su parte el ciclo diario presenta un comportamiento más similar al material particulado, con picos entre las 6 y 9am, con mínimo alrededor del mediodía, para volver a aumentar las concentraciones en horas de la tarde-noche, lo cual se encuentra ligado a la fotoquímica de este contaminante. Con respecto al comportamiento histórico de este contaminante, no se aprecian cambios significativos en los últimos 5 años, sin embargo llama la atención el comportamiento de la estación Suba, para la cual se observa una pequeña tendencia al aumento.

El dióxido de azufre SO_2 no supero los límites normativos nacionales ni para la exposición a 3 horas ($750 \mu\text{g}/\text{m}^3$), ni para 24 horas ($250\mu\text{g}/\text{m}^3$), ni tampoco para la exposición anual de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El valor máximo encontrado para una exposición a 3 horas fue de $158 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que para 24 horas de exposición estuvo en $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en ambos casos en la estación Kennedy. La comparación de 2014 con años anteriores se observa similar e incluso inferior en algunos casos. El ciclo diario de este contaminante se aprecia similar al material particulado, con incrementos en las horas pico de la mañana y leves aumentos en la tarde-noche.

El monóxido de carbono no presento excedencias de la norma nacional, ni tampoco se observan datos entre el 75% y el 100% del valor de la norma, ni para una exposición a 1 hora como para 8 horas. El valor máximo encontrado para este periodo fue de $10.4 \text{ mg}/\text{m}^3$ para una exposición de 1 hora (norma nacional $40 \text{ mg}/\text{m}^3$) y de $5.4 \text{ mg}/\text{m}^3$ para una exposición de 8 horas (norma nacional $10 \text{ mg}/\text{m}^3$).

El análisis del Índice de Calidad de Aire (ICA) para PM_{10} , permite observar que se tuvo una predominancia en la categoría de “Buena” para las estaciones de Usaquén, Suba, Las Ferias, CDAR, Minambiente, Tunal y San Cristobal, mientras que las estaciones de Carvajal-Sevillana, Kennedy y Puente Aranda tuvieron una predominancia en “Moderado”. Los días de la semana que tienen mejor ICA son domingo y lunes, con una predominancia en la categoría de “Bueno” alrededor de un 75%; mientras los peores días son los viernes con un 55% en “Bueno”, un 43% en moderado y un 2% en “Dañino para la salud de grupos sensibles”. Los martes, miércoles y jueves también presentan alrededor de un 60% en la categoría de “Bueno”, siendo su complemento la categoría de “Moderado”. Es de notar que los sábados no presentan gran diferencia con respecto a días entre semana. Los meses del año con peor ICA fueron febrero y marzo y el mejor fue julio. Por su parte el análisis para ICA del $PM_{2.5}$, se presenta por primera vez para 7 estaciones como el promedio anual, predominando la categoría de “Moderado”, especialmente para las estaciones de Carvajal-Sevillana con un 80% y Kennedy con un 75% aproximadamente, presentando tan sólo un 5% en la categoría de “Bueno” y llegando a tener incluso un 0.5% en “Dañino para la salud”, además de 20 y 15% en la categoría de “Dañino para la salud de grupos sensibles”, respectivamente. Los días entre semana y el sábado presentan un comportamiento similar, mientras que el domingo se aprecia un poco mejor. Al igual que para el ICA en PM_{10} los meses con peor ICA fueron febrero y marzo y el mejor fue julio. Por último los gases contaminantes muestran un ICA en la categoría de “Buena” para todas las estaciones y todos los gases.

Respecto a las variaciones de las condiciones meteorológicas, la RMCAB monitoreó la precipitación, temperatura, dirección y velocidad del viento, humedad relativa, radiación solar global y presión barométrica durante el segundo trimestre de 2014.

Con respecto a la precipitación, durante el año 2014 se presentó un comportamiento sectorizado a lo largo del año con respecto a promedios históricos tanto de la RMCAB (1998-2013) como de la estación EIDorado del IDEAM (1980 – 2010), pues para el primer y cuarto trimestre se presentaron excedencias, en especial noviembre y diciembre con excedencias de hasta 103% en función de los históricos; mientras que el segundo y el tercer trimestre presentaron deficiencias, que incluso para los meses de abril y agosto fueron muy significativos. Por otro lado, al revisar el promedio histórico de la RMCAB en los últimos 14 años, se evidencia una tendencia al aumento en las precipitaciones en Bogotá, lo cual también se evidencia en el número de días húmedos (días con precipitación mayor a 1mm), lo cual para este 2014, se encontró por encima de los registros históricos a excepción de los meses de abril, mayo y agosto. Sin embargo, se debe aclarar, que la cantidad de precipitación que cae en promedio por día, se encontró en casi todos los meses por debajo, a excepción de diciembre que superó ampliamente el registro histórico. Lo anterior muestra un comportamiento “anormal” de las precipitaciones en Bogotá durante 2014. Por su parte la distribución de precipitaciones en Bogotá, muestra que el suroccidente de la ciudad es la zona más seca de la ciudad, lo cual está asociado a la mayor carga de material particulado, mientras que la zona oriental de la ciudad resulta la más lluviosa. Por su parte las horas del día de mayor precipitación son entre las 3 y 6 pm, La estación en donde más llovió en este trimestre fue San Cristobal con 1076mm acumulado en 2014, mientras que la de menor precipitación fue Carvajal-Sevillana con 639mm, lo cual evidencia un comportamiento sectorizado, en el cual el norte y suroccidente presentan los menores valores, mientras que al suroriente y el centro geográfico de la ciudad, los mayores valores de precipitación.

Con respecto a las velocidades de viento, las estaciones de Kennedy, Carvajal-Sevillana y Puente Aranda registraron los mayores valores promedio a lo largo del año con 2.6, 2.4 y 2.1 m/s, respectivamente. Las velocidades máximas se observaron en Kennedy, Puente Aranda, Carvajal-Sevillana y Minambiente con 4.9, 4.8, 4.2 y 4.2, respectivamente. Por el contrario, Guaymaral y Tunal registraron promedios del viento alrededor de 1m/s y valores máximos de 2.7 y 2.5m/s, respectivamente. Lo anterior ilustra un mapa de vientos para Bogotá en 2014, en donde la mayor velocidad de viento se encuentra al suroccidente y occidente, mientras que las menores velocidades de viento se encuentran al oriente y norte de la ciudad. Con respecto a la dirección de los vientos, estos estuvieron predominantes del este – sureste – sur, particularmente hacia las zonas oriental, sur y suroccidente de la ciudad. En algunas zonas del occidente y del norte se observaron predominancias del norte – noreste y fue común la baja predominancia de vientos del oeste en toda la ciudad. Por su parte los vientos en calma (menores a 0.5 m/s), se observan principalmente hacia el noreste en donde más del 30% de los datos del año se presentaron en calma, mientras que la zona sur y suroccidente se observan los menores valores de viento en calma (no mayor 10%).

Con respecto a la variable temperatura media, se obtuvo un promedio de 14.1°C en las estaciones de la RMCAB durante el 2014. Con respecto a los datos históricos de la RMCAB (1998-2013) y la estación EIDorado del IDEAM (1980 – 2010), se encontraron valores por encima de estos históricos hasta en 0.6°C para los meses de abril y noviembre a excepción de agosto que tuvo un comportamiento negativo con -0.2 °C. Las zonas con mayor temperatura media en la ciudad resultan al suroccidente y las de menor temperatura al suroriente, mientras que las demás zonas se encuentran en rangos intermedios.

Estaciones como Guaymaral, Suba y Centro de alto rendimiento presentan jornadas calurosas durante el día y frías en las noches, a diferencia de estaciones como Kennedy y Carvajal-Sevillana que mantienen condiciones menos calurosas durante los días, pero más cálidas hacia las noches.

Por otro lado se hace un análisis de meteorología y calidad de aire, en donde se correlacionan los datos de PM_{10} contra las velocidades de vientos, sin tener en cuenta las demás variables, lo cual, aunque no resulta una “realidad completa”, pues se están dejando de lado algunas variables que pueden ser impactantes en este análisis, sí nos permite ver las tendencias y encontrar relaciones que pueden resultar interesantes en el transporte de contaminantes en Bogotá. Este análisis directo debe conllevar a unas correlaciones negativas (relación lineal inversa) si existe un proceso de dispersión por vientos. Para el bloque horario de la mañana (6am a 12m), se encuentran valores de correlación entre -0.3 a -0.4, lo que muestra la dispersión de contaminantes al aumentar la velocidad en la zona central de la ciudad principalmente, sin embargo el suroccidente de la ciudad no presenta este comportamiento, siendo incluso las correlaciones con bajos valores positivos, lo que puede sugerir un pequeño transporte de PM_{10} de otros lados. En el bloque de horas de la tarde se encuentran correlaciones principalmente positivas de hasta 0.3 y 0.4, en especial en el centro geográfico de la ciudad, sur y suroccidente, lo cual le da un poco más de fuerza al posible arrastre de PM_{10} desde la zona sur en las localidades de Tunjuelito, Rafael Uribe, Ciudad Bolívar y posiblemente Soacha, sitios de donde proviene el viento. En los bloques de madrugada y noche no se aprecian correlaciones significativas, sin embargo la tendencia es negativa en la mayor parte de la ciudad.

Por último se hace el análisis del estudio de caso del día de máxima concentración, que resulto el 27 de junio, a causa del transporte de material particulado proveniente del Sahara, pero para este informe también se ha hecho el análisis del día 6 de noviembre, a causa del incendio de llantas en la bodega de Fontibón, evento que presentó unos aumentos considerables de material particulado. Ambos casos son estudiados en este informe de 2014.

Introducción

El Distrito Capital cuenta con la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá – RMCAB, que permite recolectar información sobre la concentración de contaminantes de origen antropogénico y natural y el comportamiento de las variables meteorológicas que regulan el transporte de los mismos en la atmósfera de Bogotá. Los datos recolectados en distintos sitios de la ciudad se reciben en una estación central donde se someten a un proceso de validación final y con el fin de analizar tendencias espaciales y temporales, y evaluar el cumplimiento de los estándares de calidad de aire en Bogotá dados por la Resolución 610 del 24 de marzo de 2010 expedida por el entonces Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT).

Para el año 2014, la RMCAB estaba conformada por 13 estaciones fijas de monitoreo y una estación móvil, ubicadas en sitios estratégicos de la ciudad, dotadas con equipos de última tecnología que permiten realizar un monitoreo continuo de las concentraciones de material particulado (PM₁₀, PST, PM_{2.5}), de gases contaminantes (SO₂, NO₂, CO, O₃) y de las variables meteorológicas de precipitación, velocidad y dirección del viento, temperatura, radiación solar, humedad relativa y presión barométrica.

El primer capítulo del presente informe contiene información sobre las características generales de las estaciones de la RMCAB. En el segundo capítulo se encuentran los respectivos indicadores de operación y desempeño, referente a la captura de datos e información válida en el año 2014. El tercer capítulo corresponde a la sección de calidad del aire, donde se presenta un análisis del comportamiento de cada uno de los contaminantes durante este periodo, así como el Índice de Calidad del Aire que se asocia a temas de salud pública. Posteriormente se encuentra la sección de meteorología que contempla el análisis de precipitación, velocidad y dirección del viento, temperatura, radiación solar, humedad relativa y presión barométrica, lo que permite establecer las condiciones meteorológicas que influyeron en la dispersión de los contaminantes. Finalmente se presenta un capítulo de meteorología y calidad de aire en el cual se presentan dos análisis de caso: Análisis de vientos vs. Material particulado y el estudio de caso del día de máxima concentración, que para el caso de 2014, resultaron dos días de interés, el incendio de llantas en Fontibón y el transporte de polvo del Sahara hacia Suramérica en junio de 2014. En ambos casos se analiza el contaminante PM₁₀.

El usuario puede revisar los resultados de calidad de aire para el año 2014 en la parte final del tercer capítulo, en la cual se presenta una síntesis de los resultados por medio de tablas que permiten visualizar en términos cuantitativos el comportamiento de cada contaminante en sectores específicos de la ciudad.

1. Generalidades

La RMCAB hace parte de la Subdirección de Calidad del Aire, Auditiva y Visual de la Secretaría Distrital de Ambiente y está conformada por trece estaciones automáticas y una estación móvil, las cuales detectan en forma continua la concentración de contaminantes criterio y variables meteorológicas en la ciudad y envían los datos a una central donde la información es sometida a procesos de evaluación de calidad. Posteriormente, se elaboran informes periódicos que incluyen el análisis de la información capturada así como la verificación del cumplimiento de las regulaciones vigentes y la identificación de los sectores que requieren atención especial por sus niveles de contaminación.

La Tabla 1-1 presenta las características generales, incluyendo la ubicación y parámetros medidos con respecto a los contaminantes y a las variables meteorológicas para cada una de las estaciones de la RMCAB y la Figura 1-1 corresponde a la distribución de las estaciones en la ciudad. Las condiciones de la zona de influencia de las estaciones cubren un amplio rango de características las cuales requieren su consideración para los análisis de calidad del aire. En la interpretación de los análisis de este informe es importante destacar tres cambios de nombres en las estaciones Parque Simón Bolívar que ahora es Centro de Alto Rendimiento, Sagrado Corazón que ahora es Ministerio de Ambiente o Min.Ambiente y la estación Carvajal que ahora es Carvajal-Sevillana, a fin de ilustrar de mejor forma el sitio en donde se encuentran ubicadas. Las coordenadas geográficas no fueron modificadas con respecto a información de documentos previos.

En el presente informe no se considera la Estación Móvil porque está evaluando la calidad del aire en corredores viales bajo el Convenio 26 de 2010 entre el IDEAM, La Secretaría Distrital de Ambiente y TRANSMILENIO S.A.

Los métodos de medición utilizados por la RMCAB se encuentran descritos en el CFR (*Code of Federal Regulations*) Título 40 que están aprobados por la *Environmental Protection Agency* (EPA) de Estados Unidos (*U.S. Government Printing Office*, 2014). La Tabla 1-2 describe las Técnicas de Medición de los equipos por contaminante las cuales están acordes a los métodos de referencia de la EPA o sus equivalentes.

Para una descripción completa de las estaciones automáticas que conforman la RMCAB se puede consultar la página web <http://www.ambientebogota.gov.co>, vínculo “Calidad del aire en BOGOTÁ”¹

¹ También es posible acceder directamente mediante la dirección <http://201.245.192.252:81>

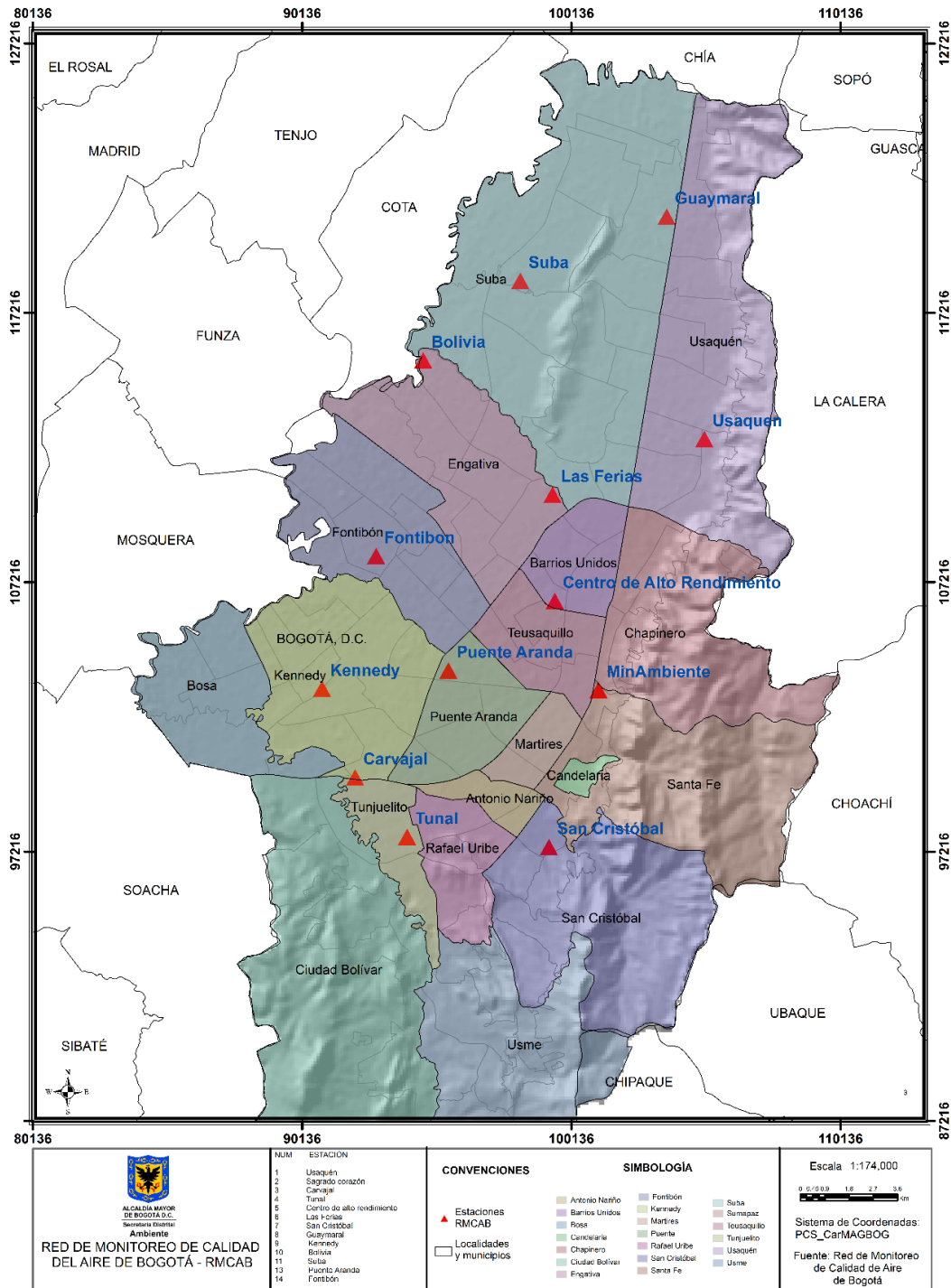


Figura 1-1. Distribución de las estaciones de la RMCAB en el año 2014².

² Parque Simón Bolívar (IDRD) será referida como Centro de Alto Rendimiento y Sagrado Corazón como Min. Ambiente o Ministerio de Ambiente.

Tabla 1-1. Características generales de las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá y variables medidas en cada una de estas en el año 2014.

Característica	Guaymaral	Usaquén	Suba	Bolivia	Las Ferias	C. de Alto Rendimiento	Min. Ambiente	Fontibón	Puente Aranda	Kennedy	Carvajal-Sevillana	Tunal	San Cristóbal	Móvil	
Ubicación	Latitud	4°47'1.52"N	4°42'37.26"N	4°45'40.49"N	4°44'9.12"N	4°41'26.52"N	4°39'30.48"N	4°37'31.75"N	4°40'12.36"N	4°37'54.36"N	4°37'30.18"N	4°35'44.22"N	4°34'34.41"N	4°34'21.19"N	---
	Longitud	74°2'39.06"W	74°1'49.50"W	74° 5'36.46"W	74°7'33.18"W	74°4'56.94"W	74°5'2.28"W	74°4'1.13"W	74 8'29.58"W	74°7'2.94"W	74°9'40.80"W	74°8'54.90"W	74°7'51.44"W	74°5'1.73"W	---
	Altitud	2580 m	2570 m	2571 m	2574 m	2552 m	2577 m	2621 m	2591 m	2590 m	2580 m	2563 m	2589 m	2688 m	---
	Altura del suelo	0 m	10 m	6 m	0 m	0 m	0 m	15 m	12 m	10 m	3 m	3 m	0 m	0 m	
	Localidad	Suba	Usaquén	Suba	Engativá	Engativá	Barrios Unidos	Santa Fe	Fontibón	Puente Aranda	Kennedy	Kennedy	Tunjuelito	San Cristóbal	---
	Dirección	Autopista Norte # 205-59	Carrera 7B Bis # 132-11	Carrera 111 # 159A-61	Avenida Calle 80 # 121-98	Avenida Calle 80 # 69Q-50	Calle 63 # 59A-06	Calle 37 # 8-40	Carrera 96G # 17B-49	Calle 10 # 65-28	Carrera 80 # 40-55 sur	Autopista Sur # 63-40	Carrera 24 # 49-86 sur	Carrera 2 Este # 12-78 sur	---
	Tipo de zona	Suburbana	Urbana	Suburbana	Suburbana	Urbana	Urbana	Urbana	Urbana	Urbana	Urbana	Urbana	Urbana	Urbana	
	Tipo de estación	De fondo	De fondo	De fondo	De fondo	De tráfico	De fondo	De tráfico	Industrial	Industrial	De fondo	Tráfico Industrial	De fondo	De fondo	
	Localización toma muestra	Zona Verde	Azotea	Azotea	Zona Verde	Zona Verde	Zona Verde	Azotea	Azotea	Azotea	Zona Verde	Azotea	Zona Verde	Zona Verde	
	Altura punto de muestra	4 m	13 m	9 m	4.6 m	4.6 m	4.6 m	18 m	15 m	13 m	7 m	6 m	3 m	4 m	
Altura viento	10 m	19 m	10 m	10 m	10 m	10 m	19 m	22 m	20 m	10 m	13 m	10 m	10 m		
Contaminantes	PST										X				
	PM ₁₀	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	PM _{2.5}	X	X	X		X	X			X	X	X	X		
	O ₃	X	X	X		X	X	X	X		X	X	X	X	
	NO ₂	X		X		X	X		X	X	X	X		X	
	CO		X			X	X		X	X	X	X	X	X	X
	SO ₂			X		X	X		X	X	X	X	X	X	X
Var. Meteorológicas	V. Viento	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	D. Viento	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Temperatura	X	X	X		X	X		X	X	X	X	X	X	X
	Precipitación	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	R. Solar	X					X				X		X	X	X
	H. Relativa	X				X	X				X		X	X	X
	Presión Atm.	X				X			X		X				X

La estación Parque Simón Bolívar será referenciada como Centro de Alto Rendimiento y Sagrado Corazón como Min. Ambiente.

Tabla 1-2. Técnicas de medición automáticas de los equipos de la RMCAB y métodos de referencia asociados de la EPA (*Environmental Protection Agency*).

Contaminante	Principio de Medición	Método de referencia EPA
PM ₁₀	Atenuación por Radiación Beta	EQPM-0798-122
PST	Atenuación por Radiación Beta	
PM _{2.5}	Atenuación por Radiación Beta	EQPM-0609-183
O ₃	Espectrofotometría de Absorción en el Ultravioleta	EQOA-0992-087
NO ₂	Quimioluminiscencia	RFNA-1289-074
CO	Espectrofotometría de Absorción en el Infrarrojo	RFCA-0992-088
SO ₂	Fluorescencia Pulsante en el Ultravioleta	EQSA-0495-100

Al momento de analizar la información de calidad del aire de Bogotá es importante considerar que no todos los años se tienen las mismas estaciones, ni un mismo contaminante en ocasiones es medido con la misma intensidad en todos los años.

1.1. Normatividad vigente.

La normatividad de calidad del aire adoptada como nivel de referencia para la evaluación de las concentraciones de contaminantes en Bogotá se establece según la Resolución 601 del 4 de abril de 2006 expedida por el entonces Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), la cual fue modificada mediante Resolución 610 de 2010. La Tabla 1-3 presenta los niveles máximos para los contaminantes criterio.

Tabla 1-3. Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio. Resolución 610 de 2010.

Contaminante	Nivel máximo permisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de exposición	Cálculo
PST	100	Anual	Promedio aritmético de las concentraciones diarias en 365 días.
	300	24 horas	Concentración promedio en 24 horas.
PM ₁₀	50	Anual	Promedio geométrico de las concentraciones diarias en 365 días.
	100	24 horas	Concentración promedio en 24 horas.
PM _{2.5}	25	Anual	Promedio aritmético de las concentraciones diarias en 365 días.
	50	24 horas	Concentración promedio en 24 horas.
SO ₂	80	Anual	Promedio aritmético de las concentraciones diarias en 365 días.
	250	24 horas	Concentración promedio en 24 horas.
	750	3 horas	Concentración promedio horaria en 3 horas.
NO ₂	100	Anual	Promedio aritmético de las concentraciones diarias en 365 días.
	150	24 horas	Concentración promedio en 24 horas.
	200	1 hora	Concentración promedio horaria.
O ₃	80	8 horas	Concentración promedio en 8 horas
	120	1 hora	Concentración promedio horaria
CO	10000	8 horas	Concentración promedio en 8 horas
	40000	1 hora	Concentración promedio horaria

2. Indicadores de operación y desempeño

En esta sección se presentan los indicadores de operación y desempeño de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá para el año 2014. En la primera parte se hará mención a la operación de la RMCAB en cuanto a los datos capturados, que son aquellos obtenidos de forma horaria por la RMCAB de acuerdo al número de monitores instalados. En la segunda parte se presentan los datos horarios válidos a partir de la información anterior.

2.1. Porcentaje de captura de datos

Para 4 de los 17 parámetros monitoreados en la RMCAB se obtuvieron porcentajes de pérdida de datos superior al 10%, valor a partir del cual la causa se debe a una de las tres situaciones siguientes: 1) fallas mayores en múltiples equipos, 2) falla en suministro de energía o 3) inclusión de nuevos equipos de monitoreo en el transcurso del año.

La Figura 2-1 presenta el porcentaje de captura de datos por parámetro en el año 2014³, donde se observa que 16 de los 17 parámetros monitoreados cumplen representatividad temporal superior al 75%. El monóxido de carbono (CO) registra un porcentaje de captura del 69% debido a que se presentó una acumulación de fallas en las fuentes IR de los equipos de Kennedy, Centro de Alto Rendimiento, San Cristóbal y Usaquén. Las fuentes IR no son partes que fallan frecuentemente en el corto plazo, son costosas y deben ser importadas de diferentes países, por lo tanto, su trámite de compra se realiza exclusivamente cuando se presenta la necesidad por falla.

A continuación se analizan los 3 parámetros cuyo porcentaje de captura se encuentra entre el 75% y 90%, los cuales son: Material particulado inferior a 2,5 micrómetros (PM_{2,5}), dióxido de azufre (SO₂) y presión barométrica.

Para el caso del PM_{2,5} se registra una captura del 82%, debido a que se incluyen las 4 estaciones en donde se instalaron monitores adicionales de PM_{2,5}, alcanzando por primera vez en la historia de la RMCAB un total de 10 monitores con registros automáticos simultáneos de este parámetro en la ciudad.

Tabla 2-1. Fechas de inicio de monitoreo de PM_{2,5} en cuatro equipos instalados durante el año 2014.

Estación	Fecha inicio monitoreo de PM _{2,5}
Guaymaral	15 de octubre de 2014
San Cristóbal	02 de mayo de 2014
MinAmbiente	26 de marzo de 2014
Suba	07 de marzo de 2014

La presión barométrica registra una captura del 84% debido a que 1 de los 4 sensores de la RMCAB, ubicado en Fontibón, dejó de funcionar por problema técnico en el suministro eléctrico de la estación desde 01 de julio de 2014 en adelante.

³ T: temperatura a 2 metros; T8m: temperatura a 8 metros; T20m: temperatura a 20 metros; Prec.: precipitación; H.R.: humedad relativa; R.S.: radicación solar; RDR: radiación solar directa; RDF: radiación solar difusa; UVB: radiación ultravioleta B; P.B.: presión barométrica; V.V.: velocidad del viento; D.V.: dirección del viento.

En el caso del dióxido de azufre (SO₂) se presenta una captura de datos del 80% debido a que se incluye en el conteo un equipo adicional instalado en la estación de tunal, el cual entró en operación el 25 de mayo de 2015. Se presentó influencia adicional por la pérdida de datos del analizador de la estación de Fontibón por la falta de suministro eléctrico, y el analizador de la estación de Carvajal por daño en la tarjeta CPU del equipo.

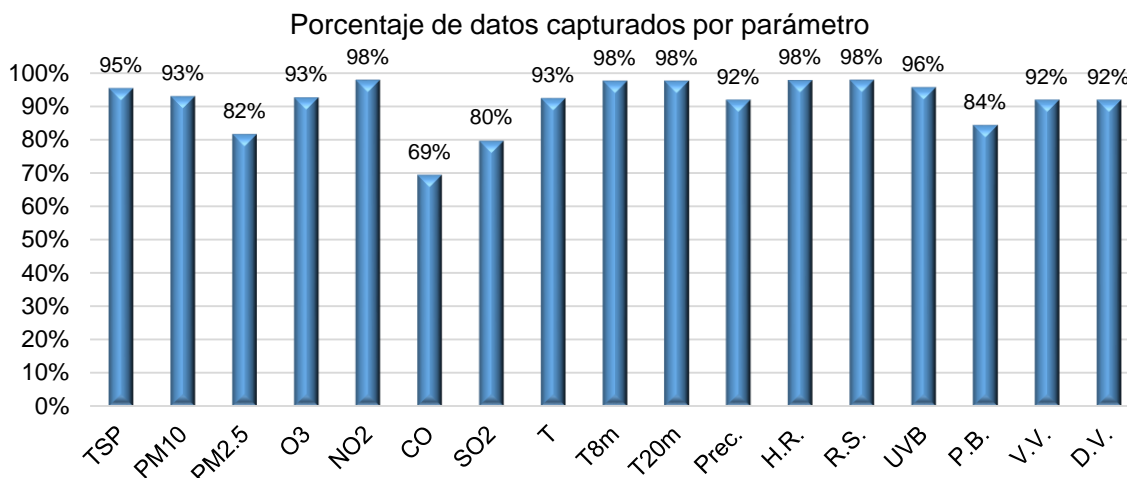


Figura 2-1. Porcentaje de captura de datos por parámetro. Año 2014.

En la Figura 2-2 se presenta el porcentaje de datos capturados por estación, donde se observa que la estación de Fontibón registra el porcentaje de captura más bajo del año, con un 44%. Como se mencionó anteriormente, esto se debió a problemas técnicos en el suministro eléctrico de la estación. Los analizadores fueron reubicados a otras estaciones mientras se proyectaba la solución para el funcionamiento ininterrumpido de la estación y a largo plazo de manera confiable. En el caso de la estación de Bolivia, se presentaron pérdidas de datos mayormente relacionada con bloqueos del Datalogger y daño en sensores meteorológicos. La estación de Centro de Alto Rendimiento presenta una pérdida de captura de datos del 20% debida a falla de 3 equipos, el analizador de monóxido de carbono (CO), sensor de radiación directa y sensor de radiación difusa. Para el caso de la estación de Usaquén el porcentaje de captura del 88% se ve influenciado por la puesta en funcionamiento del analizador de monóxido de carbono (CO) que entró en operación en el mes de julio de 2014. En Carvajal la disminución se presenta debido a daño en CPU del equipo el 01 de abril de 2014.

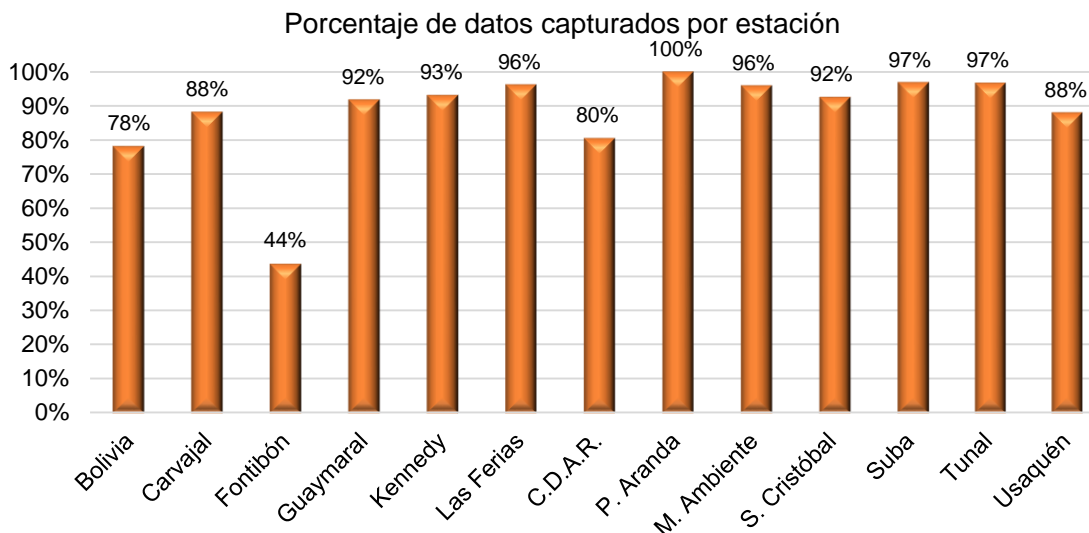


Figura 2-2. Porcentaje de captura de datos por estación. Año 2014.

En la Tabla 2-2 se presenta el porcentaje total de captura de datos por estación y por parámetro para el año 2014. Las celdas vacías en esta tabla indican que no se dispone del equipo de medición en la respectiva estación.

Tabla 2-2. Resumen del porcentaje de datos capturados por estación y por parámetro.

	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	O ₃	NO ₂	CO	SO ₂	T	T8m	T20m	Prec.	H.R.	R.S.	RDR	RDF	UVB	P.B.	V.V.	D.V.	Total
Bolivia											78%							78%	78%	78%
Carvajal	95%	95%	94%	95%	95%	95%	21%	95%			95%							95%	95%	95%
Fontibón		44%		44%		44%	44%	44%			44%						44%	44%	44%	44%
Guaymaral		98%	21%	98%	98%			98%	98%	98%	98%	98%					98%	98%	98%	92%
Kennedy		99%	99%		99%	28%	97%	99%			99%	99%	99%				99%	99%	99%	93%
Las Ferias		97%	97%	97%	97%	82%	98%	97%			97%	97%					97%	97%	97%	96%
C.D.A.R.		96%	97%	96%	96%	58%	94%	96%			96%	96%	96%	0%	0%	96%		96%	96%	80%
P. Aranda		100%		100%	100%	100%	100%	100%			100%							100%	100%	100%
M. Ambiente		100%	75%	100%							100%							100%	100%	96%
S. Cristóbal		98%	67%	99%		64%	98%	98%			98%	98%	98%					98%	98%	92%
Suba		99%	75%	100%	100%		100%	100%			100%							100%	100%	97%
Tunal		100%	99%	99%	99%	99%	67%	99%			99%	99%	99%					99%	99%	97%
Usaquén		93%	93%	93%		55%		93%			93%							93%	93%	88%
Total	95%	93%	82%	93%	98%	69%	88%	93%	98%	98%	92%	98%	98%	0%	0%	96%	84%	92%	92%	89%

2.2. Porcentaje de datos válidos.

En el año 2014 se obtuvo un porcentaje de datos válidos en la RMCAB correspondiente a 81%. Este valor es superior al porcentaje mínimo de representatividad temporal que es 75%, valor establecido de acuerdo al Manual de Operación de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010)⁴.

La Figura 2-3 presenta el porcentaje de datos válidos por parámetro, el cual es necesario compararlo con los porcentajes de captura de datos de la Figura 2-1 con el propósito de determinar la disminución de datos como resultado de la validación, revisión y procedimiento de aseguramiento de calidad. Para los parámetros meteorológicos la disminución en porcentaje oscila entre el 0% y 5%. Para el caso de los contaminantes material particulado PM₁₀, PM_{2,5}, monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), ozono (O₃) el porcentaje de disminución de datos oscila entre 7% y 12%. En el caso de partículas suspendidas totales (TSP) se alcanza un porcentaje de disminución del 65%, debido a problemas recurrentes de ajustes en el contacto de boquilla con cinta de muestreo, pérdida de muestra, y afectación del valor de los datos por falla en la bomba de succión del equipo. En el caso de dióxido de nitrógeno (NO₂) se presentó una disminución del 33%, debida a fallas mayores en la confiabilidad de desempeño de conversión del catalizador de molibdeno, flujo de los equipos y proporción NO, NO₂ y NO_x de las estaciones Centro de Alto Rendimiento y Las Ferias.

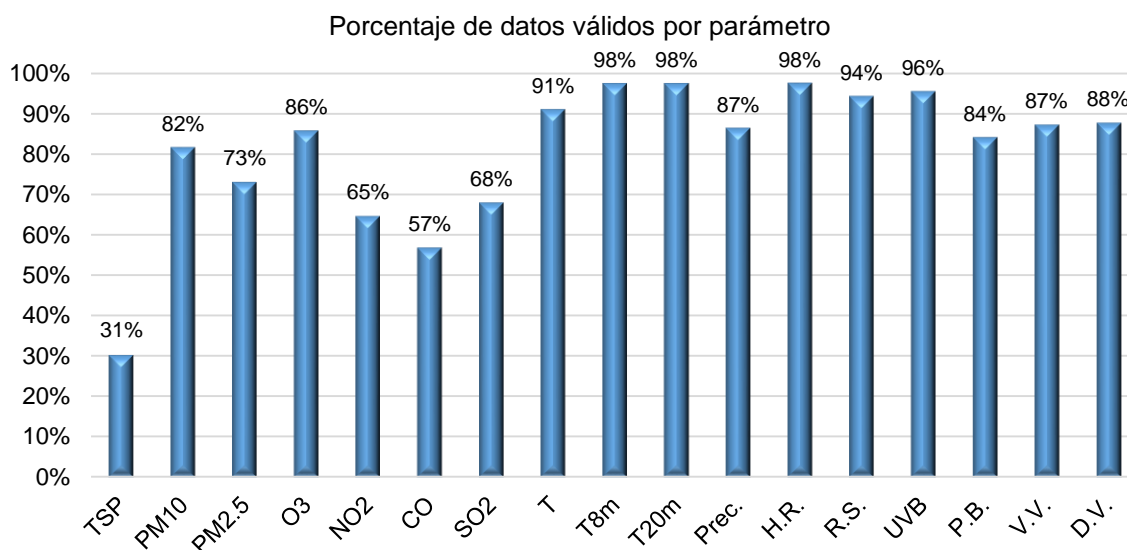


Figura 2-3. Porcentaje de datos válidos por parámetro. Año 2014.

La Figura 2-4 presenta el porcentaje de datos válidos por estación, el cual es necesario compararlo con los porcentajes de captura de datos por estación de la Figura 2-2 con el

⁴ El porcentaje de representatividad temporal se establece como la cantidad de promedios obtenidos en el periodo sobre la cantidad de promedios posibles en el mismo periodo multiplicado por cien. Este indicador muestra la cantidad de tiempo del periodo reportado que ha sido cubierto por el monitoreo. Se define como aceptable un 75%.

propósito de determinar la disminución de datos como resultado de la validación, revisión y procedimiento de aseguramiento de calidad. Para las estaciones de Fontibón, Guaymaral, Kennedy, Las Ferias, Centro de Alto Rendimiento, Puente Aranda, MinAmbiente, San Cristobal, Suba, Tunal y Usaquén, la disminución en porcentaje de datos oscila entre el 1% y 11%. Las estaciones de Bolivia y Carvajal fueron las excepciones con cambios porcentuales de datos capturados versus datos válidos del 22% y 23% respectivamente. Para la estación de Bolivia, el cambio se debió a falla en el canal del convertidor de velocidad del viento. En el caso de Carvajal el cambio se debió exclusivamente al analizador de dióxido de nitrógeno (NO₂) por inestabilidad recurrente en el cero del equipo que afecta el rango de registro de los datos capturados.

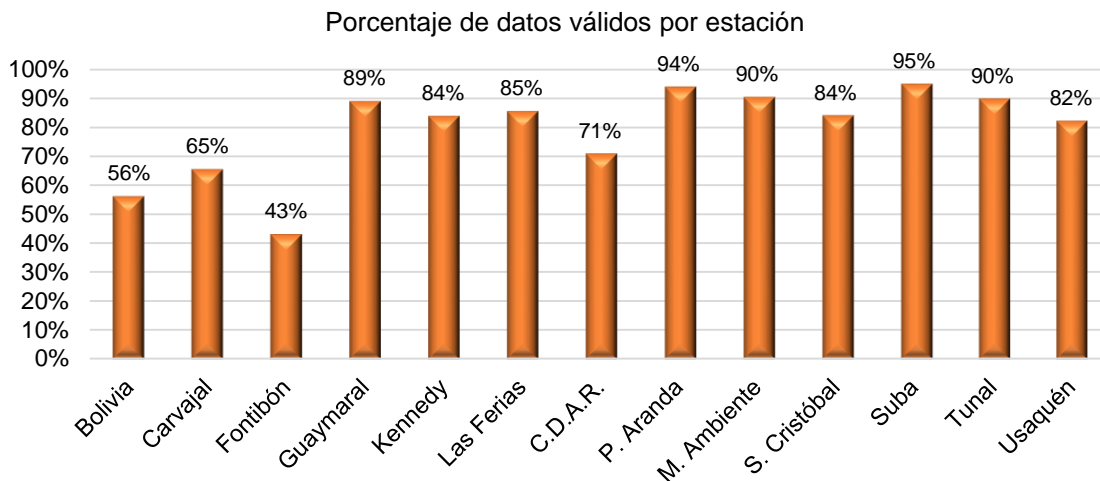


Figura 2-4. Porcentaje de datos válidos por estación. Año 2014.

La Tabla 2-3 corresponde a un resumen del porcentaje de datos válidos por estación y por parámetro

Tabla 2-3. Resumen del porcentaje de datos válidos por estación y por parámetro.

	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	O ₃	NO ₂	CO	SO ₂	T	T8m	T20m	Prec.	H.R.	R.S.	RDR	RDF	UVB	P.B.	V.V.	D.V.	Total
Bolivia											49%							60%	60%	56%
Carvajal	31%	87%	88%	79%	7%	80%	19%	82%			82%							82%	82%	65%
Fontibón		43%		43%		40%	43%	44%			44%						44%	44%	44%	43%
Guaymaral	67%	20%	95%	97%				98%	98%	98%	98%	98%	97%				98%	98%	98%	89%
Kennedy	92%	90%		95%	25%	38%	99%				76%	99%	97%				99%	98%	98%	84%
Las Ferias	88%	73%	82%	38%	79%	86%	97%				94%	97%					97%	97%	97%	85%
C.D.A.R.	77%	82%	90%	29%	24%	91%	96%				96%	96%	96%	0%	0%	96%		96%	96%	71%
P. Aranda	91%		98%	86%	99%	92%	100%				100%							90%	90%	94%
M. Ambiente	98%	72%	78%								100%							99%	95%	90%
S. Cristóbal	83%	63%	96%		41%	91%	97%				97%	97%	84%					81%	92%	84%
Suba	94%	71%	97%	99%		95%	100%				100%							100%	100%	95%
Tunal	75%	94%	96%	68%	93%	58%	99%				99%	99%	99%					99%	99%	90%
Usaquén		87%	80%	90%		32%		92%			92%							92%	92%	82%
Total	31%	82%	73%	86%	65%	57%	68%	91%	98%	98%	87%	98%	94%	0%	0%	96%	84%	87%	88%	80%

3. Evaluación y análisis de contaminantes

El presente capítulo se divide en cuatro secciones: la primera contiene el análisis de las tendencias de las concentraciones de material particulado que incluye el PST, PM₁₀ y el PM_{2.5}; la segunda sección hace referencia a los gases contaminantes que son O₃, NO₂, CO y SO₂; la tercera contiene el comportamiento del índice de calidad del aire (ICA) y la cuarta presenta un resumen cuantitativo para cada contaminante en los tiempos de exposición definidos en la Resolución 610 de 2010. Para esto, la RMCAB durante el año 2014 contó con 13 estaciones (incluyendo la estación móvil) que monitorearon las concentraciones de material particulado y de gases contaminantes (presentados en la Tabla 1-1), permitiendo establecer la calidad del aire en el Distrito Capital.

3.1. Material particulado – MP o PM (*Particulate Matter*)

Dentro de los contaminantes más complejos presentes en el aire de las grandes ciudades se encuentra el material particulado, el cual está compuesto por partículas líquidas o sólidas que pueden ser de origen natural, resultantes de procesos como la erosión, las erupciones volcánicas y los incendios o de origen antropogénico, provenientes del uso de la quema de combustibles fósiles en la industria y en el transporte, de actividades agrícolas como la fertilización y almacenamiento de granos, entre otros. Este material tiene efectos sobre la salud humana dado su diámetro de partícula, puesto que una parte puede ingresar al tracto respiratorio y producir daños en los tejidos y órganos que lo conforman, o servir como vehículo para el transporte de bacterias y virus.

Resultan de interés las partículas PM₁₀ y PM_{2.5} que además son las reguladas en el territorio colombiano por la Resolución 610 de 2010, como se presentó en la sección 1.1. Las primeras son aquellas cuyo tamaño es menor o igual a 10 micrómetros (µm), mientras que las segundas, las de PM_{2.5}, tienen tamaño menor o igual a 2,5 µm y se asocian a emisiones directas (como contaminantes primarios de las emisiones vehiculares e industriales), así como contaminantes secundarios (sulfatos y nitratos producidos por contaminantes primarios e interacciones atmosféricas). Resultan respirables en un 100% y pueden llegar a alojarse en bronquios, bronquiolos y alvéolos. Todo el material particulado se monitorea como partículas suspendidas totales (PST) y son fracciones de este el PM₁₀ y el PM_{2.5}.

La Resolución 610 del 24 de marzo de 2010 estableció los niveles máximos permisibles para PST, PM_{2.5} y PM₁₀ como lo muestra la Tabla 1-3.

3.1.1. Comportamiento de la concentración de PST

Entre enero y junio de 2014, la RMCAB contó con un monitor ubicado en la estación Carvajal-Sevillana para medir la concentración de partículas suspendidas totales (PST).

El cálculo de la concentración promedio de material particulado total o partículas suspendidas totales (PST) se basa en promedios geométricos de los datos diarios de acuerdo a la Resolución 610 de 2010 y al Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire del entonces Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010). Para los demás contaminantes se usa el promedio aritmético.

El promedio geométrico se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$C_{\text{prom}} = 10^{\frac{\sum_{i=1}^n \log C_i}{n}} \quad \text{para } i = 1, 2, 3, \dots, n$$

Donde C_{prom} es el promedio geométrico y $\frac{\sum_{i=1}^n \log C_i}{n}$ es el promedio de los logaritmos para los n valores de concentración del contaminante i .

Comportamiento de las concentraciones diarias de PST

En la estación Carvajal-Sevillana se registraron 111 promedios diarios válidos que corresponden a un porcentaje de representatividad de 30%. El monitor correspondiente presentó fallas en el sistema de muestreo y la bomba de flujo fue suspendida temporalmente. Como consecuencia, no se registraron mediciones en mayo y en los meses comprendidos entre julio y diciembre. Además, solamente hay cobertura temporal suficiente para el cálculo de promedios en los meses de febrero y marzo. Por las razones expuestas, durante el año es posible comparar con el límite máximo permisible diario (Resolución 610 de 2010) y realizar el reporte de máximos y de excedencias, pero no es posible realizar la comparación con el límite anual.

La máxima concentración de este contaminante entre los días monitoreados fue $274 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 27 de junio de 2014 la cual se encontró por debajo del límite normativo de $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ según la Resolución 610 de 2010. En esta fecha ocurrió un episodio singular a nivel ciudad con altas concentraciones de PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ en la mayoría de las estaciones. Este dato es el único que supera el valor del 90% del límite normativo ($270 \mu\text{g}/\text{m}^3$). En la Figura 3-1 y en la Tabla 3-1 se resume lo expuesto anteriormente.

Tabla 3-1. Resumen de datos diarios de PST para el año 2014.

Estación	Número de datos	% de datos válidos	Excedencias norma 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Máximo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Fecha de ocurrencia del Máximo	Cantidad de datos entre el 90% y 100% de la norma ⁵
Carvajal-Sevillana	111	30%	0	274	27/06/2014	1

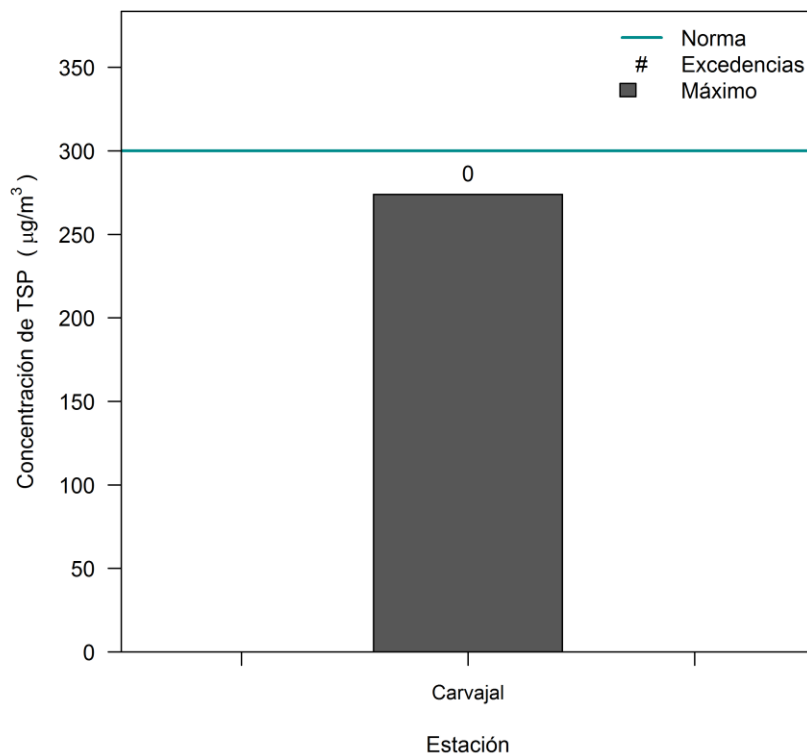


Figura 3-1. Concentración máxima de PST (TSP) durante el año 2014. Base diaria.

⁵ Mayor a 270 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y menor o igual a 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

3.1.2. Comportamiento de la concentración de PM₁₀.

Para el monitoreo de este contaminante, la RMCAB contó en el año 2014 con 12 equipos, los cuales se describen en la Tabla 1-1 y se encuentran distribuidos según la Figura 1-1. El monitor de la estación Fontibón presenta datos hasta el 1 de julio debido a inconvenientes técnicos relacionados con el suministro eléctrico de la estación.

Comportamiento anual de PM₁₀

De acuerdo a la Resolución 610 de 2010, el nivel máximo permisible en un tiempo de exposición anual para PM₁₀ es 50 µg/m³. La Tabla 3-2 y la Figura 3-2 presentan los valores promedio anuales para las estaciones de la RMCAB (basados en promedios diarios) que monitorearon este contaminante durante 2014 y cuya representatividad temporal es superior a 75%.

Las estaciones Guaymaral y Fontibón no cumplieron con el criterio de representatividad temporal de 75% al tener coberturas de 66% y 43%, respectivamente. De las diez estaciones restantes, la mitad supera el límite máximo permisible anual siendo estas Suba, Puente Aranda, Kennedy, Carvajal-Sevillana y Tunal, de las cuales las últimas cuatro estaciones se ubican en el suroccidente y en el sur de la ciudad demostrando que esta zona representa altos niveles de contaminación en comparación con otros sectores de la ciudad. La concentración anual de Suba marca una diferencia relativamente leve (1 µg/m³) respecto al límite máximo permisible. Las mayores concentraciones promedio anuales se presentaron en las estaciones Carvajal-Sevillana con 91 µg/m³ y Kennedy con 71 µg/m³.

Tabla 3-2. Promedio anual de PM₁₀ durante los años 2013 y 2014 y cambio de concentración entre los dos años. Se resaltan las estaciones que superan la norma anual correspondiente a 50 µg/m³

Estación	Promedio 2013 (µg/m ³)	Promedio 2014 (µg/m ³)	Cambio de 2013 a 2014 (µg/m ³)
Guaymaral	50	N.R.	
Usaquén	37	37	0
Suba	55	51	-4
Las Ferias	34	32	-2
Centro de Alto Rendimiento	32	40	8
Ministerio de Ambiente	45	43	-2
Fontibón	47	N.R.	
Puente Aranda	47	62	15
Kennedy	71	71	0
Carvajal-Sevillana	81	91	10
Tunal	43	53	10
San Cristóbal	34	41	7

N.R.: No representativo. El número de datos disponibles para el año es inferior al 75% del máximo posible de acuerdo al Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

En comparación con el año 2013, el monitor de Puente Aranda presentó un aumento significativo en 2014 en $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Este aumento es seguido por los presentados en Carvajal-Sevillana y Tunal con $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en cada una. Suba, Las Ferias y Ministerio de Ambiente, por el contrario, presentaron reducciones en sus concentraciones mientras que Usaquén y Kennedy se mantuvieron en niveles constantes.

La distribución espacial de la concentración de este contaminante en la ciudad puede visualizarse en la Figura 3-3 que corresponde a un mapa resultado de la interpolación espacial por el método *Kriging* de las concentraciones promedio anuales de PM_{10} (basado en promedios diarios) en las 10 estaciones durante el año 2014. Aunque no cumple con el criterio de cobertura temporal de 75% (66% con un promedio anual de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$), se incluye la estación Guaymaral como referencia. El método de *Kriging* con el cual se ha obtenido el mapa, confirma que las localidades que estuvieron más afectadas por altos niveles de PM_{10} fueron Kennedy, Bosa, Ciudad Bolívar y Tunjuelito localizadas en el sur y en el suroccidente de la ciudad.

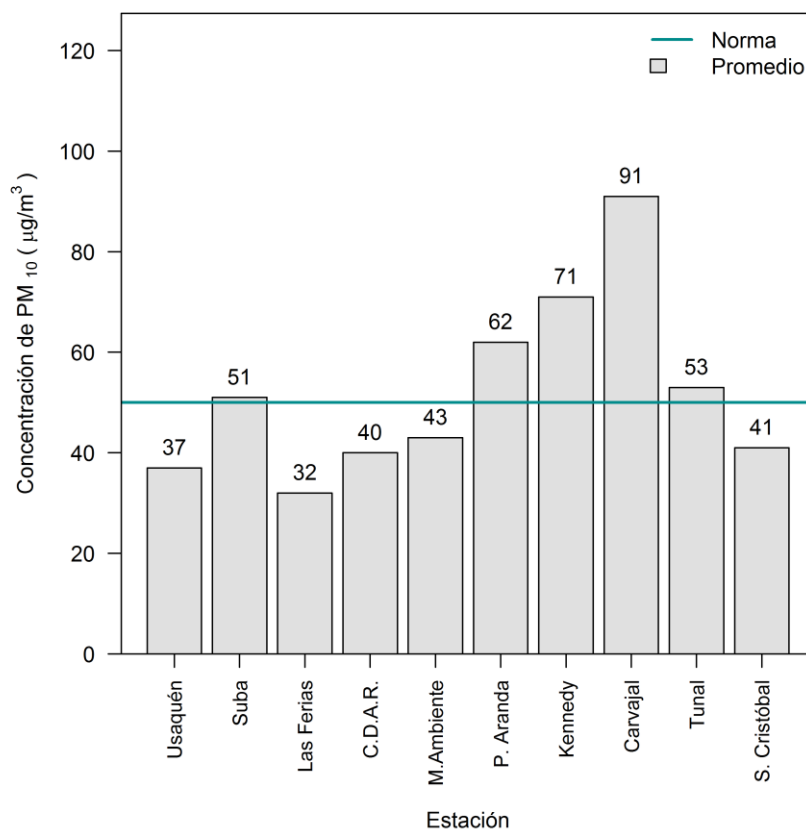


Figura 3-2. Promedios anuales de PM_{10} durante el año 2014 por estación de monitoreo.

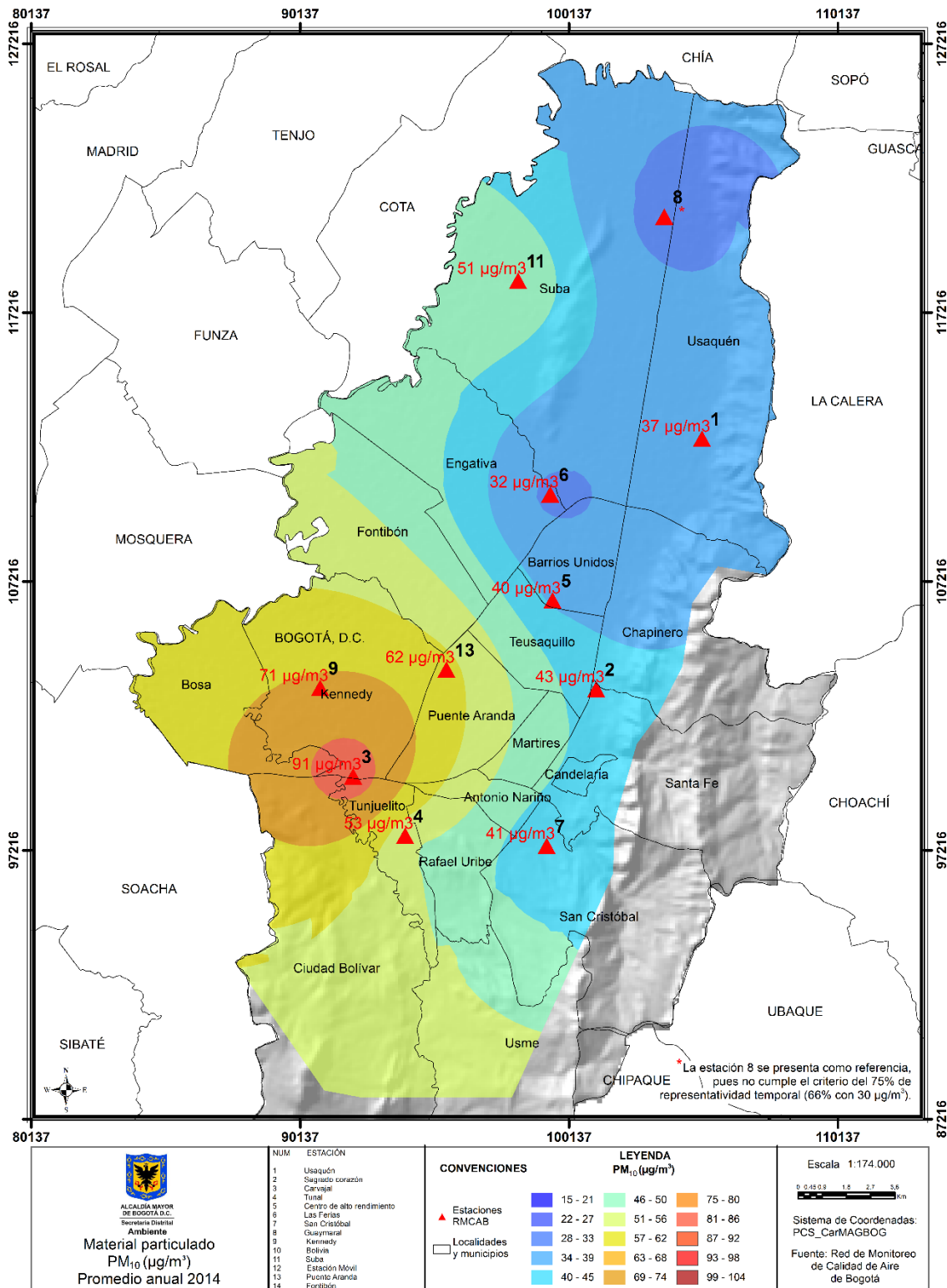


Figura 3-3. Material particulado (PM₁₀) con base en la interpolación espacial por el método *Kriging* de los promedios de las estaciones con cobertura temporal superior a 75%. Año 2014.

Comportamiento de las concentraciones diarias de PM₁₀ (24 h)

El comportamiento de las concentraciones diarias de PM₁₀ se evalúa con base en las excedencias de la norma respectiva que corresponde a 100 µg/m³ de acuerdo a la Resolución 610 de 2010. Cada dato diario se calcula a partir del promedio de los respectivos valores horarios, los cuales deben cumplir con el criterio de representatividad temporal de 75%, es decir, un mínimo de 18 concentraciones horarias por día.

Las concentraciones máximas y el número de excedencias se presentan en la Figura 3-4. La Tabla 3-3 resume los datos diarios de PM₁₀ para cada una de las estaciones de la RMCAB. De las 12 estaciones consideradas, 2 no cumplieron el criterio de cobertura temporal igual o superior a 75% y estas fueron Guaymaral y Fontibón donde en la primera se presentaron inconvenientes en el funcionamiento del sistema de regulación de flujo interno del monitor y en la segunda fue suspendido el suministro eléctrico a principios del mes de julio. Por esta razón, solamente se tendrán en cuenta los eventos diarios de estas estaciones y no sus concentraciones promedio anuales.

Del total de datos registrados, el 6% superó el valor de la norma diaria. Todas las estaciones presentaron excedencias destacándose especialmente las ubicadas en el suroccidente de la ciudad: Puente Aranda, Kennedy y Carvajal-Sevillana presentando 25, 49 y 121 excedencias, respectivamente. Estas tres estaciones totalizan 195 excedencias de las 222 totales presentadas en la RMCAB.

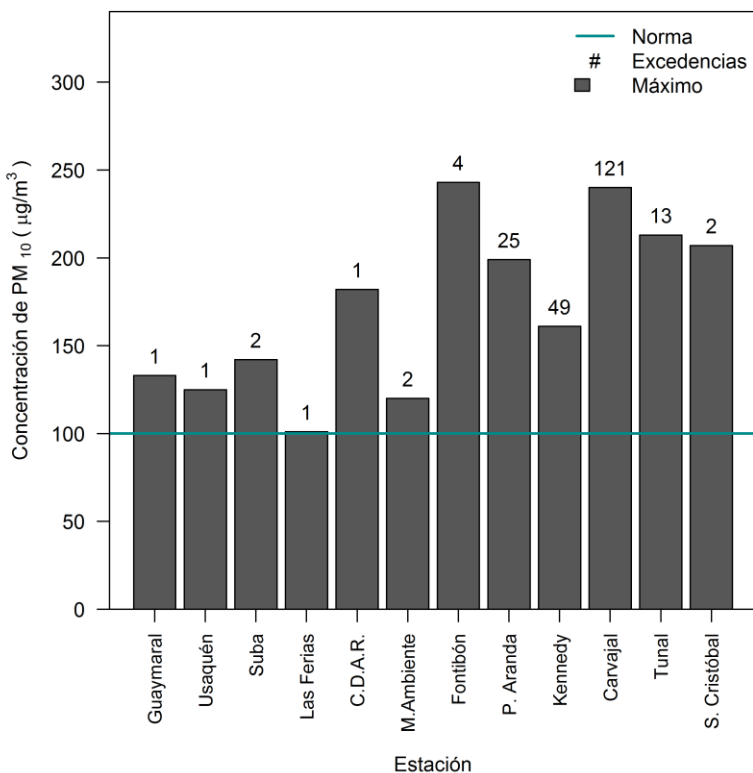


Figura 3-4. Número de excedencias y máximos de PM₁₀ por estación durante el año 2014. El nivel máximo permisible diario es 100 µg/m³ (Resolución 610 de 2010).

En 2013 ocurrieron 104 excedencias que corresponden a menos de la mitad de las presentadas en 2014. Adicionalmente, en dicho año solamente se presentaron excedencias en Guaymaral (2), Kennedy (35) y Carvajal-Sevillana (67). Estas observaciones muestran un deterioro de la calidad del aire en 2014 en el cual se destacan especialmente Puente Aranda y Tunal, las cuales no presentaron excedencias en 2013.

Se destaca la última columna de la Tabla 3-3 que muestra la cantidad de datos entre el 90% y el 100% de la normatividad, es decir, mayores a $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y menores o iguales a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Esta columna pretende evidenciar las estaciones que se encuentran en un rango próximo a empezar a presentar excedencias de la norma, además de las que ya superan la normatividad nacional. Aunque Guaymaral y Centro de Alto Rendimiento reportaron una excedencia cada una, son las únicas que no presentan valores entre $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, evidenciando que el episodio del 27 de junio fue especialmente particular a nivel ciudad. Las demás estaciones estuvieron más propensas a exceder los límites máximos permisibles.

Tabla 3-3. Representatividad temporal, promedio, excedencias y máximos de los datos diarios de PM_{10} durante el año 2014.

Estación	Número de datos válidos	% datos válidos	Excedencias de la norma $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$	Porcentaje de excedencias	Cantidad de datos entre el 90% y el 100% de la norma ⁶	Máximo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Fecha de ocurrencia del máximo
Guaymaral	240	66%	1	0,4%	0	133	27/06/2014
Usaquén	312	85%	1	0,3%	2	125	27/06/2014
Suba	344	94%	2	0,6%	7	142	27/06/2014
Las Ferias	321	88%	1	0,3%	2	101	27/06/2014
Centro de Alto Rendimiento	284	78%	1	0,4%	0	182	27/06/2014
MinAmbiente	355	97%	2	0,6%	4	120	27/06/2014
Fontibón	156	43%	4	2,6%	5	243	27/06/2014
Puente Aranda	334	92%	25	7,5%	12	199	27/06/2014
Kennedy	333	91%	49	14,7%	33	161	27/06/2014
Carvajal-Sevillana	316	87%	121	38,3%	46	240	27/06/2014
Tunal	272	75%	13	4,8%	7	213	27/06/2014
San Cristóbal	296	81%	2	0,7%	1	207	27/06/2014

La Tabla 3-4 muestra que diciembre, febrero, mayo y marzo presentaron la mayor cantidad de excedencias de 2014, caso contrario al comportamiento en julio, agosto y septiembre. Se observa que estaciones como Guaymaral, Usaquén, Las Ferias y Centro de Alto Rendimiento mostraron excedencias únicamente en el mes de junio, específicamente el día 27, cuando se observó un episodio generalizado de alta concentración por material particulado en la ciudad. En esta fecha todas las estaciones registraron excedencias y los valores máximos diarios del año. Las mayores magnitudes reportadas por la RMCAB

⁶ Mayor a $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y menor o igual a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

durante el año 2014 fueron $243 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en las estaciones Fontibón y Carvajal-Sevillana, respectivamente.

Las tendencias observadas indican que las localidades más afectadas por concentraciones altas de PM_{10} en el año de 2014 fueron las ubicadas en el suroccidente y sur de la ciudad, especialmente Kennedy, Bosa, Ciudad Bolívar, Puente Aranda y Tunjuelito y las menos afectadas fueron las ubicadas al norte y al oriente. Es importante destacar las diferencias considerables en número de excedencias entre la estación Carvajal-Sevillana y el conjunto formado por los demás receptores. Esto se debe al número de actividades que se desarrollan en este sector causantes de la emisión de material particulado por fuentes fijas industriales y fuentes móviles, especialmente vehículos de carga pesada. Este resultado destaca la importancia de no generalizar el comportamiento de la contaminación atmosférica sobre Bogotá con promedios globales. Es más recomendable su sectorización para los respectivos análisis.

Tabla 3-4. Número de excedencias de la norma diaria de PM_{10} ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) por estación y por mes para el año 2014.

Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
Guaymaral	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
Usaquén	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
Suba	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2
Las Ferias	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
Centro de Alto Rendimiento	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
MinAmbiente	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	2
Fontibón	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0	4
Puente Aranda	0	0	0	0	1	2	0	0	2	4	9	7	25
Kennedy	14	15	7	2	5	1	0	0	0	2	1	2	49
Carvajal-Sevillana	8	14	15	11	18	8	3	9	2	9	10	14	121
Tunal	0	0	0	0	1	2	0	0	0	2	1	7	13
San Cristóbal	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2
Total de excedencias	22	29	23	13	26	24	3	9	4	17	22	30	222
Días de excedencias	15	22	16	11	19	8	3	9	3	12	14	17	149

Calendario de contaminación por PM_{10} durante el año 2014

La Figura 3-5, la Figura 3-6 y la Figura 3-7 corresponden a los diagramas calendario para las estaciones Carvajal-Sevillana, Suba y Usaquén, respectivamente, mostrando el contraste en las concentraciones diarias entre estaciones con niveles altos, medios y bajos. Aunque para algunos meses no existe la cobertura temporal suficiente que sea representativa de su respectivo comportamiento, se observa que los meses de junio, julio, agosto y septiembre presentaron las menores concentraciones. Esta diferencia se atribuye en parte al comportamiento meteorológico de los vientos a mitad de año cuando su velocidad aumenta y ocurre una mayor ventilación en la ciudad. Como se ha destacado previamente, el 27 de junio marca un alto contraste en comparación con los demás días del año, no solo en estas estaciones sino en todo el conjunto de monitores de la RMCAB.

Carvajal 2014



Figura 3-5. Diagrama calendario para PM₁₀ durante el año 2014 en la estación Carvajal-Sevillana. Los valores mostrados corresponden a la concentración. Se resaltan los días que superaron el límite normativo de 100 µg/m³.

Suba 2014



Figura 3-6. Diagrama calendario para PM₁₀ durante año 2014 en la estación Suba. Los valores mostrados corresponden a la concentración. Se resaltan dos días que excedieron el límite máximo permisible de 100 µg/m³.

Usaquén 2014

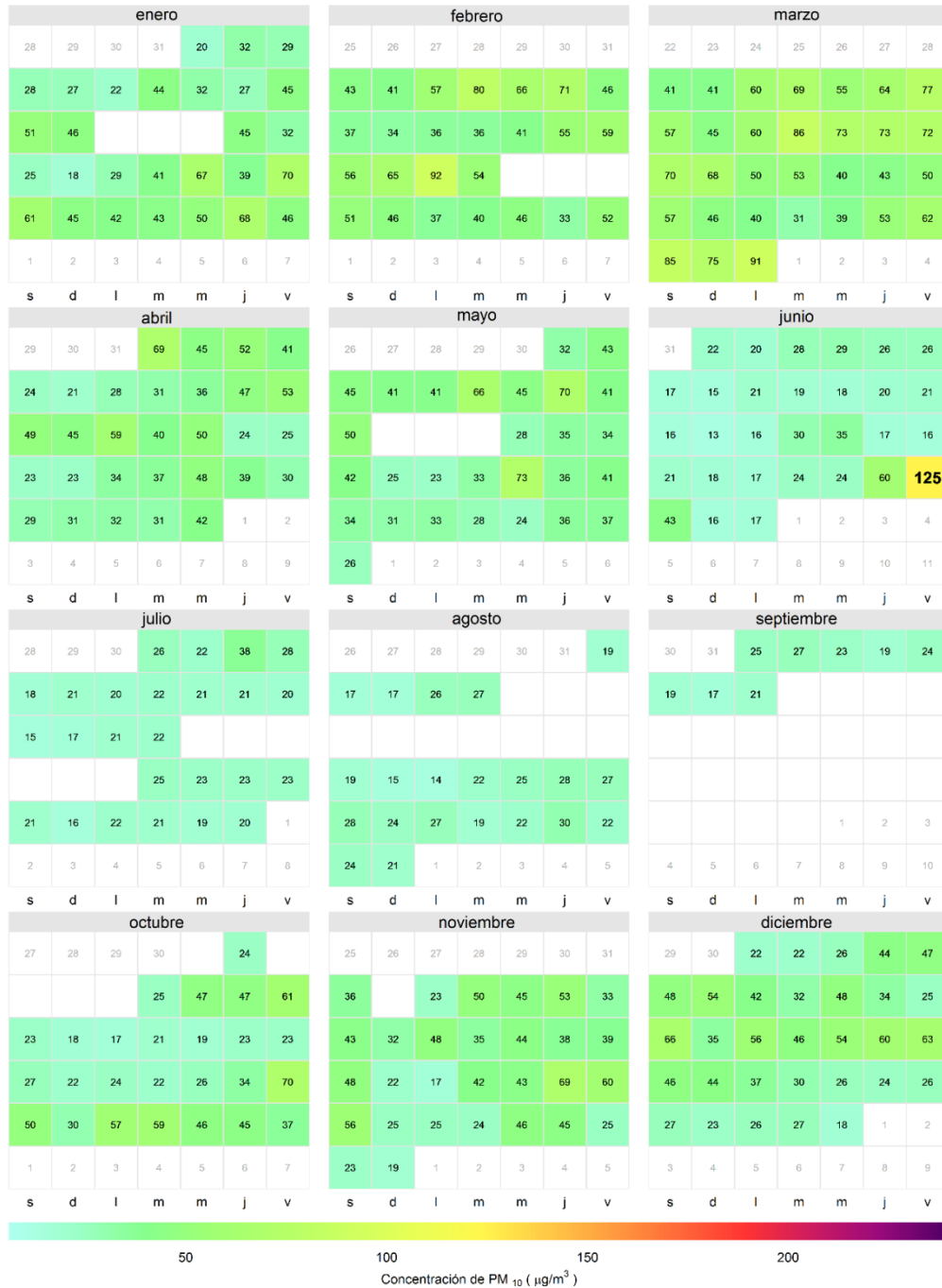


Figura 3-7. Diagrama calendario para PM₁₀ durante el año 2014 en la estación Usaquén. Los valores mostrados corresponden a la concentración. Se resalta el único día que excedió el límite máximo permisible de 100 µg/m³ en esta estación correspondiente al 27 de junio de 2014.

Comportamiento temporal de las concentraciones diarias de PM₁₀

La Figura 3-8 presenta la distribución de las concentraciones diarias de PM₁₀ en función de los días de la semana. En las estaciones analizadas se observa que los lunes y los domingos son los días con las menores concentraciones, lo cual se atribuye fundamentalmente a la dinámica de la ciudad, especialmente en lo relacionado con la actividad vehicular e industrial. Entre martes y viernes se mantienen niveles de concentración similares.

Se observa que para algunas estaciones existen valores atípicos que son considerablemente mayores al resto del conjunto de datos los cuales corresponden al día 27 de junio cuando se presentó un episodio generalizado de alta concentración. En términos de dispersión no existen diferencias significativas entre los sitio de monitoreo.

La distribución de las concentraciones diarias de PM₁₀ en función de los meses de 2014 y de las estaciones de monitoreo se observa en la Figura 3-9. En todas las estaciones se observa que los menores niveles de concentración se presentan en los meses de junio, julio y agosto. Una excepción es Puente Aranda donde se observó que sus concentraciones aumentaron gradualmente con el transcurrir del año. En general, se observa que los meses con las mayores concentraciones de PM₁₀ corresponden a los de inicio y final de año. Estas diferencias de comportamiento se atribuyen en cierto grado al aumento de la velocidad de los vientos a mitad de año permitiendo mayor ventilación y, por tanto, menores concentraciones.

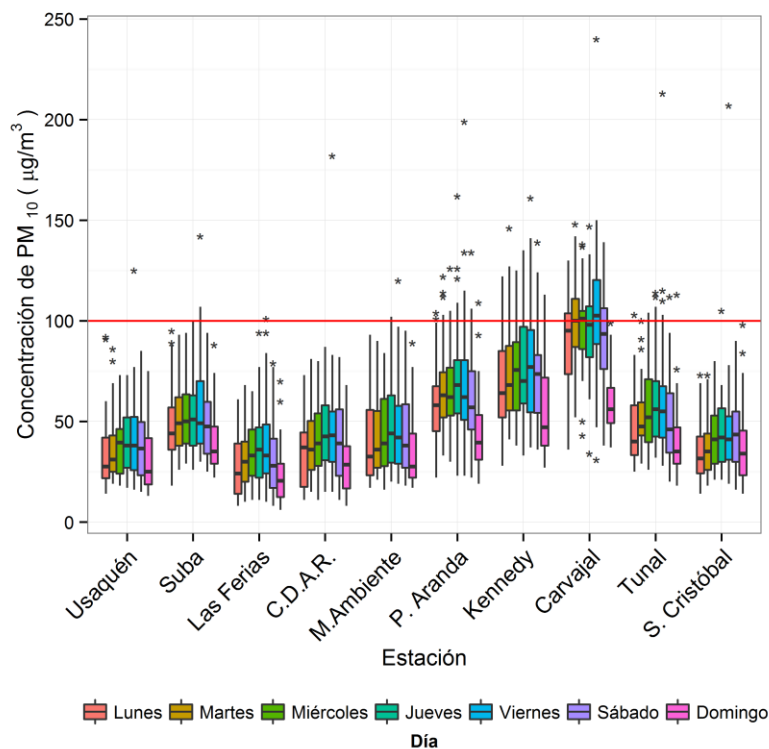


Figura 3-8. Diagramas de caja de las concentraciones diarias de PM₁₀ en función de las estaciones de monitoreo y de los días de la semana para el año 2014.

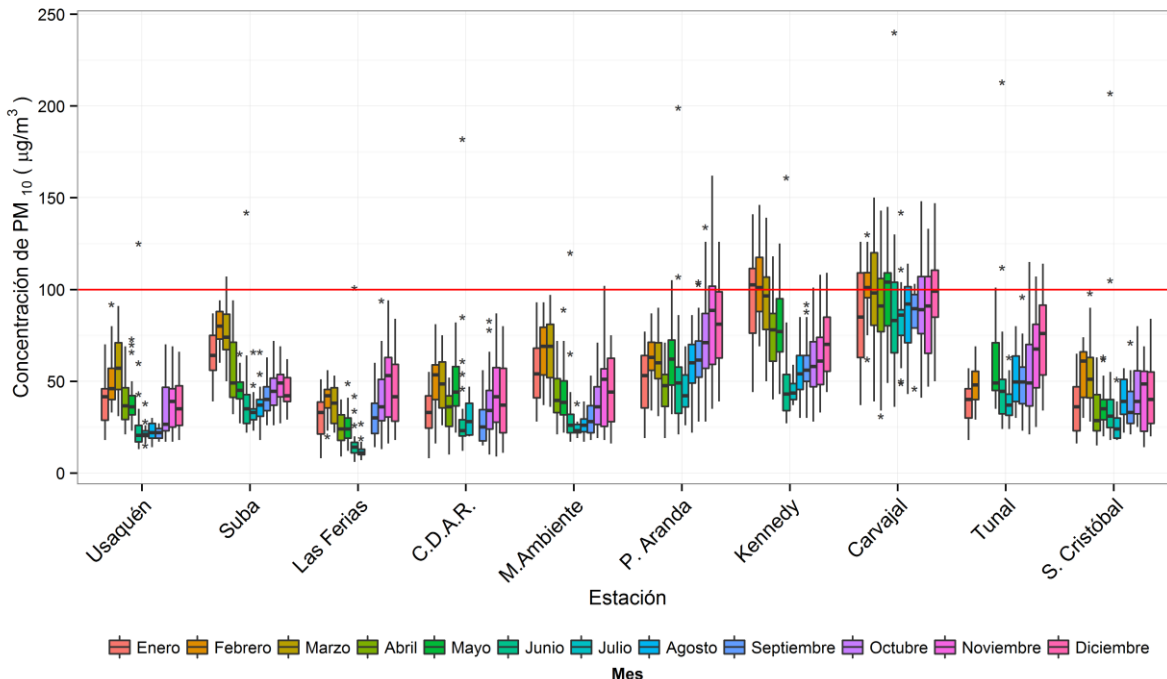


Figura 3-9. Diagramas de caja de las concentraciones diarias de PM₁₀ en función de las estaciones de monitoreo y de los meses del año 2014.

Ciclos semanales, diarios y anuales de las concentraciones de PM₁₀

La Figura 3-10 presenta los ciclos semanales de las concentraciones de PM₁₀ por estación para el año 2014. Aunque no cumple con el criterio de cobertura temporal de 75% (66% con un promedio anual de 30 µg/m³), se incluye la estación Guaymaral como referencia. Usualmente los domingos reportan las menores concentraciones de este contaminante en todas las estaciones lo cual es concordante con el cambio de la dinámica de la ciudad. Los lunes y los sábados son los siguientes días con bajas concentraciones. Los lunes por la presencia de días feriados y por la influencia de la capa residual del día anterior y los sábados por el cambio en la dinámica de la ciudad al enmarcarse dentro del fin de semana. El comportamiento entre martes y viernes varía en función de la estación de monitoreo. El ciclo más variable del año correspondió a la estación Carvajal-Sevillana en los días domingos marcan una tendencia de descenso considerable en comparación con los demás días, evidenciando un cambio sustancial en la dinámica de su zona de influencia. Puente Aranda sigue a esta estación en variabilidad con tendencias menos pronunciadas. Los ciclos más uniformes se evidenciaron en Ministerio de Ambiente, San Cristóbal y Usaquén. La variación de las concentraciones de PM₁₀ en el transcurrir de la semana está altamente influenciada por las características de los alrededores de cada estación.

El análisis de las concentraciones medias horarias para cada estación de la RMCAB que midió esta variable se presenta en la Figura 3-11: ciclos diarios por estación, en donde se observa que los picos de concentración ocurren generalmente entre las 6:00 a.m. y 8:00 a.m. con magnitudes variables, donde la mayor se observan en Carvajal-Sevillana y Kennedy y las menores en Guaymaral, San Cristóbal y Usaquén. Estas tendencias

evidencian la actividad en el transporte en la ciudad que coincide con la denominada “hora pico” en la mañana. Ciertas estaciones presentan un pico de concentración de menor intensidad en horas de la tarde y de la noche, lo cual coincide en algunos casos con la “hora pico” de la tarde.

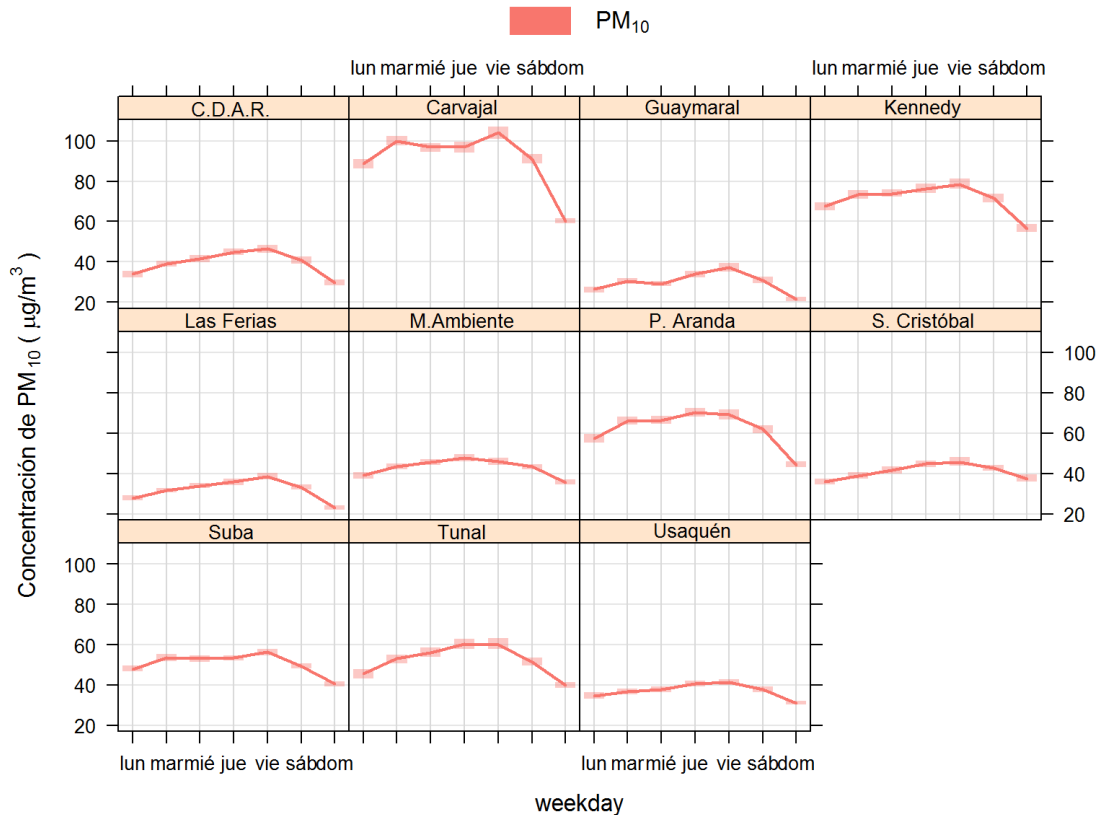


Figura 3-10. Comportamiento de la concentración de PM₁₀ en el ciclo semanal para 11 estaciones de la RMCAB, las cuales tienen cobertura temporal superior a 75%. Cada promedio se presenta con un intervalo de 95% de confianza.

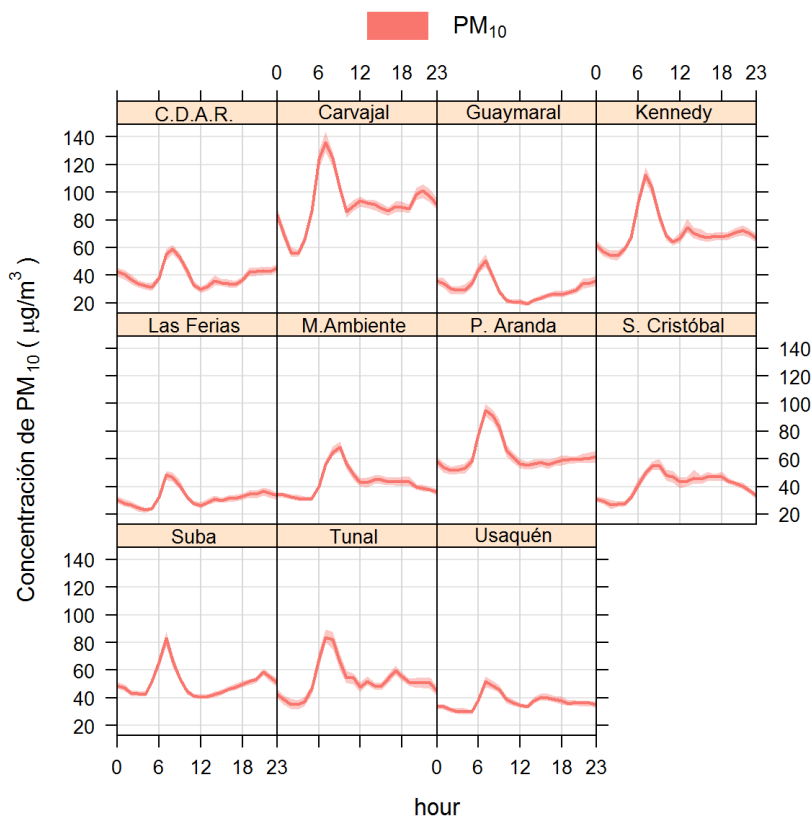


Figura 3-11. Ciclo diario de PM_{10} para 11 estaciones de la RMCAB, las cuales tienen una cobertura temporal superior a 75%. Se muestra el promedio y el intervalo de confianza de 95%.

La Figura 3-12 presenta el ciclo anual de los monitores de PM_{10} con una cobertura temporal superior a 75%. Esta figura confirma las observaciones dadas respecto a la Figura 3-9 ya que las concentraciones son generalmente menores a mitad de año y más altas a comienzos y final del mismo. Se observan cambios abruptos entre el primer y segundo semestre de 2014 donde se presentó una disminución generalizada de concentración en Kennedy y un aumento en Puente Aranda. En estaciones como Kennedy, Ministerio de Ambiente, Suba y Usaquén se observa que el primer trimestre del año presentó concentraciones relativamente altas. Para Guaymaral no se cuenta con datos capturados válidos de los tres primeros meses del año más sin embargo se observa que las concentraciones son más altas al finalizar el año.

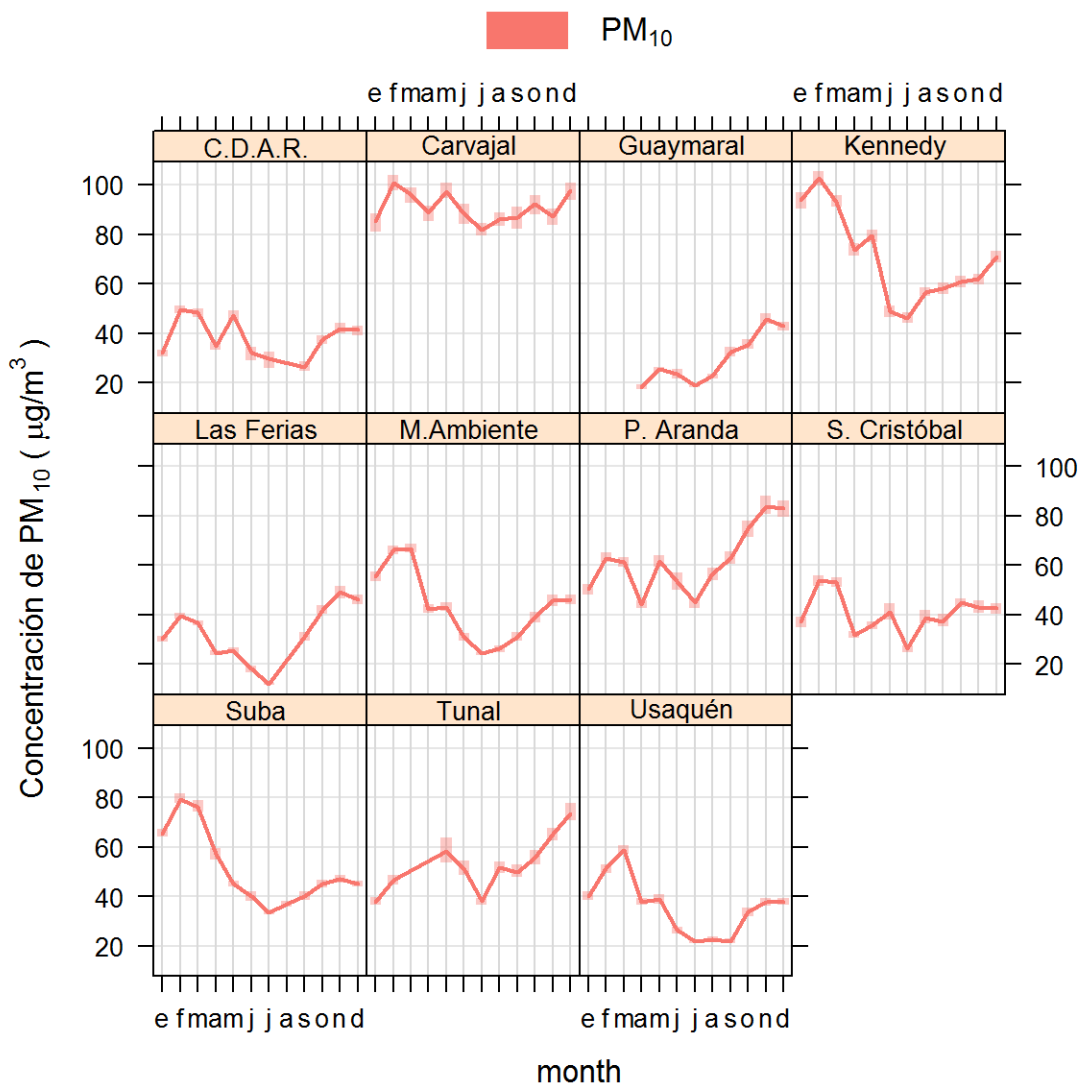


Figura 3-12. Ciclo anual (año 2014) de PM_{10} para 11 estaciones de la RMCAB, las cuales tienen una cobertura temporal superior a 75%. Se muestra el promedio y el intervalo de confianza de 95%.

Comportamiento histórico de los promedios diarios de PM_{10}

La Figura 3-13 presenta la distribución de las concentraciones diarias de PM_{10} entre los años 2010 y 2014. Se observa que Kennedy y Carvajal-Sevillana históricamente han mantenido valores altos de concentración y de número de excedencias a la normatividad nacional, lo cual se debe a las características de su zona de influencia, que está sujeta a una alta actividad de fuentes industriales y asociadas al tráfico pesado. Por el contrario, Usaquén y San Cristóbal, ubicadas al oriente de la ciudad, han presentado niveles relativamente bajos de concentración y de dispersión en sus datos.

En la estación Kennedy se registró una reducción progresiva de los niveles de concentración entre 2010 y 2012 y se mantuvieron relativamente constantes en los años

2013 y 2014. En Carvajal-Sevillana se observó un reducción entre 2010 y 2012, tendencia que fue revertida en 2013 y 2014.

En comparación con el año 2013, en 2014 los niveles de concentración aumentaron en Centro de Alto Rendimiento, Puente Aranda, Carvajal-Sevillana, Tunal y San Cristóbal, disminuyeron en Suba, Las Ferias y Ministerio de Ambiente y se mantuvieron constantes en Usaquén y Kennedy. Se observa que en el año 2014 se presentaron valores atípicamente altos, en comparación con los demás años, los cuales corresponden predominantemente al 27 de junio.

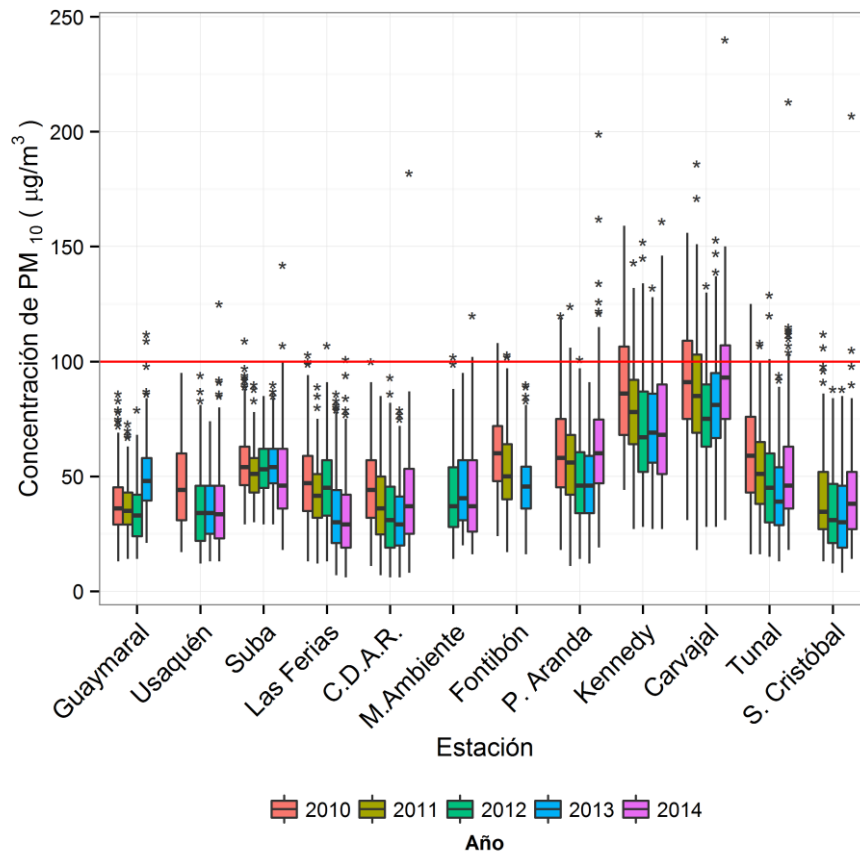


Figura 3-13. Gráfico de *boxplot* para las concentraciones diarias de PM_{10} por estación de monitoreo en los años 2010 a 2014.

La Tabla 3-5 contiene un resumen de máximos históricos entre los años 2010 y 2014. Entre 2010 y 2013 las estaciones Kennedy y Carvajal-Sevillana registraron los máximos de la RMCAB, un comportamiento esperado teniendo en cuenta las características de su área de influencia. En 2014 el máximo anual de PM_{10} fue observado en Fontibón con un valor de $243 \mu g/m^3$ el cuál es el más alto de los años estudiados, que corresponde al episodio de contaminación transfronteriza del 27 de junio de 2014.

Tabla 3-5. Resumen de máximos de las concentraciones diarias de PM₁₀ en entre los años 2010 y 2014.

Año	Máximo µg/m³	Fecha de ocurrencia del máximo	Estación
2010	159	15/02/2010	Kennedy
2011	186	02/07/2011	Carvajal-Sevillana
2012	152	17/02/2012	Kennedy
2013	154	11/12/2013	Carvajal-Sevillana
2014	243	27/06/2014	Fontibón

3.1.3. Comportamiento de la concentración de PM_{2.5}

El límite normativo diario de PM_{2.5} es 50 µg/m³. Durante el año 2014, 10 estaciones monitorearon este contaminante, como se describe en detalle a continuación. Se obtuvieron 2706 datos válidos diarios que corresponden a una cobertura temporal global de 74% entre las estaciones que registraron mediciones debido a que durante 2014 entraron en funcionamiento 4 estaciones de monitoreo, por lo cual este porcentaje es relativamente bajo. Las principales fuentes de PM_{2.5} incluyen todos los tipos de combustión tales como vehículos, centrales eléctricas, incendios forestales, quemas agrícolas y algunos procesos industriales (U.S. Environmental Protection Agency EPA, 2014).

Comportamiento anual de PM_{2.5}

El nivel máximo permisible de material particulado de tamaño inferior a 2,5 µm (PM_{2.5}) en un tiempo de exposición anual es 25 µg/m³, según la Resolución 610 de 2010. La Tabla 3-2 presenta los promedios anuales en los años 2013 y 2014 en las estaciones de monitoreo que tienen una cobertura temporal superior a 75% del total de datos posibles del año. La Figura 3-2 presenta un resumen gráfico para el año 2014. Se observa que las estaciones Kennedy y Carvajal-Sevillana excedieron el valor normativo con 32 µg/m³ y 35 µg/m³, respectivamente. Estas estaciones están localizadas en el suroccidente de Bogotá, que es una zona con concentraciones relativamente altas de material particulado lo cual se debe a la alta actividad de fuentes fijas y móviles. Por el contrario, la estación Usaquén, ubicada en el norte de Bogotá, registró la concentración anual más baja con 13 µg/m³. Estas diferencias evidencian la heterogeneidad espacial existente en Bogotá en términos de contaminación atmosférica.

Tabla 3-6. Promedio anual de PM_{2.5} durante los años 2013 y 2014. Se resaltan las estaciones que superan la norma anual correspondiente a 25 µg/m³. Base de tiempo diaria.

Estación	Promedio 2013 (µg/m ³)	Promedio 2014 (µg/m ³)
Usaquén	N.R.	13
Suba	N.R.	21
Centro de Alto Rendimiento	N.R.	20
Kennedy	28	32
Carvajal-Sevillana	N.R.	35
Tunal	N.R.	23

N.R.: No representativo. El número de datos disponibles para el año es inferior al 75% del máximo posible de acuerdo al Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

En el 2013 la estación Kennedy fue la única con una cobertura temporal superior a 75%, teniendo en cuenta que monitores adicionales entraron en operación el 1 de octubre del mismo año. La concentración de PM_{2.5} en esta estación aumentó en el año 2014 en 4 µg/m³.

La distribución espacial de la concentración de este contaminante en la ciudad puede visualizarse en la Figura 3-3 que corresponde a un mapa resultado de la interpolación

espacial por el método *Kriging* de las concentraciones promedio anuales de $PM_{2.5}$ (basado en promedios diarios) en 8 estaciones durante el año 2014. Las Ferias y San Cristóbal no cumplen con el criterio de cobertura temporal de 75% al tener porcentajes de 68% y 65%, respectivamente. Sin embargo, teniendo en cuenta que estos valores se encuentran sobre 65% y para disminuir las incertidumbres del método, se consideran como referencia en el mapa. Los resultados muestran que la zona occidental de Bogotá está sujeta a niveles más altos de este contaminante, especialmente el suroccidente de la ciudad.

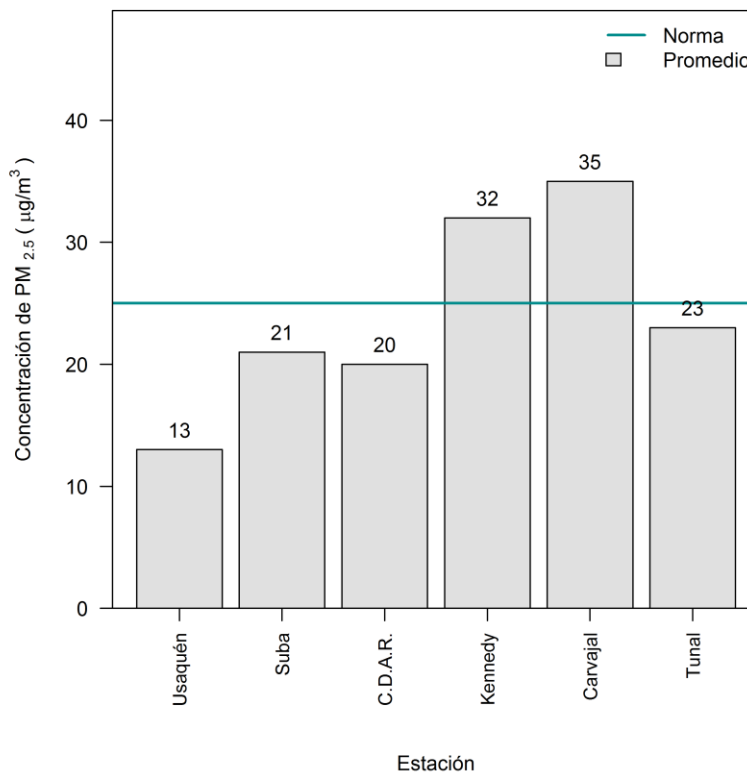


Figura 3-14. Promedios anuales de $PM_{2.5}$ durante el año 2014 por estación de monitoreo.

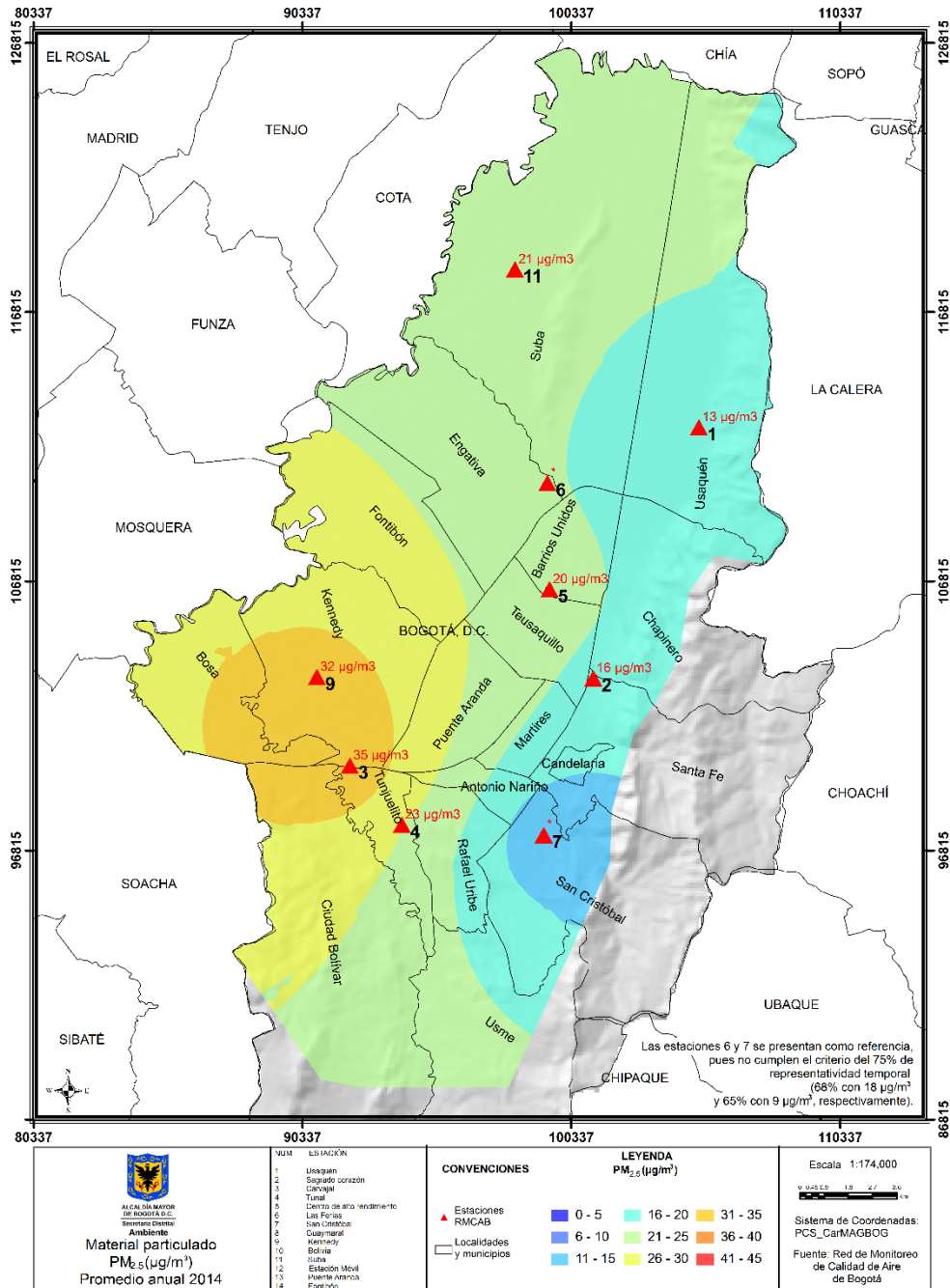


Figura 3-15. Material particulado (PM_{2.5}) con base en la interpolación espacial por el método *Kriging* de los promedios de las estaciones con cobertura temporal superior a 75%. Año 2014. Se incluyen las estaciones Las Ferias y San Cristóbal como referencia porque no cumplen con el criterio de cobertura temporal de 75% (68% y 65% con promedios anuales de 18 µg/m³ y 9 µg/m³, respectivamente)

Comportamiento de las concentraciones diarias de PM_{2.5} (24h)

La Figura 3-16 y la Tabla 3-7 contienen un resumen de concentraciones máximas y del número de excedencias de la norma diaria para PM_{2.5} en el año 2014. Con excepción de

las estaciones Guaymaral y Usaquén, ubicadas en el norte de la ciudad, y de San Cristóbal, localizada el suroriente, en todos los sitios de medición se presentaron excedencias del límite máximo permisible. Carvajal-Sevillana y Kennedy reportaron el mayor número de incumplimientos normativos con 28 y 17, respectivamente. Las Ferias, Centro de Alto Rendimiento y Ministerio de Ambiente presentaron 1 excedencia cada una, mientras que en Suba ocurrieron 2 y en Tunal 10.

El máximo registro diario de la RMCAB para $PM_{2.5}$ se presentó en Carvajal-Sevillana el 27 de junio de 2014 con $77 \mu g/m^3$. En este día ocurrió un evento generalizado de alta concentración de material particulado producto de contaminación transfronteriza. Usaquén, Las Ferias y San Cristóbal también registraron sus máximos del año en este día. El 31 de marzo de 2014 Suba y Kennedy coincidieron en sus registros mientras que el 6 de noviembre sucedió para Centro de Alto Rendimiento y Ministerio de Ambiente. En esta última fecha y sus días cercanos ocurrió un incendio de un depósito de llantas en la localidad de Fontibón, el cual presentó una afectación de la calidad del aire que fue detectada por las estaciones ubicadas en el centro y oriente de la ciudad.

El segundo registro máximo correspondió a $67 \mu g/m^3$ en la estación Kennedy. En la comparación mutua de excedencias y de valores máximos, es importante tener en cuenta la representatividad temporal de las estaciones, especialmente en Guaymaral, la cual tiene una cobertura temporal de 20% ya que el monitor inició operación en el mes de octubre.

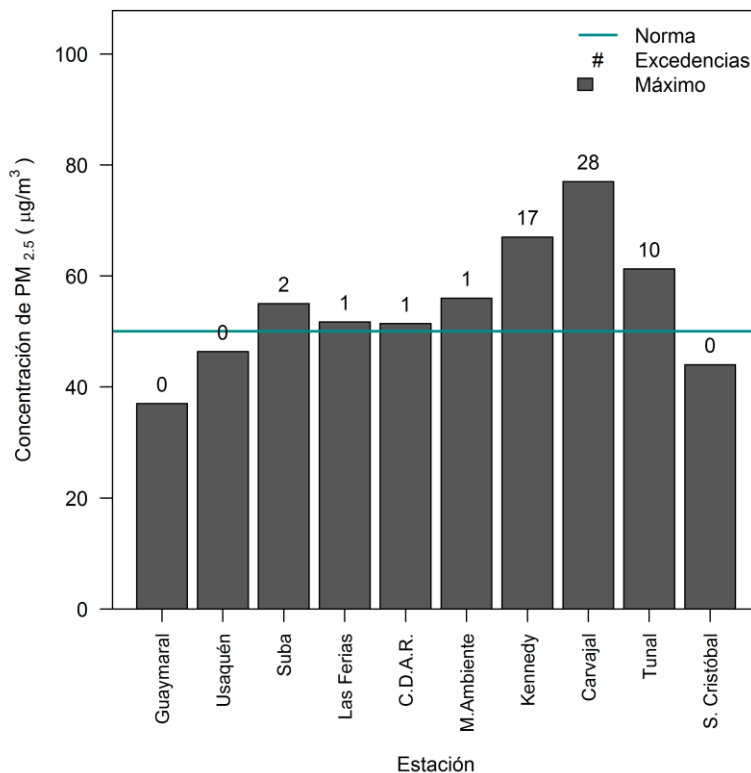


Figura 3-16. Máximo y excedencias de $PM_{2.5}$ en base diaria para el año 2014.

El análisis de las concentraciones diarias en el rango comprendido entre el 90% y el 100% del límite normativo no muestra ningún registro en Ministerio de Ambiente pero sí una

excedencia el 6 de noviembre. Este hecho da un indicio de que las concentraciones registradas en este día muestran la ocurrencia de un episodio singular de alta concentración en Bogotá. El 27 de junio, Usaquén estuvo propensa a superar la norma al tener un valor en el rango descrito.

En el año 2013 la estación Kennedy registró 2 excedencias con un porcentaje de cobertura temporal de 98%, mientras que en el 2014 se reportaron 17.

Tabla 3-7. Resumen de datos diarios de PM_{2.5} para el año 2014. Base de tiempo diaria.

Estación	Número de datos válidos	% de datos válidos	Excedencias norma 50 µg/m ³	Máximo [µg/m ³]	Fecha de ocurrencia del Máximo	Cantidad de datos entre 90% y 100% de la norma ⁷
Guaymaral	72	20%	0	37	19/12/2014	0
Usaquén	303	83%	0	46	27/06/2014	1
Suba	279	76%	2	55	31/03/2014	1
Las Ferias	249	68%	1	52	27/06/2014	3
Centro de Alto Rendimiento	306	84%	1	51	06/11/2014	5
MinAmbiente	269	74%	1	56	06/11/2014	0
Kennedy	325	89%	17	67	31/03/2014	17
Carvajal-Sevillana	316	87%	28	77	27/06/2014	24
Tunal	351	96%	10	61	07/12/2014	10
San Cristóbal	236	65%	0	44	27/06/2014	0

N.R.: no representativo. Los datos diarios tienen una cobertura temporal inferior a 75%.

La Tabla 3-8 presenta el número de excedencias de PM_{2.5} por estación y por mes. Las mayores excedencias se presentaron en los meses de inicio y final de año, especialmente en el primer trimestre. Se observa que el único incumplimiento de Las Ferias ocurrió el 27 de junio, fecha correspondiente al episodio generalizado de alta concentración en la ciudad.

⁷ Mayor a 45 µg/m³ y menor o igual a 50 µg/m³

Tabla 3-8. Número de excedencias de la norma diaria de PM_{2.5} (50 µg/m³) por estación y por mes para el año 2014.

Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
Guaymaral	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Usaquén	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Suba	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Las Ferias	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
Centro de Alto Rendimiento	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
MinAmbiente	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
Kennedy	0	2	5	1	0	1	0	0	0	3	1	4	17
Carvajal-Sevillana	7	8	11	0	0	1	0	0	0	1	0	0	28
Tunal	0	0	3	0	0	1	0	0	0	2	2	2	10
San Cristóbal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total de excedencias	7	10	20	2	0	4	0	0	0	6	5	6	60
Días de excedencias	7	8	12	1	0	1	0	0	0	4	2	5	40

Calendario de contaminación por PM_{2.5} durante el año 2014

Las Figura 3-17, Figura 3-18 y Figura 3-19 corresponden a diagramas calendario de las concentraciones diarias de PM_{2.5} durante el año 2014 en estaciones con concentraciones altas (Carvajal-Sevillana), concentraciones en rangos medios (Suba) y concentraciones bajas (Usaquén) mostrando el contraste en la variación espacial de las mediciones de este contaminante en la ciudad. Se puede observar el contraste del día 27 de junio en comparación a los otros días en el año, en especial para Carvajal-Sevillana y Usaquén.

En todos los sitios de medición analizados se observa que los niveles de concentración disminuyen en los meses de julio y agosto, comportamiento que está asociado al aumento de la velocidad del viento.

Carvajal 2014

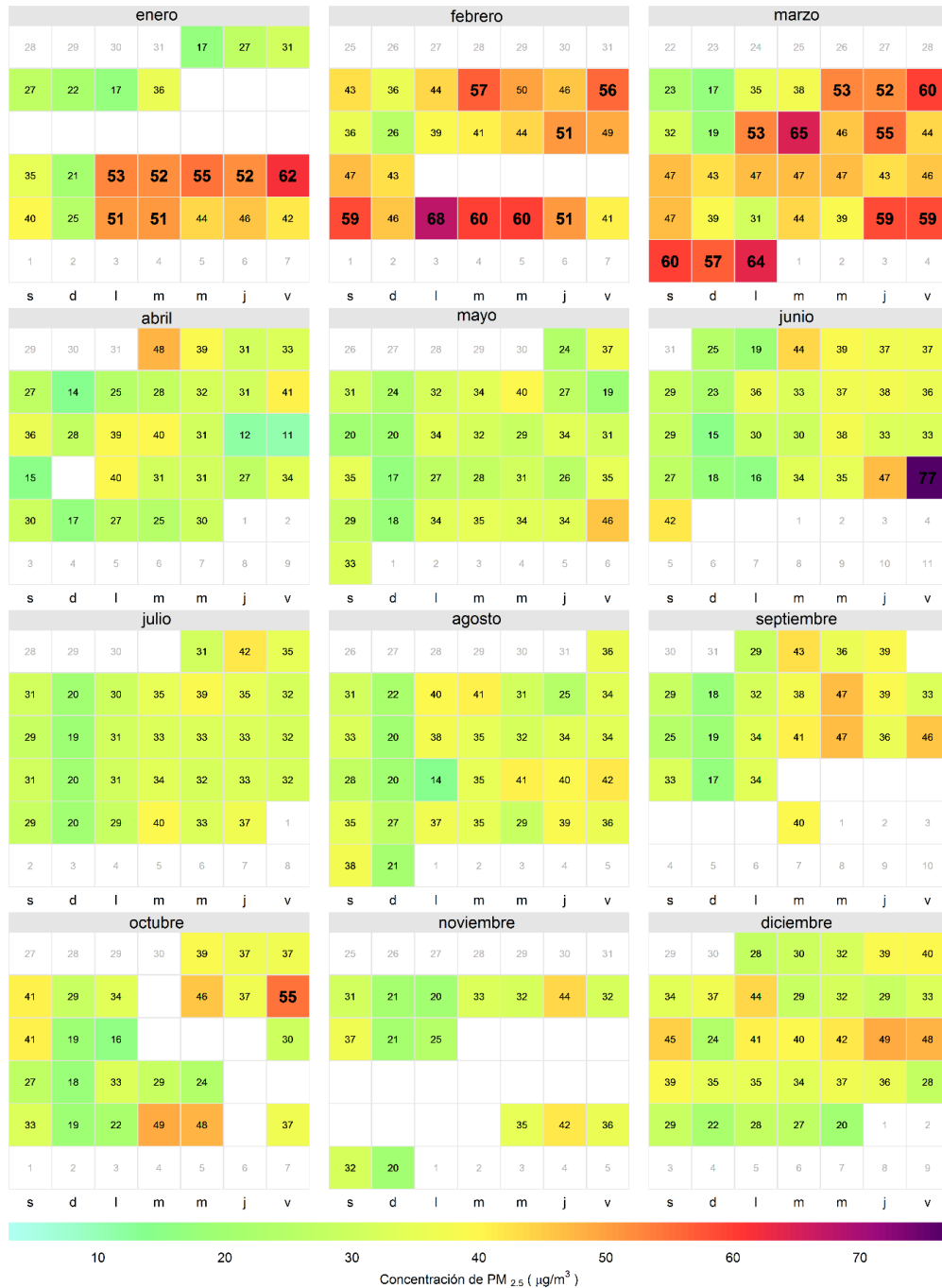


Figura 3-17. Diagrama calendario para PM_{2.5} durante el año 2014 en la estación Carvajal-Sevillana. Los valores mostrados corresponden a la concentración.

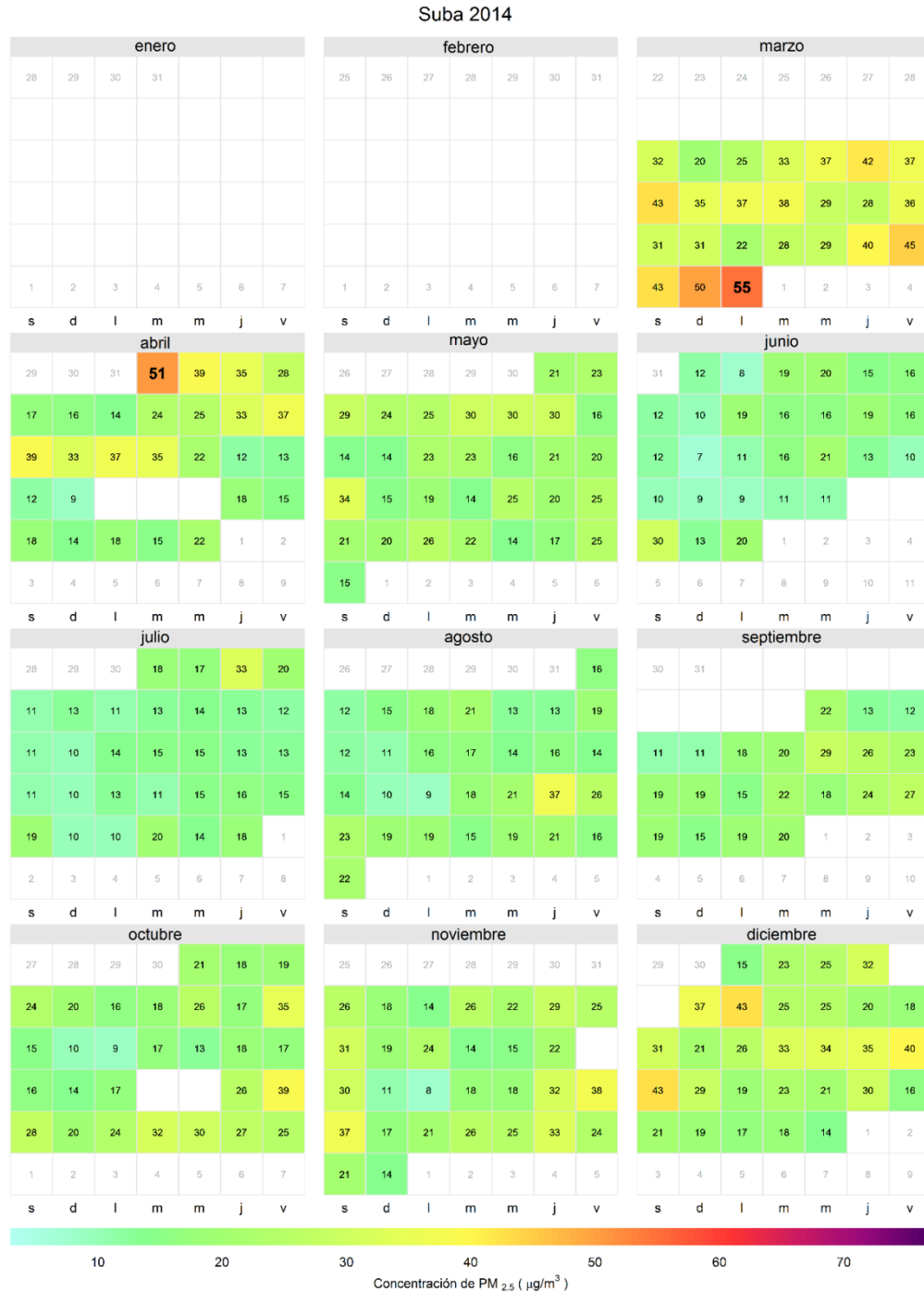


Figura 3-18. Diagrama calendario para PM_{2.5} durante el año 2014 en la estación Suba. Los valores mostrados corresponden a la concentración.

Usaquén 2014

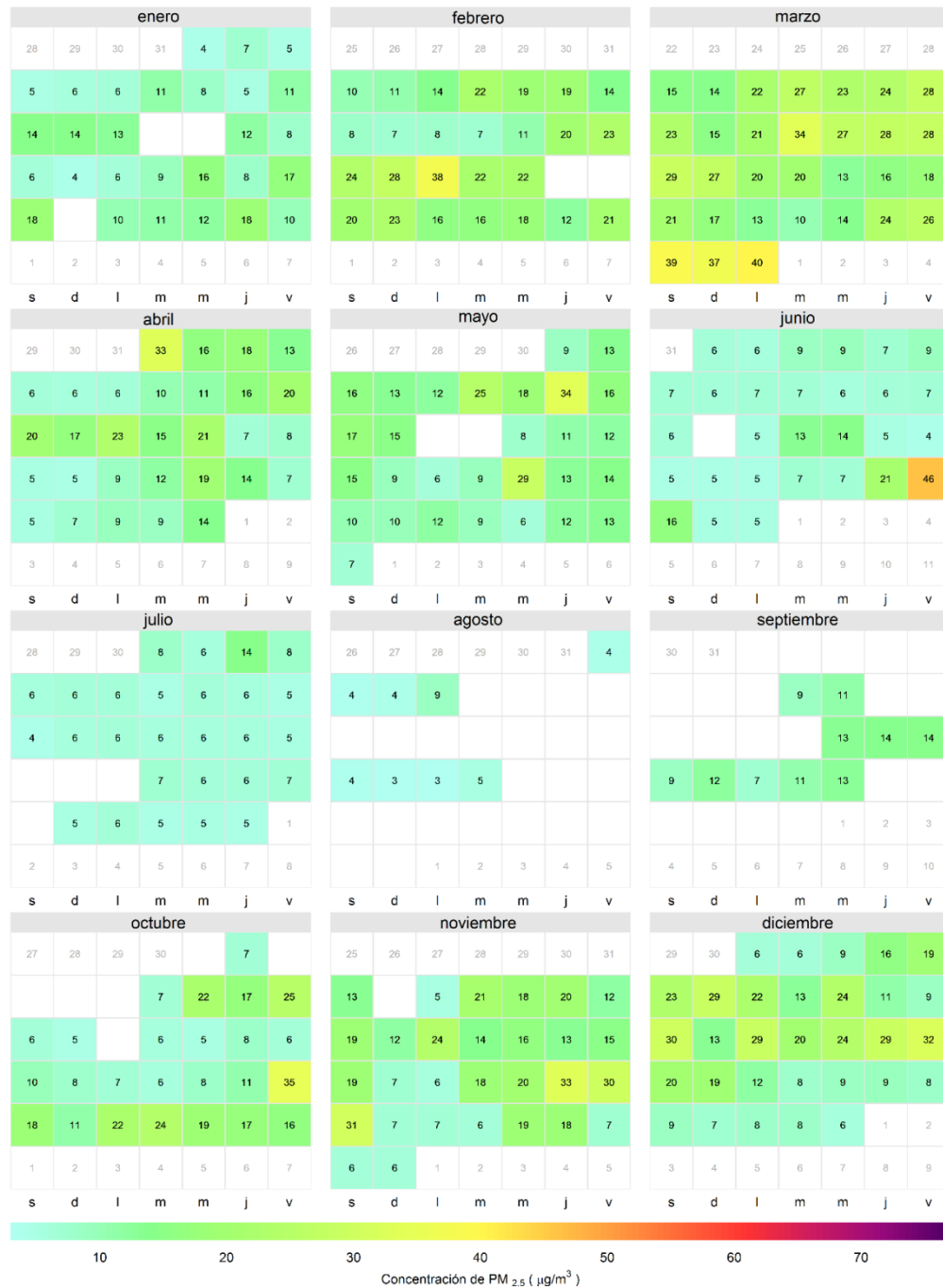


Figura 3-19. Diagrama calendario para PM_{2.5} durante el año 2014 en la estación Usaquén. Los valores mostrados corresponden a la concentración.

Diagramas de caja con el comportamiento temporal de las concentraciones de PM_{2.5}

La Figura 3-20 contiene la distribución de las concentraciones diarias de PM_{2.5} en función de los días de la semana y de las estaciones de monitoreo con cobertura temporal superior a 75%. Se observa que los domingos y los lunes son por lo general los días con las menores concentraciones, lo cual se atribuye a la diferencia en el nivel de actividad del domingo con los demás días de la semana y en el caso del lunes a la influencia remanente del fin de semana y la presencia de días feriados. Los martes y sábados son los siguientes días con las concentraciones más bajas.

El ciclo más heterogéneo y los niveles más altos se observan en Carvajal-Sevillana donde existe un amplio contraste entre el domingo y los demás días de la semana. Como se ha mencionado previamente, esta estación está cercana a la influencia de fuentes de tráfico pesado e industrias. Por el contrario, la estación Usaquéen tiene las concentraciones diarias más bajas así como el ciclo más homogéneo al ser relativamente menores las diferencias entre los días de la semana.

Como referencia, en la figura se adicionó el límite máximo permisible de 50 µg/m³ establecido en la Resolución 610 de 2010 sobre el cual es posible observar las excedencias. En concordancia con la discusión de las secciones previas, Carvajal-Sevillana y Kennedy presentaron la mayor cantidad de excedencias las cuales ocurren de lunes a domingo para Carvajal-Sevillana y entre martes y sábado para Kennedy. Se observa que aunque Carvajal-Sevillana tiene los mayores niveles de concentración, su dispersión es menor en comparación con otras estaciones con altos niveles de contaminación. Las características de los alrededores de las estaciones influyen en el grado de distribución de las concentraciones medidas.

El comportamiento en función de los meses enero a diciembre de 2014 se observa en la Figura 3-21. Con excepción de Carvajal-Sevillana, los ciclos anuales de las estaciones muestran que junio, julio y agosto se caracterizan por presentar concentraciones más bajas, lo cual se atribuye al comportamiento meteorológico de la ciudad cuando la velocidad del viento se incrementa y se favorece la ventilación de la ciudad. Por el contrario, los meses de febrero, marzo y diciembre presentaron las concentraciones más altas del año.

La variabilidad del ciclo anual para la estación Carvajal-Sevillana muestra concentraciones particularmente altas en los primeros tres meses del año. A partir de abril los niveles disminuyen drásticamente así como la diferencia entre los promedios mensuales. A diferencia de las demás estaciones, no se observa una disminución pronunciada de los niveles de concentración para los meses de la mitad del año. Es posible que la exposición de esta estación a fuentes directas de contaminación (fijas y móviles) reduzca la influencia de áreas más lejanas y, por tanto, no sea posible evidenciar cambios generales en el comportamiento meteorológico de la ciudad. Por el contrario, el ciclo semanal sí muestra un amplio contraste al ser reflejo del cambio de actividades entre los días de la semana.

En términos de distribución y con excepción de Carvajal-Sevillana, los meses de comienzo y final de año son los más dispersos al tener rangos intercuartílicos notablemente mayores.

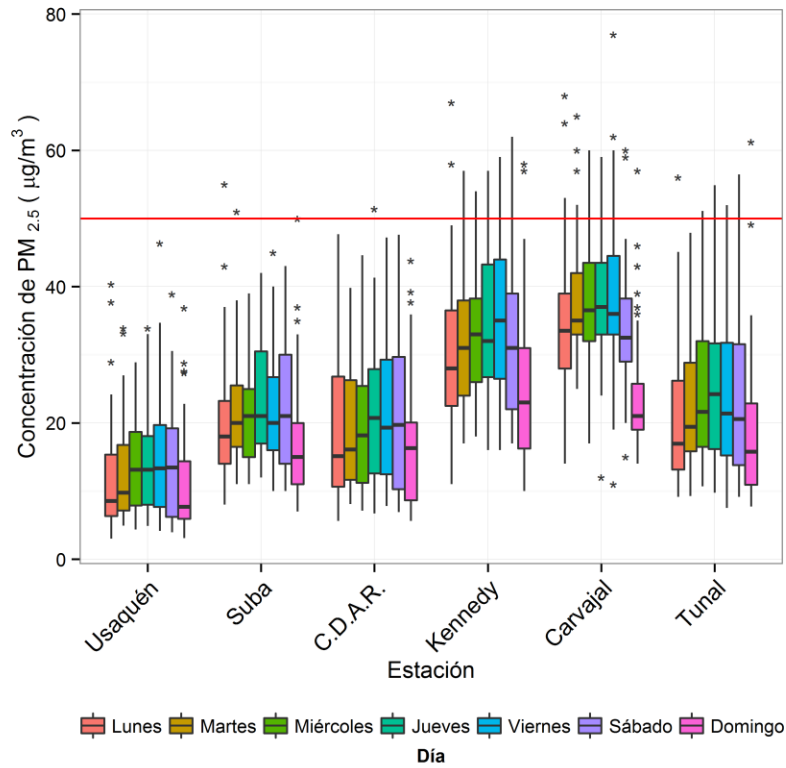


Figura 3-20. Diagramas de caja con la distribución de las concentraciones diarias de $PM_{2.5}$ en función de los días de la semana y de las estaciones de monitoreo con cobertura temporal suficiente.

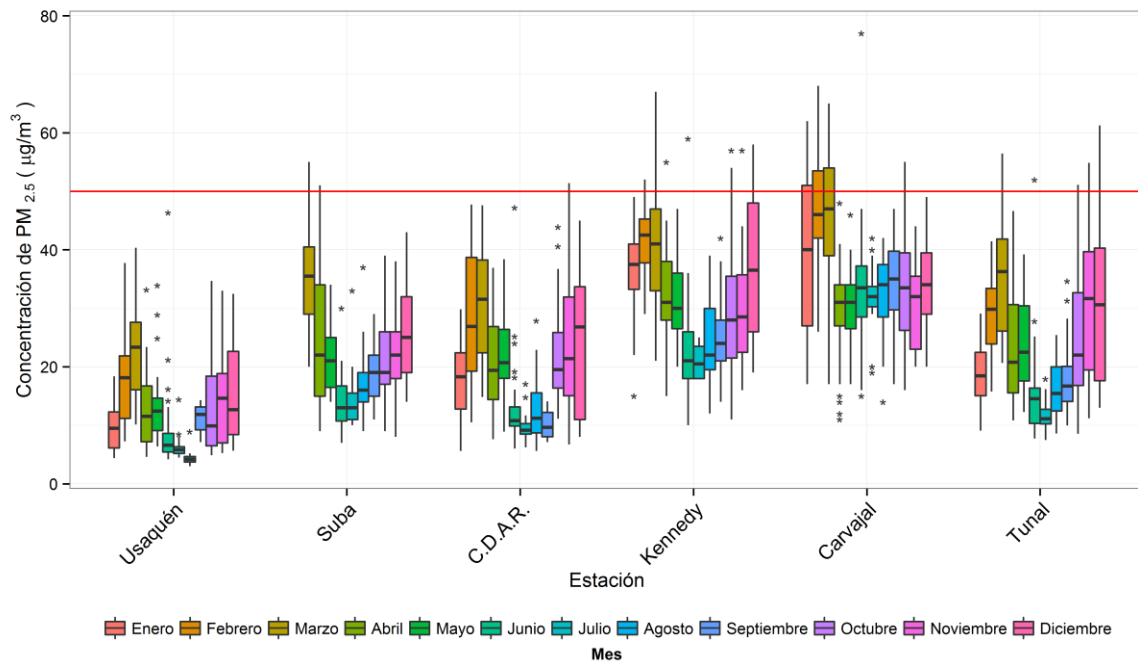


Figura 3-21. Diagramas de caja con la distribución de las concentraciones diarias de $PM_{2.5}$ en función de los meses del año 2014 y de las estaciones de monitoreo con cobertura temporal suficiente.

Ciclo semanales, diarios y anuales de las concentraciones de PM_{2.5}

La Figura 3-22 presenta el perfil semanal de las concentraciones de PM_{2.5} en los monitores con cobertura temporal superior a 75%. Se incluye los análisis de la estación Ministerio de Ambiente porque tiene una representatividad temporal de 74%, valor que es muy cercano al criterio mencionado. Conforme a lo descrito en la sección anterior, en todas las estaciones analizadas los lunes y los domingos presentaron las menores concentraciones. Carvajal-Sevillana y Kennedy presentan ciclos más variables, caso contrario a lo que sucede en la estación Usaqué, en la cual las concentraciones diarias y los rangos de los intervalos de confianza son relativamente bajos. En Ministerio de Ambiente se observa que los niveles de concentración se mantienen constantes entre miércoles y sábado y son menores en los domingos, lunes y sábados.

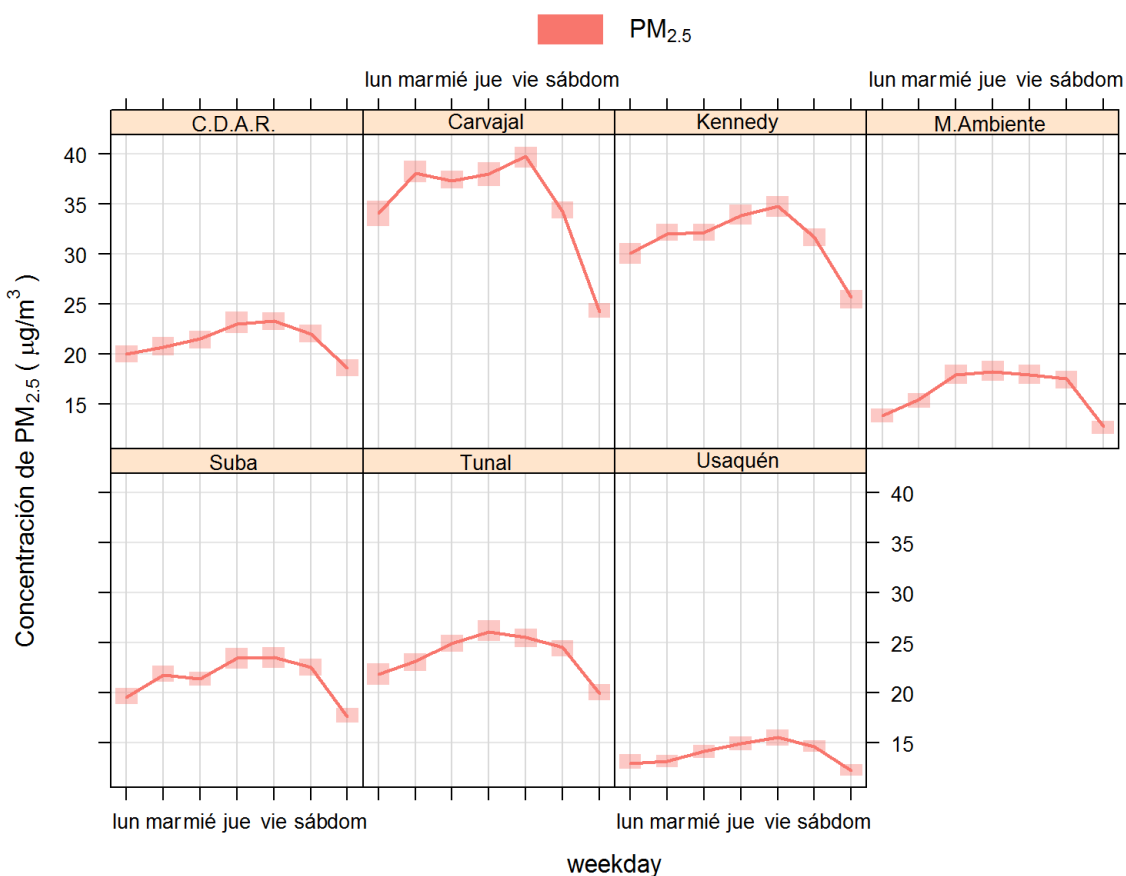


Figura 3-22. Comportamiento de las concentraciones de PM_{2.5} en el ciclo semanal. Cada promedio diario se presenta con un intervalo de 95% de confianza.

La Figura 3-23 presenta los ciclos diarios por estación de las concentraciones horarias de PM_{2.5}. En todos los sitios de monitoreo se observa un aumento pronunciado de concentración entre las 6:00 a.m. y las 8:00 a.m., especialmente en Carvajal-Sevillana y Kennedy. Este comportamiento se atribuye a la influencia de las fuentes móviles durante la denominada “hora pico”. Para estas dos estaciones y Suba se evidencia un aumento de concentración después de las 6:00 p.m., que puede deberse a actividades industriales o de

tráfico pesado que se desarrollan en horas de la noche. Centro de Alto Rendimiento, Ministerio de Ambiente, Tunal y Usaquén presentan aumentos menores en horas de la tarde que coinciden con el respectivo incremento del flujo vehicular. A manera de caso especial, se observa que en Suba la concentración de $PM_{2.5}$ tiene un descenso abrupto en horas cercanas al medio día, lo cual podría estar asociado a una reducción del flujo vehicular en dicho momentos. Las diferencias existentes entre las estaciones impiden generalizar el comportamiento espacial de Bogotá con promedios a nivel ciudad y por tanto es más recomendable sectorizar para observar los comportamientos individuales y analizar situaciones particulares de contaminación atmosférica.

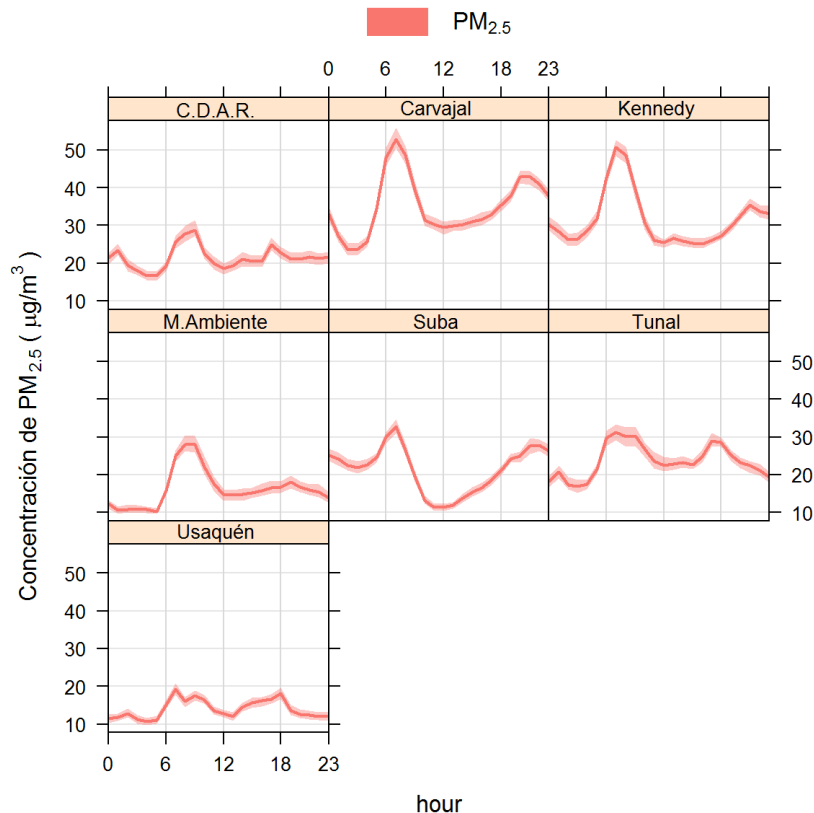


Figura 3-23. Ciclos diarios de las concentraciones de $PM_{2.5}$ por estación en el año 2014. Se muestra el intervalo de 95% de confianza.

Los ciclos anuales de la Figura 3-24 confirman las observaciones dadas en la sección anterior con respecto a la Figura 3-21. Con excepción de Carvajal-Sevillana, las concentraciones disminuyen abruptamente en los meses de julio y agosto, como consecuencia del aumento de la velocidad de los vientos que favorece la ventilación de la ciudad. Se observa que para todas las estaciones (con excepción de Suba y Ministerio de Ambiente cuyos monitores no estaban operativos a principios de año) enero presenta concentraciones bajas en comparación con meses como febrero y marzo. Esto se debe a la influencia de los primeros días del año en los cuales la actividad de la ciudad es reducida.

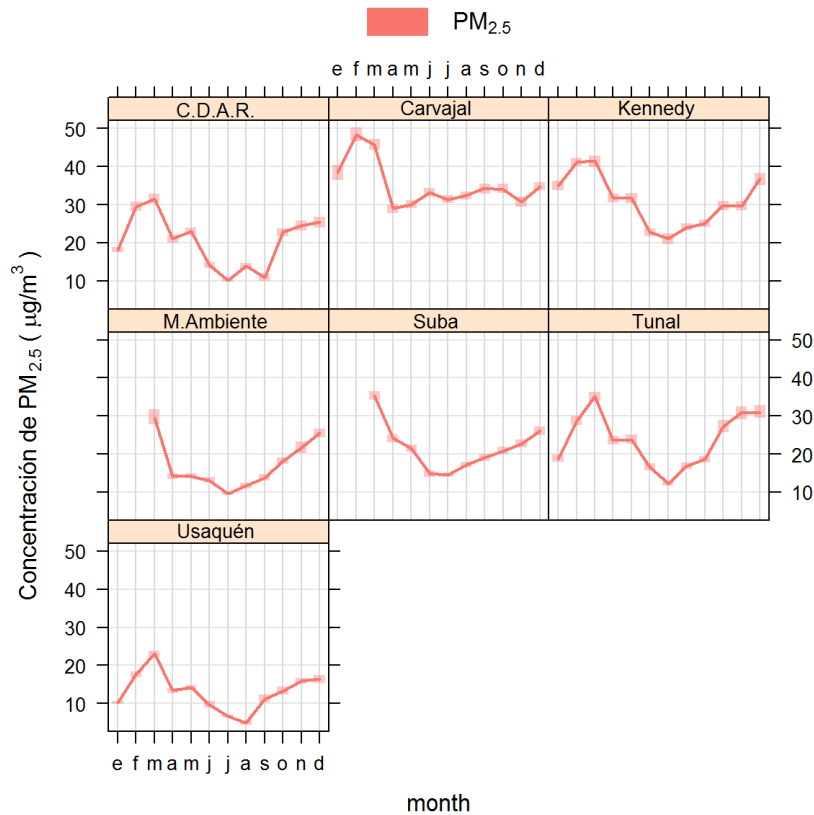


Figura 3-24. Ciclo anual (año 2014) de PM_{2.5} para 7 monitores de la RMCAB, las cuales tienen una cobertura temporal superior a 75%, con excepción de Ministerio de Ambiente con 74%. Se muestra el promedio y el intervalo de confianza de 95%.

Comportamiento histórico de promedios de PM_{2.5}

En el análisis de las tendencias históricas es importante aclarar que los periodos entre 2010 y 2013 solamente reportan información para la estación Kennedy, mientras que el año 2014 corresponde al análisis de 6 estaciones en conjunto (con cobertura temporal suficiente) teniendo en cuenta que desde octubre de 2013 monitores adicionales iniciaron operación.

La Figura 3-25 corresponde a un gráfico de *boxplot* con el comportamiento histórico de las concentraciones diarias de PM_{2.5} en la estación Kennedy entre los años 2010 y 2014 y de las estaciones Usaquén, Suba, Centro de Alto Rendimiento, Carvajal-Sevillana y Tunal en 2014. Por tanto, el análisis de tendencias históricas (en periodos de tiempo superiores a un año) solamente es posible en Kennedy. Se observa que entre 2010 y 2012, los niveles de concentración en este sitio de medición presentaron una reducción progresiva, se mantuvieron constantes en 2013 y aumentaron en 2014. En todos los años se observaron excedencias del límite máximo permisible diario. La dispersión entre los diagramas de caja se mantuvo relativamente constante.

La Tabla 3-9 contiene un resumen histórico de máximos entre 2010 y 2014. Es importante destacar que en los periodos de 2010 a 2013 solamente existieron mediciones válidas de

Kennedy. El máximo valor histórico reportado en la RMCAB fue $83 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 8 de diciembre de 2010, el cual es superior a la concentración reportada en Carvajal-Sevillana ($77 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en el episodio de contaminación transfronteriza del 27 de junio de 2014, que corresponde al máximo valor diario de 2014.

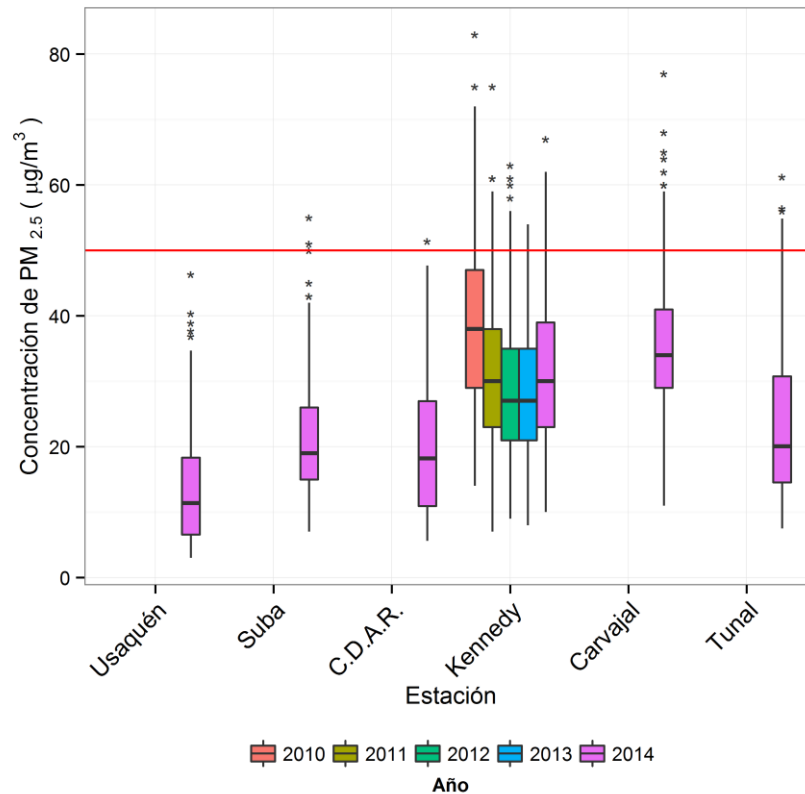


Figura 3-25. Gráfico de *boxplot* de las concentraciones diarias de $\text{PM}_{2.5}$ en función de las estaciones de monitoreo con cobertura temporal superior a 75% para los años 2010 a 2014.

Tabla 3-9. Resumen histórico de concentraciones máximas de $\text{PM}_{2.5}$ entre los años 2010 y 2014. Solamente se considera la estación Kennedy entre 2010 y 2013.

Año	Máximo $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Fecha de ocurrencia del máximo	Estación
2010	83	08/12/2010	Kennedy
2011	75	17/03/2011	Kennedy
2012	63	17/02/2012	Kennedy
2013	55	16/01/2013	Kennedy
2014	77	27/06/2014	Carvajal-Sevillana

3.1.4. Relación de concentración $PM_{2.5}/PM_{10}$

La Tabla 3-10 muestra la relación de concentraciones promedio anuales entre material particulado $PM_{2.5}$ y PM_{10} en las estaciones que midieron ambos contaminantes durante el año 2014 y que tienen una cobertura temporal superior a 75%. Seis (6) estaciones cumplieron este criterio las cuales fueron Usaquén, Suba, Centro de Alto Rendimiento, Kennedy, Carvajal-Sevillana y Tunal.

La relación entre PM_{10} y $PM_{2.5}$ muestra la fracción de PM_{10} que es $PM_{2.5}$ y varía en función de las actividades que se desarrollan en las inmediaciones de la estación. Las fracciones más altas fueron observadas en Centro de Alto Rendimiento y Kennedy lo cual indica que en el área cubierta por estas estaciones habría una mayor influencia por parte de las fuentes de combustión. Por el contrario, Usaquén, Ministerio de Ambiente y Carvajal-Sevillana registraron los menores valores con 0,35, 0,37 y 0,38, respectivamente, reflejando una mayor participación de material particulado grueso asociado a la influencia de la resuspensión de partículas.

En resumen, las diferencias en los valores de esta relación se atribuyen a las variación de las actividades de combustión tanto de fuentes fijas como de fuentes móviles, a la influencia de reacciones fotoquímicas (Baker & Scheff, 2007; Real & Sartelet, 2011; Sun, Lin, & Wang, 2003) y/o a la magnitud de emisión de material particulado resuspendido.

Tabla 3-10. Relación de concentraciones entre $PM_{2.5}$ y PM_{10} para las estaciones de la RMCAB que midieron ambos contaminantes durante el año 2014 y que tienen cobertura temporal superior a 75%. Como excepción y referencia, se incluye Ministerio de Ambiente con una cobertura temporal de 74% en $PM_{2.5}$.

Estación	$PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Relación de concentraciones $PM_{2.5}/PM_{10}$
Usaquén	13	37	0,35
Suba	21	51	0,41
Centro de Alto Rendimiento	20	40	0,50
Ministerio de Ambiente	16	43	0,37
Kennedy	32	71	0,45
Carvajal-Sevillana	35	91	0,38
Tunal	23	53	0,43

3.2. Gases contaminantes

La RMCAB, además de medir el material particulado, realiza el monitoreo de otros contaminantes tanto primarios como secundarios presentes en el aire. Éstos son el ozono (O_3), dióxido de nitrógeno (NO_2), monóxido de carbono (CO) y dióxido de azufre (SO_2). Estos gases se emiten a partir del uso de combustibles fósiles y/o por reacciones químicas y fotoquímicas ocurridas en la atmósfera.

El O_3 es un gas azul pálido que existe en las capas altas (estratosfera) y capas bajas de la atmósfera, pero mientras el estratosférico es de tipo natural y benéfico para la vida, actuando como un filtro protector de la radiación ultravioleta, el segundo (llamado ozono troposférico) es perjudicial en los seres vivos, ya que es un oxidante fuerte e irritante en altas concentraciones en el sistema respiratorio de animales y humanos y causa toxicidad en plantas. Este ozono troposférico no es emitido directamente a la atmósfera, más sí es producido por la reacción química entre el oxígeno natural del aire y los óxidos de nitrógeno e hidrocarburos, los cuales actúan como precursores o facilitadores de la reacción química en presencia de la luz solar. Estos precursores sí son emitidos directamente a la atmósfera y por tanto a mayor concentración de estos, mayor es la producción de ozono, siempre y cuando exista la radiación solar.

El NO_2 es un gas de color pardo rojizo cuya presencia en el aire de los centros urbanos se debe a los procesos de combustión a altas temperaturas en vehículos (fuentes móviles) e industrias (fuentes fijas). El NO_2 participa en las reacciones atmosféricas que dan lugar a la formación del ozono (O_3) y material particulado secundario, afectando pulmones y vías respiratorias.

El CO es un gas inflamable, incoloro e insípido y es producto de la combustión incompleta de combustibles fósiles. Este gas afecta la salud puesto que tiene mayor afinidad con la hemoglobina de la sangre que el oxígeno, por lo cual en altas concentraciones puede llegar a interferir en el proceso de transporte de oxígeno en la sangre.

El SO_2 , contaminante primario, es un gas incoloro y de olor picante e irritante, perceptible en concentraciones superiores a ~3 ppm. Se genera principalmente por la utilización de combustibles fósiles con contenido de azufre como el carbón, la gasolina y el diésel, que son usados en la industria y el transporte. Este gas puede reaccionar químicamente con otros compuestos y generar lluvia ácida y material particulado secundario. Su aspiración continua puede producir problemas respiratorios.

En las secciones que se presentan a continuación, las concentraciones de los gases serán reportadas en unidades de masa por unidad de volumen. En decir, las concentraciones de O_3 , NO_2 y SO_2 se presentarán en $\mu g/m^3$ mientras que las correspondientes a CO en mg/m^3 . El reporte en este sistema está acorde al Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire, Manual de Operación de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010). Teniendo en cuenta que en informes anteriores los resultados se reportaron en ppb y ppm, en el Anexo B se proporciona una tabla con los factores de conversión de unidades.

3.2.1. Comportamiento de la concentración de O₃

La RMCAB contó con once (11) equipos para monitorear ozono durante el año 2014, ubicados según se reporta en la Tabla 1-1. La estación Fontibón reporta una cobertura temporal notablemente baja (43%) al salir de operación en el mes de julio.

Comportamiento de las concentraciones horarias de O₃

Durante el 2014 se obtuvieron 82620 (ochenta y dos mil seiscientos veinte) promedios horarios válidos de O₃, lo que representa un porcentaje de recuperación global de los datos de 86% entre las estaciones que reportaron al menos una medición en el año. La representatividad temporal, el número de excedencias de la norma horaria (120 µg/m³ de acuerdo a la Resolución 610 de 2010) y las concentraciones máximas con su respectiva fecha y hora de ocurrencia por estación se presentan en la Tabla 3-11. La Figura 3-26 es un reflejo de la información de esta tabla con un resumen gráfico de promedios, máximos y número de excedencias.

Tabla 3-11. Resumen descriptivo de los datos horarios de O₃ por estación para el año 2014.

Estación	% de datos válidos	Excedencias norma 120 µg/m ³	Máximo [µg/m ³] ⁸	Fecha/hora de ocurrencia del Máximo	Cantidad de datos entre el 90% y el 100% de la norma ⁹
Guaymaral	96%	13	159	29/01/2014 15:00	23
Usaquén	90%	17	179	29/03/2014 15:00	13
Suba	97%	0	120	29/01/2014 14:00	4
Las Ferias	82%	7	168	29/03/2014 14:00	15
Centro de Alto Rendimiento	89%	16	157	29/03/2014 14:00	13
MinAmbiente	78%	1	123	29/03/2014 15:00	2
Fontibón	43%	16	165	29/03/2014 14:00	18
Puente Aranda	98%	2	126	29/03/2014 14:00	5
Carvajal-Sevillana	79%	0	106	30/03/2014 12:00	0
Tunal	94%	1	128	29/03/2014 14:00	2
San Cristóbal	96%	1	128	29/01/2014 14:00	2

Con excepción de Carvajal-Sevillana y Suba, todas las estaciones presentaron excedencias al límite normativo horario de 120 µg/m³, especialmente Usaquén, Centro de Alto Rendimiento y Fontibón que se localizan en el norte, occidente y centro de la ciudad. A

⁸ En informes anteriores las concentraciones de los gases contaminantes (O₃, NO₂, CO y SO₂) se reportaban en partes por millón (ppm) o en partes por billón (ppb) según el caso. Sin embargo, con fines de comparar con los límites máximos permisibles de la normatividad vigente (Resolución 610 de 2010) y de acuerdo al Manual de Operación de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire del MAVDT, las concentraciones se reportarán en mg/m³ y µg/m³ acordemente.

⁹ Mayor o a 108 µg/m³ y menor o igual a 120 µg/m³.

pesar de su baja cobertura temporal, Fontibón reportó 16 excedencias, lo que indica que de haber continuado su funcionamiento en el segundo semestre de 2014, el número de incumplimientos normativos pudo haber sido mayor. A diferencia de las tendencias observadas para el material particulado, los sitios de medición ubicados en el sur de la ciudad (Carvajal-Sevillana Tunal y San Cristóbal) tienden a registrar niveles menores de ozono, un comportamiento que requiere de mayor investigación. Una excepción es Ministerio de Ambiente, ubicada en el centro de la ciudad que registró solamente una excedencia. En resumen, el número total de excedencias del límite normativo diario de ozono en la RMCAB fue 74, representando un 0,1% de los datos capturados válidos.

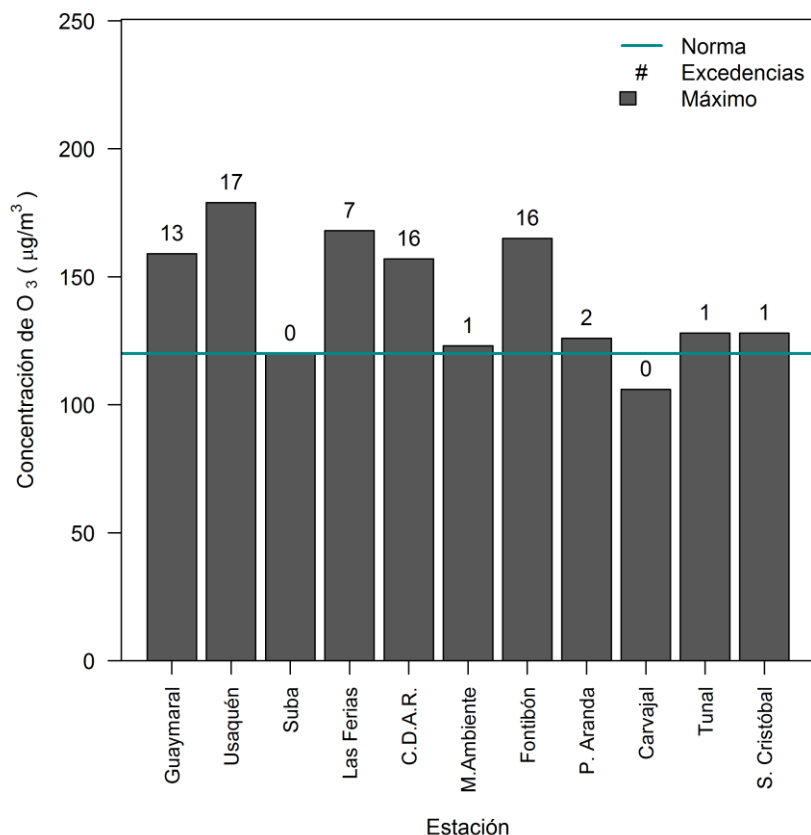


Figura 3-26. Máximos y excedencias de la norma de O₃ en base horaria por estación durante el año 2014.

La cantidad de datos que se encontraron entre el 90% y 100% de la norma muestra las estaciones que están propensas a presentar excedencias o a generar mayores incumplimientos. Se observa que a pesar de que Suba no registró excedencias, presentó 4 datos en este rango y su valor máximo fue precisamente el límite máximo permisible, el cual no se considera excedencia. Carvajal-Sevillana, por el contrario no presenta datos entre estos límites, indicando concentraciones notablemente bajas en comparación con las demás estaciones de la RMCAB.

En términos de concentraciones máximas, se observó una tendencia particular el 29 de marzo de 2014 entre 2:00 p.m. y 3:00 p.m., momento en el cual siete estaciones reportaron simultáneamente sus valores horarios más altos del año. Estas fueron Usaquén, Las Ferias, Centro de Alto Rendimiento, Ministerio de Ambiente, Fontibón, Puente Aranda y Tunal. La

distancia existente entre estos sitios de monitoreo sugiere que se trató de un episodio generalizado a nivel ciudad, similar en extensión geográfica al ocurrido el 27 de junio de 2014 para material particulado. El día siguiente, 30 de marzo de 2014 a las 12:00 m., la estación Carvajal-Sevillana registró su valor máximo del año. El 29 de enero entre 2:00 p.m. y 3:00 p.m. las estaciones Guaymaral, Suba y San Cristóbal reportaron valores más altos del año, indicando otro episodio singular de alta concentración. El máximo horario de ozono registrado por la RMCAB en 2014 fue $179 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la estación Usaquén.

En el año 2013 se presentó un total de 28 excedencias correspondientes al 0,04% del respectivo total de promedios válidos. Por el contrario, en el año 2014 se presentaron 74 excedencias, demostrando un incremento considerable y un consecuente deterioro de la calidad del aire en términos de este contaminante.

Comportamiento de los promedios móviles de 8 horas para O_3

En un tiempo de exposición de 8 horas se obtuvieron 82146 (ochenta y dos mil ciento cuarenta y seis) promedios que representan el 85% del número máximo de datos que podrían calcularse en las estaciones que monitorearon este contaminante en el año 2014. Se presentaron 237 excedencias del límite máximo permisible de 8 horas ($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Resolución 610 de 2010). El resumen de porcentaje de datos válidos, promedios anuales, excedencias y máximos se presenta en la Tabla 3-12. Los promedios anuales que se muestran en la tabla son indicativos para comparación mutua de las estaciones y no deben ser contrastados con los límites máximos permisibles ya que estos no consideran un tiempo de exposición anual.

Con respecto a las excedencias del límite máximo permisible de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$, se observa que las estaciones Guaymaral, Usaquén y Fontibón dan cuenta del 68% del total. Para esta última estación se cuenta con representatividad temporal de 43% y es posible que de haber continuado el monitoreo más adelante del 1 de julio, el número de excedencias hubiera sido mayor. Como contraste, Ministerio de Ambiente y las estaciones localizadas en el occidente y sur de la ciudad (Puente Aranda, Carvajal-Sevillana, Tunal y San Cristóbal) registraron un total de 12 excedencias, representando 5% del total. Las diferencias observadas muestran que es más adecuado analizar la calidad del aire de Bogotá por sectores en lugar de calcular promedios a nivel ciudad. Entre el 28 de marzo y el 1 de abril las concentraciones de ozono alcanzaron niveles inusualmente altos y se registró un total de 133 excedencias en Guaymaral (18), Usaquén (35), Suba (9), Las Ferias (22), Centro de Alto Rendimiento (17), Ministerio de Ambiente (3), Fontibón (20), Puente Aranda (4) y Tunal (5). Estos cinco días representaron el 56% de las excedencias totales del año demostrando la ocurrencia de un episodio persistente de altas concentraciones en gran parte del área urbana de Bogotá.

La Figura 3-27 presenta el resumen en forma gráfica de máximos y excedencias del límite máximo permisible de la Resolución 610 de 2010 ($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$) así como la comparación de los valores máximos con la guía de la Organización Mundial de la Salud de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Organización Mundial de la Salud, 2006) y con el límite normativo de los *National Ambient Air Quality Standards* (NAAQS) de Estados Unidos correspondiente a 75 ppb o $147 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (U.S. Environmental Protection Agency, 2012). La comparación con el nivel recomendado por la EPA de 59 ppb o $116 \mu\text{g}/\text{m}^3$ debajo del cual no se esperan efectos sobre la salud y

la calidad del aire se considera “Buena” (*U.S. Environmental Protection Agency EPA/Office of Air Quality Planning and Standards, 2013*) muestra un total de 15 excedencias distribuidas en Usaquén (5), Las Ferias (4), Centro de Alto Rendimiento (2) y Fontibón (4). Con respecto a la normatividad europea (*European Commission - Environment, 2014*) se presentaron 12 excedencias del límite normativo de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Usaquén (5), Las Ferias (3) y Fontibón (4). Teniendo en cuenta que la concentración máxima fue $133 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la RMCAB no presentó excedencias del límite normativo de los NAAQS. Con respecto a la guía de la OMS se presentaron 58 excedencias distribuidas en Guaymaral (6), Usaquén (20), Las Ferias (12), Centro de Alto Rendimiento (9) y Fontibón (11).

Tabla 3-12. Porcentaje de datos válidos, excedencias, máximos y respectivos periodos de ocurrencia, de las concentraciones de O_3 en base 8 horas durante el año 2014.

Estación	% de datos válidos	Promedio anual ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Excedencias norma (8h) $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$	Máximo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Fecha de concentración máxima
Guaymaral	96%	23	49	107	29/03/2014 19:00
Usaquén	90%	31	62	133	29/03/2014 19:00
Suba	97%	22	12	89	31/03/2014 18:00
Las Ferias	81%	25	22	127	29/03/2014 18:00
Centro de Alto Rendimiento	88%	23	30	120	29/03/2014 18:00
MinAmbiente	77%	20	3	90	29/03/2014 19:00
Fontibón	43%	N.R.	50	129	29/03/2014 18:00
Puente Aranda	98%	15	4	97	29/03/2014 18:00
Carvajal-Sevillana	77%	14	0	80	29/03/2014 17:00
Tunal	94%	18	5	95	29/03/2014 18:00
San Cristóbal	95%	20	0	78	29/01/2014 17:00

N.R. No representativo. La cantidad de datos válidos en el año es inferior al 75% del total posible.

La Tabla 3-13 corresponde a un resumen de las excedencias del límite máximo permisible de 8 horas de ozono ($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$) discriminado por mes y por estación de monitoreo. Se observa que, con una diferencia considerable, el primer trimestre del año registró la mayor cantidad de excedencias. Es importante destacar el contraste existente entre el total de incumplimientos y el número de días de excedencias en estos meses. En marzo, por ejemplo, se presentaron 130 excedencias repartidas en 5 días. En los meses de mitad de año no ocurrieron excedencias, producto del comportamiento meteorológico de la ciudad.

Tabla 3-13. Número de excedencias y días de excedencias de la norma de 8 horas de O₃ (80 µg/m³) por estación y por mes para el año 2014.

Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
Guaymaral	16	15	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	49
Usaquén	14	4	28	7	0	0	0	0	0	3	6	0	62
Suba	3	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12
Las Ferias	0	0	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22
Centro de Alto Rendimiento	5	0	17	0	0	0	0	0	0	0	0	8	30
MinAmbiente	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
Fontibón	11	15	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50
Puente Aranda	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
Carvajal-Sevillana	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tunal	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
San Cristóbal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total de excedencias	49	34	130	7	0	0	0	0	0	3	6	8	237
Días de excedencias	6	6	5	1	0	0	0	0	0	1	1	2	22

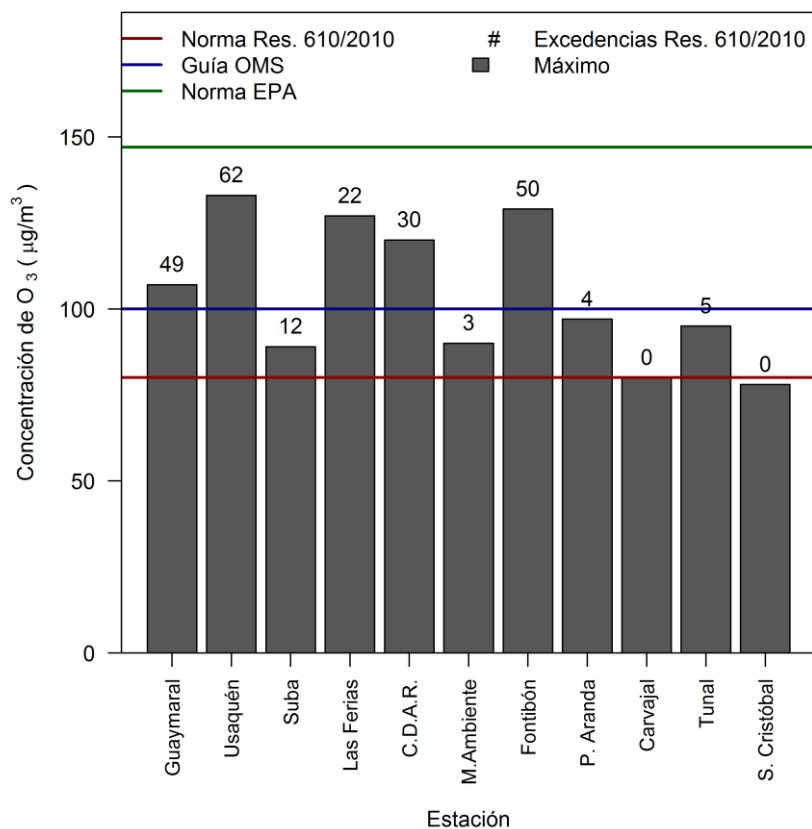


Figura 3-27. Concentraciones máximas y excedencias de la norma de O₃ (80 µg/m³) en base de promedios móviles de 8 horas por estación durante el año 2014.

Con excepción de Fontibón, todas las estaciones de la RMCAB presentaron una cobertura temporal superior a 75%, lo cual permite el cálculo de los respectivos promedios anuales. Usaquén registró el promedio más alto con $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Este valor es seguido por los calculados en Las Ferias, Guaymaral y Centro de Alto Rendimiento. A diferencia de las tendencias registradas en los contaminantes PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, NO_2 , SO_2 y CO , las concentraciones de ozono tienden a ser más altas en las estaciones localizadas en la zona norte de la ciudad, lo cual se debe a su naturaleza como contaminante secundario, formado a partir de óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles en presencia de radiación solar. Las menores concentraciones promedios fueron observadas en Puente Aranda y Carvajal-Sevillana localizadas en la zona suroccidental de la ciudad.

Los promedios móviles de ocho horas permiten suavizar las tendencias de las concentraciones horarias y visualizar de forma más clara aquellos episodios generalizados de concentración a nivel ciudad. El 29 de marzo de 2014 entre 5:00 p.m. y 7:00 p.m., 9 estaciones de la RMCAB coincidieron en el reporte de sus valores máximos evidenciando la ocurrencia de un episodio de alta concentración a nivel ciudad, como ya fue discutido. Los demás receptores, Suba y San Cristóbal, reportaron sus máximos el 31 de marzo de 2014 a las 6:00 p.m. y el 29 de enero de 2014 a las 5:00 p.m. Como se mencionó previamente, la máxima concentración de ozono en promedio móvil de 8 horas registrada por la RMCAB fue $133 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valor registrado en la estación Usaquén el 29 de marzo de 2014 a las 7:00 p.m. Es importante considerar que los promedios móviles resumen las 8 horas anteriores que en estos casos corresponden a horas cercanas al mediodía y de la tarde.

La Figura 3-28 corresponde a un mapa con la distribución espacial de las concentraciones anuales de ozono (en base de promedios móviles de 8 horas) en las estaciones de la RMCAB con cobertura temporal superior a 75%. Como se ha mencionado previamente, se observa que a diferencia del material particulado, donde las altas concentraciones predominan en el suroccidente, el ozono tiende a mantener niveles altos en el norte de la ciudad, especialmente en la localidad de Usaquén. Al ser un contaminante secundario, el ozono presenta ciertas particularidades que están asociadas al comportamiento de sus precursores y al transporte de los mismos sobre Bogotá.

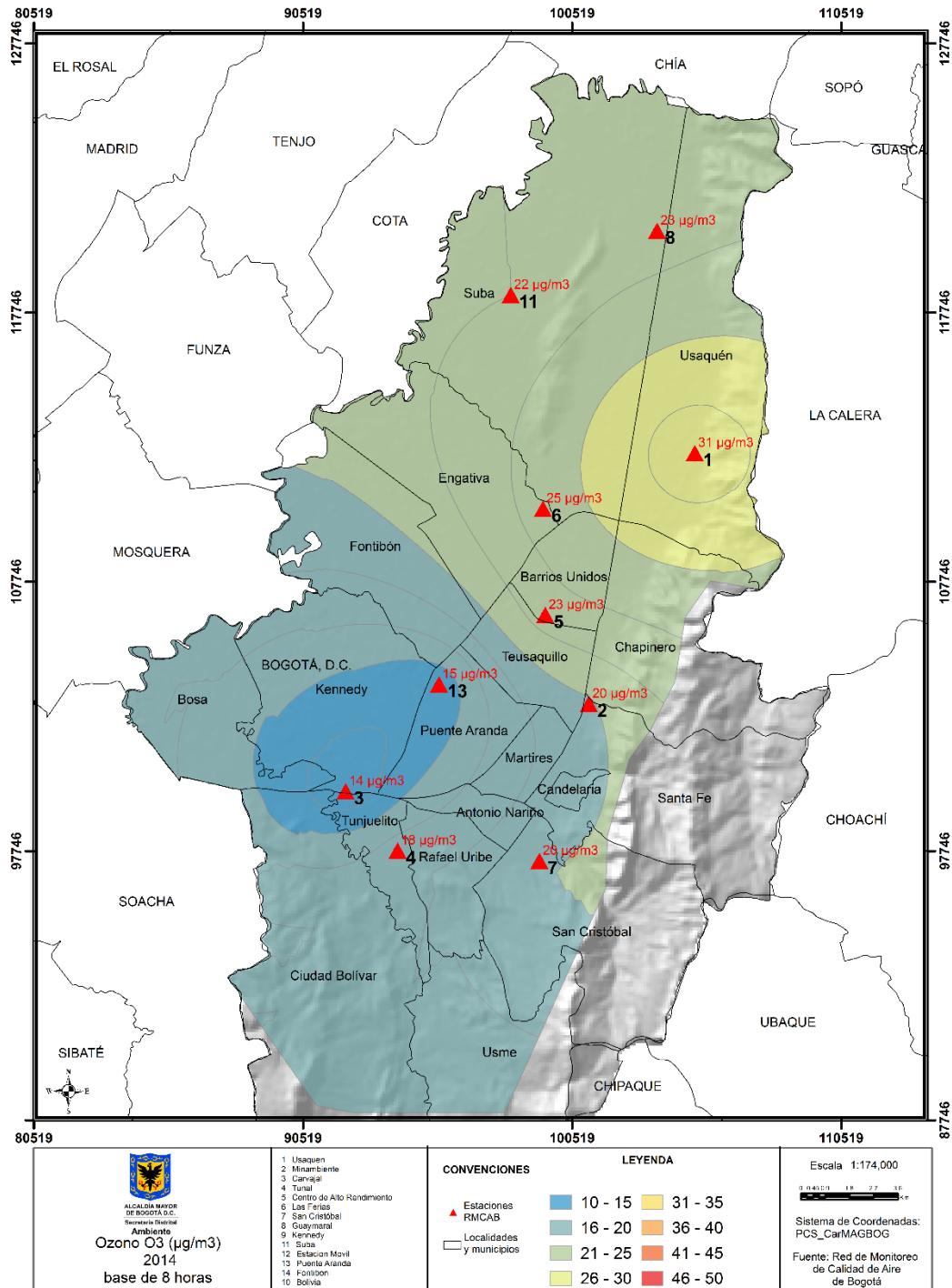


Figura 3-28. Superficie de concentración de ozono en Bogotá a partir de la interpolación espacial por el método Kriging de los promedios móviles de 8 horas en cada una de las estaciones de monitoreo con cobertura temporal superior a 75%.

Diagramas de caja con el comportamiento temporal del O₃

La Figura 3-29 presenta la distribución de las concentraciones de ozono en promedios móviles de 8 horas en función de los días de la semana y de las estaciones de monitoreo. En general las concentraciones más altas se presentan los lunes y los domingos y no se observan diferencias significativas entre los martes y los sábados. Esta es una tendencia contraria a la observada para los demás contaminantes. Las estaciones localizadas en el sur y occidente de la ciudad (Puente Aranda, Carvajal-Sevillana, Tunal y San Cristóbal) registraron los menores niveles de dispersión y de excedencias. Usaquén establece una diferencia al presentar concentraciones y distribuciones más amplias en sus datos.

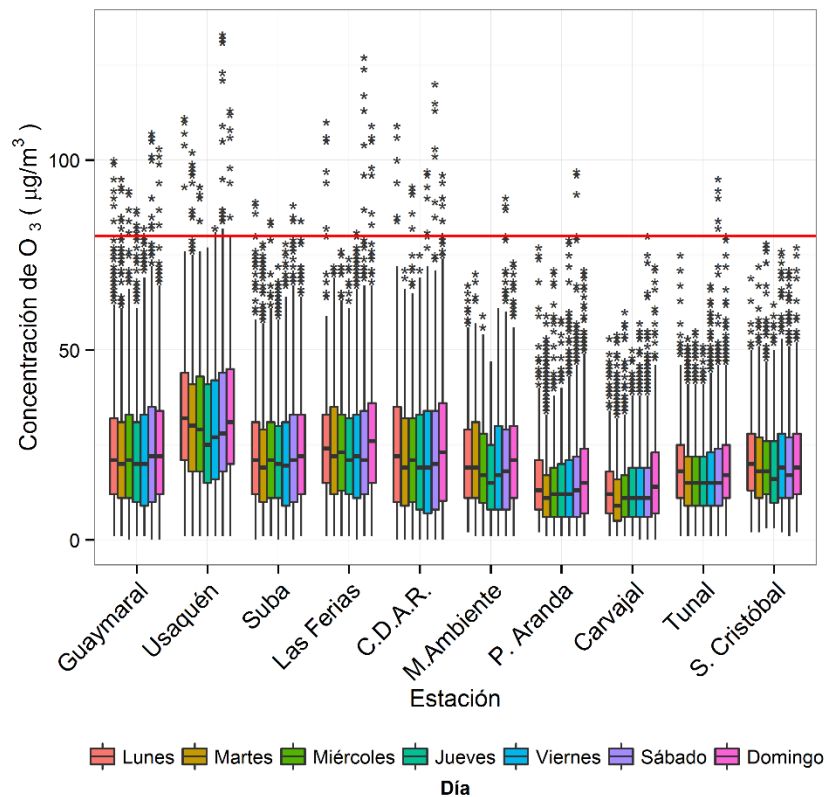


Figura 3-29. Diagramas de caja con el comportamiento de las concentraciones de ozono (promedios móviles de 8 horas) en función de los días de la semana y de las estaciones de monitoreo para año 2014.

La distribución de las concentraciones móviles de 8 horas de ozono en función de los meses del año 2014 se presenta en la Figura 3-30. Con excepción de Las Ferias, se observan en general bajos niveles de concentración en los meses de mitad de año. Este comportamiento se explica teniendo en cuenta la variación intra-anual de la velocidad del viento, la cual tiende a aumentar en julio y agosto. Para Guaymaral, Usaquén, Suba y San Cristóbal se observaron mayores niveles de concentración durante el primer trimestre de 2014.

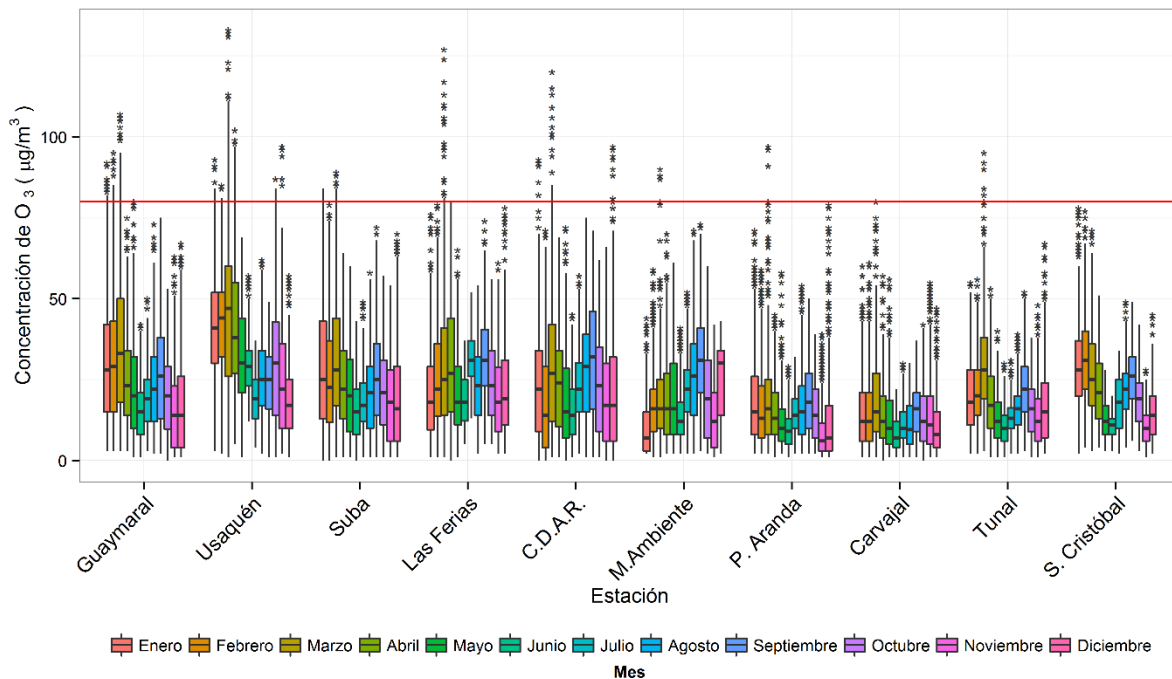


Figura 3-30. Diagramas de caja con el comportamiento de las concentraciones de ozono (promedios móviles de 8 horas) en función de los meses de 2014 y de las estaciones de monitoreo.

Ciclos semanales, diarios y anuales de las concentraciones de O₃

La Figura 3-31 presenta los ciclos semanales de las concentraciones de ozono por estación de monitoreo. En la mayoría de los casos, los niveles más altos se observan en los lunes y los domingos mientras que los menores se observan entre martes y viernes, especialmente los jueves. La variabilidad de los ciclos depende de la estación a analizar. Ministerio de Ambiente y Usaquén presentan mayores cambios en el ciclo semanal. En esta figura también es posible observar que las estaciones ubicadas al norte y oriente de la ciudad registran los niveles más altos de ozono. En la estación Suba se presenta una tendencia ascendente de las concentraciones entre lunes y domingo. La tendencia semanal del ozono es en general contraria a la observada para los demás contaminantes en los cuales las mayores concentraciones se presentan en los días hábiles.

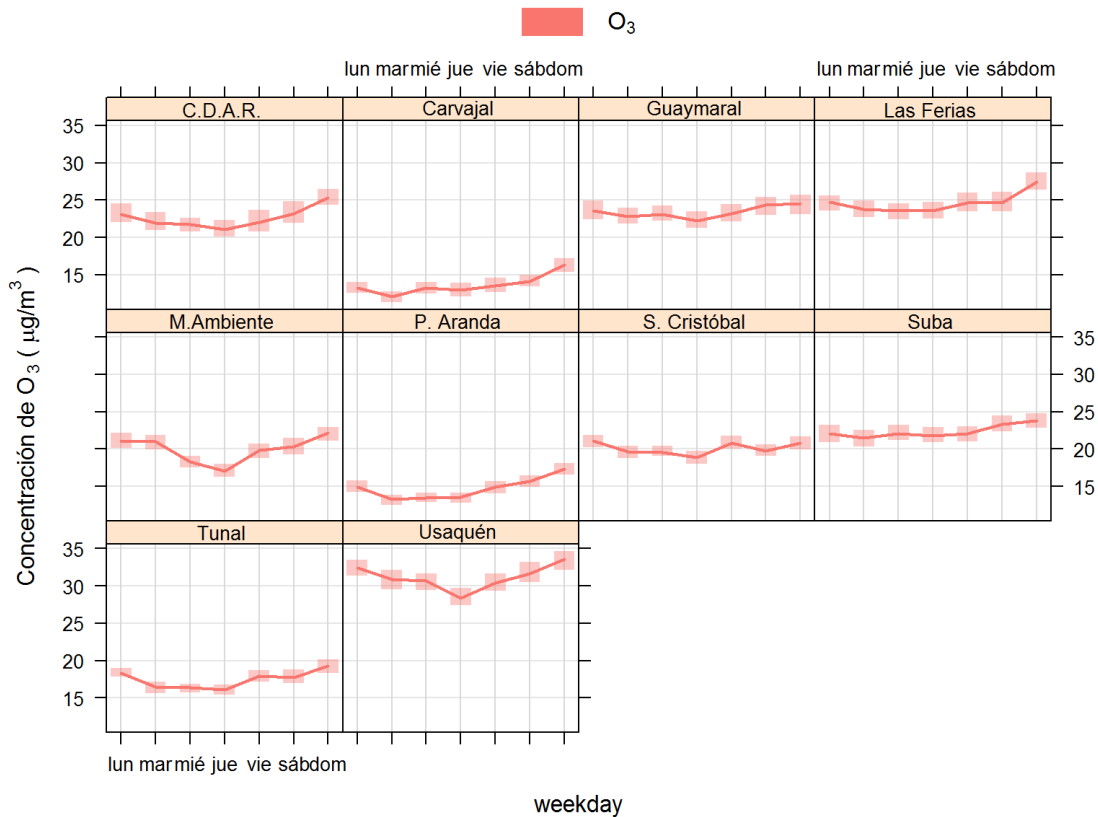


Figura 3-31. Ciclos semanales de las concentraciones de ozono por estación de monitoreo y por día de la semana.

Los ciclos diarios de la Figura 3-32 confirman la naturaleza del ozono como contaminante secundario ya que en general las concentraciones se incrementan en horas cercanas al medio día como consecuencia del aumento de la radiación solar. Usaquén, Ministerio de Ambiente y San Cristóbal mantienen concentraciones relativamente altas en horas de la noche y de la madrugada, un tema que requiere de una investigación más profunda.

La Figura 3-33 presenta los ciclos anuales en base mensual de las concentraciones de ozono para el año 2014. Las diferencias en las características de las áreas de influencia de las estaciones impiden identificar una tendencia generalizada de la variabilidad de los ciclos anuales. Sin embargo, se observa que los meses correspondientes a la mitad de año (junio, julio y agosto) presentan las más bajas concentraciones, lo cual estaría influenciado por la variabilidad de la velocidad de los vientos.

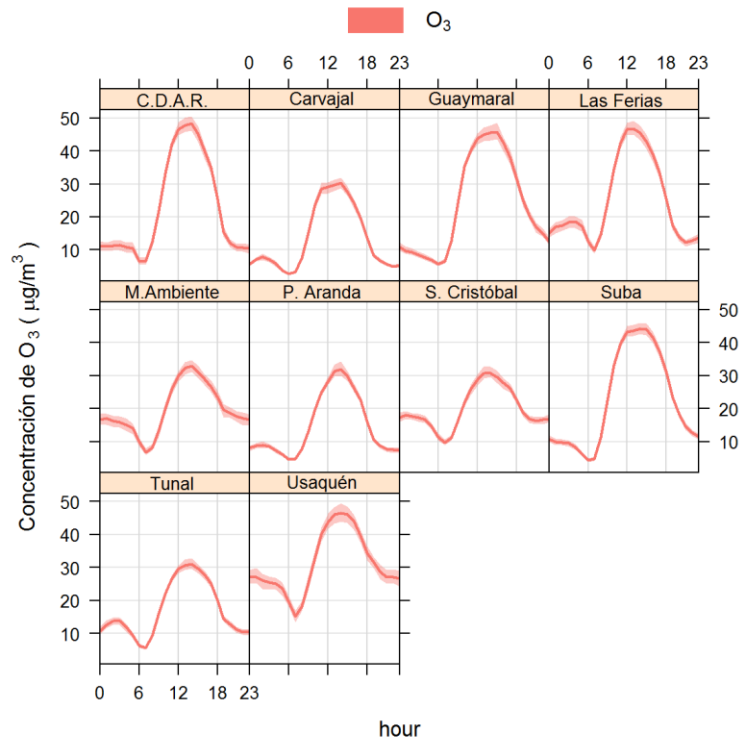


Figura 3-32. Ciclos diarios de las concentraciones de ozono por estación de monitoreo y por hora del día.

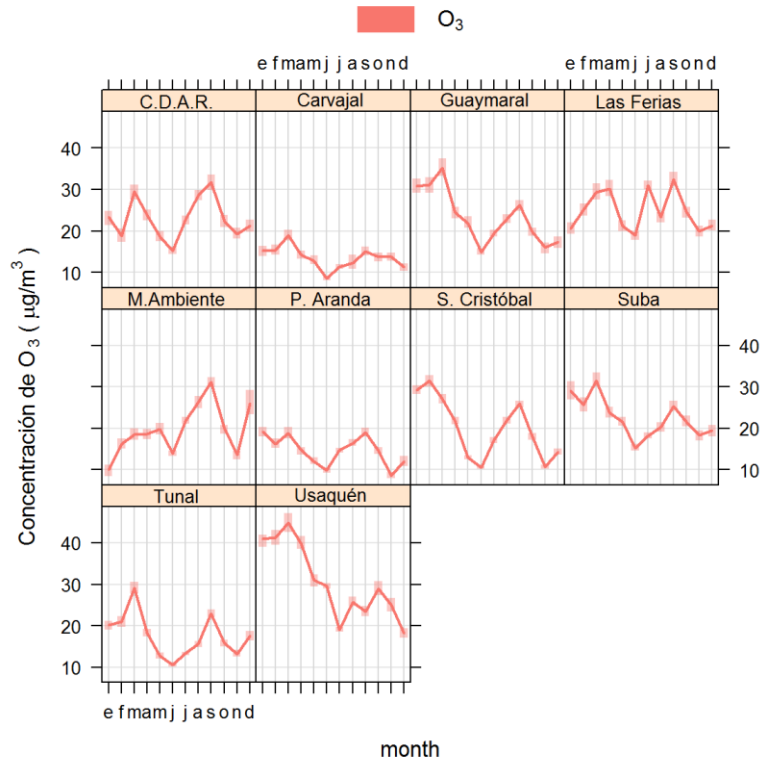


Figura 3-33. Ciclo anual de las concentraciones de ozono en base mensual para el año 2014.

Comportamiento histórico del O₃

La Figura 3-34 es un diagrama *boxplot* que muestra la distribución de las concentraciones de ozono en promedios móviles de 8 horas en función de las estaciones de monitoreo entre los años 2010 y 2014. Históricamente, Usaquén ha mostrado los niveles de concentración más altos en los 5 años estudiados, especialmente en el 2010 donde se observa que la cantidad de valores atípicos y sus respectivas magnitudes son considerablemente altas, excediendo el límite normativo de 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Resolución 610 de 2010).

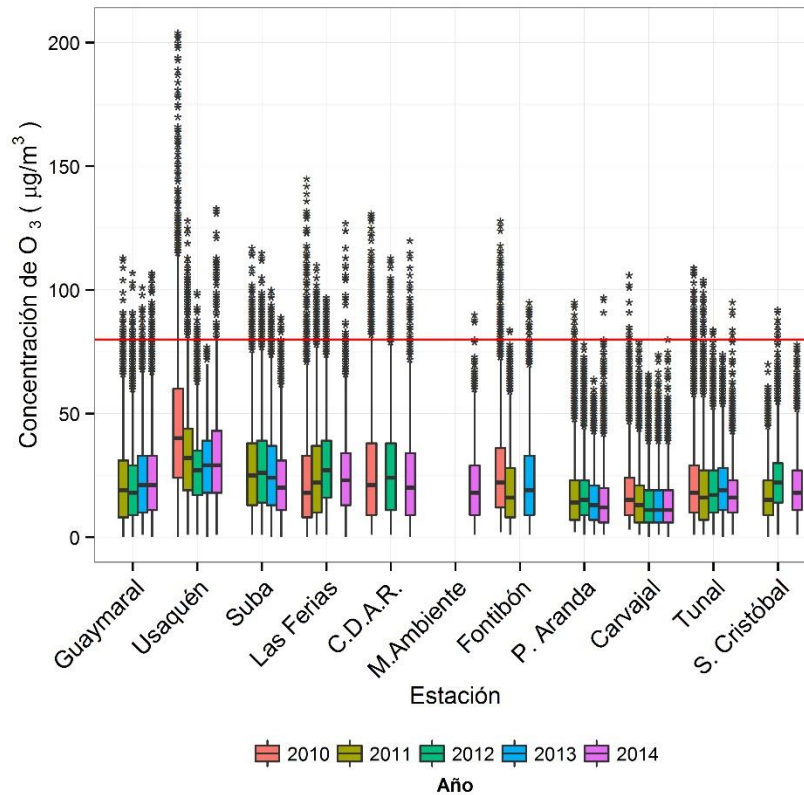


Figura 3-34. Gráfico de *boxplot* de O₃ en función de las estaciones entre los años 2010 y 2014 (con base en promedios móviles de 8 horas).

La distribución de los datos sugiere una disminución de las concentraciones en Suba entre 2012 y 2014. Se observa además que en este periodo las concentraciones en Carvajal-Sevillana se han mantenido constantes luego de una disminución entre 2010 y 2011. Con respecto al año 2013, en 2014 las concentraciones aumentaron en Usaquén y se mantuvieron relativamente constantes en las demás estaciones. Para otros puntos de medición no es posible realizar la comparación al tener representatividad temporal suficiente únicamente en uno de los dos años o en ninguno. Respecto al año 2012, en el año 2014 San Cristóbal redujo sus niveles de concentración. Estas observaciones evidencian una heterogeneidad de las concentraciones de ozono en la ciudad y la necesidad de sectorizarla en los análisis de las tendencias. En términos de dispersión se observa que las estaciones localizadas al norte presentan mayores distribuciones, en contraste con el sur. Históricamente, las estaciones ubicadas en la zona norte y central de

Bogotá han registrado mayores concentraciones en comparación con la zona sur, especialmente el suroccidente de Bogotá.

La Tabla 3-14 es un resumen histórico de las concentraciones máximas de ozono en base de promedios móviles de 8 horas. Se observa que el valor máximo reportado en las estaciones de la RMCAB entre los periodos considerados fue 204 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el 22 de agosto de 2010 a las 8:00 a.m. en la estación Usaqué. Este dato es considerablemente alto en comparación con los máximos encontrados en los demás periodos y debe entenderse como el promedio de las 8 horas previas al reporte, el cual cubre momentos de la madrugada. En los demás periodos las concentraciones se mantuvieron en el rango comprendido entre 101 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 133 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ entre las 6:00 p.m. y las 7:00 p.m. cubriendo horas de la tarde y cercanas al medio día. Las concentraciones máximas se reportaron principalmente en estaciones localizadas en el norte y el centro de la ciudad. Se destaca que no se presentan resultados en base diaria para esta Tabla al no existir normatividad correspondiente.

Tabla 3-14. Resumen histórico de las concentraciones máximas de O_3 en promedios móviles de 8 horas entre los años 2010 y 2014.

Año	Máximo $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Fecha de ocurrencia del máximo	Estación
2010	204	22/08/2010 8:00	Usaqué
2011	128	25/01/2011 18:00	Usaqué
2012	132	16/02/2012 18:00	Ministerio de Ambiente
2013	101	04/04/2013 18:00	Guaymaral
2014	133	29/03/2014 19:00	Usaqué

3.2.2. Comportamiento de la concentración de NO₂

En el año 2014, se contó con 8 estaciones para el monitoreo de dióxido de nitrógeno, tal como se indica en la Tabla 1-1. Las concentraciones horarias y diarias de este contaminante fueron comparadas con los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 610 de 2010.

Comportamiento de las concentraciones anuales de NO₂

La Tabla 3-15 presenta las concentraciones anuales de dióxido de nitrógeno para los años 2013 y 2014, con base en promedios diarios en las estaciones con representatividad temporal superior a 75%. Adicionalmente, se presenta la comparación de estas magnitudes para aquellos sitios de medición que tienen cobertura temporal suficiente en los dos años. Las únicas estaciones para las que es posible analizar las diferencias son Puente Aranda y Kennedy, ubicadas en el occidente de la ciudad. La concentración de Kennedy se mantuvo constante mientras que en Puente Aranda disminuyó en 1 µg/m³, el cual es un cambio leve que no permite afirmar un aumento.

Tabla 3-15. Concentraciones promedio anuales de NO₂ con base en promedios diarios para los años 2013 y 2014 y cambio entre estos dos años.

Estación	Promedio 2013 (µg/m ³)	Promedio 2014 (µg/m ³)	Cambio de 2013 a 2014 (µg/m ³)
Guaymaral	N.R.	23	
Suba	N.R.	26	
Centro de Alto Rendimiento	16	N.R.	
Puente Aranda	40	39	-1
Kennedy	34	34	0
Tunal	30	N.R.	

N.R.: No representativo. El número de datos disponibles para el año es inferior al 75% del máximo posible de acuerdo al Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Las tendencias de la Figura 3-35 muestran que Puente Aranda y Kennedy son las estaciones con mayores concentraciones de este contaminante lo cual se atribuye a mayores actividades de combustión (fuentes móviles y fijas) en sus áreas de influencia. Se observa un contraste de la concentración de Puente Aranda en relación con Suba y Guaymaral que se localizan en el norte de la ciudad. Las diferencias en las características de las zonas de influencia de las estaciones de la RMCAB indican que es más adecuado sectorizar la ciudad para analizar las tendencias en lugar de establecer promedios a nivel ciudad.

El límite máximo permisible en un tiempo de exposición anual para dióxido de nitrógeno es 100 µg/m³. De acuerdo a la Tabla 3-15, ninguna estación superó este límite teniendo en cuenta que el promedio anual más alto fue 39 µg/m³ en la estación Puente Aranda.

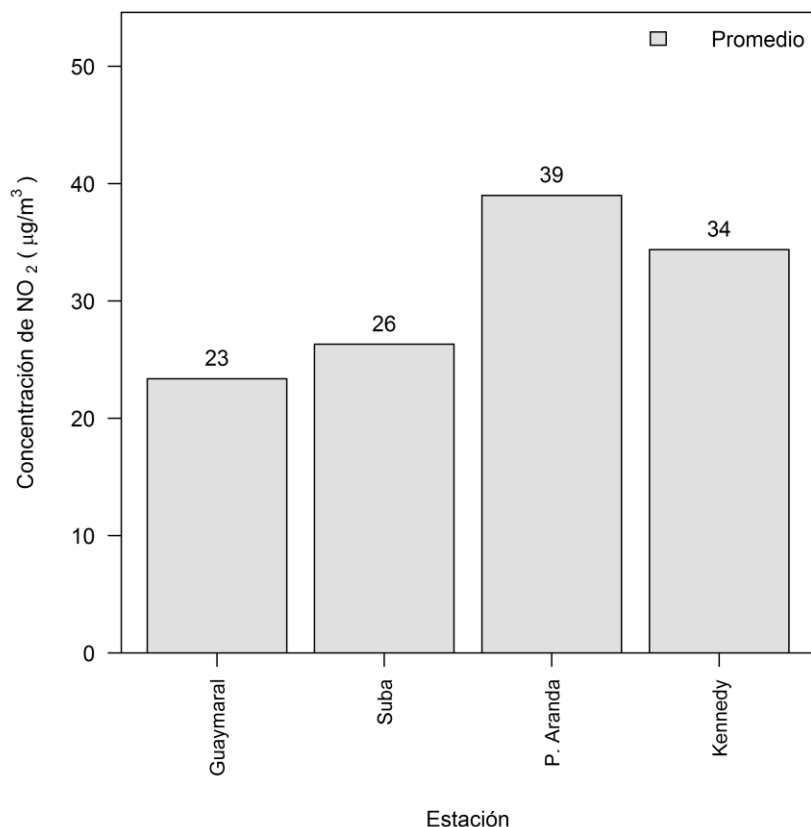


Figura 3-35. Concentración promedio anual de dióxido de nitrógeno para las estaciones de la RMCAB con cobertura temporal igual o superior a 75% durante el año 2014.

Comportamiento de los promedios horarios de NO₂

Durante el periodo analizado se obtuvieron 45282 (cuarenta y cinco mil doscientos ochenta y dos) promedios horarios, que corresponden a una representatividad temporal global de 65% entre las ocho estaciones que registraron mediciones, lo cual incumple con el criterio de cobertura temporal mínima requerida de 75%. La Figura 3-36 contiene un resumen de máximos y excedencias por estación para NO₂, en base de tiempo horaria. Los valores de porcentajes de representatividad temporal, máximos horarios y fechas en las que ocurrieron los máximos para cada estación se presentan en la Tabla 3-16. Como se puede observar, no se registraron excedencias de la norma (200 µg/m³, Resolución 610 de 2010) pero sí del 75% de la misma (150 µg/m³) en Tunal (3), Las Ferias (2), Puente Aranda (2) y Carvajal-Sevillana (1). Esta última estación también presentó un dato diario que excedió el 90% del límite máximo permisible (180 µg/m³) con un valor de 199 µg/m³.

De las 8 estaciones consideradas, Las Ferias, Centro de Alto Rendimiento, Carvajal-Sevillana y Tunal presentaron una cobertura temporal inferior a 75%, representando la mitad de los analizadores disponibles. Por tanto, no es posible obtener un promedio anual de las mismas para NO₂ ya que no sería representativo del periodo a analizar. La máxima concentración horaria de este contaminante registrada por la RMCAB en 2014 fue 199 µg/m³ en Carvajal-Sevillana, la cual está 1 µg/m³ por debajo del límite máximo permisible

(200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Entonces la zona de influencia de esta estación es propensa de presentar incumplimientos normativos. Este máximo es seguido por Tunal con 178 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el 28 de octubre a las 10:00 a.m.

El análisis de los valores máximos permite identificar dos episodios singulares de alta concentración en la ciudad. El primero ocurrió el 28 de octubre entre 9:00 a.m. y 10:00 a.m. en Carvajal-Sevillana y Tunal, localizadas en el sur de la ciudad. El siguiente ocurrió el 19 de diciembre entre 5:00 p.m. y 6:00 p.m. para las estaciones Guaymaral, Las Ferias y Puente Aranda sugiriendo un evento de altas concentraciones a nivel ciudad.

Tabla 3-16. Resumen de datos horarios de NO_2 por estación para el año 2014.

Estación	% de datos válidos	Máximo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Fecha de ocurrencia del Máximo	Número de datos entre el 75% y el 100% de la norma ¹⁰
Guaymaral	97%	106	19/12/2014 17:00	0
Suba	99%	113	29/10/2014 19:00	0
Las Ferias	38%	156	19/12/2014 18:00	2
Centro de Alto Rendimiento	28%	124	10/12/2014 14:00	0
Puente Aranda	85%	164	19/12/2014 18:00	2
Kennedy	95%	102	31/03/2014 09:00	0
Carvajal-Sevillana	7%	199	28/10/2014 09:00	1
Tunal	68%	178	28/10/2014 10:00	3

Comportamiento de las concentraciones diarias de NO_2

Se obtuvieron 1872 valores diarios de NO_2 , cuya representatividad temporal global corresponde al 64% del total de datos posibles entre las estaciones que reportaron alguna medición, evidenciando una cobertura temporal inferior al límite de 75%. En la Tabla 3-17 se reportan los porcentajes de datos válidos, máximos con sus fechas de ocurrencia, y cantidad de datos superiores al 50% del límite máximo permisible, por estación. De estos valores diarios, ninguno superó la norma establecida de NO_2 para un tiempo de exposición de 24 horas (150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) como se observa en la Figura 3-37. Sin embargo, se observaron 12 datos superiores al 50% de la norma (75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) en Las Ferias (8), Puente Aranda (2) y Carvajal-Sevillana (2). Estas estaciones están sujetas a una influencia destacable de emisiones de fuentes móviles y fijas, lo cual contribuye a que los niveles de inmisión de NO_2 sean notablemente más altos, en comparación con las demás estaciones de la RMCAB.

¹⁰ Mayor a 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y menor o igual a 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

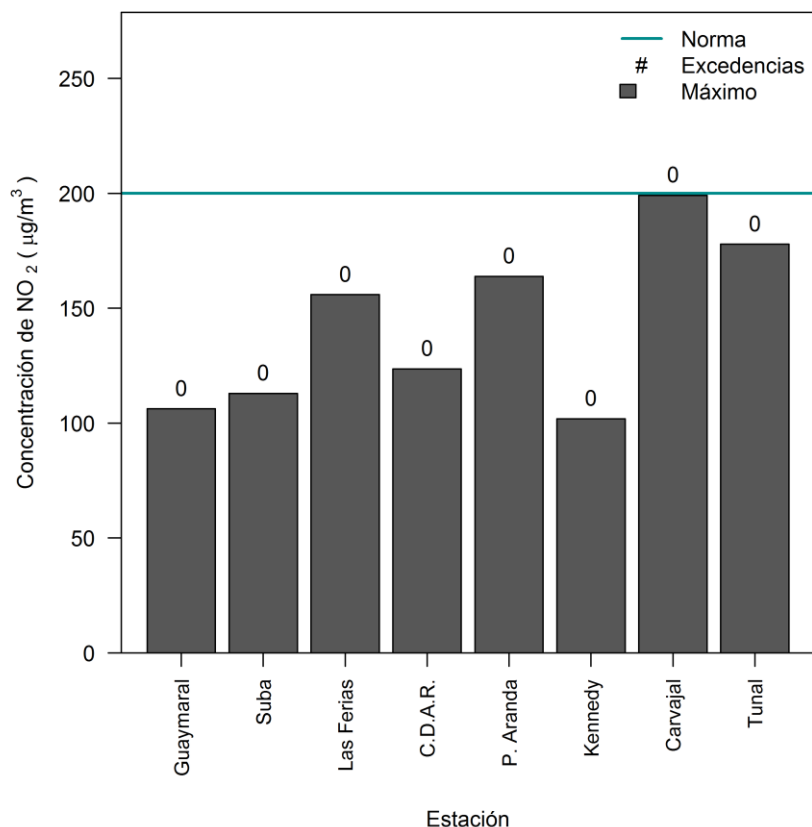


Figura 3-36. Máximos y excedencias de los datos horarios de NO₂ por estación durante el año 2014.

En términos de concentraciones diarias, el 20 de noviembre las estaciones Guaymaral, Suba y Las Ferias coincidieron en el reporte de sus valores máximos con 43 µg/m³, 54 µg/m³ y 93 µg/m³, evidenciando un episodio de alta concentración en el norte y occidente de la ciudad. Esta fecha no fue observada cuando se analizaron las concentraciones en términos horarios y la razón se fundamenta en que los eventos singulares en base horaria son más puntuales que sus contrapartes diarias cuyas tendencias permiten conocer episodios de mayor duración. La máxima concentración diaria de NO₂ en el año 2014 fue 93 µg/m³ en las estaciones Las Ferias y Puente Aranda el 20 de noviembre y el 19 de diciembre, respectivamente, representando el 62% del límite máximo permisible de 150 µg/m³.

Tabla 3-17. Resumen de datos diarios de NO₂ por estación para el año 2014.

Estación	% de datos válidos	Máximo (µg/m ³)	Fecha de ocurrencia del Máximo	Número de datos superior al 50% de la norma ¹¹
Guaymaral	96%	43	20/11/2014	0
Suba	99%	54	20/11/2014	0
Las Ferias	37%	93	20/11/2014	8

¹¹ Mayores a 75 µg/m³.

Centro de Alto Rendimiento	27%	63	22/11/2014	0
Puente Aranda	85%	93	19/12/2014	2
Kennedy	95%	53	01/04/2014	0
Carvajal-Sevillana	7%	84	29/10/2014	2
Tunal	67%	72	28/10/2014	0

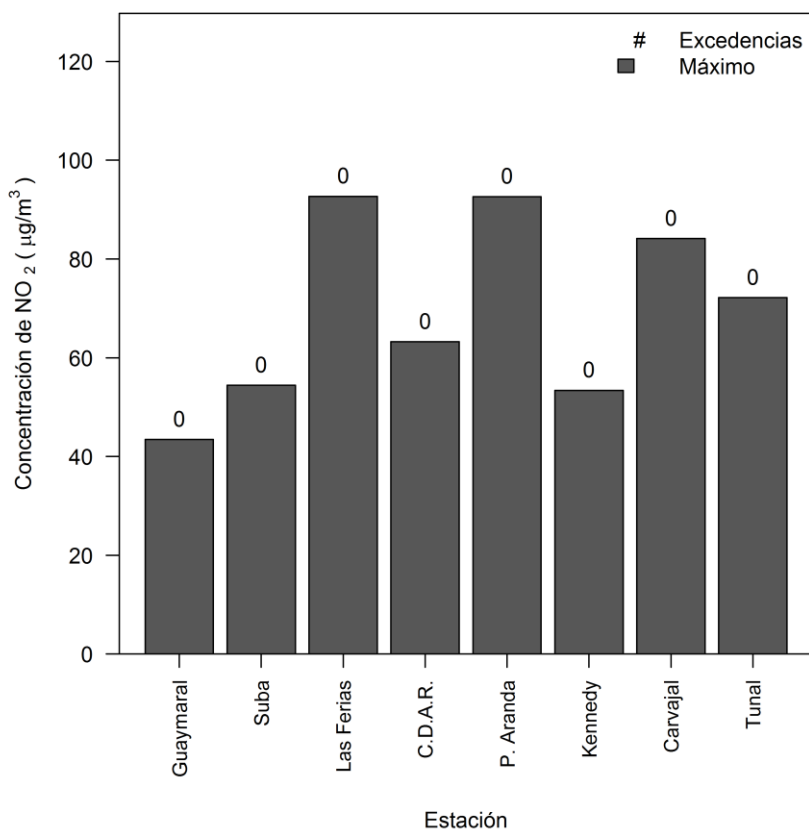


Figura 3-37. Excedencias y concentraciones máximas de NO₂ en base diaria por estación para año 2014.

Calendario de contaminación por NO₂ durante el año 2014

La Figura 3-38 y la Figura 3-39 corresponde a diagramas calendario de las concentraciones diarias de NO₂ para las estaciones Puente Aranda y Guaymaral que registraron, de acuerdo a los promedios anuales, las concentraciones más altas y más bajas del año. Entre estas dos estaciones se observa un contraste notable y en general niveles son más elevados en los meses iniciales y finales, lo cual se atribuye al comportamiento meteorológico de la ciudad. En Puente Aranda se observa, con una diferencia notable respecto a los demás días, la concentración máxima de la RMCAB 93 µg/m³ ocurrida el 19 de diciembre, la cual es seguida por 78 µg/m³ el 20 de diciembre sugirieron un único episodio de alta concentración de NO₂ en la ciudad.

P. Aranda 2014

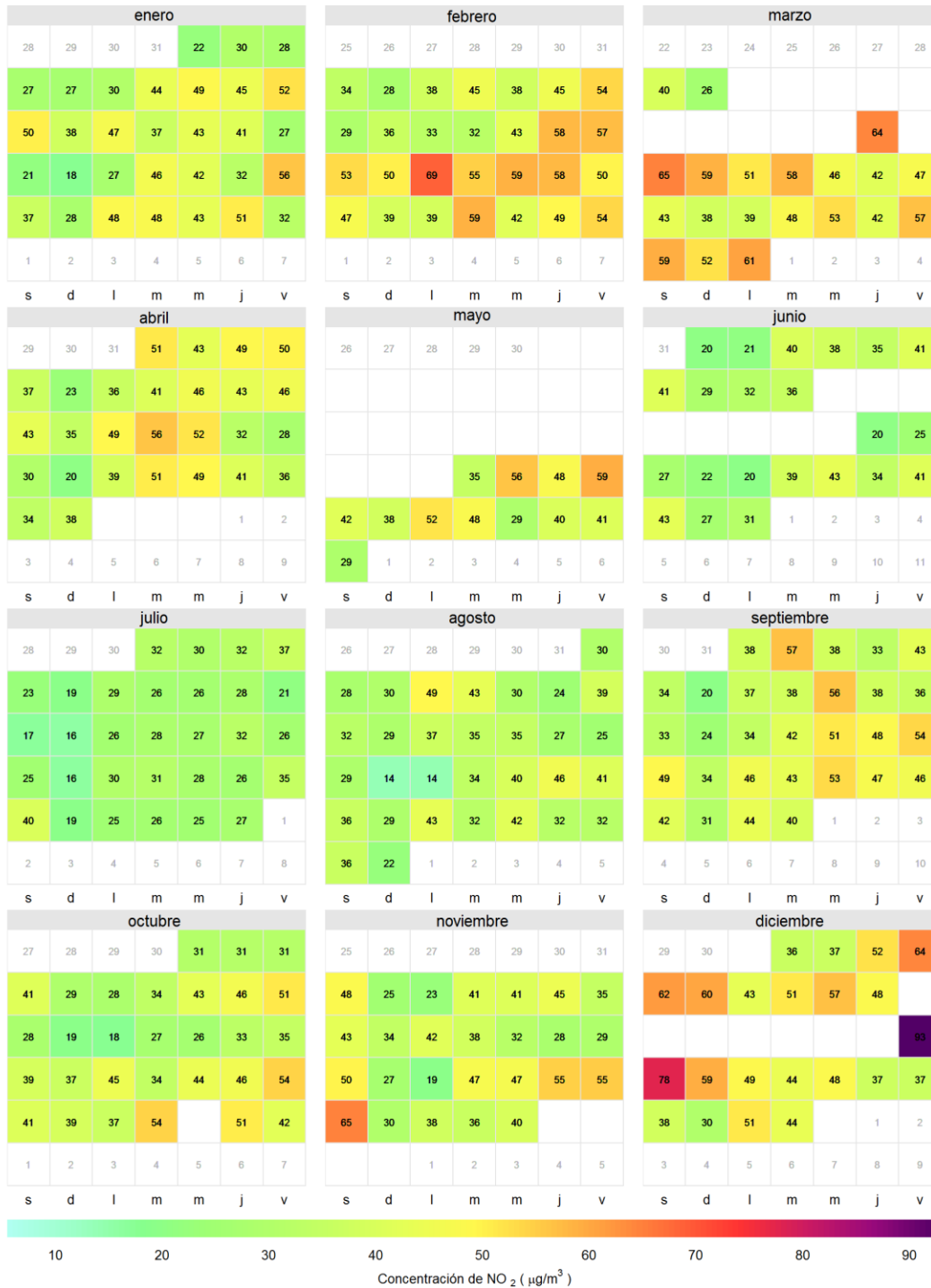


Figura 3-38. Diagrama calendario para NO₂ durante el año 2014 en la estación Puente Aranda. Los valores mostrados corresponden a la concentración. El límite normativo es 150 µg/m³.

Guaymaral 2014



Figura 3-39. Diagrama calendario para NO₂ durante el año 2014 en la estación Guaymaral. Los valores mostrados corresponden a la concentración. El límite normativo es 150 µg/m³.

Comportamiento temporal de las concentraciones diarias de NO₂

La Figura 3-40 presenta la distribución de las concentraciones diarias de NO₂ en función de las estaciones de monitoreo con cobertura temporal igual o superior a 75% y de los días de la semana. En los cuatro sitios de medición se observa que los domingos presentan concentraciones notablemente menores. La razón de esta diferencia se basa en que durante estos días se reduce la actividad en la ciudad, especialmente en relación a las fuentes móviles. Los lunes siguen a los domingos en esta tendencia, posiblemente por la influencia de la capa residual del día anterior y la presencia de días feriados. El comportamiento de las concentraciones entre los martes y los sábados no permite establecer una tendencia generalizada tanto en magnitud como en dispersión.

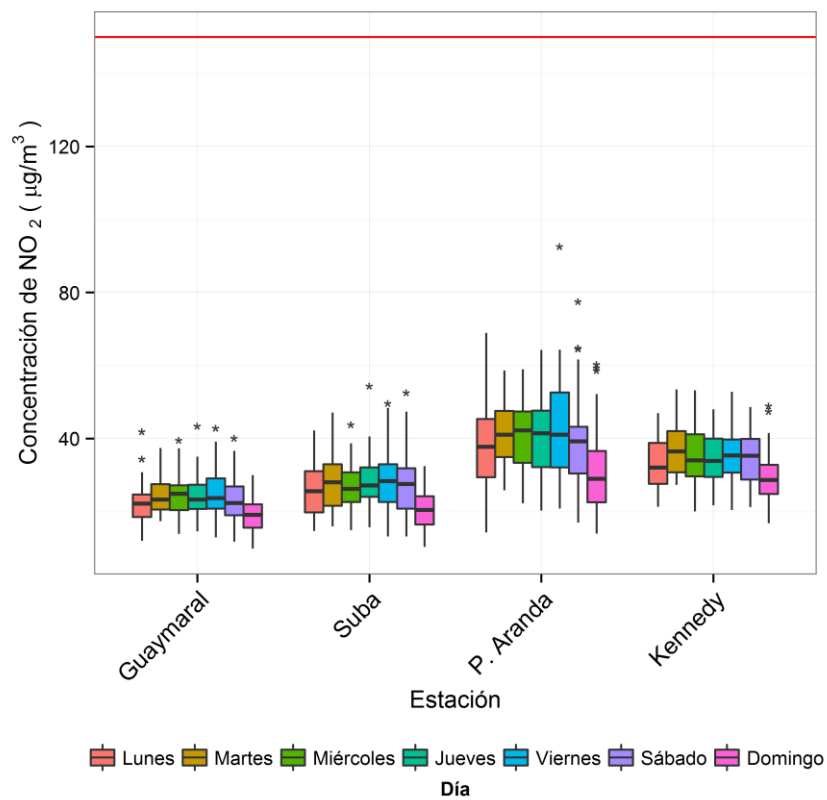


Figura 3-40. Diagramas de caja con el comportamiento de las concentraciones diarias de NO₂ en función de los días de la semana y de las estaciones de monitoreo con cobertura temporal superior a 75%. Año 2014.

La Figura 3-41 presenta el análisis de las concentraciones diarias de NO₂ en función del mes y de las estaciones de monitoreo con cobertura temporal superior a 75% del total posible a medir. Para todos los sitios se observa que los niveles se reducen en los meses de junio, julio y agosto, producto de la variabilidad anual de la velocidad de los vientos. En todas las estaciones se observa que el mes de enero igualmente presenta concentraciones bajas, lo cual se atribuye a la reducción de la actividad de la ciudad durante sus primeros días. Los meses con las concentraciones más altas son por lo general febrero (excepto Kennedy), marzo, abril y diciembre (excepto Suba en este último). En términos de

dispersión, se observa que los meses de mitad de año son los que presentan menor variabilidad, posiblemente asociado a una mayor ventilación de la ciudad.

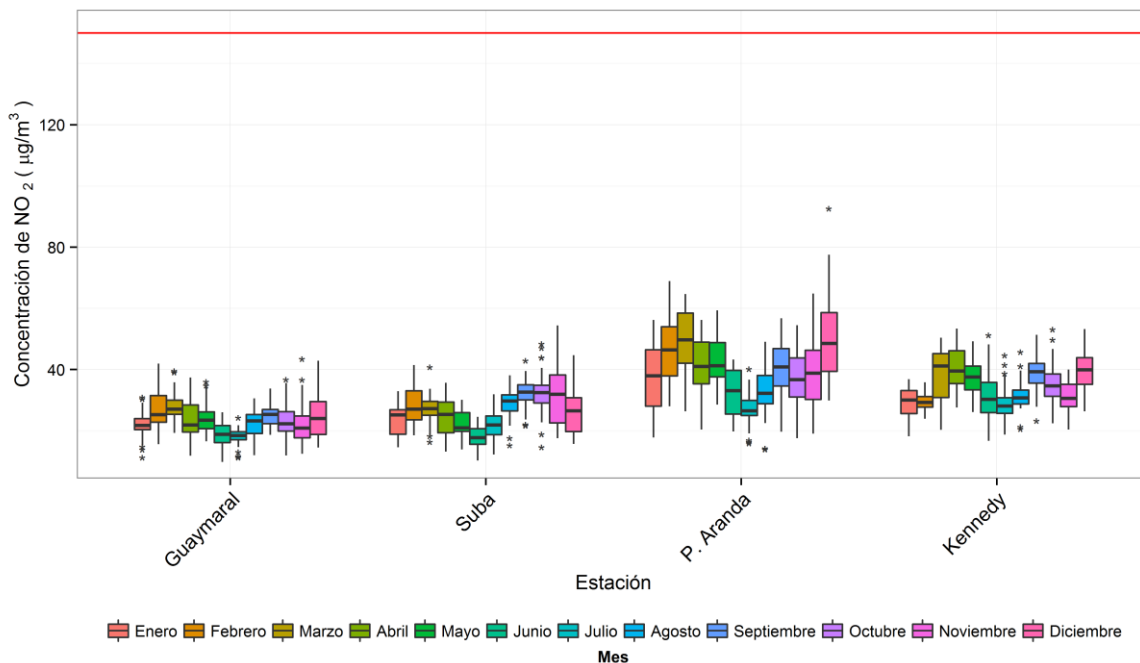


Figura 3-41. Diagramas de caja con el comportamiento de las concentraciones diarias de NO₂ en función de los meses del año 2014 y de las estaciones de monitoreo con cobertura temporal superior a 75%.

Ciclos semanales, diarios y anuales de las concentraciones de NO₂

Los ciclos semanales de la Figura 3-42 muestran que los domingos y los lunes presentaron las menores concentraciones del año. Por el contrario, en los martes y viernes se observaron niveles relativamente altos, aunque levemente superiores a los correspondientes a los miércoles y jueves. Puente Aranda presenta un ciclo más variable, lo cual es consecuencia de grado de actividad desarrollado en su zona de influencia, que corresponde a fuentes móviles e industriales.

La Figura 3-43 presenta los ciclos diarios en las estaciones de monitoreo que registraron una cobertura temporal superior a 75%. En todas las estaciones se observan dos picos de concentración correspondientes a la mañana y a la tarde. Al medio día ocurre una reducción significativa estableciendo un mínimo, el cual es producto del consumo de NO₂ y de compuestos orgánicos volátiles a favor de la producción de ozono en presencia de radiación solar. En Guaymaral, Kennedy y Puente Aranda, el pico de la mañana se presenta entre 7:00 a.m. y 9:00 a.m. y el de la estación Suba inicia una hora antes. Las elevaciones de la tarde por lo general inician a las 7:00 p.m. y terminan a las 9:00 p.m.

La Figura 3-44 presenta los ciclos anuales con base en promedios mensuales para las cuatro estaciones con cobertura temporal igual o superior a 75%. De forma similar al caso observado para el material particulado, las concentraciones son bajas en los meses de

enero, junio, julio y agosto. Como se mencionó previamente, este comportamiento está asociado a la variabilidad anual de la velocidad de los vientos.

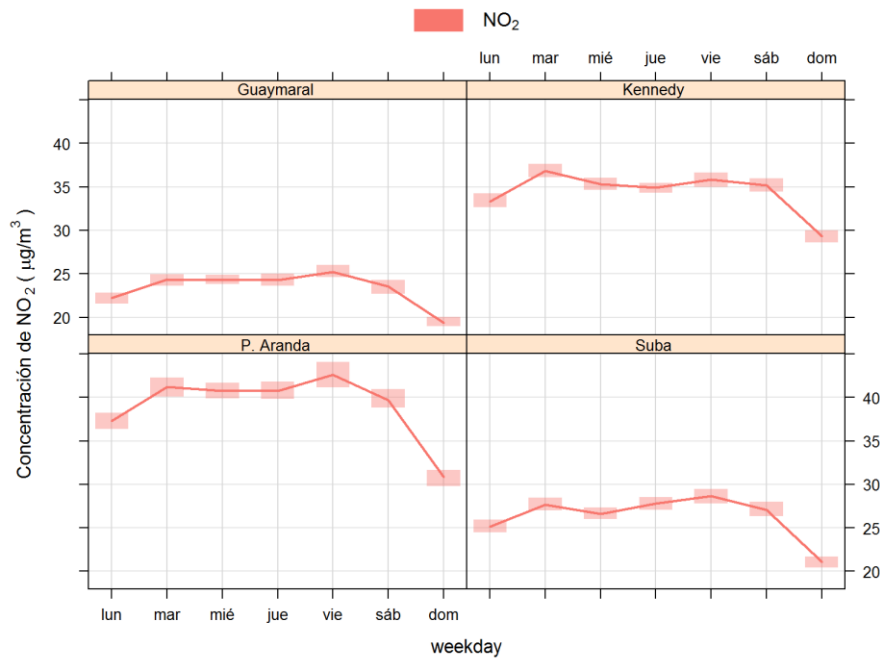


Figura 3-42. Ciclos semanales de las concentraciones de NO₂ para cada uno de los monitores con representatividad temporal igual o superior a 75% en el año 2014. Se indica además el intervalo de confianza de 95%.

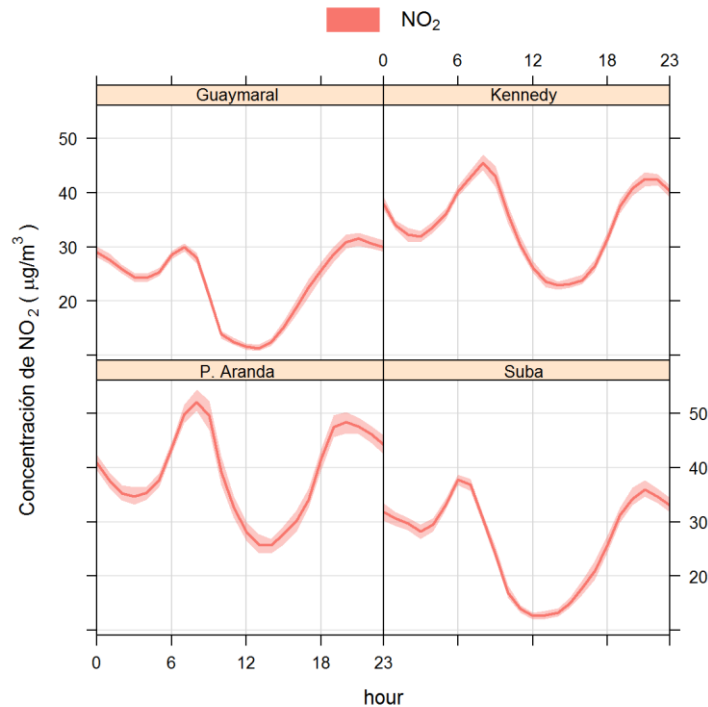


Figura 3-43. Ciclos diarios de las concentraciones de NO₂ para los monitores con cobertura temporal igual o superior a 75% en el año 2014. Se indica el intervalo de confianza de 95%.

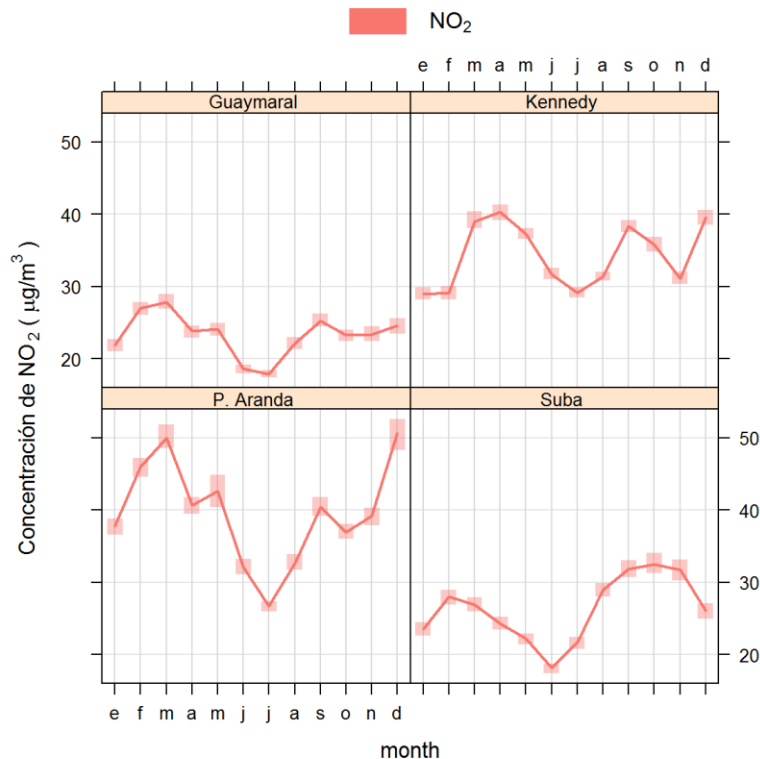


Figura 3-44. Ciclos anuales de las concentraciones de NO₂ con base en promedios mensuales. Año 2014. En cada mes se muestra el intervalo de confianza de 95%.

Comportamiento histórico de los promedios diarios de NO₂.

La Figura 3-45 presenta la distribución de las concentraciones diarias de NO₂ en función de las estaciones de monitoreo con cobertura temporal igual o superior a 75% entre los años 2010 y 2014. Históricamente se observa que Puente Aranda, Kennedy, Carvajal-Sevillana y Tunal han registrado las concentraciones más altas en la RMCAB lo cual es producto de las características de su zona de influencia en cuanto a tipos de emisión y actividad (fuentes móviles y fijas industriales). Con excepción de Kennedy y Tunal, no se tiene un registro continuo a través de los años estudiados porque, por asuntos relacionados con operación algunas estaciones, no alcanzan la cobertura temporal suficiente.

Los niveles de concentración en la estación Kennedy se han mantenido constantes entre 2011 y 2014 mientras que para Tunal se redujeron entre 2010 y 2013. Aunque hay brechas sin datos en la estación Suba, los diagramas de caja de 2010, 2012 y 2014 muestran un aumento progresivo, evidenciando un deterioro en la calidad del aire en términos de este contaminante, caso contrario a Centro de Alto Rendimiento donde se observa una reducción para los años 2010, 2012 y 2013. De la estación Guaymaral no se cuentan con registros históricos con los cuales llevar a cabo la comparación. Los diagramas de 2010 y 2013 evidencian un aumento notable en Carvajal-Sevillana mientras que entre 2013 y 2014 los niveles de Puente Aranda se mantuvieron constantes. En Las Ferias no se cuenta con

representatividad suficiente desde el 2012. Los mayores niveles de dispersión se han observado en Las Ferias y Tunal.

La Tabla 3-18 es un resumen histórico de máximos de las concentraciones diarias de NO₂ entre 2010 y 2014. El máximo valor reportado por la RMCAB en los 5 años considerados fue 93 µg/m³ en las estaciones Las Ferias y Puente Aranda el 20 de noviembre y el 19 de diciembre de 2014. Este valor corresponde al 62% del límite máximo permisible de 150 µg/m³ establecido en la Resolución 610 de 2010. Como se observa en la tabla, Las Ferias, Puente Aranda y Carvajal-Sevillana predominan en el reporte de valores atípicos altos de este contaminante. En 2010 y 2011 se reportó el mismo máximo correspondiente a 89 µg/m³ en Puente Aranda y Carvajal-Sevillana, respectivamente.

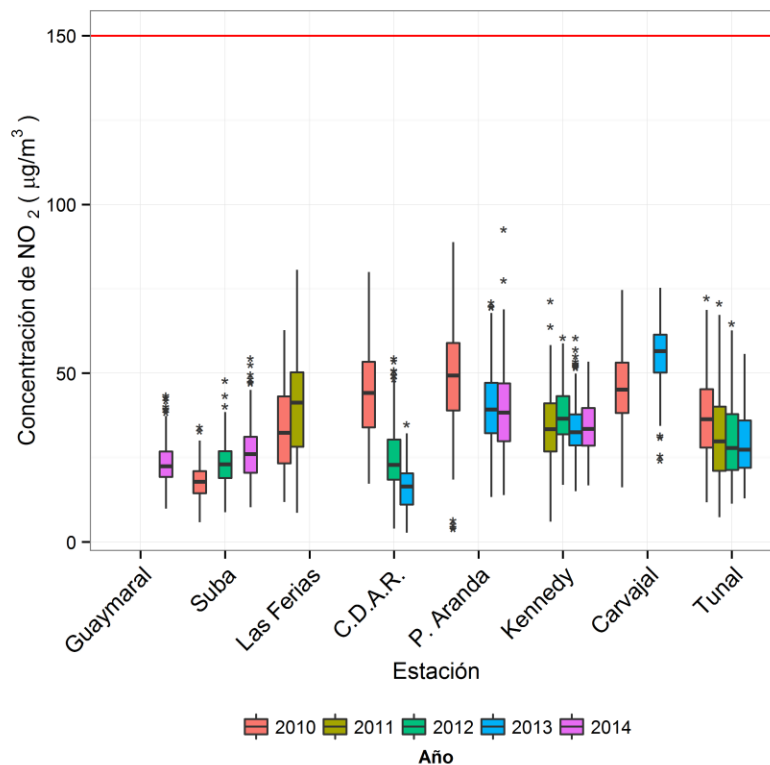


Figura 3-45. Gráfico de *boxplot* para NO₂ por estaciones en base diaria entre los años 2010 y 2014.

Tabla 3-18. Resumen histórico de máximos de las concentraciones de NO₂ en base diaria entre los años 2010 y 2014.

Año	Máximo µg/m ³	Fecha de ocurrencia del máximo	Estación
2010	89	29/09/2010	Puente Aranda
2011	89	26/02/2011	Carvajal-Sevillana
2012	77	14/04/2012 y 29/02/2012	Las Ferias y Carvajal-Sevillana
2013	84	05/02/2013	Las Ferias
2014	93	20/11/2014 y 19/12/2014	Las Ferias y Puente Aranda

3.2.3. Comportamiento de la concentración de SO₂

La RMCAB contó con 9 analizadores de dióxido de azufre (SO₂) ubicados según la configuración mostrada en la Tabla 1-1. Los datos obtenidos en cada una de las estaciones permitieron calcular las concentraciones promedio diarias, anuales y móviles de 3 horas con el fin de compararlas con los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 610 de 2010 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. El analizador de la estación Fontibón presentó una cobertura temporal reducida durante el año. Esto se debió a que la estación fue suspendida el 1 de julio de 2014 por asuntos relacionados con su suministro eléctrico.

Comportamiento de las concentraciones anuales de SO₂

La Tabla 3-19 presenta las concentraciones promedio anuales de SO₂ para 2013 y 2014 así como el respectivo cambio para los analizadores con cobertura temporal superior a 75%. Con respecto a 2013, en 2014 Suba aumentó su concentración anual en 1,1 µg/m³ mientras que Puente Aranda mostró una disminución en una magnitud de 0,3 µg/m³. Estas dos estaciones son las únicas para las cuales es posible realizar la comparación al tener representatividad superior a 75% en los dos años.

Tabla 3-19. Concentraciones promedio anuales de SO₂ con base en promedios diarios para los años 2013 y 2014 y cambio entre estos dos años.

Estación	Promedio 2013 (µg/m ³)	Promedio 2014 (µg/m ³)	Cambio de 2013 a 2014 (µg/m ³)
Suba	6,2	7,3	1,1
Las Ferias	N.R.	3,4	
Centro de Alto Rendimiento	N.R.	4,4	
Puente Aranda	4,5	4,2	-0,3
Carvajal-Sevillana	15,0	N.R.	
San Cristóbal	N.R.	1,7	

N.R.: No representativo. El número de datos disponibles para el año es inferior al 75% del máximo posible de acuerdo al Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Los promedios anuales de 2014 se observan de forma gráfica en la Figura 3-46. Suba presentó el promedio anual de SO₂ más alto de la RMCAB con un valor de 7,3 µg/m³, el cual establece un contraste con las otras cuatro estaciones que se encuentran en el rango comprendido entre 1,7 µg/m³ (San Cristóbal) y 4,4 µg/m³ (Centro de Alto Rendimiento). Como se observará en los siguientes apartes, la estación Suba presenta picos importantes de este contaminante en horas de la mañana.

El límite máximo permisible anual de SO₂ de acuerdo a la Resolución 610 de 2010 es 80 µg/m³. Este valor es notablemente superior a las concentraciones anuales registradas en la RMCAB. El valor máximo de 7,3 µg/m³ representa el 9% del límite normativo, indicando que tiene un bajo riesgo en términos de protección a la salud pública en comparación con, por ejemplo, PM₁₀ y PM_{2.5}.

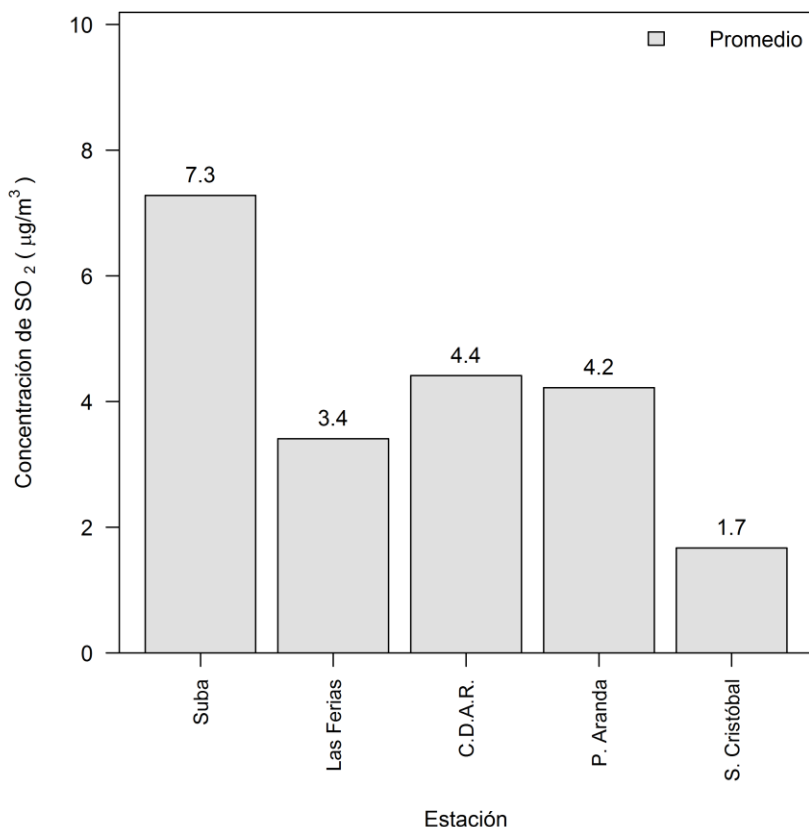


Figura 3-46. Concentración promedio anual de dióxido de azufre para las estaciones de la RMCAB con cobertura temporal igual o superior a 75% durante el año 2014.

Comportamiento de las concentraciones de SO₂. Promedios móviles de 3 horas.

Durante el periodo analizado se obtuvieron 52852 (cincuenta y dos mil ochocientos cincuenta y dos) datos de concentraciones en promedios móviles de 3 horas, que representan el 67% de cobertura temporal de los posibles datos a medir (9 analizadores) en el año 2014.

En la Tabla 3-20 se muestra un resumen de la cobertura temporal por estación en esta base temporal, así como los días y las horas de ocurrencia de los máximos. En la Figura 3-47 se visualizan las concentraciones máximas para cada una de las estaciones y el número de excedencias a la norma. La máxima concentración móvil de 3 horas reportada por la RMCAB en 2014 fue 158,1 µg/m³ el 13 de diciembre de 2014 a las 4:00 a.m. en Kennedy. Esta hora de reporte es inusual teniendo en cuenta que durante la madrugada la actividad de fuentes de emisión disminuye a nivel ciudad. La misma tendencia se observa para las estaciones Las Ferias, Carvajal-Sevillana y Centro de Alto Rendimiento. La distancia entre estas estaciones impide la asociación de una zona específica de Bogotá donde se presenta alta actividad de emisión de este contaminante. El valor máximo registrado en Kennedy es seguido por Suba y Carvajal-Sevillana con registros de 115,7 µg/m³ el 18 de diciembre de 2014 a las 10:00 a.m. y 148,6 µg/m³ el 18 de marzo de 2014 a las 00:00 a.m., respectivamente. Las tres estaciones establecen un contraste destacado en máximos ya

que en las demás estaciones se reportaron valores comprendidos en el rango de 15,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 45,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tabla 3-20. Resumen de datos de SO_2 en base de 3 horas por estación para el año 2014.

Estación	% de datos válidos	Máximo [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Fecha de ocurrencia del Máximo
Suba	92%	115,7	18/12/2014 10:00
Las Ferias	85%	35,1	31/01/2014 02:00
Centro de Alto Rendimiento	89%	32,5	10/12/2014 00:00
Fontibón	43%	45,5	16/03/2014 09:00
Puente Aranda	91%	36,5	06/02/2014 10:00
Kennedy	36%	158,1	13/12/2014 04:00
Carvajal-Sevillana	18%	148,6	18/03/2014 00:00
Tunal	58%	28,5	17/09/2014 09:00
San Cristóbal	91%	15,8	06/02/2014 11:00

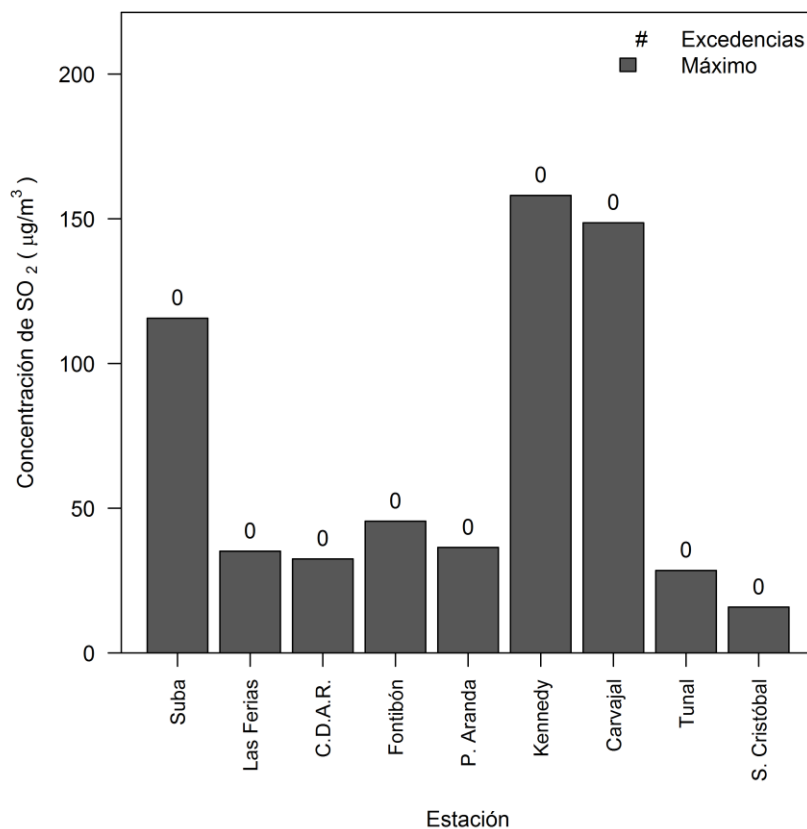


Figura 3-47. Máximos y número de excedencias de SO_2 en base de promedios móviles de 3 horas por estación durante el año 2014.

El 6 de febrero de 2014, durante la denominada jornada del “Día sin Carro”, Puente Aranda y San Cristóbal coincidieron en el reporte de máximos promedios móviles de tres horas con

valores de $36,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $15,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Este día se caracterizó por registrar concentraciones relativamente altas de dióxido de azufre en todas las estaciones, evidenciando un episodio generalizado de alta concentración a nivel ciudad.

El límite máximo permisible en la Resolución 610 de 2010 para un tiempo de exposición de 3 horas ($750 \mu\text{g}/\text{m}^3$) no fue excedido en ninguna oportunidad. Tampoco se presentaron excedencias del 50% de la norma. El máximo de $158,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ representa el 21% de este límite normativo. Por tanto, este contaminante no es susceptible de presentar excedencias de la normatividad nacional.

Comportamiento diario de la concentración de SO_2

Se analizaron 2211 (dos mil doscientos once) valores diarios cuya representatividad temporal global es 67% entre las estaciones que reportaron alguna medición en el año, lo que indica que en términos generales las mediciones de este contaminante no cumplieron con el criterio de cobertura temporal de 75% del total posible. Todos los promedios obtenidos estuvieron por debajo del nivel máximo permisible establecido en la Resolución 610 de 2010 ($250 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y, de forma similar al caso de la comparación con promedios móviles de 3 horas, ningún dato superó el valor del 50% de la norma ($125 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Entonces, de acuerdo a los límites normativos establecidos, este contaminante no es crítico en términos de afectación de la calidad del aire, en comparación con contaminantes como PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$.

La Figura 3-48 y la Tabla 3-21 presentan un resumen de concentraciones máximas de SO_2 en base diaria. Fontibón, Kennedy, Carvajal-Sevillana y Tunal presentaron coberturas temporales inferiores a 75%, especialmente Carvajal-Sevillana con 18%. La máxima concentración diaria de SO_2 reportada en la RMCAB fue $32,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 13 de diciembre de 2014 en la estación Kennedy que representa el 13% del límite normativo diario de $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Este valor es seguido por Suba con $32,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 18 de diciembre de 2014. En contraste, San Cristóbal y Tunal reportaron valores máximos de $7,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $9,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Las tendencias observadas muestran que Suba y las estaciones localizadas al suroccidente de la ciudad están sujetas a altas concentraciones de este contaminante, posiblemente por la influencia de la combustión en vehículos de carga pesada que usan diésel como combustible así como en calderas industriales.

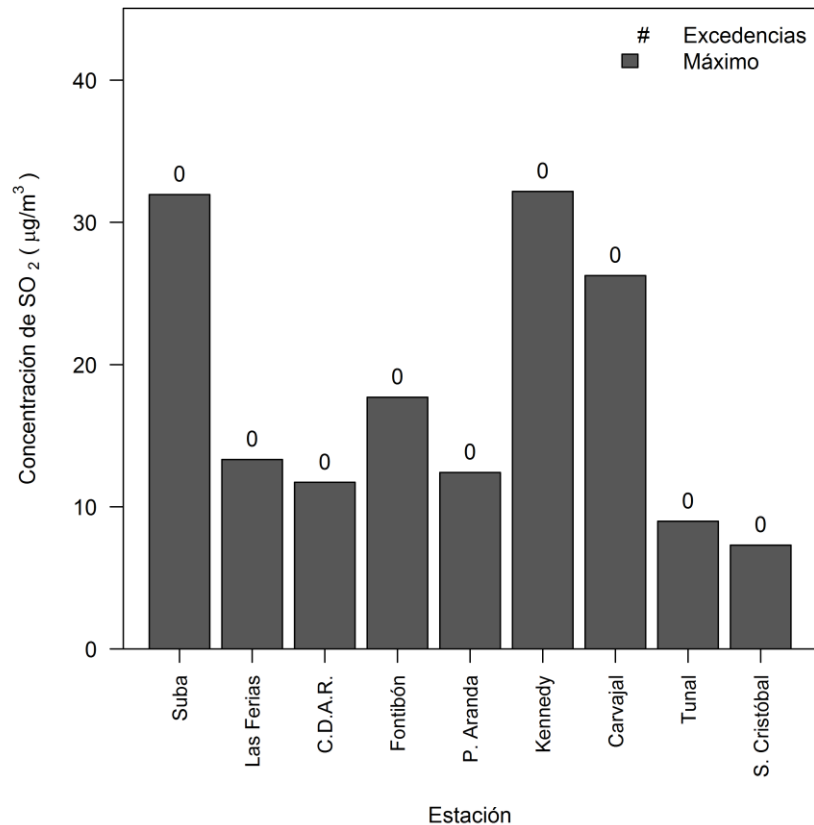


Figura 3-48. Concentraciones máximas y número de excedencias de SO₂ en base diaria por estación para el año 2014.

El 6 de febrero de 2014, durante la jornada del denominado “Día sin Carro”, tres estaciones reportaron de forma simultánea sus concentraciones máximas diarias, siendo estas Fontibón, Puente Aranda y San Cristóbal. La ubicación relativa de estas estaciones y su distancia mutua sugiere la ocurrencia de un evento singular de alta concentración en la ciudad. El 13 de diciembre de 2014 Las Ferias y Kennedy coincidieron en el reporte de sus concentraciones máximas. Este día también correspondió a un evento generalizado de alta contaminación en la ciudad teniendo en cuenta que las demás estaciones también registraron valores altos durante este día. Se observa que las concentraciones máximas se reportaron en los meses de enero, febrero, septiembre, noviembre y diciembre, pero no en meses de mitad de año.

Tabla 3-21. Resumen de datos en base diaria de SO₂ por estación para el año 2014.

Estación	% de datos válidos	Máximo [µg/m ³]	Fecha de ocurrencia del Máximo
Suba	93%	32,0	18/12/2014
Las Ferias	85%	13,3	13/12/2014
Centro de Alto Rendimiento	91%	11,7	22/11/2014
Fontibón	43%	17,7	06/02/2014
Puente Aranda	92%	12,4	06/02/2014
Kennedy	37%	32,2	13/12/2014
Carvajal-Sevillana	18%	26,3	25/01/2014
Tunal	57%	9,0	17/09/2014
San Cristóbal	90%	7,3	06/02/2014

Calendario de contaminación por SO₂ durante el año 2014

La Figura 3-49 y la Figura 3-50 corresponden a diagramas calendario que representan las concentraciones diarias de SO₂ en 2014 para la estación con la mayor concentración promedio anual (Suba) y la de menor concentración (San Cristóbal). Las diferencias en magnitudes entre estas dos estaciones son significativas evidenciando la alta heterogeneidad espacial en el comportamiento de este contaminante en la ciudad. Para ambas estaciones, se observa que los valores diarios fueron relativamente altos durante la jornada del Día Sin Carro ocurrida el 6 de febrero. A manera de tendencia particular, el mes de diciembre en Suba presentó días con concentraciones notablemente altas.

Suba 2014

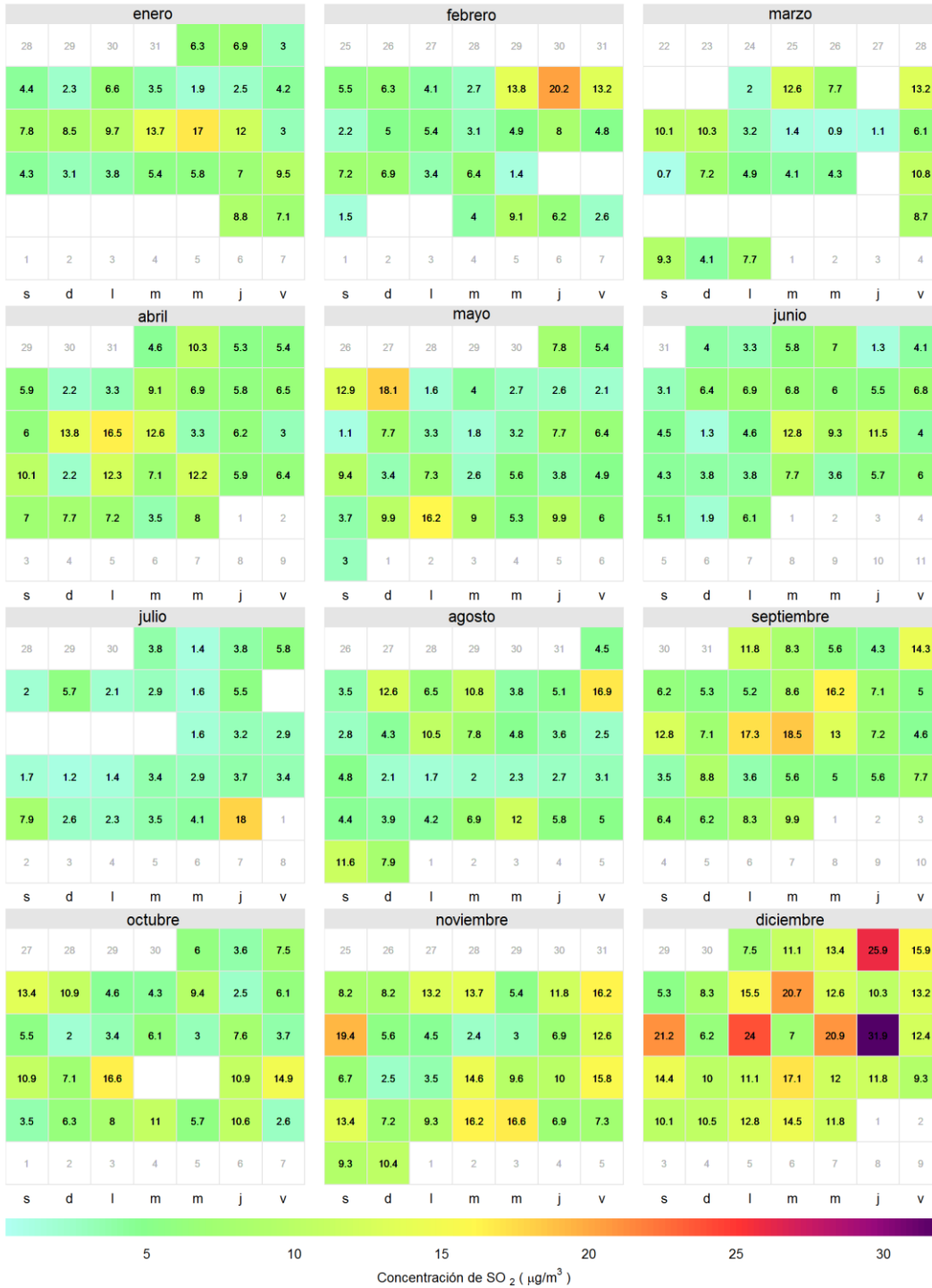


Figura 3-49. Diagrama calendario para SO₂ durante el año 2014 en la estación Suba. Los valores mostrados corresponden a la concentración. Debe tenerse en cuenta que el límite normativo es 250 µg/m³.

S. Cristóbal 2014



Figura 3-50. Diagrama calendario para SO₂ durante el año 2014 en la estación San Cristóbal. Los valores mostrados corresponden a la concentración. El límite máximo permisible es 250 µg/m³.

Comportamiento temporal de las concentraciones de SO₂

La Figura 3-51 describe el comportamiento de las concentraciones diarias de SO₂ en función de los días de la semana por estación de monitoreo. En comparación con las demás estaciones, Suba mantiene notablemente los mayores niveles de dispersión y concentración en todos los días, posiblemente por actividades asociadas a emisiones de vehículos de carga pesada en su zona de influencia. El caso contrario sucede en la estación San Cristóbal, donde sus bajos valores impiden establecer una diferenciación clara en el comportamiento semanal.

De forma similar al comportamiento observado para PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂ y CO, los días con los menores niveles de concentración son los lunes y los domingos. El periodo comprendido entre martes y viernes tiene concentraciones mayores lo cual está asociado al aumento de la actividad en la ciudad durante dichos días. El valor máximo de 32,0 µg/m³ fue observado un jueves.

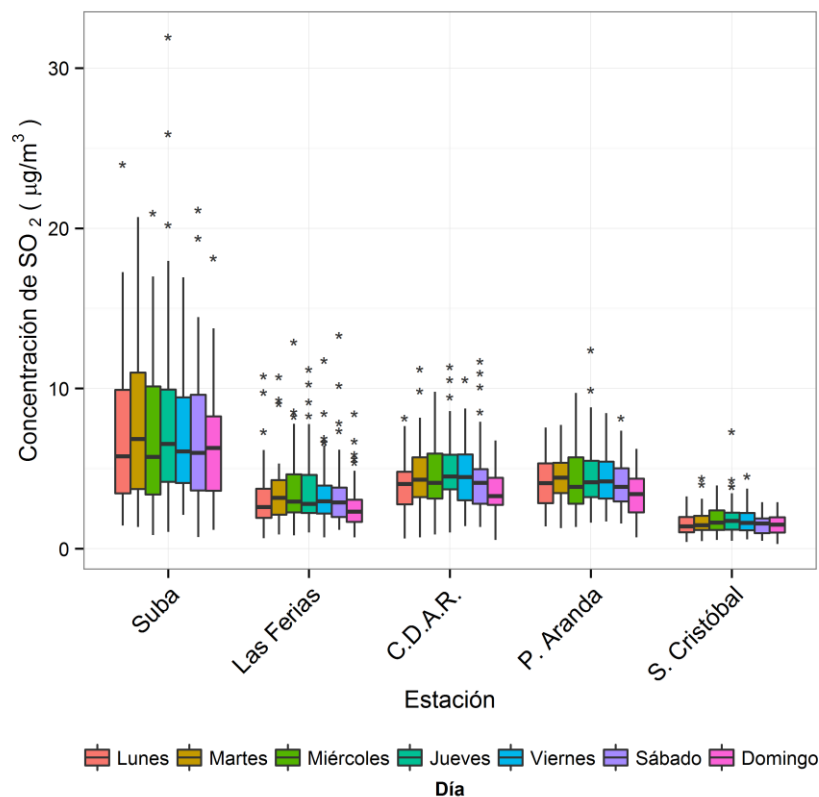


Figura 3-51. Comportamiento de las concentraciones diarias de SO₂ en función de los días de la semana por estación de monitoreo para el año 2014.

La Figura 3-52 presenta el comportamiento de las concentraciones en función de los meses del año 2014 por estación de monitoreo. En Suba y Las Ferias se observa claramente que los meses de mitad de año presentaron los menores valores de concentración, lo cual está influenciado por la variación de la velocidad de los vientos. Las tendencias de Centro de Alto Rendimiento y Puente Aranda son menos claras porque en la primera se observa que

marzo registró los niveles más bajos de concentración mientras que en la segunda junio fue uno de los meses con los valores más altos. Como se mencionó previamente, las tendencias en la estación San Cristóbal impiden establecer con claridad variaciones presentadas durante el año 2014.

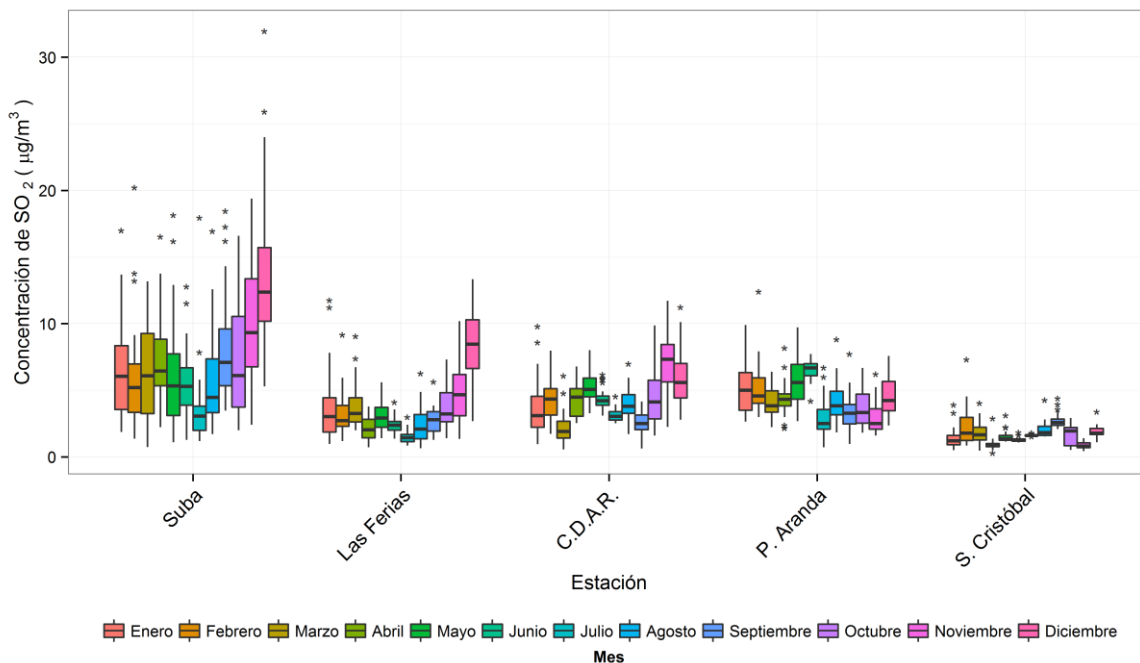


Figura 3-52. Comportamiento de las concentraciones diarias de SO₂ en función de los meses de 2014 por estación de monitoreo.

Ciclos semanales, diarios y anuales de las concentraciones de SO₂

La Figura 3-53 presenta los ciclos semanales de las concentraciones de SO₂ para las estaciones de monitoreo que tienen una cobertura temporal superior a 75% en el año 2014. Conforme a las observaciones dadas en el aparte anterior, los menores niveles de concentración se observan los lunes y los domingos. Los días comprendidos entre martes y viernes mantienen niveles similares. Suba establece una diferencia considerable con respecto a las demás estaciones al mantener concentraciones e intervalos de confianza en niveles relativamente más altos. El ciclo semanal de la estación San Cristóbal evidencia que los días jueves mantienen altas concentraciones.

Los perfiles diarios de la Figura 3-54 muestran que en general las concentraciones más altas se presentan entre las 8:00 a.m. y las 10:00 a.m. lo que sugiere que las fuentes móviles tienen una influencia considerable en la presencia de niveles altos de este contaminante. En Suba, la magnitud de las concentraciones así como el intervalo de confianza son relativamente elevados en horas de la media noche y de la madrugada posiblemente por actividades relacionadas con el transporte o emisiones de fuentes fijas en la zona de influencia de esta estación.

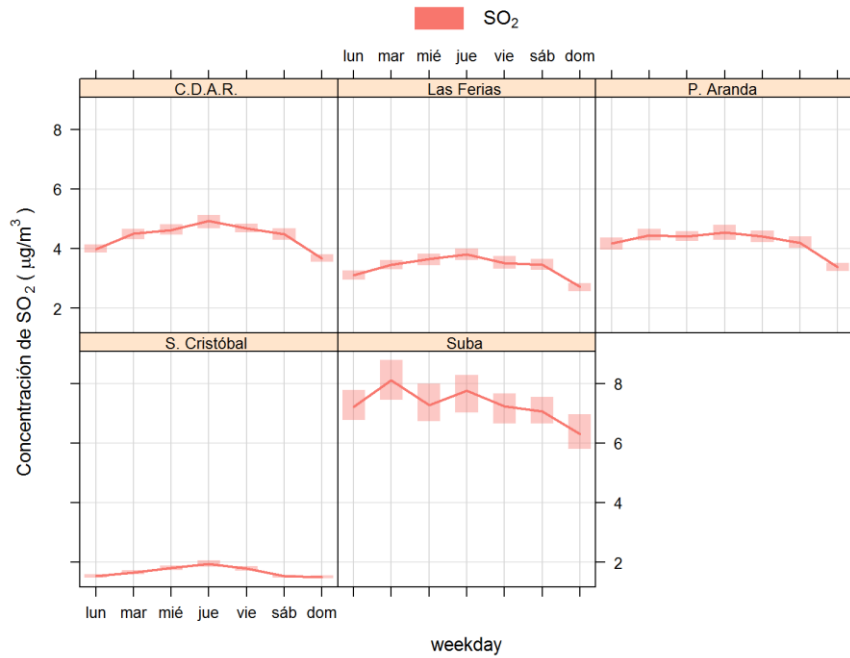


Figura 3-53. Ciclos semanales de las concentraciones de SO_2 para las estaciones de monitoreo con cobertura temporal superior a 75% en el año 2014. Se indica el intervalo de confianza de 95%.

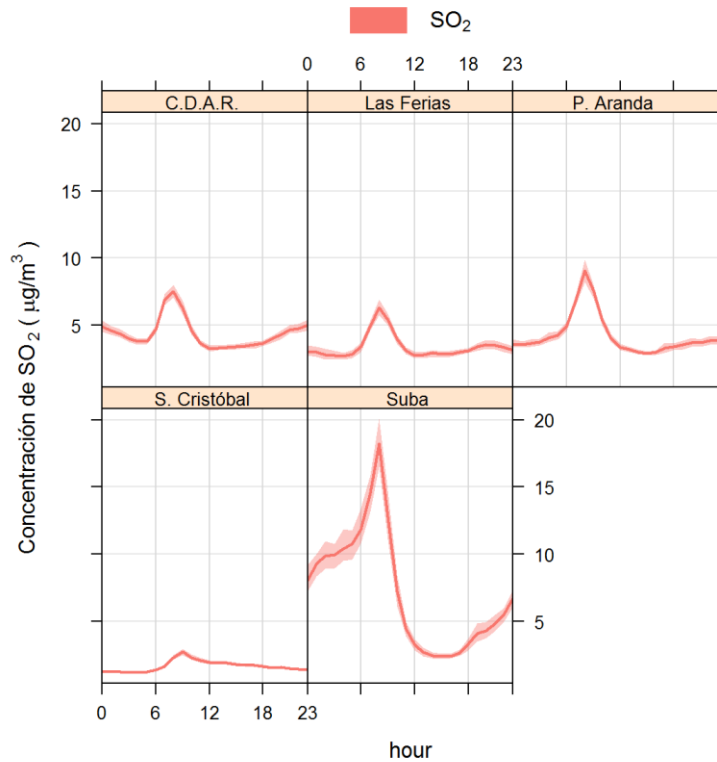


Figura 3-54. Ciclos diarios de las concentraciones de SO_2 para las estaciones de monitoreo con cobertura temporal superior a 75% en el año 2014. Se indica el intervalo de confianza de 95%.

La Figura 3-55 presenta los ciclos anuales de los analizadores que presentaron una cobertura temporal mayor a 75% durante el año 2014, con base en promedios mensuales. Para Centro de Alto Rendimiento, Las Ferias y Suba se observa que las concentraciones aumentaron notablemente a partir del mes de agosto. La explicación de las causas de este aumento es un tema de investigación en curso. En Puente Aranda, la mayor concentración fue observada en el mes de julio mientras que en San Cristóbal, la uniformidad del ciclo anual impide identificar con claridad la diferenciación en el comportamiento entre los meses.

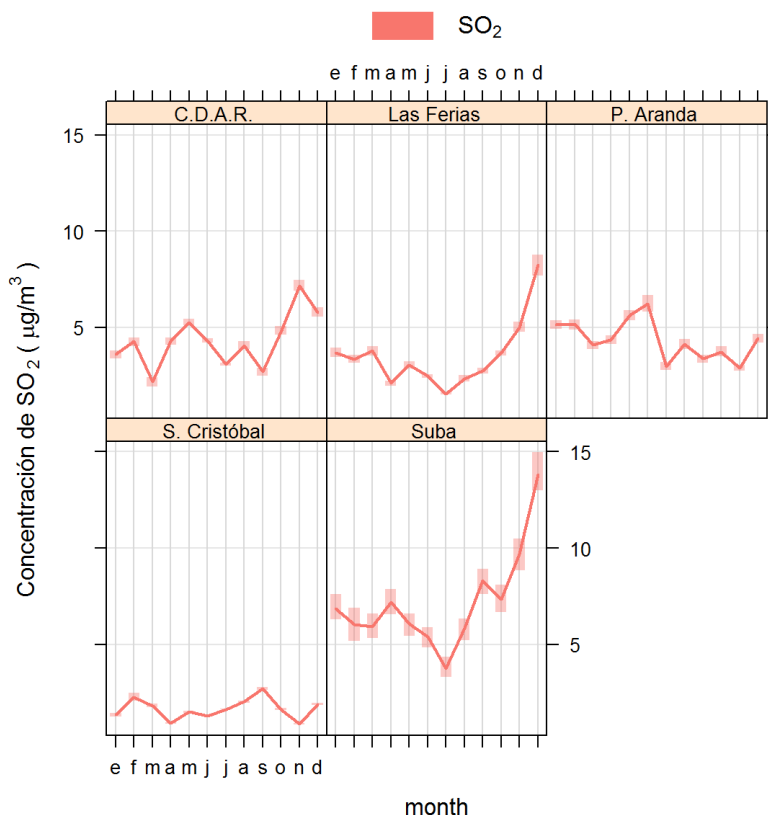


Figura 3-55. Ciclos anuales de las concentraciones de SO₂ con base en promedios mensuales. Año 2014. En cada mes se muestra el intervalo de confianza de 95%.

Comportamiento histórico de los promedios diarios de SO₂

La Figura 3-56 presenta la distribución de las concentraciones diarias de SO₂ entre los años 2010 y 2014 en función de las estaciones de monitoreo. Históricamente y con una diferencia apreciable, los niveles más altos se mantienen en la estación Carvajal-Sevillana a pesar de observarse una reducción progresiva general de las concentraciones entre 2011 y 2013. Los niveles son incluso superiores a los presentados en Suba, estación que ha venido incrementando sus concentraciones. Esto se debe a que las actividades relacionadas con combustión en los alrededores de la estación son mayores teniendo en cuenta la presencia de actividad industrial.

Puente Aranda es la única estación que cuenta con cobertura temporal superior a 75% entre 2010 y 2014, periodo durante el cual se ha observado una tendencia de disminución

constante. Aunque Las Ferias y Centro de Alto Rendimiento tienen años en los cuales no hay suficiente cobertura temporal, sí se observan reducciones en 2011, 2012 y 2014 para la primera y 2010, 2012 y 2014 para la segunda.

En comparación con el año 2013, en 2014 se observó una reducción en Puente Aranda y un aumento en Suba. Esta estación ha estado incrementando sus niveles de dióxido de azufre entre 2012 y 2014. San Cristóbal solamente registra cobertura temporal suficiente para 2014 y, por tanto, no es posible establecer una comparación en términos históricos. En general, todas las tendencias observadas dan evidencia de la alta heterogeneidad de Bogotá en relación a sus fuentes de emisión y correspondientes niveles de inmisión.

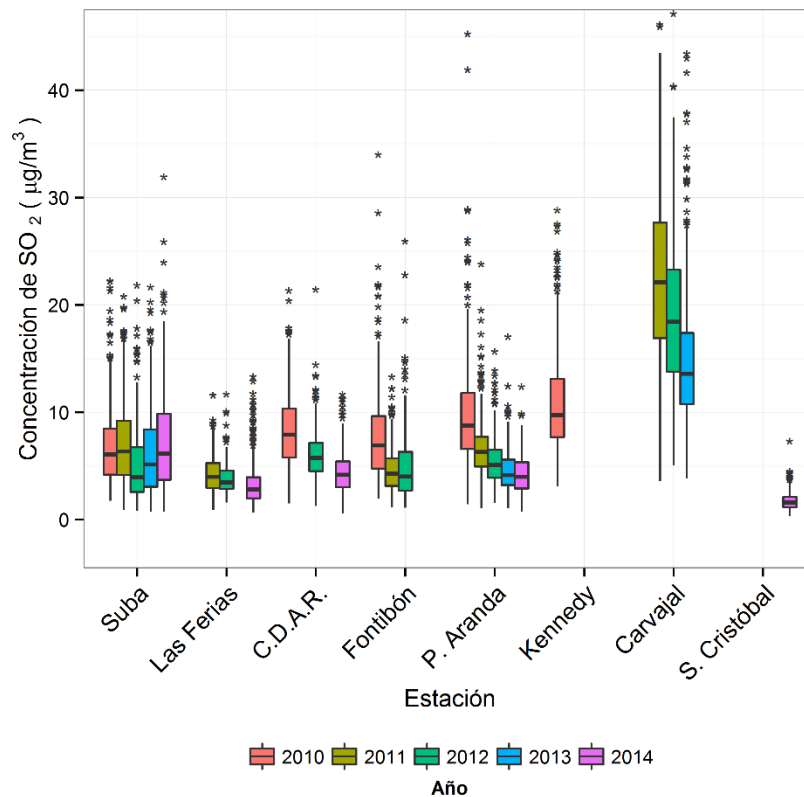


Figura 3-56. Gráfico de *boxplot* para SO₂ en base diaria por estación de monitoreo entre los años 2010 y 2014.

La Tabla 3-22 es el resumen de los máximos históricos entre los años 2010 y 2014. El máximo valor registrado en estos años fue 98,0 µg/m³ el 25 de febrero de 2010 en la estación Carvajal-Sevillana. Entre 2010 y 2013 esta estación se destacó por ser la única en presentar valores máximos. Esta tendencia fue interrumpida en 2014 al ser Kennedy la estación que reportó el máximo de la RMCAB. Se destaca que la magnitud de 2014 es notablemente menor en comparación con años anteriores. Ningún valor máximo histórico supera el 50% del límite normativo establecido, lo cual en consecuencia indica que el SO₂ representa un riesgo menor en términos de protección a la salud pública, en comparación con otros contaminantes considerados como criterio.

Tabla 3-22. Resumen estadístico histórico de los máximos diarios de SO₂ entre los años 2010 y 2014.

Año	Máximo µg/m³	Fecha de ocurrencia del máximo	Estación
2010	57,1	12/02/2010	Carvajal-Sevillana
2011	98,0	25/02/2011	Carvajal-Sevillana
2012	47,1	05/06/2012	Carvajal-Sevillana
2013	51,1	13/06/2013	Carvajal-Sevillana
2014	32,2	13/12/2014	Kennedy

3.2.4. Comportamiento de la concentración de CO

En el año 2014 se contó con promedios horarios y móviles de 8 horas de monóxido de carbono (CO) para 9 estaciones, como se indica en la Tabla 1-1. La Resolución 610 de 2010 establece un límite normativo de 40 mg/m³ para un tiempo de exposición de 1 hora y de 10 mg/m³ para 8 horas.

Comportamiento de las concentraciones horarias de CO

Se obtuvieron 44851 (cuarenta y cuatro mil ochocientos cincuenta y uno) datos de promedios horarios de CO en las estaciones de la RMCAB para el año 2014. El porcentaje de captura de datos para este contaminante fue de 57% con respecto al máximo posible de información a obtener en las estaciones que registraron mediciones en el periodo.

Tabla 3-23. Resumen de datos horarios de CO por estación para el año 2014. Los promedios anuales son indicativos y no deben ser contrastados con los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 610 de 2010.

Estación	% de datos válidos	Promedio (mg/m ³)	Máximo (mg/m ³)	Fecha de ocurrencia del Máximo
Usaquén	32%	N.R.	3,1	24/10/2014 23:00
Las Ferias	79%	0,7	4,1	24/10/2014 23:00
Centro de Alto Rendimiento	24%	N.R.	6,9	28/10/2014 22:00
Fontibón	40%	N.R.	2,8	13/05/2014 07:00
Puente Aranda	99%	0,9	10,4	20/02/2014 11:00
Kennedy	25%	N.R.	5,1	23/12/2014 07:00
Carvajal-Sevillana	80%	1,5	7,7	28/03/2014 06:00
Tunal	93%	0,8	7,8	22/04/2014 20:00
San Cristóbal	40%	N.R.	4,5	10/09/2014 09:00

N.R.: No representativo. Los datos del periodo tienen una cobertura temporal inferior al 75% del número total posible en la estación.

En la Tabla 3-23 se presenta, por estación, el porcentaje de datos válidos, el promedio anual, el valor máximo horario y el día y hora en que ocurrieron y en la Figura 3-57 se encuentran los máximos y excedencias en forma gráfica. Las Ferias, Puente Aranda Carvajal-Sevillana y Tunal presentaron una representatividad temporal superior a 75% y son las únicas para las que se reportan promedios anuales. Carvajal-Sevillana estableció una diferencia notable con las otras tres estaciones ya que su promedio de 1,5 mg/m³ es significativamente mayor a los demás al encontrarse en el rango comprendido entre 0,7 mg/m³ y 0,9 mg/m³. En la zona de influencia de esta estación se observa una alta actividad de fuentes de combustión las cuales son las principales responsables de la emisión de monóxido de carbono. Es importante destacar que los promedios anuales de la Tabla 3-23 son indicativos para la comparación mutua de las estaciones pero no contrastables con la normatividad nacional ya que esta no regula tiempos de exposición de un año para este contaminante.

La máxima concentración horaria reportada en las estaciones de la RMCAB fue 10,4 mg/m³ en Puente Aranda el 20 de febrero de 2014 a las 11:00 a.m. Este valor es seguido en magnitud por los máximos reportados en Tunal y Carvajal-Sevillana con 7,8 mg/m³ y 7,7 mg/m³ el 22 de abril a las 8:00 p.m. y el 28 de marzo a las 6:00 a.m. El 24 de octubre de 2014 a las 11:00 p.m., Usaquén y Las Ferias presentaron coincidencias en sus concentraciones máximas con valores de 3,1 mg/m³ y 4,1 mg/m³, respectivamente, sugiriendo un posible episodio singular de alta concentración al norte de la ciudad.

El límite máximo permisible de CO en un tiempo de exposición horario es 40 mg/m³. La concentración máxima de 10,4 mg/m³ representa el 26% de este valor. Por tanto, no se presentaron incumplimientos normativos y además, todos los datos horarios se registraron por debajo del 50% del límite (20 mg/m³).

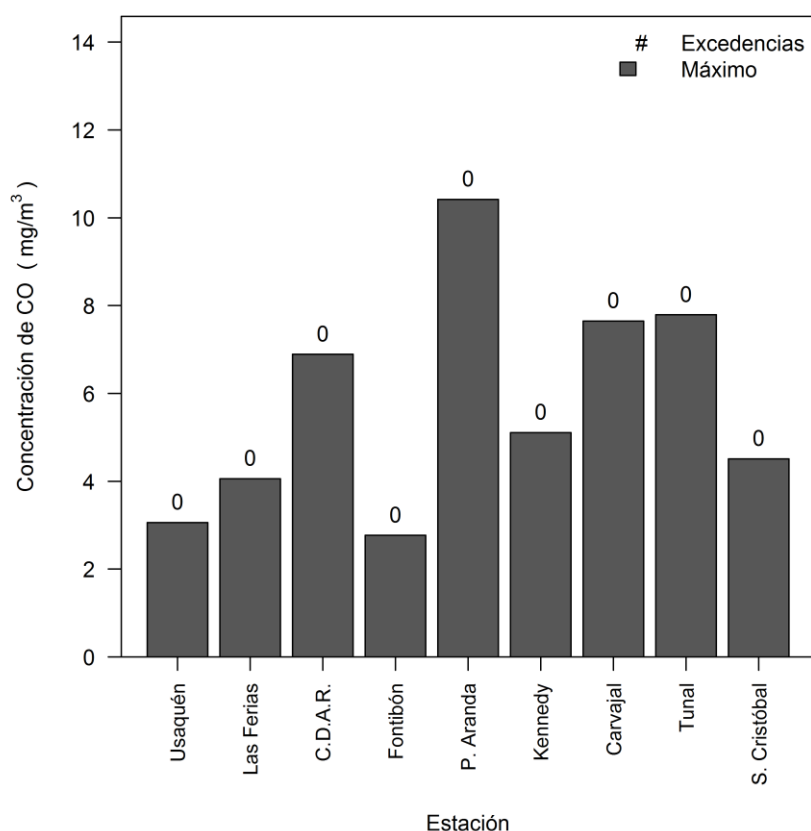


Figura 3-57. Concentraciones máximas y excedencias de CO en base horaria para el año 2014.

Comportamiento de los promedios móviles de 8 horas para CO

En el año 2014 se calcularon 44560 (cuarenta y cuatro mil quinientos sesenta) promedios móviles de 8 horas de CO, equivalentes al 57% de los datos posibles en el año entre las estaciones que reportaron mediciones. Conforme a las observaciones proporcionadas para el análisis de concentraciones horarias, la cobertura temporal global fue inferior a 75%. Usaquén, Centro de Alto Rendimiento, Fontibón, Kennedy y San Cristóbal contribuyeron a este resultado con representatividades menores a 75%.

La Tabla 3-24 presenta un resumen por estación del porcentaje de datos válidos, máximos con sus respectivas fechas de ocurrencia y excedencias del 50% de la norma para el año 2014. La Figura 3-58 muestra los valores máximos y el número de excedencias de la normatividad en forma gráfica. El máximo promedio móvil de 8 horas de CO reportado en la RMCAB fue 5,4 mg/m³ en la estación Carvajal-Sevillana el 10 de octubre de 2014 a las 6:00 a.m. Esta valor es seguido por las estaciones Centro de Alto Rendimiento y Puente Aranda con valores de 4,7 mg/m³ el 29 de octubre a las 2:00 a.m. y 4,1 mg/m³ el 7 de marzo a las 12:00 m. Teniendo en cuenta que el límite máximo permisible de acuerdo a la Resolución 610 de 2010 es 10 mg/m³, el valor máximo de 5,4 mg/m³ representa el 54% de este valor de referencia. Como consecuencia, se presentaron 3 excedencias del 50% del límite normativo (5 mg/m³) en la estación Carvajal-Sevillana.

En términos de promedios móviles de 8 horas, el 25 de octubre las estaciones Usaquén y Las Ferias coincidieron en el reporte de sus concentraciones máximas a las 12:00 a.m. y las 2:00 a.m. Este episodio corresponde al descrito en el apartado anterior que ocurrió el 24 de octubre. El corrimiento de un día se explica teniendo en cuenta que los máximos corresponden a las 8 horas previas, las cuales cubren la noche del día anterior. La mayoría de concentraciones máximas se reportaron en los primeros y últimos meses del año.

Tabla 3-24. Resumen de datos de CO por estación en el año 2014. Base de 8 horas.

Estación	% de datos válidos	Máximo (mg/m ³)	Fecha de ocurrencia del Máximo	Excedencias del 50% del límite normativo ¹²
Usaquén	32%	2,2	25/10/2014 00:00	0
Las Ferias	79%	3,1	25/10/2014 02:00	0
Centro de Alto Rendimiento	23%	4,7	29/10/2014 02:00	0
Fontibón	40%	1,6	22/04/2014 23:00	0
Puente Aranda	100%	4,1	07/03/2014 12:00	0
Kennedy	25%	2,7	25/01/2014 10:00	0
Carvajal-Sevillana	79%	5,4	10/10/2014 06:00	3
Tunal	92%	4,0	03/04/2014 22:00	0
San Cristóbal	39%	2,8	02/09/2014 13:00	0

¹² Mayor a 5 mg/m³ y menor a 10 mg/m³.

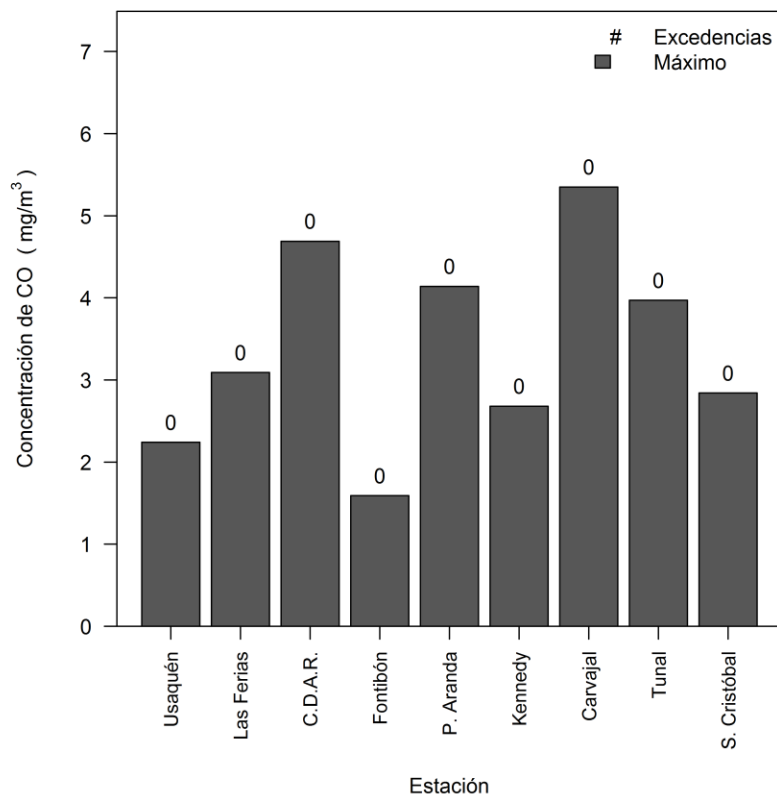


Figura 3-58. Concentraciones máximas y número de excedencias en base de 8 horas para CO por estación durante el año 2014.

Comportamiento temporal de las concentraciones de CO

La Figura 3-59 presenta el comportamiento de las concentraciones de CO (promedios móviles de 8 horas) en función de la estación y de los días de la semana. En Puente Aranda, Carvajal-Sevillana y Tunal se observa que las menores concentraciones se presentan los lunes y los domingos, lo cual se atribuye, en el caso de los domingos, a la reducción de actividades en comparación a los demás días y, en el caso de los lunes, a la presencia de festivos y a la influencia del día anterior. En Las Ferias, los domingos son los días con las menores concentraciones pero el diagrama de caja del lunes es similar en magnitudes y dispersión a los correspondientes a los días martes a sábado. Carvajal-Sevillana y Tunal presentaron mayores niveles de dispersión, lo cual está asociado al nivel de actividad desarrollado en sus zonas de influencia. En Las Ferias se observa la menor cantidad de valores atípicos. Los domingos en Puente Aranda y Carvajal-Sevillana tienen menores variabilidades, lo cual está asociado a la dinámica de la ciudad de Bogotá.

El comportamiento de las estaciones en función de los meses de 2014 se muestra en la Figura 3-60. Las menores concentraciones fueron observadas en los meses de junio, julio y agosto, consecuencia de la variabilidad en la velocidad de los vientos. En Puente Aranda y Carvajal-Sevillana se observaron bajas concentraciones en enero. Al ser estaciones cercanas a fuentes de emisión asociadas con la combustión, la reducción de actividades durante los primeros días de este mes es más evidente.

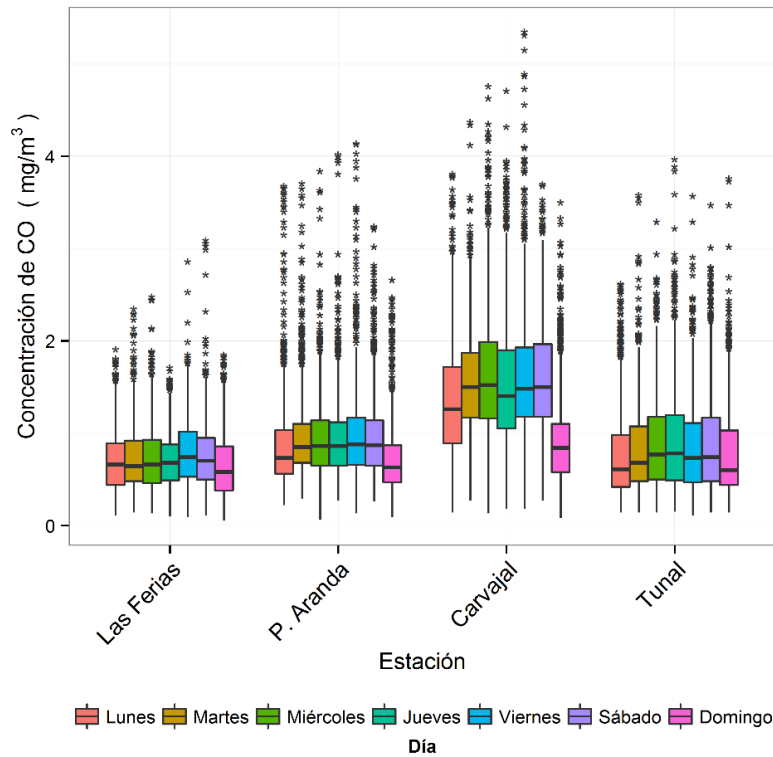


Figura 3-59. Comportamiento de las concentraciones de CO en base de 8 horas (móvil) en función de los días de la semana por estación de monitoreo para el año 2014.

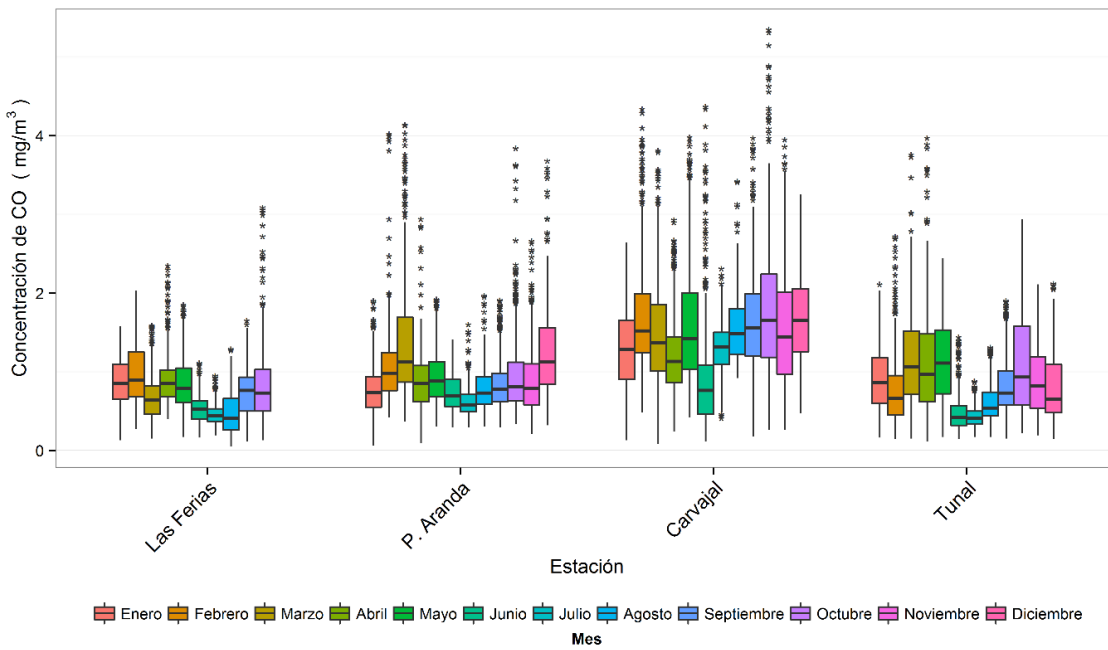


Figura 3-60. Comportamiento de las concentraciones de CO en base de 8 horas (móvil) en función de los meses por estación de monitoreo para el año 2014.

Ciclos semanales, diarios y anuales de las concentraciones de CO

La Figura 3-61 presenta los ciclos semanales de las concentraciones de monóxido de carbono en los monitores con cobertura temporal igual o superior a 75%. El ciclo más heterogéneo y las concentraciones más altas se observan en la estación Carvajal-Sevillana estableciendo una diferencia significativa con respecto a los correspondientes de las demás estaciones. Esto se observa especialmente en los días domingo que muestran un descenso significativo y evidencian la alta influencia de sus alrededores inmediatos. En general, estos días mostraron los menores niveles en todas las estaciones así como los lunes, excepto en Las Ferias donde no hay una diferencia consistente. En los viernes se observa de forma generalizada altos niveles de este contaminante.

La Figura 3-62 presenta el comportamiento en función de las horas del día. En general se observa un pico de concentración en la mañana, lo cual está acorde con el comportamiento del flujo vehicular de la ciudad que tiende a ser mayor entre 6:00 a.m. y 9:00 a.m. En horas de la noche, después de las 6:00 p.m., se presenta un nuevo aumento de concentración que coincide con la denominada “hora pico” de la tarde. En Las Ferias y Tunal, este pico presenta magnitudes similares al correspondiente al de la mañana. En cambio, es menor en Carvajal-Sevillana y Puente Aranda.

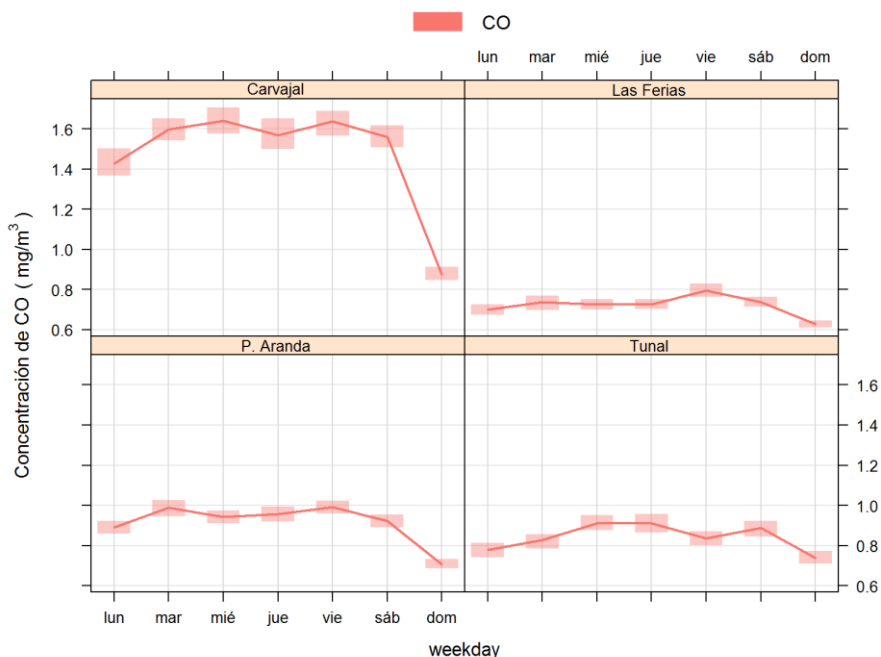


Figura 3-61. Ciclos semanales de las concentraciones de CO por estación de monitoreo con cobertura temporal igual o superior a 75% para el año 2014. Se indica el intervalo de confianza de 95%.

Los ciclos mensuales de la Figura 3-63 muestran que los meses de enero, junio y julio presentan las menores concentraciones, lo cual corresponde en el primer mes a la reducción del nivel de actividad en la ciudad durante sus primeros días y en los demás al aumento de la velocidad del viento a mitad de año, la cual favorece la ventilación de la ciudad. En Carvajal-Sevillana, Las Ferias y Puente Aranda, el mes de febrero mostró las mayores concentraciones del año, mientras que para Las Ferias fue marzo.

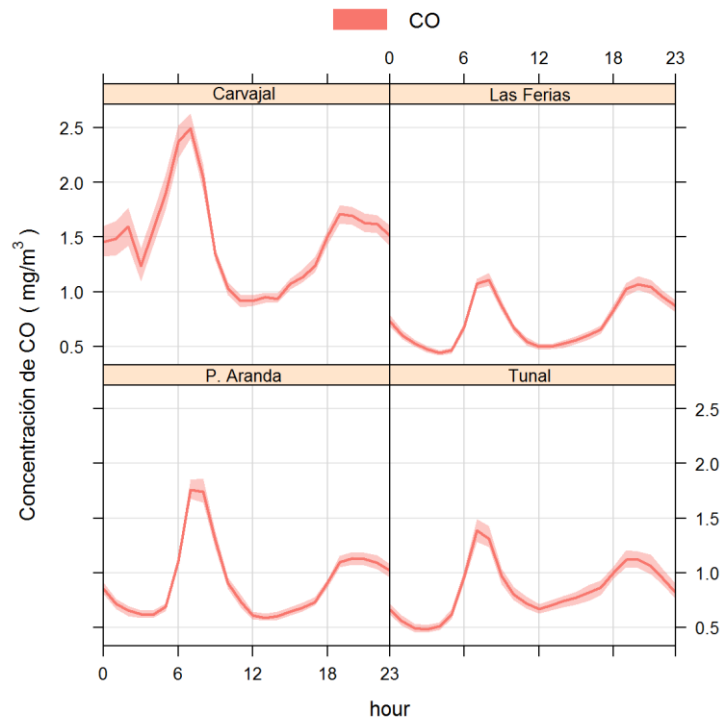


Figura 3-62. Ciclos diarios de las concentraciones de CO para el año 2014 para los monitores con cobertura temporal igual o superior a 75%. Se indica el intervalo de confianza de 95%.

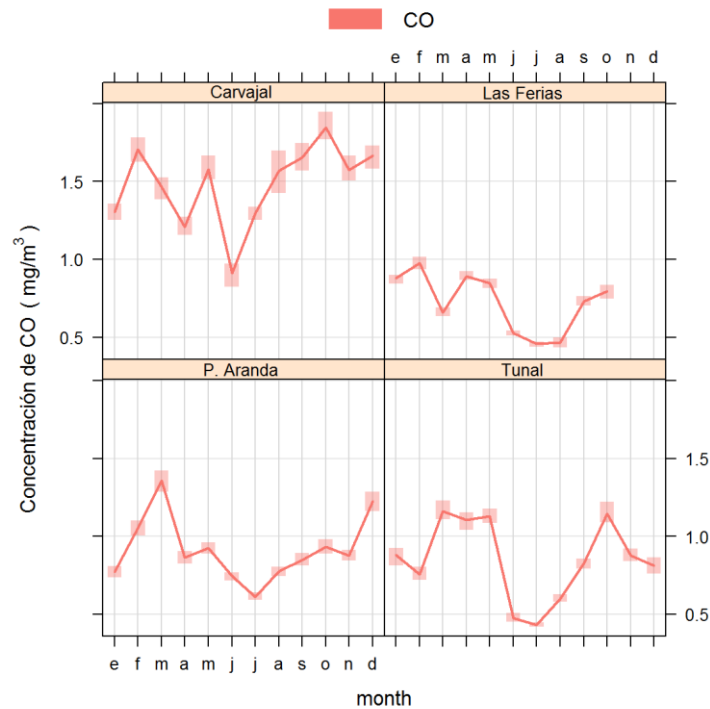


Figura 3-63. Ciclos anuales de monóxido de carbono con base en promedios mensuales en las estaciones de monitoreo con una cobertura temporal igual o superior a 75%. Año 2014. Se presenta el intervalo de confianza de 95% en cada promedio mensual.

Comportamiento histórico de las concentraciones de monóxido de carbono.

En la Figura 3-64 se encuentra la tendencia histórica de las estaciones de la RMCAB que midieron CO entre los años 2010 y 2014 y que cumplen con el criterio de representatividad temporal de 75%. La estación Las Ferias ha reducido sus niveles de concentración progresivamente en los años estudiados. En Kennedy también se observa reducción hasta 2013 mientras que Puente Aranda presentó un leve incremento entre 2010 y 2011 y luego una reducción hasta 2014. En Carvajal-Sevillana la reducción fue progresiva hasta 2013 y se estabilizó en 2014; este sitio de monitoreo ha presentado los mayores niveles de concentración de la RMCAB. Para las demás estaciones no se cuenta con información histórica suficiente que permita establecer una tendencia definida. Se observa que ninguna concentración móvil de 8 horas ha excedido el límite máximo permisible de 10 mg/m³ en los 5 años analizados.

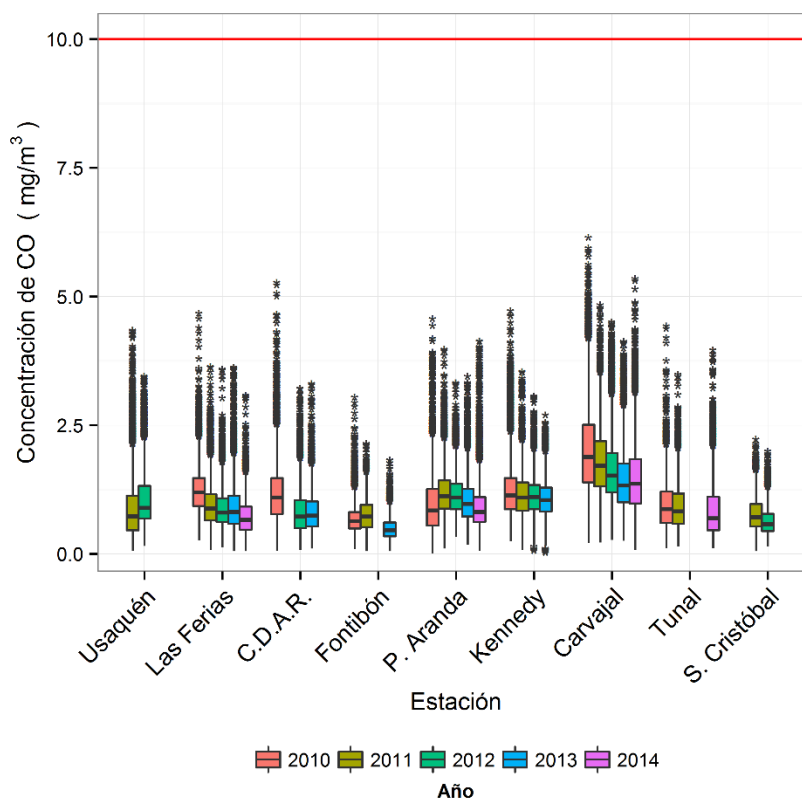


Figura 3-64. Gráfico de *boxplot* para CO en base de 8 horas (promedios móviles) por estación de monitoreo entre los años 2010 y 2014.

El resumen de máximos históricos en términos de promedios móviles de 8 horas entre 2010 y 2014 se presenta en la Tabla 3-25. La máxima concentración de monóxido de carbono observada en estos 5 años fue 6,2 mg/m³ en la estación Carvajal-Sevillana el 7 de mayo de 2010 a las 7:00 a.m., lo que implica que abarcó las horas de la madrugada, lo cual corresponde a lo observado en los ciclos diarios de la Figura 3-62. Para los años 2012, 2013 y 2014 esta estación igualmente presentó los valores máximos de la RMCAB en horas

cercanas (5:00 a.m. y 6:00 a.m.) lo cual se debe a que se encuentra influenciada por actividades de tráfico pesado (Autopista Sur) e industrias. La excepción correspondió a Centro de Alto Rendimiento el 5 de marzo de 2011 a las 2:00 a.m., con una concentración de 5,2 mg/m³. Las horas que abarca este promedio móvil son inusuales teniendo en cuenta la tendencia diaria de este contaminante.

Teniendo en cuenta que el límite normativo en base de 8 horas es 10 mg/m³, se puede afirmar que el monóxido de carbono no es un contaminante crítico en términos de protección de la salud pública a diferencia del PM₁₀, PM_{2.5} y O₃.

Tabla 3-25. Resumen histórico de las concentraciones máximas de CO en promedios de 8 horas entre los años 2010 y 2014.

Año	Máximo mg/m ³	Fecha de ocurrencia del máximo	Estación
2010	6,2	07/05/2010 07:00	Carvajal-Sevillana
2011	5,2	05/03/2011 02:00	Centro de Alto Rendimiento
2012	4,5	11/05/2012 05:00	Carvajal-Sevillana
2013	4,1	24/12/2013 06:00	Carvajal-Sevillana
2014	5,4	10/10/2014 06:00	Carvajal-Sevillana

3.3. Índices de calidad del aire

Esta sección presenta el Índice de Calidad del Aire (ICA) para seis contaminantes criterio (PM_{10} , $PM_{2.5}$, O_3 , NO_2 , CO y SO_2). El ICA corresponde a un valor adimensional que oscila entre 0 y 500 y que representa qué tan limpio o contaminado está el aire ambiente y los potenciales efectos perjudiciales en la salud pública.

La metodología de cálculo se basa en la definida en el *Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire: Manual de Operación de Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire* del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010), la cual, a su vez, está basada en los lineamientos dados por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos EPA, donde se establecen puntos de corte para cada contaminante de acuerdo al tiempo de exposición y al grado de afectación que tendría sobre la salud, asignándole un rango y una clasificación; (bueno, moderado, dañino a la salud para grupos sensibles, dañino a la salud, muy dañino a la salud y peligroso), tal y como lo muestra la Tabla 3-26.

Tabla 3-26. Puntos de corte del ICA según la EPA. Fuente: Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

ICA	COLOR	CLASIFICACIÓN	O_3 8h ppm	O_3 1h Ppm (1)	PM_{10} 24h $\mu g/m^3$	$PM_{2.5}$ 24h $\mu g/m^3$	CO 8h ppm	SO_2 24h ppm	NO_2 1h ppm
0 - 50	Verde	Buena	0,000 0,059	-	0 54	0,0 15,4	0,0 4,4	0,000 0,034	(2)
51-100	Amarillo	Moderada	0,060 0,075	-	55 154	15,5 40,4	4,5 9,4	0,035 0,144	(2)
101 - 150	Naranja	Dañina a la salud para grupos sensibles	0,076 0,095	0,125 0,164	155 254	40,5 65,4	9,5 12,4	0,145 0,224	(2)
151 - 200	Rojo	Dañina a la salud	0,096 0,115	0,165 0,204	255 354	65,5 150,4	12,5 15,4	0,225 0,304	(2)
201 - 300	Púrpura	Muy Dañina a la salud	0,116 0,374 (0,155 0,404) (4)	0,205 0,404	355 424	150,5 250,4	15,5 30,4	0,305 0,604	0,65 1,24
301-400	Marrón	Peligrosa	(3)	0,405 0,504	425 504	250,5 350,4	30,5 40,4	0,605 0,804	1,25 1,64
401-500	Marrón	Peligrosa	(3)	0,505 0,604	505 604	350,5 500,4	40,5 50,4	0,805 1,004	1,65 2,04

(1) Para O_3 se calculará el índice usando promedios de 8 horas y de 1 hora.

(2) Para NO_2 se tendrán en cuenta valores únicamente por encima de 200 teniendo en cuenta que han sido tomados de valores y parámetros EPA.

(3) Valores de concentraciones de 8 horas de ozono no definen valores más altos de ICA (301). Los valores de ICA de 301 o mayores serán calculados con concentraciones de 1 hora.

(4) Los números entre paréntesis se asocian a valores de 1 hora que se utilizarán en esta categoría sólo si se superponen.

La importancia de este índice radica en ofrecer información sobre la calidad del aire a la población que sea fácil de entender y que exponga las posibles complicaciones en la salud que pueden llegar a presentarse cuando los contaminantes alcanzan niveles no saludables.

3.3.1. Índice de calidad del aire para PM₁₀.

Los estudios sugieren que la exposición a corto plazo a PM₁₀ puede estar vinculada a muertes prematuras y al incremento de enfermedades respiratorias y cardiovasculares. La Figura 3-65 muestra el comportamiento del Índice de Calidad del Aire para los promedios móviles de 24 horas de PM₁₀ en función de las estaciones de monitoreo con cobertura temporal superior a 75%. Las diferencias en la proporción del ICA entre los sitios de monitoreo muestra la alta variabilidad en las características de sus zonas de influencia. La categoría “Moderada” predomina en las estaciones Puente Aranda, Kennedy y Carvajal-Sevillana, localizadas al occidente y suroccidente de Bogotá. La zona que representan estas estaciones está sujeta a una actividad alta de emisiones de fuentes fijas industriales y móviles, especialmente carga pesada. La categoría “Moderada” en PM₁₀ implica un riesgo a la salud, especialmente para personas con enfermedades respiratorias. En las demás estaciones se observa la predominancia de la categoría “Buena”, especialmente en Usaquén, Las Ferias, Centro de Alto Rendimiento y San Cristóbal. Sin embargo, existen horas con categoría “Moderada”.

Se observa una participación leve de la categoría “Dañina a la salud para grupos sensibles” que corresponde al 26 y 27 de junio cuando ocurrió un episodio generalizado de contaminación transfronteriza de material particulado, evidenciándose especialmente en Centro de Alto Rendimiento, Puente Aranda, Kennedy, Carvajal-Sevillana, Tunal y San Cristóbal; al 6 y 7 de noviembre cuando ocurrió el incendio de un depósito de llantas en la localidad de Fontibón en el cual se observaron altas concentraciones en Puente Aranda y al 19 de diciembre de 2014 en Carvajal-Sevillana. La categoría “Dañina a la salud para grupos sensibles” representa efectos adversos en la salud para personas con afecciones cardíacas o respiratorias, adultos mayores y niños.

La Figura 3-66 muestra la discriminación del ICA de PM₁₀ en función de los meses de 2014. La participación de la categoría “Buena” es relativamente mayor en enero y en los meses de mitad de año, lo cual en el primer mes del año se debe a la reducción del nivel de actividad de la ciudad durante sus primeros días y en el caso de junio y julio al aumento de la velocidad de los vientos que favorecen la ventilación de la ciudad y la consecuente reducción de las concentraciones de los contaminantes. La calidad del aire se deteriora entre agosto y diciembre, consecuencia del comportamiento meteorológico de la ciudad. De forma concordante al análisis de la proporción del ICA por estaciones de monitoreo, se observa que los meses de junio y noviembre presentan una participación de la categoría “Dañina a la salud para grupos sensibles”. Como se mencionó previamente, ocurrió adicionalmente un evento con esta categoría en el mes de diciembre pero no se evidencia en la figura al tener una duración de una hora.

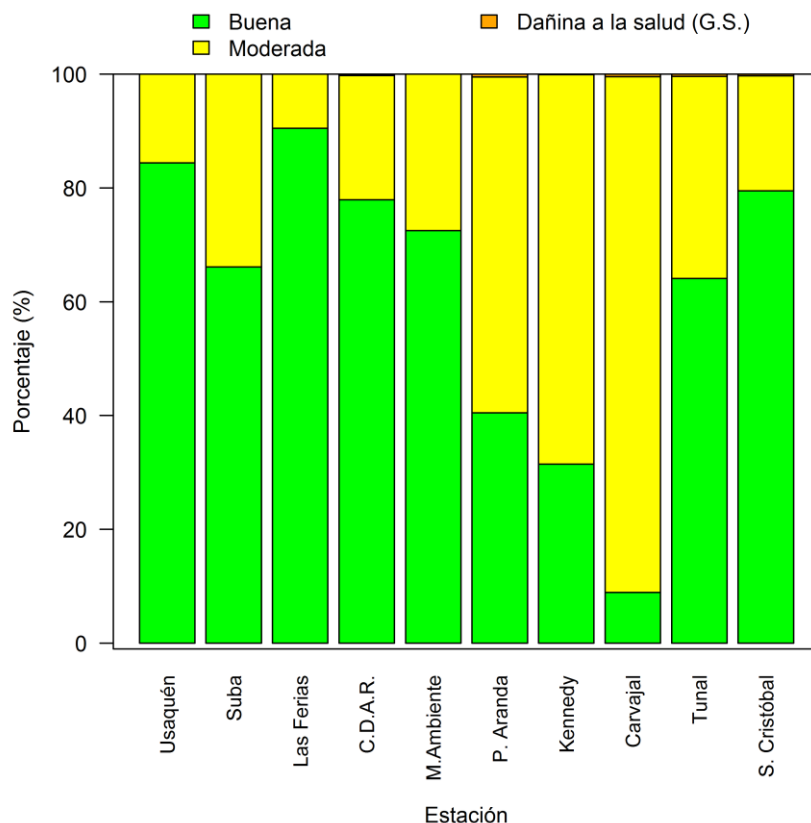


Figura 3-65. Proporción relativa de las categorías del Índice de Calidad del Aire (ICA) por estación para el año 2014.

La Figura 3-67 discrimina el Índice de Calidad del Aire por día de la semana. De martes a sábado ocurre la mayor afectación mientras que los lunes y domingos presentaron una mejor calidad del aire en términos de este contaminante. Este es un resultado esperado y concordante con el análisis realizado para las concentraciones de PM_{10} . Aunque el lunes no es catalogado como día perteneciente a un fin de semana, es posible que la influencia de los días feriados y de la capa residual del día anterior influyan en su mejor calidad del aire.

La Figura 3-68 clasifica las estaciones de acuerdo al valor promedio del Índice de Calidad del Aire para PM_{10} durante el año 2014. La categoría “Buena” se define cuando el ICA se encuentra entre 0 y 50 unidades. Se observa que, en promedio, todas las estaciones se enmarcaron en esta categoría con excepción de Puente Aranda, Kennedy y Carvajal-Sevillana que representaron una predominancia de la categoría “Moderada”. El mayor valor de ICA correspondió a 68 en la estación de Carvajal-Sevillana mientras que el menor fue observado en Las Ferias con 29 el cual es seguido por Usaquén con 34.

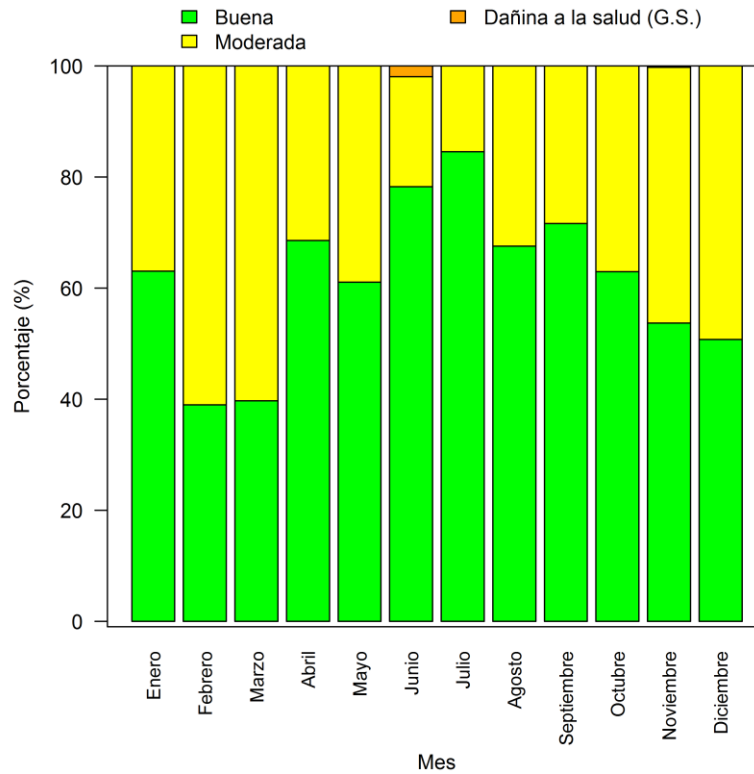


Figura 3-66. Proporción relativa del Índice de Calidad del Aire (ICA) para los meses de 2014.

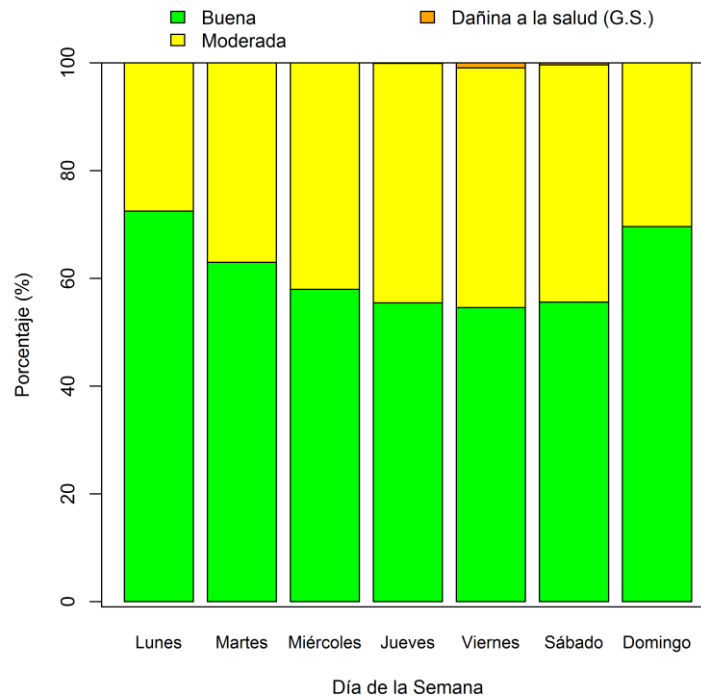


Figura 3-67. Proporción relativa del Índice de Calidad del Aire (ICA) por día de la semana para durante el año 2014.

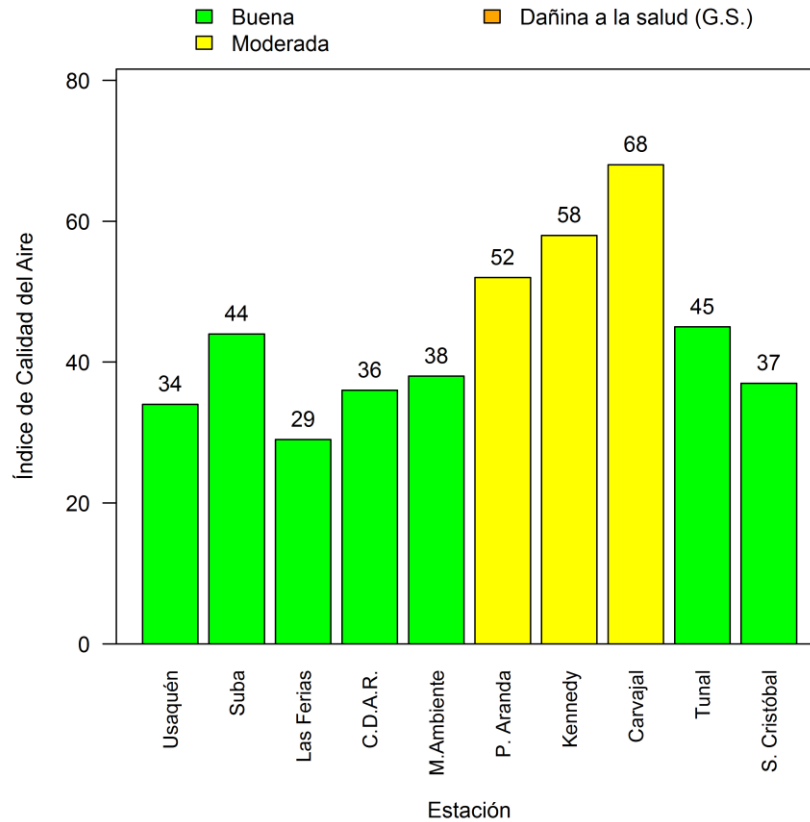


Figura 3-68. Índice de Calidad del Aire promedio de PM_{10} para las estaciones de la RMCAB durante el año 2014.

3.3.2. Índice de calidad del aire para PM_{2.5}

Debido a su tamaño, las partículas finas de diámetro inferior a 2.5 µm (PM_{2.5}) pueden alojarse profundamente en los pulmones causando altos riesgos para la salud, especialmente en lo concerniente a las enfermedades respiratorias. La Figura 3-69 muestra la proporción del Índice de Calidad del Aire para este contaminante por estación con base en promedios móviles de 24 horas. En todas las estaciones analizadas se observa la participación de las categorías “Buena”, “Moderada” y “Dañina a la salud para grupos sensibles” en diferentes proporciones. Usaquén y Ministerio de Ambiente mostraron la mayor participación de la categoría “Buena”, mientras que la calidad del aire “Moderada” presentó una proporción mayor en Suba, Centro de Alto Rendimiento, Kennedy y Carvajal-Sevillana, especialmente en las dos últimas.

La categoría “Dañina a la salud para grupos sensibles” mostró una participación relativamente baja en Usaquén y se observó en los días 31 de marzo y 27 y 28 de junio. Kennedy y Carvajal-Sevillana, en cambio, mostraron las mayores proporciones. La categoría “Dañina a la salud” está asociada a la agravación de enfermedades cardíacas o respiratorias y una mortalidad prematura en personas con enfermedades cardiovasculares, adultos mayores y personas de bajos niveles socioeconómicos y los efectos respiratorios se incrementan en la población en general. Esta categoría fue identificada el 31 de marzo y el 1 de abril en Kennedy, el 8 de diciembre en Kennedy y Tunal y el 27 y 28 de junio en Carvajal-Sevillana. En las dos últimas fechas ocurrió un episodio generalizado de contaminación transfronteriza.

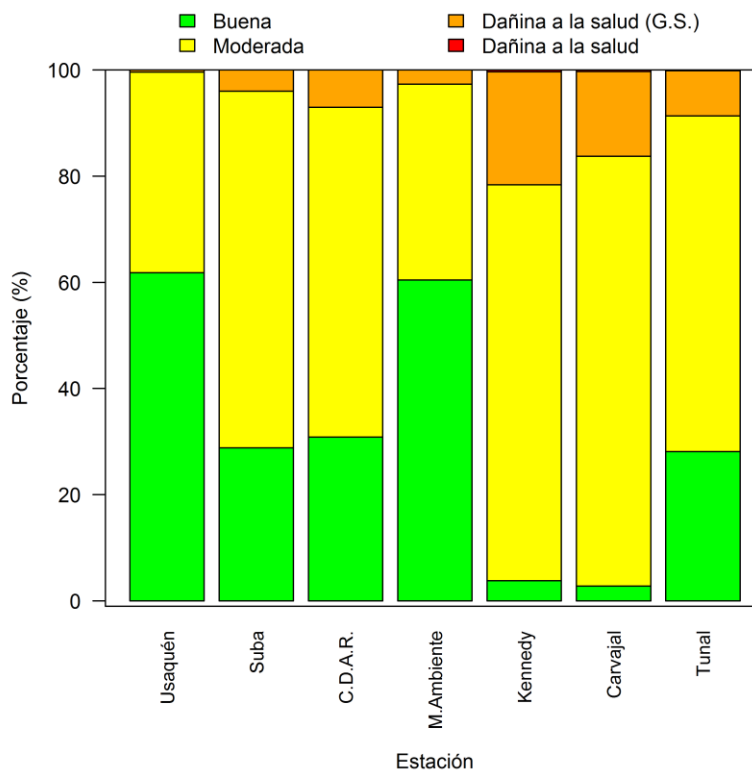


Figura 3-69. Proporción relativa de las categorías del Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM_{2.5} por estación para el año 2014.

La Figura 3-70 corresponde a la desagregación del Índice de Calidad del Aire diario en función de los meses de 2014. En todos ellos la calidad del aire se enmarca en las categorías “Buena”, “Moderada” y “Dañina a la salud para grupos sensibles”. Los meses de marzo, abril, junio y diciembre mostraron la categoría “Dañina a la salud”, la cual estuvo presente especialmente en los dos últimos. Se observa que enero y los meses de junio, julio y agosto tienen una mayor participación de la categoría “Buena”. Las razones son similares a las dadas para PM₁₀, que muestran que en los primeros días de enero hay una reducción del nivel de actividad de la ciudad mientras que a mitad de año la velocidad de los vientos aumenta favoreciendo la ventilación de la ciudad.

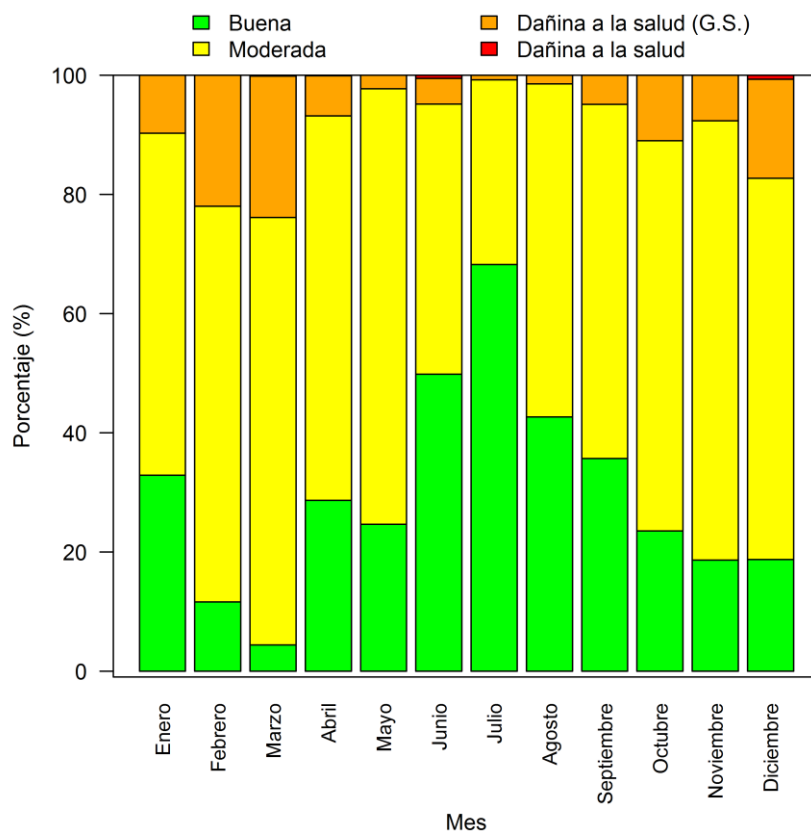


Figura 3-70. Proporción relativa del Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM_{2.5} para los meses de 2014.

En lo referente al comportamiento por día de la semana, la Figura 3-71 muestra que los domingos y los lunes presentaron mejor calidad del aire por su mayor participación de la categoría “Buena”. La proporción es menor el martes y disminuye entre miércoles y viernes aumentando levemente el sábado. Se observa que entre domingo y sábado la proporción de la categoría “Dañina a la salud para grupos sensibles” aumenta progresivamente evidenciando un deterioro de la calidad del aire con respecto a este contaminante.

Los valores de ICA de la Figura 3-72 durante el año 2014 muestran que las estaciones Usaquén y Ministerio de Ambiente son las únicas en las que se observa una predominancia de la categoría “Buena”. Sin embargo, la segunda estación reporta un valor de ICA de 49, el cual se encuentra muy cercano de 50, límite a partir del cual la calidad del aire es

“Moderada”. Las demás estaciones registraron una predominancia de esta última categoría y los valores promedio más altos del índice de calidad del aire fueron observados en Kennedy y Carvajal-Sevillana con 83 y 85, respectivamente. Estas dos estaciones se localizan en el suroccidente de Bogotá donde predomina alta actividad de fuentes industriales y móviles, especialmente vehículos de carga pesada.

En comparación con los resultados obtenidos para PM₁₀, se puede afirmar que en términos de salud pública, los niveles de PM_{2.5} en el año 2014 presentaron una mayor afectación y por tanto se debe prestar especial atención a las magnitudes generales de sus concentraciones así como la ocurrencia de episodios de alta contaminación.

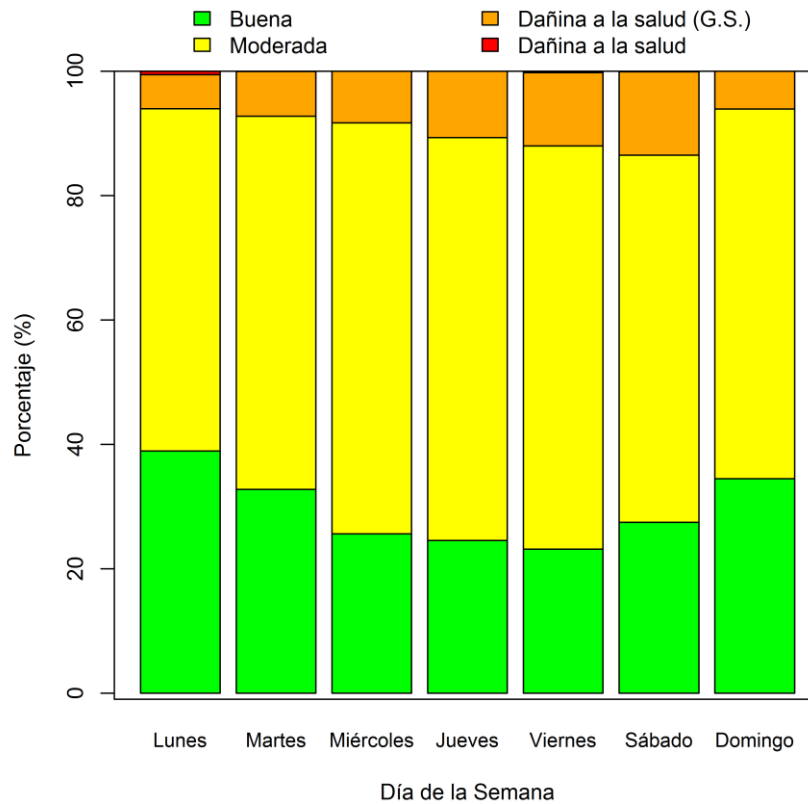


Figura 3-71 Índice de Calidad del Aire (ICA) de PM_{2.5} por día de la semana para el año 2014.

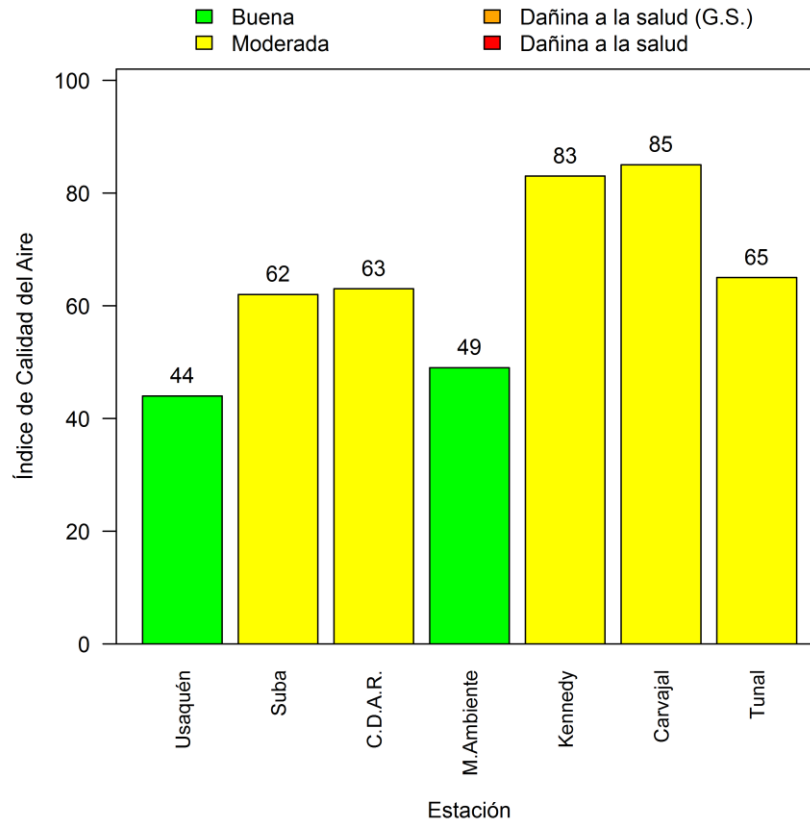


Figura 3-72. Índice de calidad del aire (ICA) promedio por estación para PM_{2.5} durante el año 2014.

3.3.3. Índice de calidad del aire para ozono (O₃), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂) y dióxido de nitrógeno (NO₂).

La Figura 3-73, la Figura 3-74 y la Figura 3-75 presentan el índice de calidad del aire promedio por estación para el año 2014 en los contaminantes O₃, CO y SO₂ en tiempos de exposición de 8 horas para los dos primeros de 24 horas para el último. No se presentan resultados para el dióxido de nitrógeno teniendo en cuenta que en este contaminante solamente se consideran valores de ICA superiores a 200, correspondientes a una concentración de 650 ppb o 1222 µg/m³ en un tiempo de exposición de 1 hora. La máxima concentración horaria de NO₂ medida por la RMCAB en 2014 fue 199 µg/m³ en la estación Carvajal-Sevillana, lo cual evidencia que no se alcanzan las 200 unidades de ICA.

La categoría “Moderada” se considera únicamente si el valor del ICA supera las 50 unidades. En promedio, todas las estaciones presentaron valores debajo de este límite en los tres contaminantes demostrando la predominancia de la categoría “Buena” en el año. En términos de protección a la salud pública, el contaminante con menor afectación es SO₂ teniendo en cuenta que el máximo valor fue 4 en la estación Suba.

El máximo valor de ICA para ozono fue 13 en la estación Usaquén y es seguido por Centro de Alto Rendimiento con 11 unidades. Estos resultados son concordantes con los análisis llevados a cabo en apartados anteriores teniendo en cuenta que las concentraciones más altas fueron observadas en el norte y centro geográfico de la ciudad. Carvajal-Sevillana y Puente Aranda, localizadas al suroccidente y occidente de la ciudad registraron valores inferiores de ICA evidenciando una tendencia contraria a la observada para PM₁₀ y PM_{2.5}. El 29 de marzo de 2014 ocurrió un episodio singular de alta concentración de ozono a nivel ciudad y los niveles de concentración alcanzaron la categoría “Moderada” entre las 5:00 p.m. y las 9:00 p.m. en Usaquén, Las Ferias y Centro de Alto Rendimiento. La categoría “Moderada” de ozono implica que las personas inusualmente sensibles pueden experimentar síntomas respiratorios.

En lo referente al monóxido de carbono, el máximo valor promedio de ICA fue 15 en la estación Carvajal-Sevillana. Como se ha mencionado previamente, en la zona de influencia de esta estación predomina alta actividad relacionada con la emisión de fuentes industriales y móviles cuyos procesos de combustión favorecen la emisión de monóxido de carbono. Este valor de ICA es seguido por 9 en Puente Aranda y Tunal y 7 en Las Ferias, demostrando un amplio contraste en las tendencias de la calidad del aire en la ciudad. En Carvajal-Sevillana, el 10 de octubre de 2014 entre 5:00 a.m. y 7:00 a.m. los niveles de concentración se enmarcaron en la categoría “Moderada” producto de altos niveles de concentración en horas de la madrugada.

Los índices de calidad del aire para el dióxido de azufre muestran un valor máximo de 4 en la estación Suba, el cual está significativamente alejado de 50 que establece el límite entre la categoría “Buena” y “Moderada”. Este valor es seguido por 2 en Las Ferias, Centro de Alto Rendimiento y Puente Aranda y por 1 en San Cristóbal. Las tendencias en Suba sugieren una actividad de emisión de SO₂ mayor en horas de la madrugada y de la mañana, en comparación con las demás estaciones, lo que estaría asociado a vehículos de carga pesada.

En general, los resultados para estos gases permiten afirmar que sus concentraciones representan un riesgo menor para la salud en comparación con el material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$.

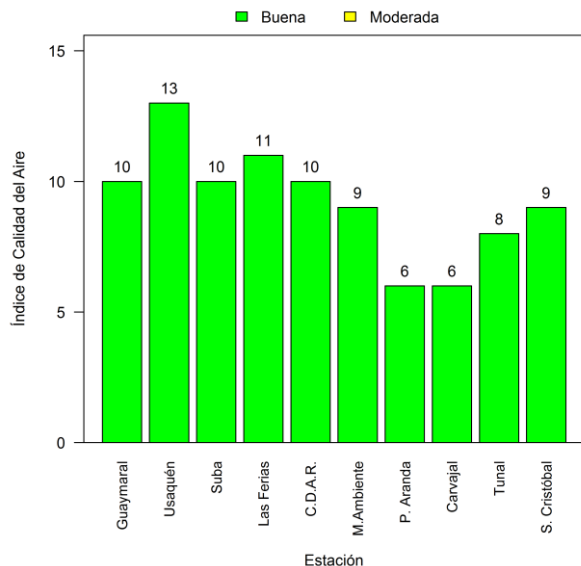


Figura 3-73. Índice de Calidad del Aire promedio para ozono (O_3). Base de 8 horas.

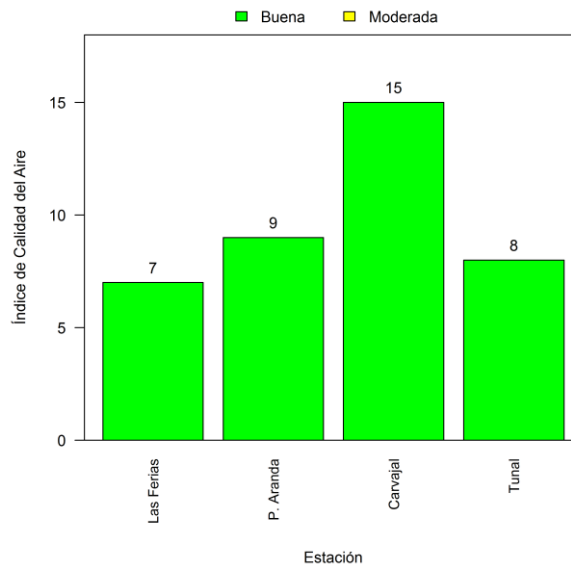


Figura 3-74. Índice de Calidad del Aire promedio para monóxido de carbono (CO). Base de 8 horas.

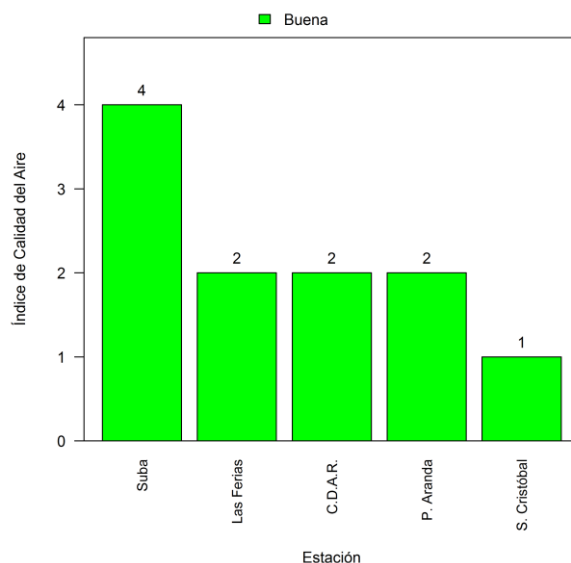


Figura 3-75. Índice de Calidad del Aire promedio para dióxido de azufre (SO_2). Base diaria.

3.4. Síntesis de resultados

Esta sección contiene una síntesis de resultados por contaminante por medio de tablas indicativas. Para cada caso se presenta el comportamiento de los promedios en las bases temporales estudiadas para el año 2014.

Para cada tabla, se observa en la primera columna la zona geográfica donde se encuentra cada estación, en la segunda aparece el nombre respectivo y en la tercera se informa el número de promedios obtenidos con los datos recolectados en el periodo reportado. La cuarta columna indica el porcentaje de representatividad temporal, que se establece como la cantidad de promedios obtenidos en el periodo reportado, ya sea un mes o un año, sobre la cantidad de promedios posibles en el mismo periodo. Este indicador muestra la cobertura temporal del monitoreo. La quinta columna informa el número de promedios que estuvieron por encima de la norma y en la sexta se encuentra el porcentaje de estas excedencias sobre el total de los datos obtenidos para cada estación. La séptima columna informa el número de promedios que están por encima del 50% y van hasta el 75% del valor de la norma, mientras que la octava columna tiene la misma idea pero entre el 75% y el 100%, lo cual resulta importante en la medida que permite visualizar las estaciones que se encuentran en ese último rango de 25% próximo a vencer la norma. En la novena columna se muestra el máximo encontrado en el periodo y en la décima el cociente del máximo sobre el valor de la norma, lo que da un indicativo de la susceptibilidad de exceder los límites normativos. La última columna presenta los valores de los promedios anuales los cuales en el caso del monóxido de carbono y del ozono son indicativos al no estar regulado un tiempo de exposición anual en la Resolución 610 de 2010.

Tabla 3-27. Consolidado de los promedios diarios de partículas suspendidas totales (PST), año 2014.

Información de los promedios diarios de concentración de PST [Norma: 300 µg/m ³ ; Resolución 610 de 2010]									
Zona	Nombre de la Estación	No de promedios	Representatividad Temporal	No de datos que exceden la norma	% de datos que exceden la norma	No. datos entre el 50% y el 75% de la norma	No. datos entre el 75% y el 100% de la norma	Máximo [µg/m ³]	Max/ Norma
Suroccidente	Carvajal-Sevillana	111	30%	0	0,0%	35	2	274	0,9

Tabla 3-28. Consolidado de los promedios diarios para material particulado inferior a 2,5 micrómetros (PM_{2.5}), año 2014.

Información de los promedios diarios de concentración de PM _{2.5} [Norma diaria: 50 µg/m ³ ; Resolución 610 de 2010]										
Zona	Nombre de la Estación	No de promedios	Representatividad Temporal	No de datos que exceden la norma	% de datos que exceden la norma	No. datos entre el 50% y el 75% de la norma	No. datos entre el 75% y el 100% de la norma	Máximo [µg/m ³]	Max/Norma	Promedio anual (µg/m ³) ¹³
Norte	Guaymaral	72	20%	0	0,0%	13	0	37	0,7	N.R.
	Usaquén	303	83%	0	0,0%	24	4	46	0,9	13
	Subtotal	375	51%	0	0,0%	37	4	46	0,9	13
Noroccidente	Suba	279	76%	2	0,7%	58	14	55	1,1	21
	Las Ferias	249	68%	1	0,4%	41	11	52	1,0	N.R.
	Subtotal	528	72%	3	0,6%	99	25	55	1,1	21
Centro	Centro de Alto Rendimiento	306	84%	1	0,3%	62	26	51	1,0	20
	MinAmbiente	269	74%	1	0,4%	28	12	56	1,1	N.R.
	Subtotal	575	79%	2	0,3%	90	38	56	1,1	20
Suroccidente	Kennedy	325	89%	17	5,2%	116	84	67	1,3	32
	Carvajal-Sevillana	316	87%	28	8,9%	150	82	77	1,5	35
	Subtotal	641	88%	45	7,0%	266	166	77	1,5	34
Sur	Tunal	351	96%	10	2,9%	86	33	61	1,2	23
	San Cristóbal	236	65%	0	0,0%	0	1	44	0,9	N.R.
	Subtotal	587	80%	10	1,7%	86	34	61	1,2	23

N.R.: No Representativo. La serie de datos respectiva presentó una cobertura temporal inferior a 75% del total posible a medir durante el año.

¹³ Comparar con el límite máximo permisible en un tiempo de exposición anual de 25 µg/m³.

Tabla 3-29. Consolidado de los promedios diarios para material particulado inferior a 10 micrómetros (PM₁₀), año 2014.

Información de los promedios diarios de concentración de PM ₁₀ [Norma: 100 µg/m ³ ; Resolución 610 de 2010]										
Zona	Nombre de la Estación	No de promedios	Representatividad Temporal	No de datos que exceden la norma	% de datos que exceden la norma	No. datos entre el 50% y el 75% de la norma	No. datos entre el 75% y el 100% de la norma	Máximo [µg/m ³]	Max/Norma	Promedio anual (µg/m ³) ¹⁴
Norte	Guaymaral	240	66%	1	0,4%	27	1	133	1,3	N.R.
	Usaquén	312	85%	1	0,3%	53	6	125	1,3	37
	Subtotal	552	76%	2	0,4%	80	7	133	1,3	37
Noroccidente	Suba	344	94%	2	0,6%	96	41	142	1,4	51
	Las Ferias	321	88%	1	0,3%	36	6	101	1,0	32
	Subtotal	665	91%	3	0,5%	132	47	142	1,4	42
Centro	Centro de Alto Rendimiento	284	78%	1	0,4%	71	10	182	1,8	40
	MinAmbiente	355	97%	2	0,6%	83	29	120	1,2	43
	Subtotal	639	88%	3	0,5%	154	39	182	1,8	42
Suroccidente	Fontibón	156	43%	4	2,6%	85	22	243	2,4	N.R.
	Puente Aranda	334	92%	25	7,5%	147	52	199	2,0	62
	Kennedy	333	91%	49	14,7%	117	84	161	1,6	71
	Carvajal-Sevillana	316	87%	121	38,3%	52	115	240	2,4	91
	Subtotal	1139	78%	199	17,5%	401	273	243	2,4	75
Sur	Tunal	272	75%	13	4,8%	74	25	213	2,1	53
	San Cristóbal	296	81%	2	0,7%	77	6	207	2,1	41
	Subtotal	568	78%	15	2,6%	151	31	213	2,1	47

N.R.: No Representativo. La serie de datos respectiva presentó una cobertura temporal inferior a 75% del total posible a medir durante el año.

¹⁴ Comparar con el límite máximo permisible en un tiempo de exposición anual de 50 µg/m³.

Tabla 3-30. Consolidado de los promedios horarios de O₃, año 2014.

Información de los promedios horarios de concentración de O ₃ [Norma: 120 µg/m ³]									
Zona	Nombre de la Estación	No de promedios	Representatividad Temporal	No de datos que exceden la norma	% de datos que exceden la norma	No. de datos entre el 50% y el 75% norma	No. datos entre el 75% y el 100% de la norma	Máximo [µg/m ³]	Max/Norma
Norte	Guaymaral	8398	96%	13	0,2%	326	82	159	1,3
	Usaquén	7917	90%	17	0,2%	645	62	179	1,5
	Subtotal	16315	93%	30	0,2%	971	144	179	1,5
Noroccidente	Suba	8492	97%	0	0,0%	296	34	120	1,0
	Las Ferias	7165	82%	7	0,1%	296	31	168	1,4
	Subtotal	15657	89%	7	0,0%	592	65	168	1,4
Centro	Centro de Alto Rendimiento	7829	89%	16	0,2%	321	44	157	1,3
	MinAmbiente	6838	78%	1	0,0%	100	8	123	1,0
	Subtotal	14667	84%	17	0,1%	421	52	157	1,3
Suroccidente	Fontibón	3798	43%	16	0,4%	280	62	165	1,4
	Puente Aranda	8601	98%	2	0,0%	75	19	126	1,1
	Carvajal-Sevillana	6923	79%	0	0,0%	64	6	106	0,9
	Subtotal	19322	74%	18	0,1%	419	87	165	1,4
Sur	Tunal	8265	94%	1	0,0%	59	9	128	1,1
	San Cristóbal	8394	96%	1	0,0%	90	16	128	1,1
	Subtotal	16659	95%	2	0,0%	149	25	128	1,1

Tabla 3-31. Consolidado de los promedios móviles de 8 horas de O₃, año 2014.

Información de los promedios móviles de 8 horas de concentración de O ₃ [Norma: 80 µg/m ³]										
Zona	Nombre de la Estación	No de promedios	Representatividad Temporal	No de datos que exceden la norma	% de datos que exceden la norma	No. de datos entre el 50% y el 75% norma	No. datos entre el 75% y el 100% de la norma	Máximo [µg/m ³]	Max/Norma	Promedio anual (µg/m ³) ¹⁵
Norte	Guaymaral	8376	96%	49	0,6%	871	229	107	1,3	23
	Usaquén	7888	90%	62	0,8%	1710	435	133	1,7	31
	Subtotal	16264	93%	111	0,7%	2581	664	133	1,7	27
Noroccidente	Suba	8497	97%	12	0,1%	827	161	89	1,1	22
	Las Ferias	7128	81%	22	0,3%	841	137	127	1,6	25
	Subtotal	15625	89%	34	0,2%	1668	298	127	1,6	24
Centro	Centro de Alto Rendimiento	7737	88%	30	0,4%	965	135	120	1,5	23
	MinAmbiente	6753	77%	3	0,0%	496	39	90	1,1	20
	Subtotal	14490	83%	33	0,2%	1461	174	120	1,5	21
Suroccidente	Fontibón	3806	43%	50	1,3%	464	181	129	1,6	N.R.
	Puente Aranda	8579	98%	4	0,1%	210	29	97	1,2	15
	Carvajal-Sevillana	6747	77%	0	0,0%	141	11	80	1,0	14
	Subtotal	19132	73%	54	0,3%	815	221	129	1,6	14
Sur	Tunal	8275	94%	5	0,1%	292	22	95	1,2	18
	San Cristóbal	8360	95%	0	0,0%	468	42	78	1,0	20
	Subtotal	16635	95%	5	0,0%	760	64	95	1,2	19

N.R.: No Representativo. La serie de datos respectiva presentó una cobertura temporal inferior a 75% del total posible a medir durante el año.

¹⁵ Estos promedios anuales no tienen referencia normativa para comparación en un tiempo de exposición anual de acuerdo a la Resolución 610 de 2010.

Tabla 3-32. Consolidado de los promedios horarios de NO₂, año 2014.

Información de los promedios horarios de concentración de NO ₂ [Norma: 200 µg/m ³ ; Resolución 610 de 2010]									
Zona	Nombre de la Estación	No de promedios	Representatividad Temporal	No de datos que exceden la norma	% de datos que exceden la norma	No. de datos entre el 50% y el 75% norma	No. datos entre el 75% y el 100% de la norma	Máximo [µg/m ³]	Max/Norma
Norte	Guaymaral	8484	97%	0	0,0%	1	0	106	0,5
	Subtotal	8484	97%	0	0,0%	1	0	106	0,5
Noroccidente	Suba	8663	99%	0	0,0%	8	0	113	0,6
	Las Ferias	3301	38%	0	0,0%	90	2	156	0,8
	Subtotal	11964	68%	0	0,0%	98	2	156	0,8
Centro	Centro de Alto Rendimiento	2477	28%	0	0,0%	5	0	124	0,6
	Subtotal	2477	28%	0	0,0%	5	0	124	0,6
Suroccidente	Puente Aranda	7478	85%	0	0,0%	54	2	164	0,8
	Kennedy	8296	95%	0	0,0%	1	0	102	0,5
	Carvajal-Sevillana	655	7%	0	0,0%	16	1	199	1,0
	Subtotal	16429	63%	0	0,0%	71	3	199	1,0
Sur	Tunal	5928	68%	0	0,0%	32	3	178	0,9
	Subtotal	5928	68%	0	0,0%	32	3	178	0,9

Tabla 3-33. Consolidado de los promedios diarios de NO₂, año 2014.

Información de los promedios diarios de concentración de NO ₂ [Norma: 150 µg/m ³ ; Resolución 610 de 2010]										
Zona	Nombre de la Estación	No de promedios	Representatividad Temporal	No de datos que exceden la norma	% de datos que exceden la norma	No. de datos entre el 50% y el 75% norma	No. datos entre el 75% y el 100% de la norma	Máximo [µg/m ³]	Max/Norma	Promedio anual (µg/m ³) ¹⁶
Norte	Guaymaral	352	96%	0	0,0%	0	0	43	0,3	23
	Subtotal	352	96%	0	0,0%	0	0	43	0,3	23
Noroccidente	Suba	363	99%	0	0,0%	0	0	54	0,4	26
	Las Ferias	134	37%	0	0,0%	8	0	93	0,6	N.R.
	Subtotal	497	68%	0	0,0%	8	0	93	0,6	26
Centro	Centro de Alto Rendimiento	98	27%	0	0,0%	0	0	63	0,4	N.R.
	Subtotal	98	27%	0	0,0%	0	0	63	0,4	N.R.
Suroccidente	Puente Aranda	310	85%	0	0,0%	2	0	93	0,6	39
	Kennedy	345	95%	0	0,0%	0	0	53	0,4	34
	Carvajal-Sevillana	25	7%	0	0,0%	2	0	84	0,6	N.R.
	Subtotal	680	62%	0	0,0%	4	0	93	0,6	37
Sur	Tunal	245	67%	0	0,0%	0	0	72	0,5	N.R.
	Subtotal	245	67%	0	0,0%	0	0	72	0,5	N.R.

N.R.: No Representativo. La serie de datos respectiva presentó una cobertura temporal inferior a 75% del total posible a medir durante el año.

¹⁶ Comparar con el límite máximo permisible en un tiempo de exposición anual de 100 µg/m³.

Tabla 3-34. Consolidado de los promedios horarios de CO, año 2014.

Información de los promedios horarios de concentración de CO [Norma: 40 mg/m ³ ; Resolución 610 de 2010]										
Zona	Nombre de la Estación	No de promedios	Representatividad Temporal	No de datos que exceden la norma	% de datos que exceden la norma	No. de datos entre el 50% y el 75% norma	No. datos entre el 75% y el 100% de la norma	Máximo [mg/m ³]	Max/Norma	Promedio (mg/m ³) ¹⁷
Norte	Usaquén	2791	32%	0	0,0%	0	0	3,1	0,1	N.R.
	Subtotal	2791	32%	0	0,0%	0	0	3,1	0,1	N.R.
Noroccidente	Las Ferias	6931	79%	0	0,0%	0	0	4,1	0,1	0,7
	Subtotal	6931	79%	0	0,0%	0	0	4,1	0,1	0,7
Centro	Centro de Alto Rendimiento	2111	24%	0	0,0%	0	0	6,9	0,2	N.R.
	Subtotal	2111	24%	0	0,0%	0	0	6,9	0,2	N.R.
Suroccidente	Fontibón	3510	40%	0	0,0%	0	0	2,8	0,1	N.R.
	Puente Aranda	8715	99%	0	0,0%	0	0	10,4	0,3	0,9
	Kennedy	2224	25%	0	0,0%	0	0	5,1	0,1	N.R.
	Carvajal-Sevillana	6987	80%	0	0,0%	0	0	7,7	0,2	1,5
	Subtotal	21436	61%	0	0,0%	0	0	10,4	0,3	1,2
Sur	Tunal	8104	93%	0	0,0%	0	0	7,8	0,2	0,8
	San Cristóbal	3478	40%	0	0,0%	0	0	4,5	0,1	N.R.
	Subtotal	11582	66%	0	0,0%	0	0	7,8	0,2	0,8

N.R.: No Representativo. La serie de datos respectiva presentó una cobertura temporal inferior a 75% del total posible a medir durante el año.

¹⁷ Estos promedios anuales no tienen referencia normativa para comparación en un tiempo de exposición anual de acuerdo a la Resolución 610 de 2010.

Tabla 3-35. Consolidado de los promedios móviles de 8 horas de CO, año 2014.

Información de los promedios móviles de 8 horas de concentración de CO [Norma: 10 mg/m ³]									
Zona	Nombre de la Estación	No de promedios	Representatividad Temporal	No de datos que exceden la norma	% de datos que exceden la norma	No. de datos entre el 50% y el 75% norma	No. datos entre el 75% y el 100% de la norma	Máximo [mg/m ³]	Max/Norma
Norte	Usaquén	2778	32%	0	0,0%	0	0	2,2	0,2
	Subtotal	2778	32%	0	0,0%	0	0	2,2	0,2
Noroccidente	Las Ferias	6929	79%	0	0,0%	0	0	3,1	0,3
	Subtotal	6929	79%	0	0,0%	0	0	3,1	0,3
Centro	Centro de Alto Rendimiento	2058	23%	0	0,0%	0	0	4,7	0,5
	Subtotal	2058	23%	0	0,0%	0	0	4,7	0,5
Suroccidente	Fontibón	3500	40%	0	0,0%	0	0	1,6	0,2
	Puente Aranda	8734	100%	0	0,0%	0	0	4,1	0,4
	Kennedy	2214	25%	0	0,0%	0	0	2,7	0,3
	Carvajal-Sevillana	6908	79%	0	0,0%	3	0	5,4	0,5
	Subtotal	21356	61%	0	0,0%	3	0	5,4	0,5
Sur	Tunal	8025	92%	0	0,0%	0	0	4,0	0,4
	San Cristóbal	3414	39%	0	0,0%	0	0	2,8	0,3
	Subtotal	11439	65%	0	0,0%	0	0	4,0	0,4

Tabla 3-36. Consolidado de los promedios móviles de 3 horas de SO₂, año 2014.

Información de los promedios móviles de 3 horas de concentración de SO ₂ [Norma: 750 µg/m ³ ; Resolución 610 de 2010]									
Zona	Nombre de la Estación	No de promedios	Representatividad Temporal	No de datos que exceden la norma	% de datos que exceden la norma	No. datos entre el 50% y el 75% de la norma	No. datos entre el 75% y el 100% de la norma	Máximo [µg/m ³]	Max/Norma
Noroccidente	Suba	8032	92%	0	0,0%	0	0	115,7	0,2
	Las Ferias	7475	85%	0	0,0%	0	0	35,1	0,1
	Subtotal	15507	89%	0	0,0%	0	0	115,7	0,2
Centro	Centro de Alto Rendimiento	7815	89%	0	0,0%	0	0	32,5	0,0
	Subtotal	7815	89%	0	0,0%	0	0	32,5	0,0
Suroccidente	Fontibón	3752	43%	0	0,0%	0	0	45,5	0,1
	Puente Aranda	7993	91%	0	0,0%	0	0	36,5	0,1
	Kennedy	3175	36%	0	0,0%	0	0	158,1	0,2
	Carvajal-Sevillana	1577	18%	0	0,0%	0	0	148,6	0,2
	Subtotal	16497	47%	0	0,0%	0	0	158,1	0,2
Sur	Tunal	5052	58%	0	0,0%	0	0	28,5	0,0
	San Cristóbal	7981	91%	0	0,0%	0	0	15,8	0,0
	Subtotal	13033	74%	0	0,0%	0	0	28,5	0,0

Tabla 3-37. Consolidado de los promedios diarios de SO₂, año 2014.

Información de los promedios diarios de concentración de SO ₂ [Norma diaria: 250 µg/m ³ ; Resolución 610 de 2010]										
Zona	Nombre de la Estación	No de promedios	Representatividad Temporal	No de datos que exceden la norma	% de datos que exceden la norma	No. de datos entre el 50% y el 75% norma	No. datos entre el 75% y el 100% de la norma	Máximo [µg/m ³]	Max/Norma	Promedio anual (µg/m ³) ¹⁸
Noroccidente	Suba	339	93%	0	0,0%	0	0	32,0	0,1	7,3
	Las Ferias	310	85%	0	0,0%	0	0	13,3	0,1	3,4
	Subtotal	649	89%	0	0,0%	0	0	32,0	0,1	5,3
Centro	Centro de Alto Rendimiento	331	91%	0	0,0%	0	0	11,7	0,1	4,4
	Subtotal	331	91%	0	0,0%	0	0	11,7	0,1	4,4
Suroccidente	Fontibón	157	43%	0	0,0%	0	0	17,7	0,1	N.R.
	Puente Aranda	335	92%	0	0,0%	0	0	12,4	0,1	4,2
	Kennedy	136	37%	0	0,0%	0	0	32,2	0,1	N.R.
	Carvajal-Sevillana	65	18%	0	0,0%	0	0	26,3	0,1	N.R.
	Subtotal	693	47%	0	0,0%	0	0	32,2	0,1	4,2
Sur	Tunal	209	57%	0	0,0%	0	0	9,0	0,0	N.R.
	San Cristóbal	329	90%	0	0,0%	0	0	7,3	0,0	1,7
	Subtotal	538	74%	0	0,0%	0	0	9,0	0,0	1,7

N.R.: No Representativo. La serie de datos respectiva presentó una cobertura temporal inferior a 75% del total posible a medir durante el año.

¹⁸ Comparar con el límite máximo permisible en un tiempo de exposición anual de 80 µg/m³.

4. Evaluación y análisis de variables meteorológicas

Este capítulo presenta el estudio de la variación de las condiciones atmosféricas en la ciudad de Bogotá durante el año 2014. La Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) a través de los sensores localizados en sus estaciones, realiza el monitoreo de variables meteorológicas como la precipitación, velocidad y dirección del viento, temperatura, radiación solar y humedad relativa.

Condiciones climatológicas y sinópticas del periodo

Uno de los fenómenos climáticos que presentan mayor relevancia en la modulación de las precipitaciones en Colombia corresponde al fenómeno ENOS (El Niño Oscilación Del Sur). A lo largo de 2014 se presentó una fase neutral según los informes emitidos por la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) (El Niño/Southern Oscillation (ENSO) Diagnostic Discussion, s.f.), en donde el índice oceánico de EL NIÑO (ONI) alcanzó un máximo de 0.7°C en el promedio de los trimestres Octubre-Noviembre-Diciembre (OND) y un mínimo de -0.6 en Enero-Febrero-Marzo (EFM). Esto significa que durante el año, las precipitaciones y otras variables meteorológicas no debieron afectarse por la influencia del fenómeno ENOS y más su respuesta es con base en la climatología presente en la región y a eventos de escala menor, con tendencia a valores promedio.

Generalidades climatológicas de Bogotá:

El comportamiento de los vientos en Colombia responde al flujo de los alisios del noreste y sureste, los cuales confluyen en la zona tropical formando la llamada zona de convergencia intertropical (ZCIT), que al desplazarse sobre el territorio debido al cambio relativo de la incidencia solar sobre la tierra genera las temporadas de lluvia en el país. Regularmente la circulación de los vientos alisios se ve trastornada por anomalías en el balance de energía modificando la distribución espacial y temporal de las lluvias, según el evento ENOS que se encuentre presente. Bogotá se encuentra ubicada en la región Andina de Colombia y está determinada por una distribución temporal de lluvias, dominada por las características climatológicas de la cuenca del Río Bogotá – Sabana de Bogotá. Al estar encerrada por dos ramales de la cordillera Oriental presenta escasa pluviosidad (500 a 1000 mm en promedio (IDEAM, 2010)). La distribución típica de lluvias es caracterizada por dos temporadas secas y dos temporadas lluviosas bien definidas siendo la temporada seca de inicio de año y la lluviosa de finales de año las más definidas y prolongadas (Hurtado, 2000). Las características de la variabilidad de la precipitación en Bogotá se resumen desde el punto de vista horario y mensual en la Figura 4-1, donde se aprecia que existen dos temporadas lluviosas, en donde la más fuerte es en octubre - noviembre y a su vez la mayor intensidad se presenta en horas de la tarde y primeras horas de la noche.

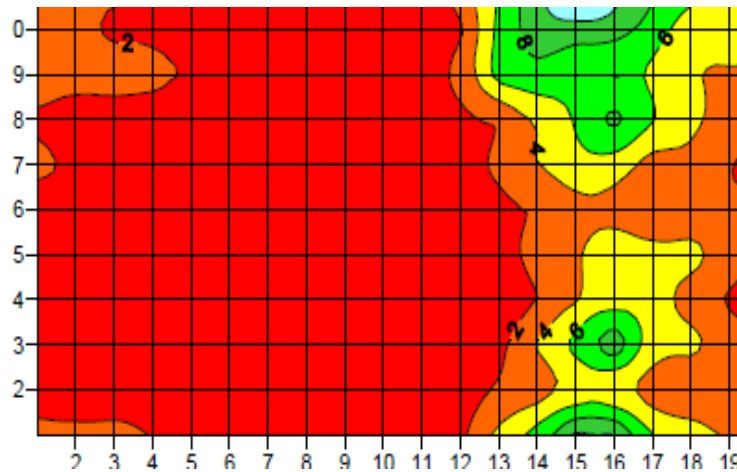


Figura 4-1. Esquematación hora-mes de la precipitación en la estación del aeropuerto ElDorado en Bogotá.
 (Instituto de hidrología meteorología y estudios ambientales, 2013)

Los vientos alisios traen consigo humedad que a su vez produce lloviznas que de alguna forma reemplazan las lluvias fuertes de los periodos lluviosos y que además gracias a ellos los contaminantes producidos en zonas industriales en las afueras de la ciudad, (municipios como Soacha, Madrid) son transportados hacia la ciudad. Por otra parte, los llamados vientos locales son bastante variables y dependen de la distribución de las precipitaciones, predominan durante la segunda temporada de lluvias y viajan hacia el nororiente, oriente y occidente, con velocidades medias de 4 a 6 m/s. Los vientos con diferentes direcciones dan lugar a condiciones de discontinuidad y presencia de corrientes ascendentes, que junto con el calentamiento diurno, apoyan la formación de nubes de amplio despliegue vertical favoreciendo las precipitaciones fuertes y la ocurrencia de tormentas eléctricas, granizadas y torbellinos en zonas locales y a veces de poca extensión.

4.1. Precipitación

Las estaciones consideradas en el año para la variable precipitación se presentan en la Tabla 1-1 en donde se observa la representatividad de los datos recolectados.

La Figura 4-2 presenta el acumulado promedio mensual de la RMCAB en el periodo 1998 – 2013, el promedio mensual de las estación del aeropuerto ElDorado (IDEAM) en el periodo 1980-2010 y el promedio de la RMCAB en 2014. Se observa que durante los primeros tres meses se presentaron lluvias por encima de lo normal, lo que tendió a disminuir drásticamente con valores moderadamente por debajo de lo normal hasta el último trimestre en donde se presentó un acumulado significativo, particularmente en el mes de diciembre en donde se registraron 132 mm y siendo la estación de Las Ferias la de mayor valor con 179 mm para este mes de diciembre (ver Tabla 4-1 **Tabla 1-1**). Por su parte, en el mes de agosto se presentó la diferencia más significativa, alcanzando los 20 mm por debajo con respecto al estimado de la RMCAB. Es importante resaltar que los promedios de la RMCAB aún no representan una climatología de Bogotá; estos se muestran únicamente como comparación de lo ocurrido en los últimos años.

Tabla 4-1. Acumulados de precipitación de las estaciones de la RMCAB mensuales durante 2014. (NA no cumple criterio de representatividad)

Estación	ENE	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
Carvajal-Sevillana	NA	39.7	69.6	74.9	59.5	42.4	25.7	NA	34.9	119.2	92.9	NA
Centro_de_Alto_Rendimiento	52.9	121.8	167.6	100.2	117.4	31.6	18.9	9.6	NA	131.3	133.7	135.8
Fontibón	NA	28.7	45.9	28.6	41.2	17.4	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Guaymaral	84.3	84.7	117.3	42.3	40.6	47.9	29.8	24.4	46.9	109.1	85.1	123.9
Kennedy	24	50.9	68	83.3	83.9	NA	NA	NA	39.9	95.8	101	124
Las_Ferías	36.7	85.5	135.5	54.3	109.5	31.6	23.2	3.1	NA	110.1	143.6	179.5
MinAmbiente	69	60.4	97.4	34.7	99.3	41.3	31.1	17.9	27	140.2	132.7	163.6
Puente_Aranda	24.3	39	47.9	63.1	71.7	56.7	22.4	22.6	38.3	73.9	108.8	111.6
San_Cristobal	46.3	93.5	175.7	81.8	80.8	93	60.9	43.2	24.5	53.9	163.5	158.4
Suba	56.5	62.4	60.7	61.3	82.7	37.7	24.6	11.9	46.6	101.5	75.7	110.8
Tunal	31.5	52.7	49	52.2	58.5	49.6	33.7	21.4	32.6	105.4	96.1	91.7
Usaquén	70.2	52.7	113.4	64.7	78.3	39	23.9	NA	NA	99	159.7	119.9

La Figura 4-3 muestra el acumulado de precipitación trimestral comparada con los últimos años. Durante el primer trimestre de 2014 el acumulado alcanzó los 201 mm, valor que está por encima de la media para este periodo, el cual es de 163 mm. En el segundo trimestre el valor observado fue de 179 mm el cual está significativamente por debajo de la media histórica del periodo, que corresponde a 234 mm. En el tercer trimestre de 2014 se presentó un acumulado promedio de 77 mm, por debajo del promedio que es 117 mm y el cual es uno de los más bajos reportados hasta la fecha solamente superado por 2006 con 52 mm. Durante el cuarto trimestre de los 253 mm esperados en promedio, se presentó un 35% más con 341mm. Este valor fue superado solamente por los cuartos trimestres de 1998, 2007, 2010 y 2011. También resulta importante destacar que en el mes de diciembre se obtuvo un 103% más de lluvia que lo esperado en el promedio. La Figura 4-3 es producto de la información que se presenta en desde la Tabla 4-2 a la Tabla 4-5.

La Figura 4-4 presenta en el eje de las abscisas la hora, en el eje de las ordenadas el mes y los colores el acumulado de lluvia horaria durante el año; en ella se nota una diferencia de la estacionalidad de la lluvia con respecto a la climatología, en donde los valores más significativos se presentaron en el mes de febrero, en horas de las tardes y no en marzo como se aprecia la Figura 4-1. También llama la atención las lluvias presentadas en las primeras horas de las noches de marzo y diciembre, así como las medianoches de abril y el intervalo de las 8 a las 10 pm en mayo. En la Figura 4-5 se aprecia el comportamiento en cada una de las estaciones de la RMCAB. Durante el año, las lluvias más significativas se concentraron en las tardes del primer y último trimestre.

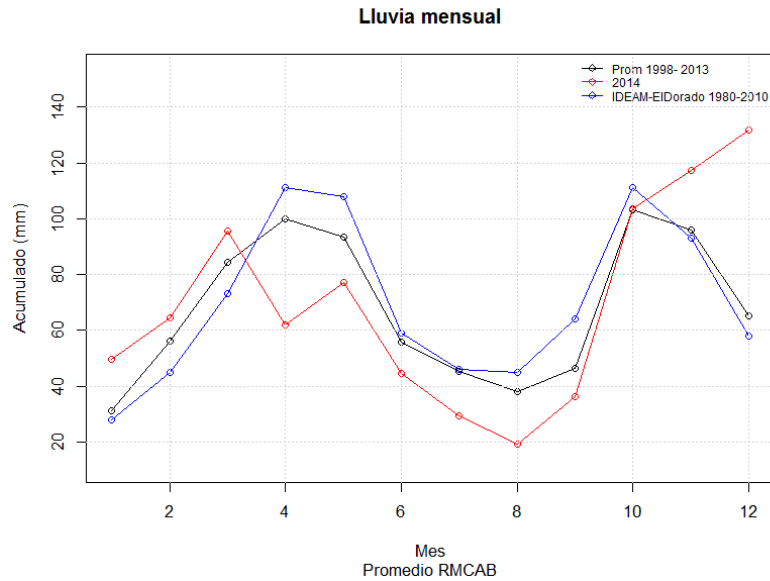


Figura 4-2. Acumulado promedio de precipitación de las estaciones de la RMCAB del periodo 1998-2013, promedio histórico estación del aeropuerto EIDorado del IDEAM y el promedio registrado trimestralmente por la RMCAB.

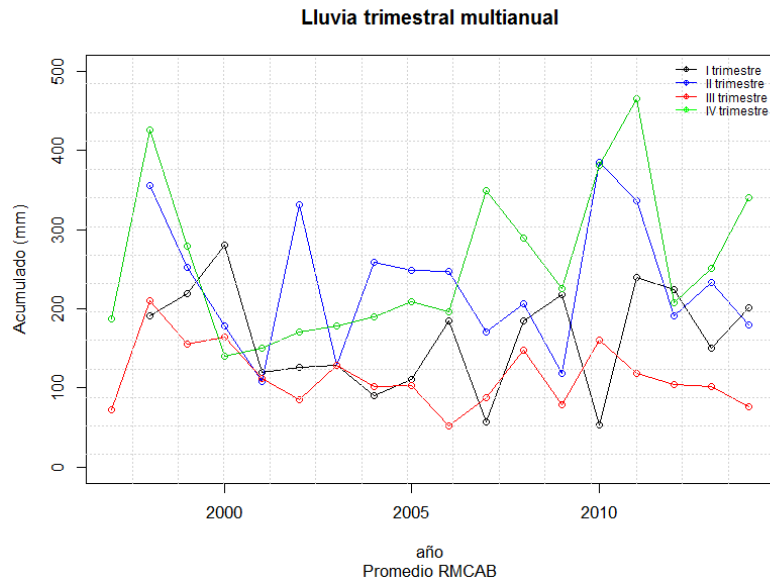


Figura 4-3. Promedio de los acumulados de precipitación trimestral desde 1998 hasta 2014.

Tabla 4-2. Acumulados de los primeros trimestres multianuales y por estación.

Estación	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Cade_Energia	241	133	100	133	148										
Carvajal-Sevillana	193	58	65	83	95	70	91	65	269	137	63	227	101	121	109
Cazuca	130	68	79	85	82	33	73	40	117	108					
Central_de_Mezclas		23													
Centro_de_Alto_Rendimiento					98	145		78	110	296	78	419	330	182	342
Chico_lago_Sto_Tomas.	374	146	208	140		171	348	83		279	67				
Fontibón	185	133	136	99	111	74	274	26	86	103	22	84	73	100	75
Guaymaral	244		91					35	245	189	31	305	184	168	286
Kennedy							87	29	235	221	39	206		121	143
Las_Ferías		168		131		141	258	73	152	315	56	314	337	126	258
Mimbiente	296	184	159	187						321	56		315	221	227
Olaya	339	183													
Puente_Aranda	238	144	145	142	6	58	139	60	306	435	48	160	179	132	111
San_Cristobal											28		296	226	316
Suba	140	112	130			61	122	76		263	89	260	303	153	180
Tul								55	268	116	36	197	121	103	133
Univ_ciol	348	145	69												
Usaquen	635	62	208	158		239	230	89	191	201	41	197		150	236
USME							196	31	91	74					
Vitelma							211	66	150		89	271			

Tabla 4-3. Acumulados de los segundos trimestres multianuales y por estación.

Estación	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Cade_Energia	325	263	140	110	353	155	145								
Carvajal-Sevillana	279	209	154	68	311	125	252		307	238	133	161	290	312	207
Cazuca	209	108	170	63	231	17	254		342	123	271				
Central_de_Mezclas		123	110	72											
Centro_de_Alto_Rendimiento							235	271			245	164	592	467	232
Chico_lago_Sto_Tomas.	307	248	142	134	400		309		301	257		132	534		
Engativa	309	346													
Fontibón			153	138	292	102	303	219	92			87	210	105	34
Guaymaral	604	459	252		271					152	150	123	390	399	118
Kennedy									154		161	92	239	305	
Las_Ferías			121	135	315	137	255	314	313			113	461	384	236
Mimbiente	670	299	177	130	385	133						140	492		174
Olaya	306	103	345	119											
Puente_Aranda				134	414	148		131	184	165	155		312	199	237
San_Cristobal														398	236
Suba	309	267	139	100			524			47		78	357	385	235
Tul											175	133	429	329	180
Univ_ciol	317	280	152	106											
Usaquen	272	316	261	93	343	209	57	305	130	202	143	50	516	334	208
USME									277	174	291				
Vitelma									375	177	339	145	188	422	

Tabla 4-4. Acumulados de los terceros trimestres multianuales y por estación.

Estación	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Cade_Energía	202	119	53	82	95										
Carvajal-Sevillana	152	91	75	45	72		37	87		89	166	93	91	109	
Cazuca	130	78	77		85	74	71	85	137						
Central_de_Mezclas	85	79													
Centro_de_Alto_Rendimiento					138	117		95	117	73	240	189	69	100	29
Chico_lago_Sto_Tomas.	189	113	118		102		52	91	173	84	262				
Fontibón	211	86		133	95			104	37	44	94	61	23	54	
Guaymaral	64	127	36	134				65	126	58	206	154	149	35	101
Kennedy							46	93	117		101			97	
Las_Ferías	180	130	96		149	118	18	79	112	74	260	169	134	131	26
Mimbiente	246	166	111							77			141	123	76
Olaya	175														
Puente_Aranda		111	87	366	72	106	41	72	360		128	90	83	78	83
San_Cristobal												116	132	135	129
Suba	182	115	65		110		38	68	131	89	107	72	152	159	83
Tul							90	108	58	99	175	116	65	136	88
Univ_ciol	157	108													
Usaquen	160	130	135	12			51	45	160	40	86	121	105	61	
USME							63	125	178		168				
Vitelma							67	118	214	143	102				

Tabla 4-5. Acumulados de los cuartos trimestres multianuales y por estación.

Estación	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Cade_Energía	188	427	275	171	162	220									
Carvajal-Sevillana	191		173	57	100	129	81	141		233	279	171	233	451	392
Cazuca	128	178	137	121	131	98	41	104	87	188	224	179			
Central_de_Mezclas	119	202	161	106	101										
Centro_de_Alto_Rendimiento								223	219		445	377	283	555	637
Chico_lago_Sto_Tomas.	251	580	393	179	195	187		227	308	320	484	306	263		
Engativa	135	372	276												
Fontibón				139	84	160	202	175	157	112	317		101	121	
Guaymaral	61	816	131		160	168	381				395	280	287	405	536
Kennedy										185	269	203	195	265	74
Las_Ferías				187	159	174		271	310	161	481	293	257	545	562
Mimbiente	278	455	405	132	158	219							275		658
Olaya	223	198	362	52											
Puente_Aranda			294	163	175	254	190	121	136	216	405	696	186	393	363
San_Cristobal															499
Suba	241	406	274	131	169	85		257	242			259	216	271	398
Tul										208	215	142	194	410	424
Univ_ciol	236	455	315	207	183										
Usaquen	196	592	434	174	175	181			171	148	444	409	270	551	585
USME										79	146	159			
Vitelma									255	308	442		181	229	

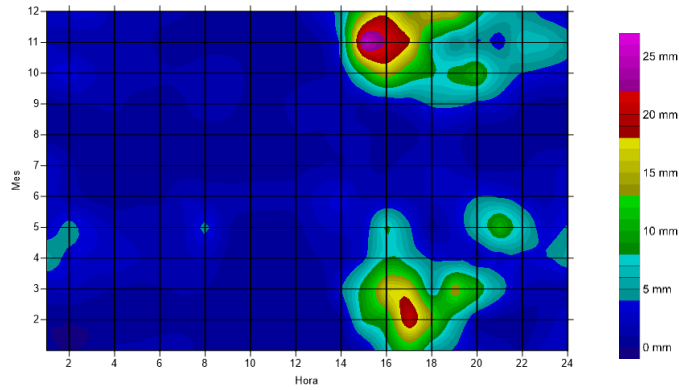


Figura 4-4. Acumulado de precipitación promedio en 2014 (el eje de las abscisas representa la hora mientras que el de las ordenadas presenta el mes).

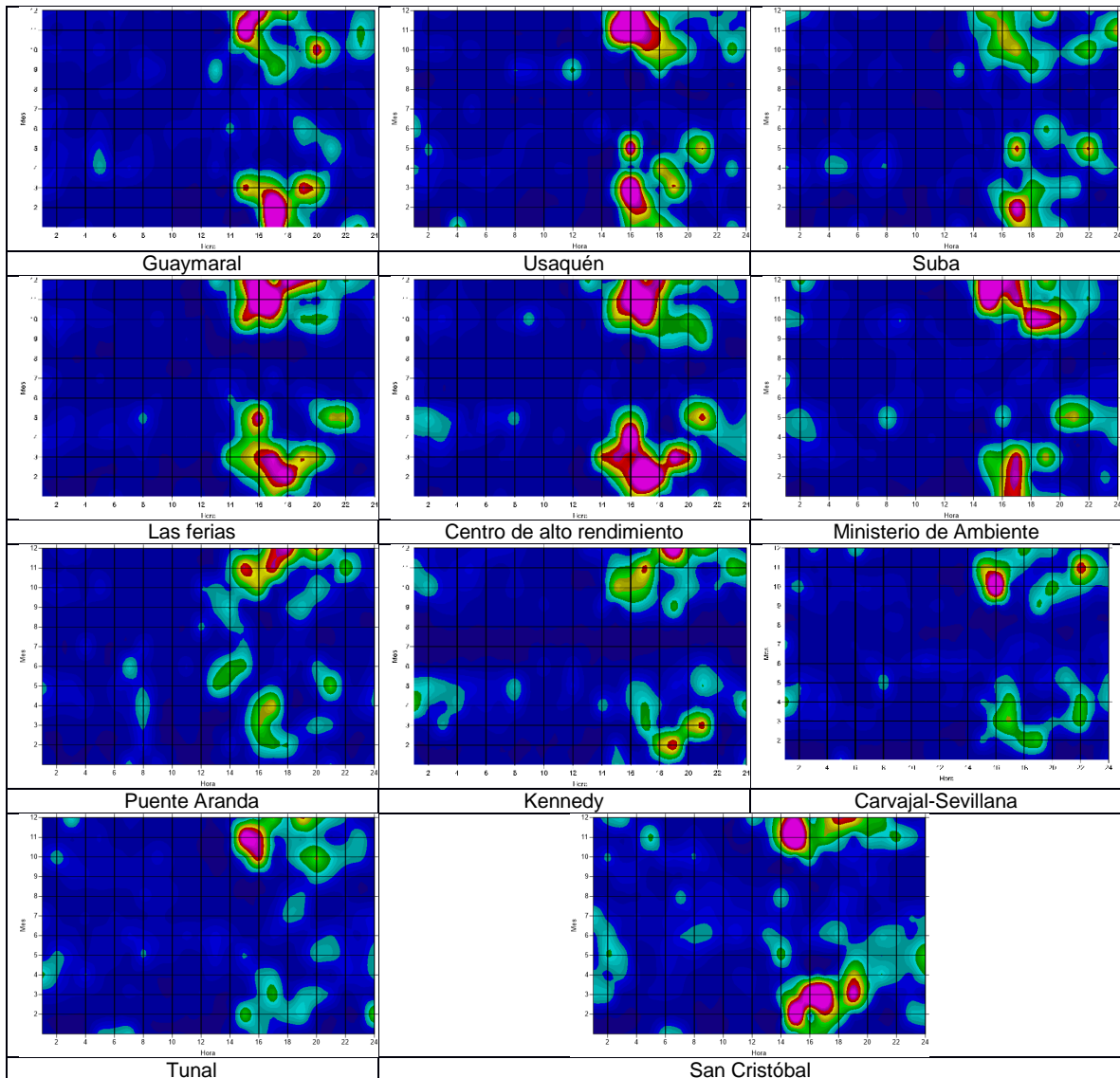


Figura 4-5. Precipitación promedio acumulada de las estaciones en 2014

Los datos presentados en la Tabla 4-6 representan los acumulados anuales de cada estación de la RMCAB, hasta 2014. El promedio de la RMCAB anual estuvo por encima de lo sucedido históricamente con 73 mm. Las estaciones con mayor acumulado en 2014 fueron Centro de alto rendimiento y San Cristóbal mientras que Tunal y Puente Aranda registraron los menores valores.

Tabla 4-6. Acumulados de precipitación de las estaciones de la RMCAB desde 2000 hasta 2014.

Estaciones	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Cade Energía	754	525	812	551											
Carvajal-Sevillana	585	317	580	421	577		692	669		620	970	1024	638	678	639
Cazuca	551	339	485	142	525	326	674	507	703						
Central de Mezclas	402	345													
Centro de Alto Rendimiento					739	752		707	848	815	1523	1710	891	964	1062
Chico lago (Sto Tomas)	884	588	913		756	797	1095	915	841	758	980				
Engativa															
Fontibón	687	471	653	574	684	545	520	559		382	522	520	350	392	
Guaymaral			578	709				646	821	656	1048	1394	639	828	836
Kennedy							611	546	839	559	644	587		688	689
Las Ferias	606	592	667			882	861	654	695	759	1321	1429	931	855	925
MinAmbiente	851	636	874							812			940	940	915
Olaya	1138														
Puente Aranda		564	901	891	248	431	580	701	1547	857	881	812	679	660	680
San Cristóbal													938	865	1076
Suba	650	496	489		1007		573	460	575	646	1023	1156	866	930	732
Tunal								539	686	542	1071	1066	668	711	674
Univ. Nacional	863	542													
Usaquén	1242	563	867	495		947	825	780	946	624	1292	1277	828	703	869
USME							702	553	718						
Vitelma							1087	803	839	652	922				
Promedio Anual	768	498	711	540	648	668	747	646	838	668	1016	1097	761	768	827

La Figura 4-6 presenta los acumulados multianuales del promedio de las estaciones de la RMCAB a partir del año 1998 y hasta 2014, según las estaciones presentes y descritas en la Tabla 4-6.

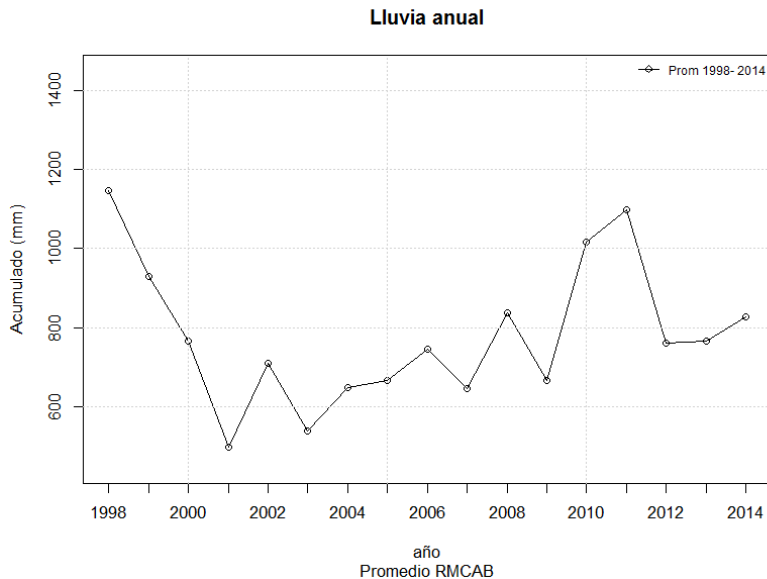


Figura 4-6. Acumulados multianuales del promedio de las estaciones de la RMCAB.

Con respecto al número de días que llueve en Bogotá (asumiendo un día de lluvia con un valor mayor o igual a 1 mm en 24 h), la Figura 4-7 muestra que en 2014 el número de días con lluvia en el primer trimestre estuvo por encima del promedio, mientras que en el

segundo trimestre, abril y mayo presentaron valores por debajo de la media, junio mostró un acumulado ligeramente por encima de lo normal; el tercer trimestre presentó un comportamiento variable, ya que julio y septiembre estuvieron por encima de lo esperado mientras que agosto alcanzó solamente 57 días. Finalmente en el último trimestre, similar al acumulado de lluvias, se presentó incremento en el número de días con lluvia comparado con la media histórica. En el caso de precipitación por día, es similar a lo presentado en el acumulado total, significativamente menor a lo esperado salvo en el último trimestre en donde el incremento de lluvia por día es significativo.

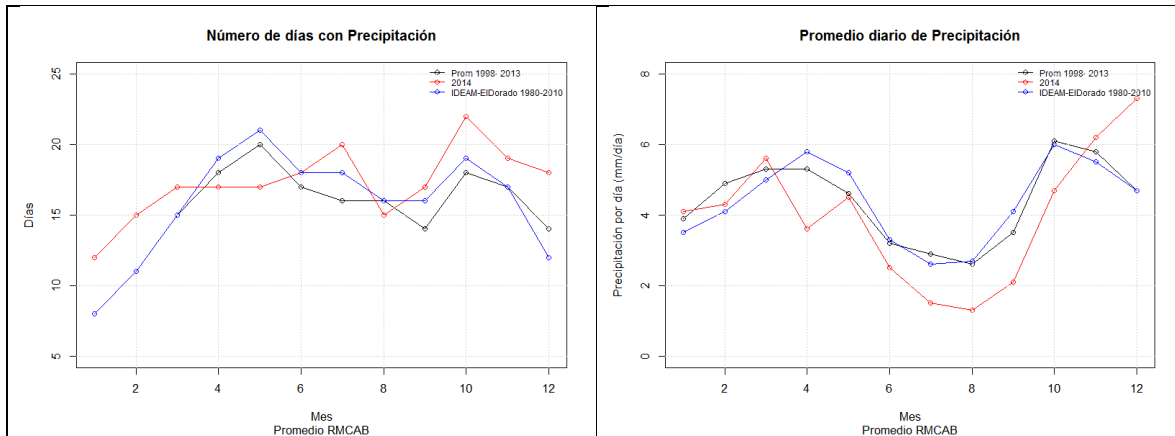


Figura 4-7. Número de días y promedio diario de precipitación en 2014.

El mapa de la Figura 4-8 muestra la ciudad de Bogotá, la distribución de las estaciones geográficamente y la interpolación de los acumulados de precipitación de 2014 sobre esta superficie. Los sectores sombreados, principalmente al oriente y sur, corresponden a terrenos que por su condición orográfica, entre otros, no son aptos para ser representados mediante métodos de interpolación, sin datos *In Situ*. La ciudad mostró su comportamiento típico de precipitación, alcanzando los mayores acumulados en Teusaquillo, Barrios Unidos y San Cristóbal, zonas cercanas al oriente y tendiendo a disminuir hacia el occidente particularmente en la estación de Carvajal-Sevillana en la localidad de Tunjuelito y Kennedy.

Desde el punto de vista trimestral, en la Figura 4-9 llama la atención que en el cuarto trimestre las condiciones de lluvia fueron significativamente mayores comparadas a los otros trimestres. Esta condición se ve acentuada particularmente en las estaciones cercanas a Chapinero, Barrios Unidos y oriente de Engativá, situación que dista significativamente del periodo inmediatamente anterior, ya que fue en esta zona en la que se presentaron los menores acumulados.

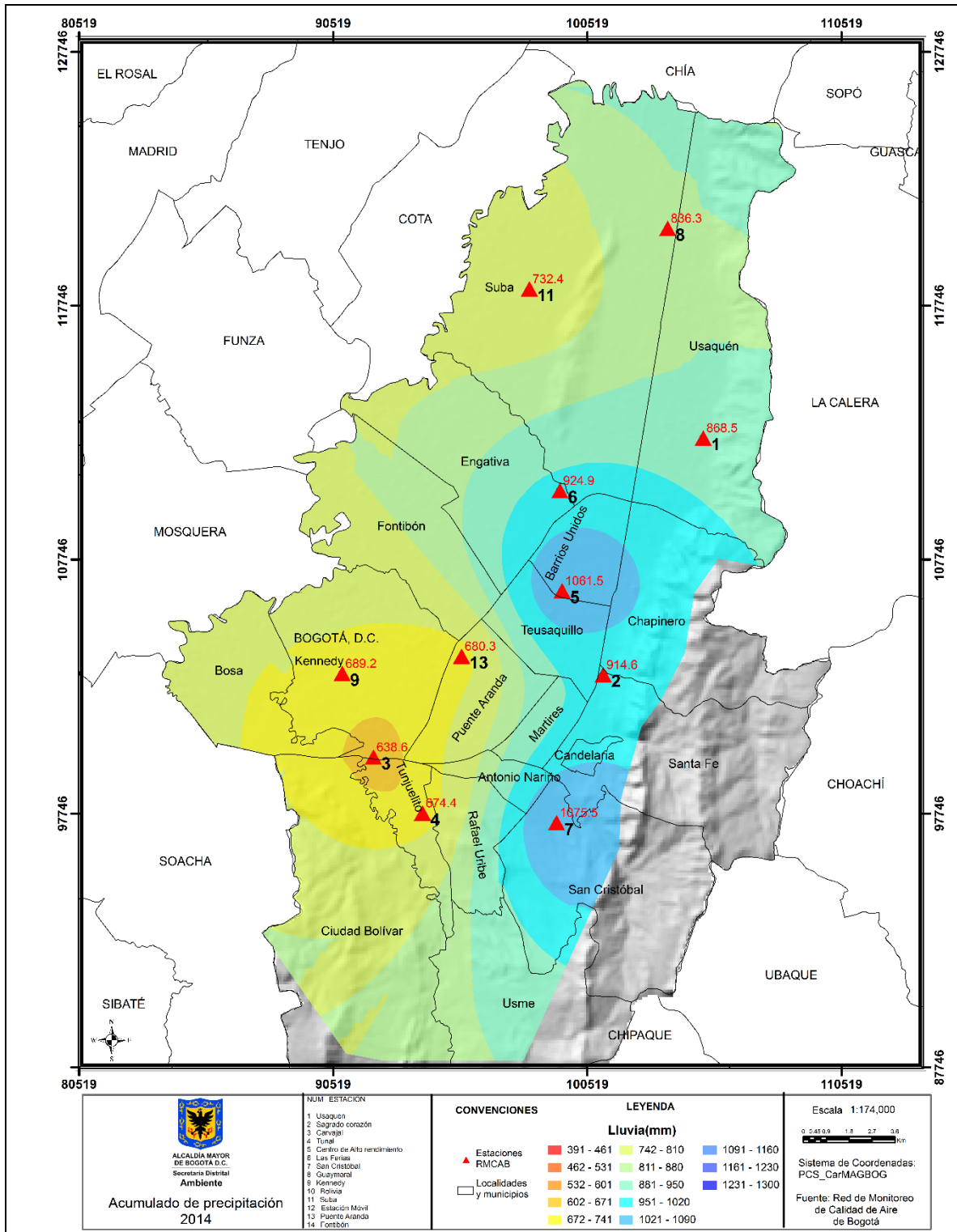


Figura 4-8. Mapa de acumulado de precipitación de las estaciones de la RMCAB en el año 2014.

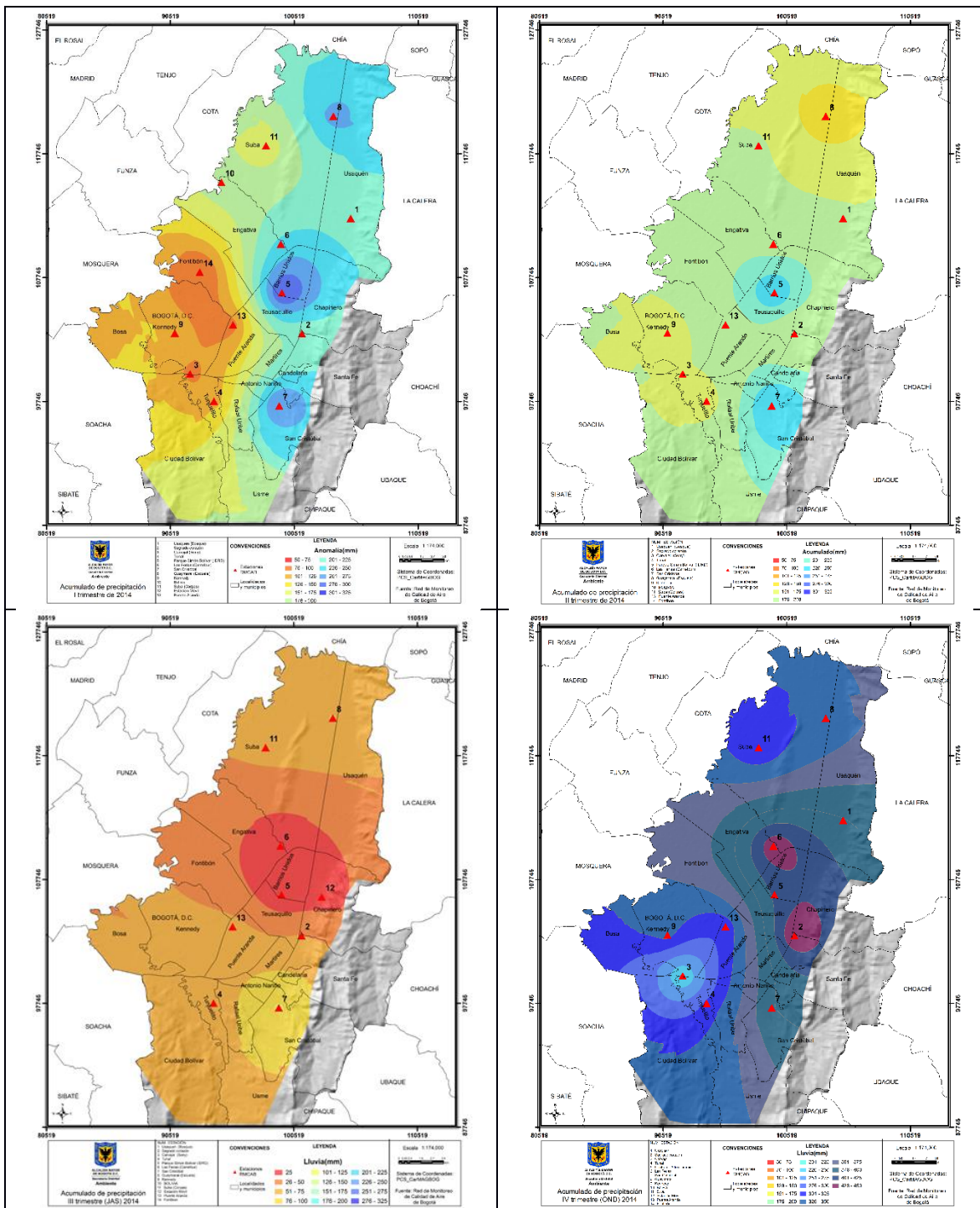


Figura 4-9. Mapa de acumulado de precipitación de las estaciones de la RMCAB trimestrales en 2014.

En la Figura 4-10 se observan las diferencias de los acumulados de precipitación registradas por las estaciones de la RMCAB durante 2014 y su similar en el periodo 1998-2013 (esto es denominado anomalía de precipitación). Note que cada estación tiene una historia distinta, según la fecha de inicio de operación). Se observa que la gran mayoría del área estuvo por debajo de lo esperado con particular acento en la zona norte de la ciudad

mientras que se presentaron algunas anomalías positivas importantes en la zona de San Cristóbal, Barrios Unidos, sur de Engativa y Kennedy.

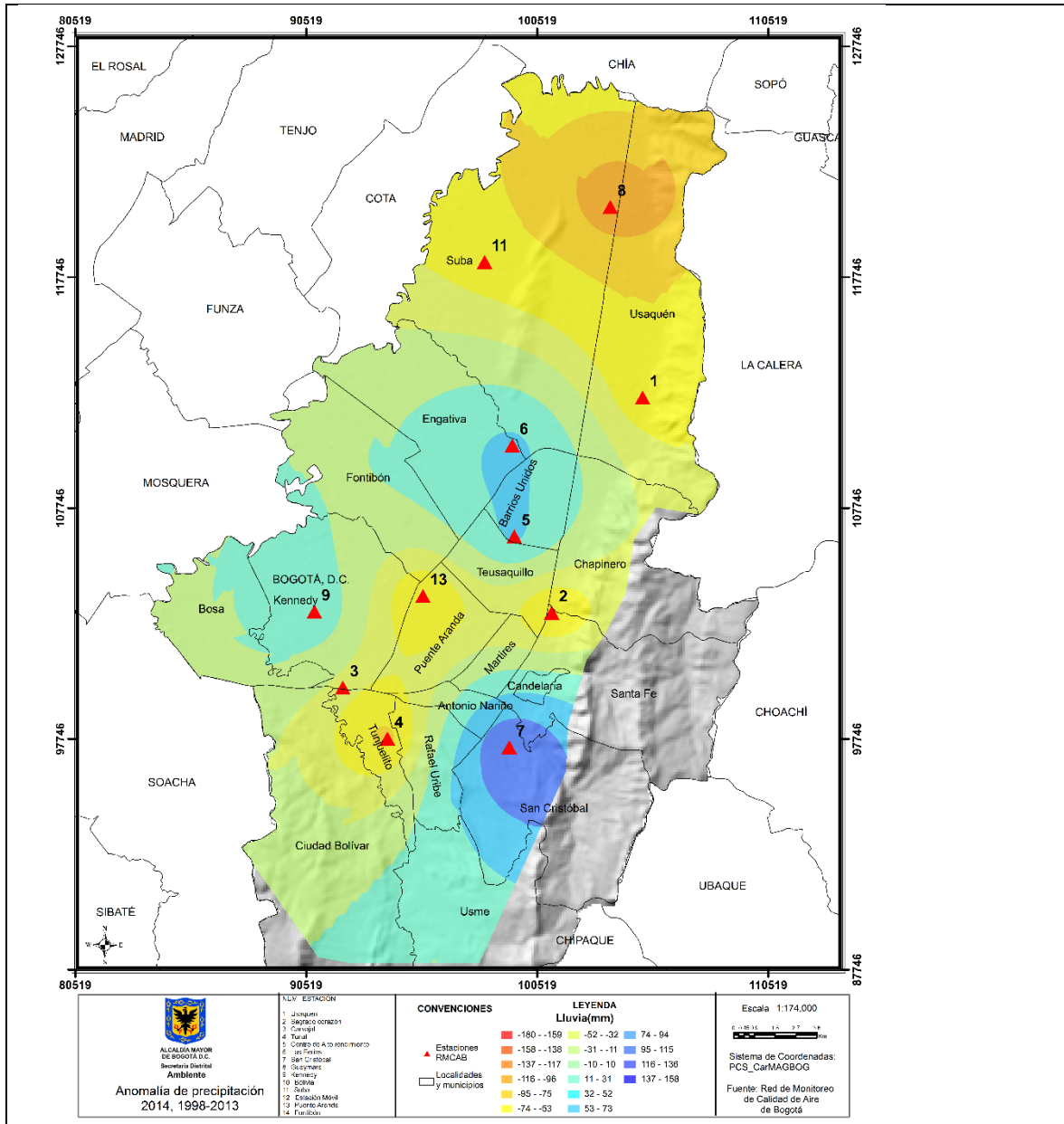


Figura 4-10. Anomalia de precipitación anual entre 1998 – 2013 y 2014 para las estaciones de la RMCAB.

4.2. Vientos

Durante 2014 la dirección y velocidad del viento se registró en las estaciones según se observa en la Tabla 1-1 la cual presenta la representatividad de los datos recolectados mensual y trimestralmente. Por su parte, la Tabla 4-7 presenta los valores promedio de velocidad y predominancia de la dirección de los vientos durante el año en grupos horarios y diarios. Como es de esperar, los valores más significativos se presentaron en horas de

las tardes, particularmente en las estaciones de Kennedy, Puente Aranda y Carvajal-Sevillana, con vientos máximos relativos de hasta 4.9 m/s. Por el contrario Tunal y Guaymaral registraron promedios del viento de 1.0 y 1.1 m/s promedio diario, alcanzando valores máximos de 2.5 y 2.7 m/s respectivamente.

Tabla 4-7. valores de velocidad promedio, máxima y de dirección del viento para las estaciones de la RMCAB.

Estación	Velocidad del viento						Dirección del viento			
	Madrugada	Mañana	Tarde	Noche	Promedio	Max prom	Predominancia	mañana	tarde	noche
Carvajal-Sevillana	1.6	2.1	3.5	2.3	2.4	4.2	180	135	135	180
Centro de Alto Rendimiento	0.8	1.3	2.3	1.3	1.4	3.2	270	315	315	90
Guaymaral	0.5	1	1.9	0.9	1.1	2.7	90	0	90	90
Kennedy	1.6	2.2	4.0	2.5	2.6	4.9	135	315	135	135
Las Ferias	1.4	1.7	2.5	1.7	1.8	3.6	45	45	45	135
MinAmbiente	1.1	1.5	2.8	1.7	1.8	4.2	90	135	90	90
Puente Aranda	1	1.6	3.6	2	2.1	4.8	135	315	135	180
San Cristóbal	1.4	1.5	2.5	1.7	1.8	3.7	90	90	90	90
Suba	1.2	2	2.9	1.5	1.9	3.8	45	45	0	90
Tunal	0.6	0.9	1.8	0.9	1	2.5	180	180	180	180
Usaquén	0.8	1.2	2.1	1.5	1.4	3.2	180	135	180	135

La Figura 4-11 presenta los valores promedios históricos de velocidad media y máxima relativa de la red y la comparación con lo corrido de 2014. En el caso de la velocidad media, las condiciones fueron ligeramente superiores a lo esperado históricamente, particularmente a mediados del año mientras que en el caso de las velocidades máximas relativas, durante el primer semestre tendió a estar por encima de lo esperado y en el segundo semestre los valores tendieron a estar similares a la referencia. La Tabla 4-8 presenta los promedios anuales para cada una de las estaciones de la RMCAB, desde 2000 hasta 2014 siendo los NA datos que no cumplen el criterio de representatividad del 75%. Por su parte, la Figura 4-12 presenta el comportamiento multianual, por un lado los promedios trimestrales y por otro el comportamiento horario multianual. Predominan por velocidades altas los terceros trimestres y en las horas de las tardes, notándose una tendencia de disminución de la velocidad de los vientos en el último año.

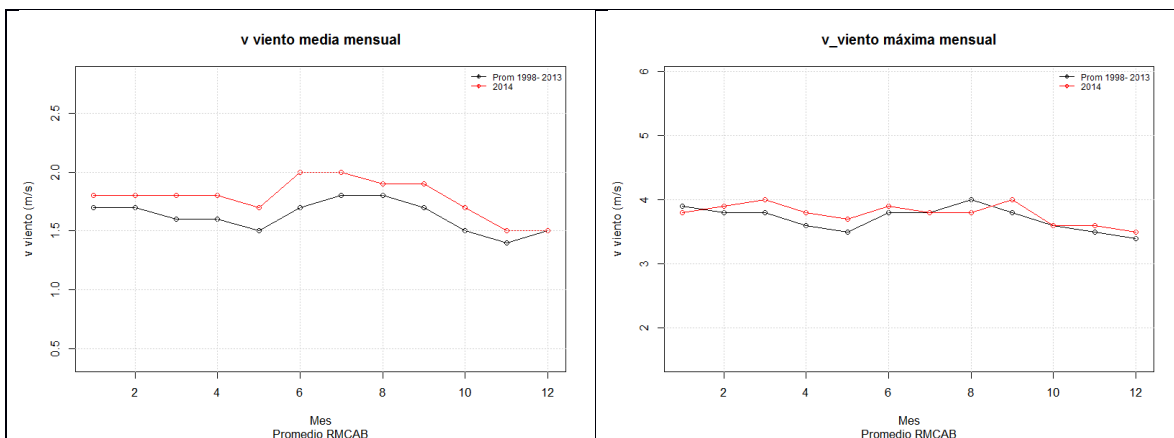


Figura 4-11. Velocidad del viento mensual promedio y máxima relativa de las estaciones de monitoreo de la SDA

Tabla 4-8. Promedio de velocidad del viento para las estaciones de la RMCAB desde 2000 hasta 2014.

Estación	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Cade_Energia	0.7	0.9	0.7	0.8	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Carvajal-Sevillana	0.9	1.3	1.2	2.1	NA	NA	NA	1.8	1.9	2.4	2.1	2.1	2.4	2.4	2.4
Cazuca	1.9	2.1	2.3	NA	2.8	2.4	2.5	2.6	1.7	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Central_de_Mezclas	2	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Centro_de_Alto_Rendimiento	NA	NA	NA	NA	0.8	1.9	NA	1.1	1.4	1.7	1.5	1.3	1.4	1.4	1.4
Chico_lago_Sto_Tomas.	0.4	0.4	0.4	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Fontibon	2.4	2.8	2.8	2.8	2.7	2.8	2.9	3.4	2.7	3	2.8	2.9	3	3	NA
Guaymaral	NA	NA	0.6	NA	NA	NA	NA	1.1	1.2	1.3	NA	0.9	1	1	1.1
Kennedy	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1.5	1.5	2.3	2.7	2.5	2.4	2.6	2.5	2.6
Las_Ferías	1.7	1.7	1.6	NA	NA	1.5	1.4	1.4	1.9	2.1	1.7	1.8	1.9	1.9	1.8
MinAmbiente	0.4	0.5	0.5	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1.2	NA	NA	NA	1.8	1.8
Olaya	1.8	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Puente_Aranda	1.9	2.4	2.4	2.6	2.7	2.8	2.8	2.7	2.7	2.9	2.7	2.7	2.2	2.1	2.1
San_Cristobal	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1.1	1.7	1.8	2.2	1.8
Suba	1.4	1.4	1.3	NA	1.6	NA	1.3	1.5	0.5	0.9	1	1.8	2	2	1.9
Tunal	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2.1	1.3	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1
Univ_Nacional	0.5	0.6	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Usaquen	1.2	1.1	1	1.2	NA	1.6	2.4	1.8	0.7	0.9	1.2	1.4	1.6	1.6	1.4
USME	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2.6	2.7	3.5	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Vitelma	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1.6	1.5	1.7	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Promedio	1.3	1.4	1.3	1.9	2.1	2.2	2.1	2	1.8	1.8	1.8	1.8	1.9	1.9	1.7

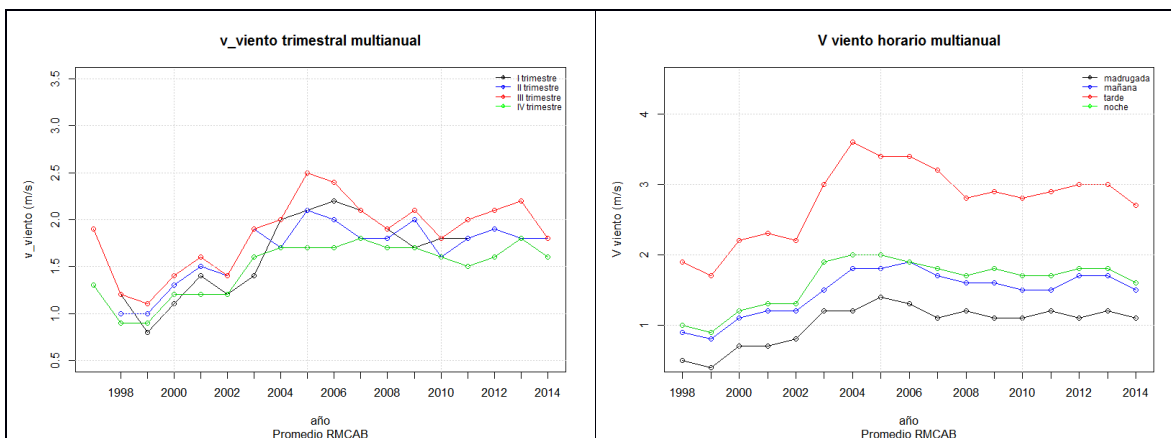


Figura 4-12. Velocidad del viento multianual promedio por trimestre y horario multianual de las estaciones de monitoreo de la SDA.

La Figura 4-13 esquematiza las rosas de vientos en la RMCAB durante el trimestre, presentando un comportamiento regular según su ubicación; hacia el norte y oriente es común observar vientos predominantes del este y del norte, salvo en la estación de Usaquén la cual presentó predominancia del sur. Por su parte, las estaciones ubicadas al centro geográfico de la ciudad como Centro de Alto Rendimiento y Puente Aranda presentaron frecuencias con una amplia variabilidad en sus direcciones; hacia el occidente son predominantes vientos del este y del sur a medida que se acercan al sur geográfico de la ciudad. La Figura 4-13 también presenta el porcentaje de vientos en calma (menores a 0.5 m/s), en donde se observa que hacia el occidente y suroriente de la ciudad, los vientos tienden a estar la mayor parte del tiempo en movimiento, a diferencia del noreste donde hasta el 30% de los datos anuales se presentaron en calma. Esta condición obedece a la

orografía de la ciudad, la cual a su vez facilita la dispersión en algunas zonas de los contaminantes y también genera corrientes de vientos ascendentes que apoyan la formación de lluvias locales.

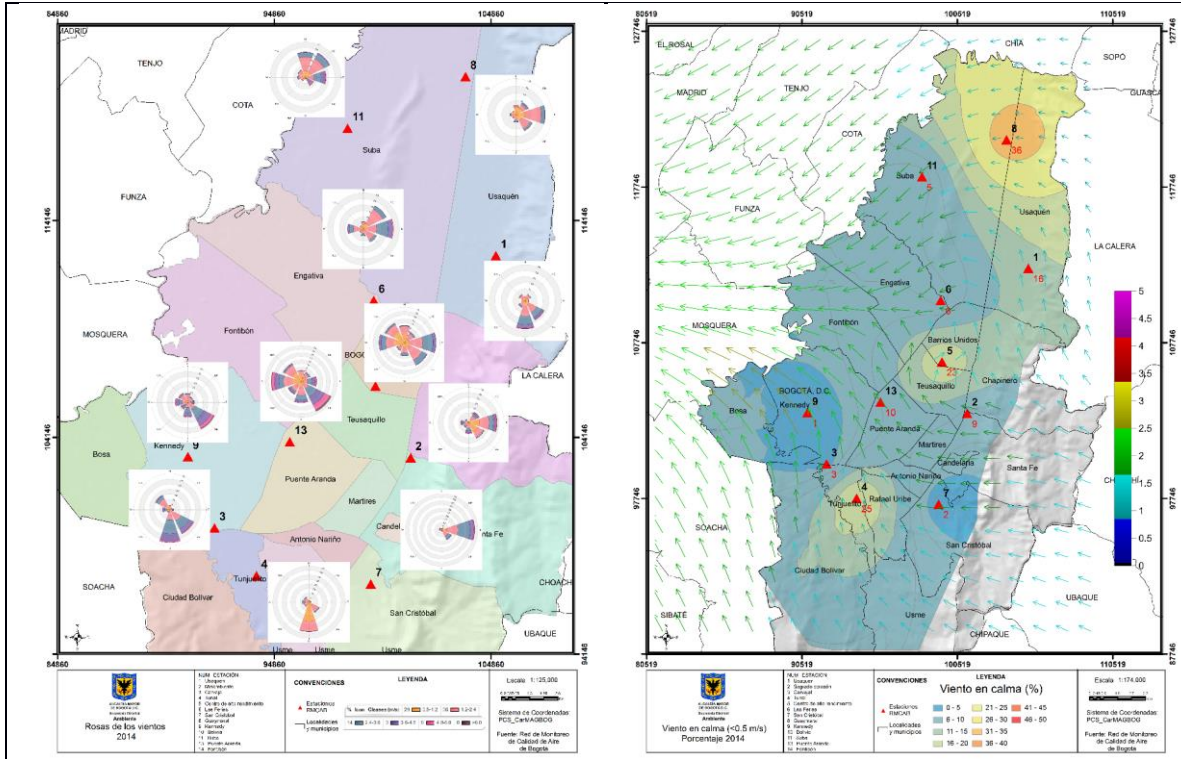


Figura 4-13. Rosa de los vientos para las estaciones de la RMCAB; Porcentaje de vientos en calma (< 0.5 m/s), velocidad y dirección de los vientos.

La Figura 4-15 presenta las condiciones de viento para cada estación discriminado por mes y por hora; para referencia se presenta el comportamiento climatológico de la estación del aeropuerto EIDorado, en donde se observa la cresta de velocidad del viento luego de mitad de año particularmente en horas de las tardes; en el caso de la RMCAB, la estación de Kennedy presenta los mayores promedios durante las tardes y en el tercer trimestre del año, condición que es característica según se observa en los diagramas de Puente Aranda y Carvajal-Sevillana y Suba; en estaciones como Guaymaral y Tunal los vientos tienen características débiles y llegan a presentar comportamientos distintos a lo largo del año. Por ejemplo la estación de San Cristóbal mostró una tendencia de mayor velocidad en el primer trimestre, condición que tiende a ser similar en las zonas de los llanos orientales. Las estaciones del centro geográfico de la ciudad presentan un comportamiento semiregular con vientos de velocidades relativamente bajas.

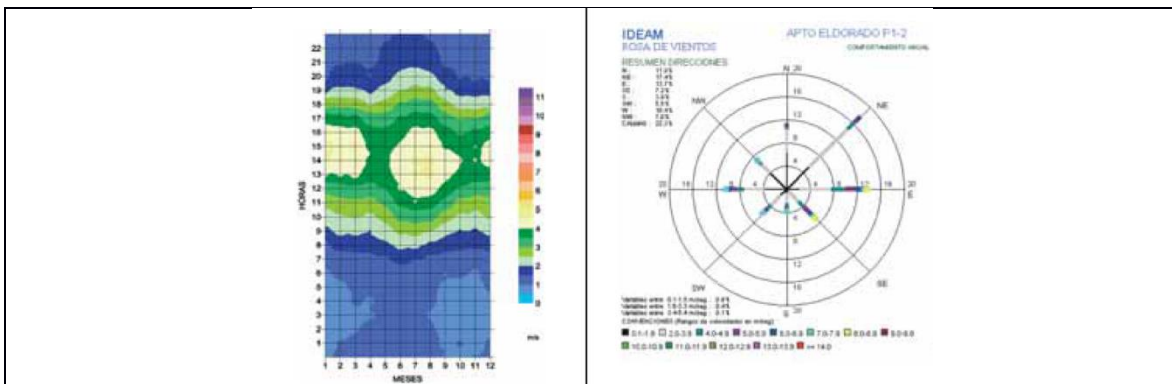


Figura 4-14. Velocidad del viento y rosa de los vientos en la estación del aeropuerto EIDorado de Bogotá en el periodo 1971- 2000 (el eje de las abscisas representa el mes mientras que el de las ordenadas presenta la hora). Fuente IDEAM

El mapa de la Figura 4-16 muestra la ciudad de Bogotá, la distribución de las estaciones geográficamente y la interpolación de los promedios de velocidad del viento en el 2014 sobre esta superficie. Asimismo se presentan los vectores con las velocidades y direcciones predominantes de los vientos. Según lo descrito anteriormente, se puede observar que la tendencia de la velocidad del viento geográficamente tiende a presentar velocidades bajas al nororiente y sectores del sur de la ciudad. Predominan vientos del noreste-este y sureste-este en los extremos norte y sur de la ciudad y se observa confluencia de los vientos en sectores aledaños a Mosquera. Los mayores valores de velocidad del viento se encontraron en el occidente particularmente en la localidad de Kennedy, alcanzando velocidades de hasta 2.6 m/s promedio diario.

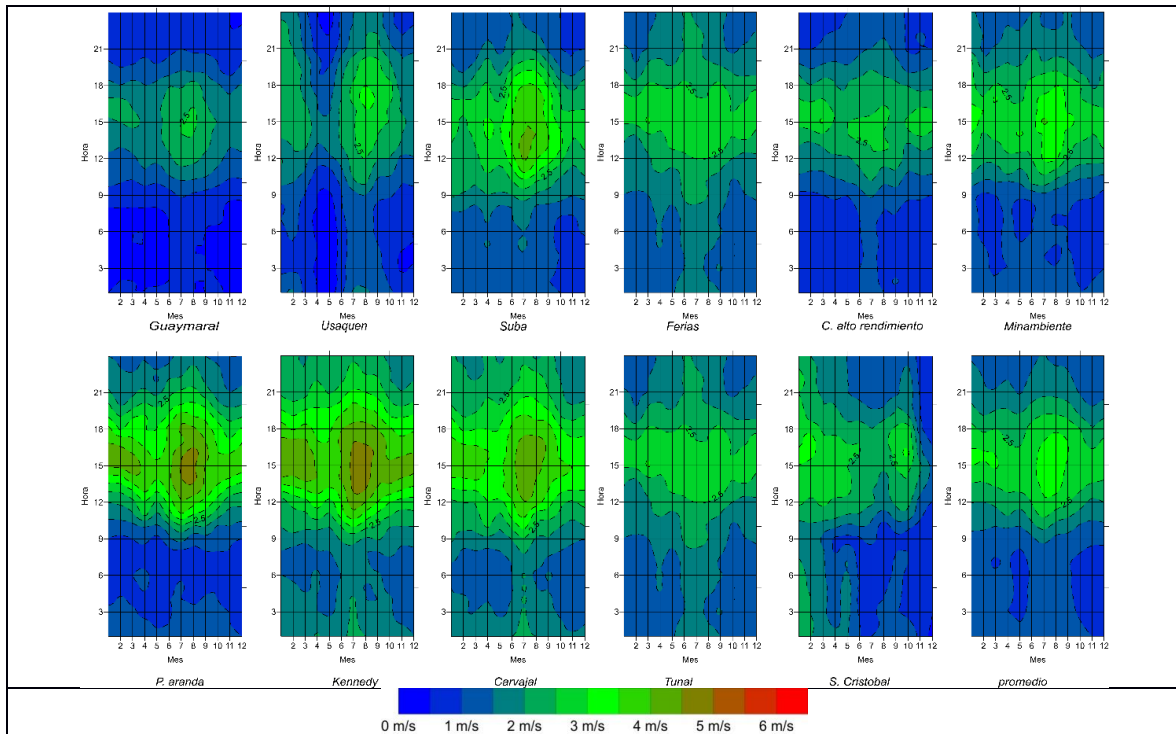


Figura 4-15. Velocidad del viento promedio de las estaciones en 2014 (el eje de las abscisas representa el mes mientras que el de las ordenadas presenta la hora).

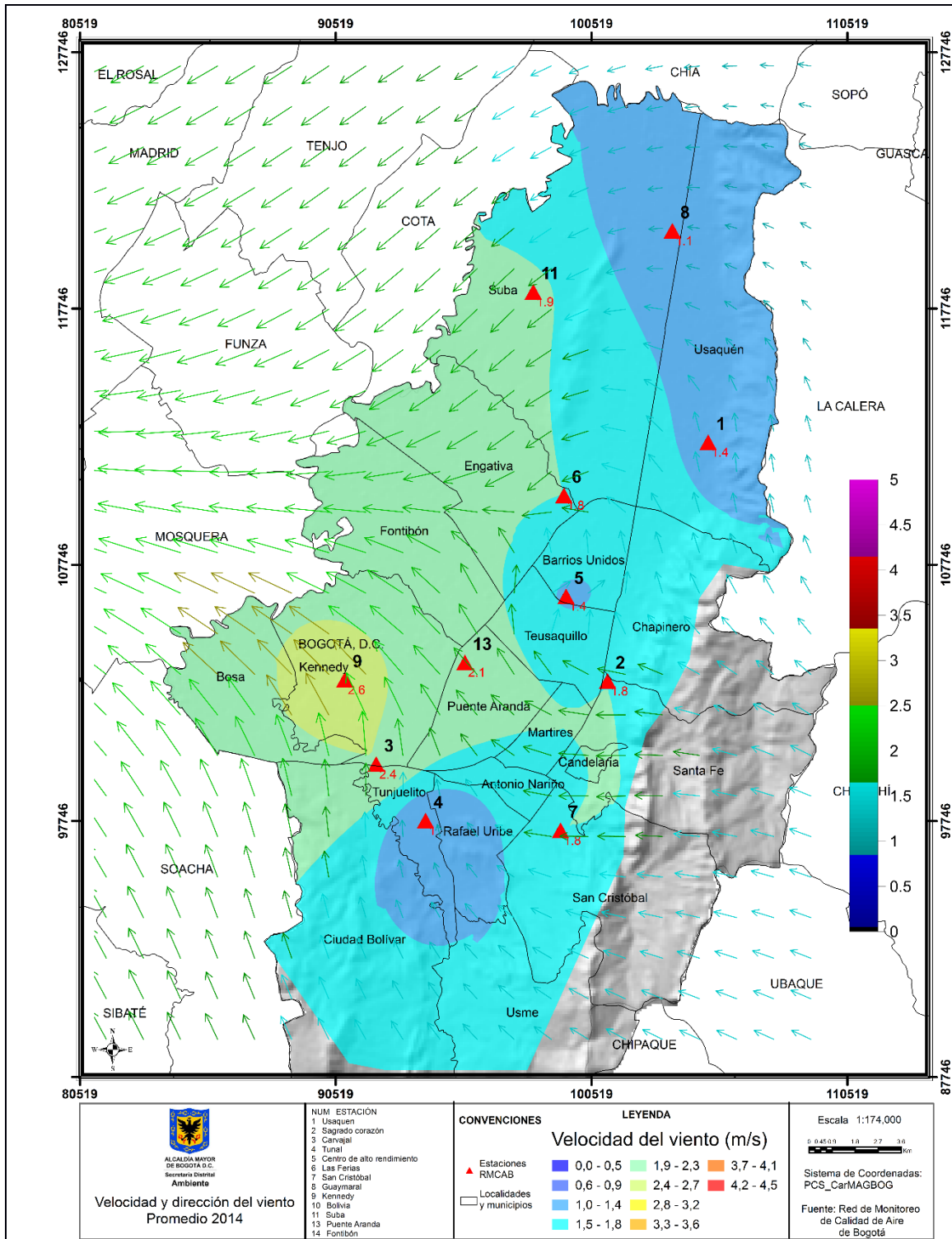


Figura 4-16. Velocidad (Superficie en colores y vectores) y dirección (vectores) del viento en Bogotá durante 2014.

4.3. Temperatura Superficial

Las estaciones consideradas en el año para la variable temperatura se presentan en la Tabla 1-1 donde se observa el porcentaje de representatividad de los datos. La temperatura del aire en la superficie (2m arriba de la ubicación de la estación en cada punto) de la ciudad mostró valores superiores a los esperados según la historia de la RMCAB y se observaron diferencias de hasta 0.6 °C (abril y noviembre), mientras que el único mes de diferencia negativa se presentó en agosto con -0.2 °C. Similar a esto, los valores promedio fueron mayores a lo reportado climatológicamente por la estación del aeropuerto EIDorado del IDEAM, como se puede apreciar en la Figura 4-17, la cual muestra el promedio de la temperatura superficial para todas las estaciones de la RMCAB que miden esta variable discriminados mensualmente, los valores de la estación del aeropuerto EIDorado del IDEAM y su comparación con el promedio de temperatura mensual de 2014.

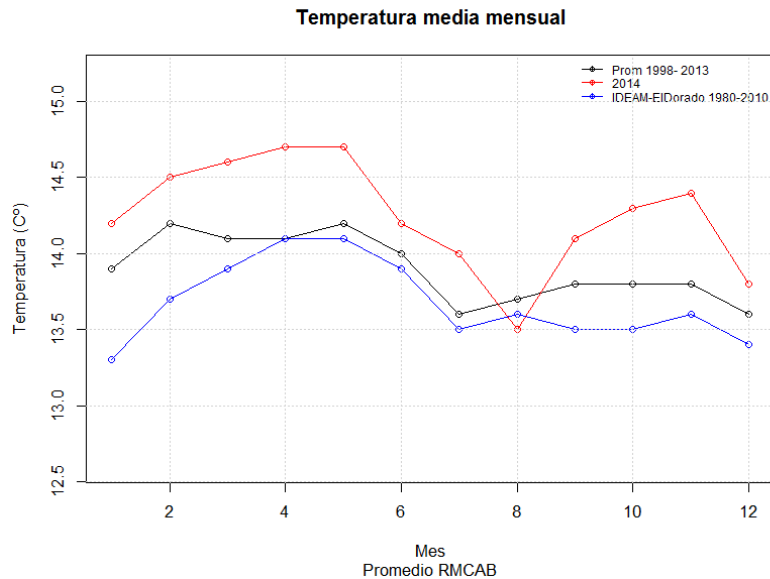


Figura 4-17. Temperatura promedio mensual de las estaciones de la RMCAB en el periodo 1998- 2013, IDEAM EIDorado 1980-2010 y RMCAB 2014.

La Figura 4-18, muestra la evolución de la temperatura media de los trimestres en el periodo 1998-2014. Como se observa, los años de mayor temperatura en Bogotá se registraron en 2002 y 2005 mientras que la menor temperatura fue en 2006 - 2008. 2014 en promedio mostró temperaturas similares en el I y II trimestre, una disminución hacia el tercer trimestre para posteriormente incrementarse en el último trimestre.

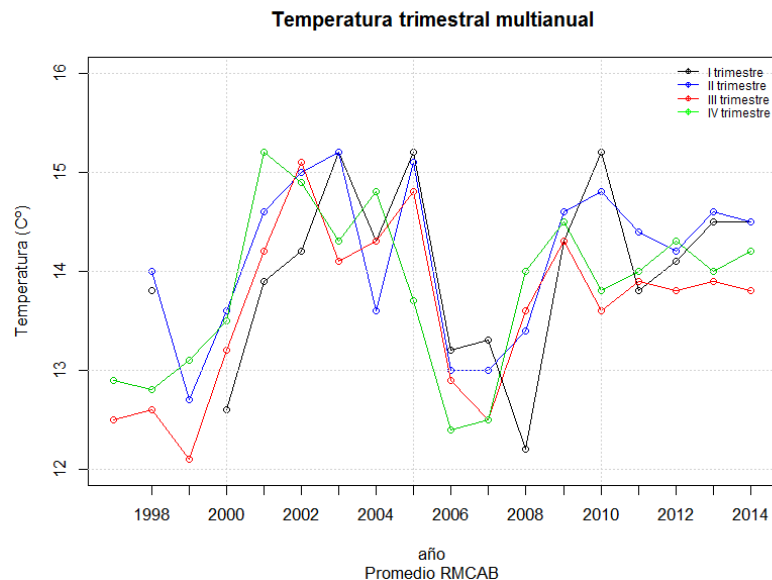


Figura 4-18. Temperatura trimestral media de las estaciones de la RMCAB en el periodo 1998- 2014.

La Tabla 4-9 muestra la temperatura superficial promedio anual distribuida en las estaciones de la RMCAB.

Tabla 4-9. Promedios de temperatura media anual de las estaciones de la RMCAB en el periodo 2000-2014.

Estaciones	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Carvajal-Sevillana							12.2	11.2	14.1	15.4	15.5	15	15.2	15.5	15.5
Cazuca							12.3	11.7	13						
Centro de Alto Rendimiento									13.9	14.7	14.8	14.5	14.6	14.8	14.8
Fontibón	13.6	13.9	14.1	14.2	13.9	14.2	14.1	13.9	14.1	14.7	14.5	13.6	13.8	14.1	
Guaymaral									13.9	14.4	14.8	14.3	14.3	14.6	14.6
Kennedy									13.6	14.8	14.8	14.4	14.5	14.8	14.9
Las Ferias	15.6	16	16			15.9			13.3	14	14.2	13.7	13.9	14.2	14.2
Puente Aranda	14.1	14.5	14.6	14.7	14.5	14.8	14.6	14.6	14	14.6	14.6	14	13.8	13.7	14
San Cristóbal											13.5	13.7	13	13.1	13
Suba	10.6						12.6	13.2	13.7	12.9			14	14.3	14.3
Tunal										14.6		13.2	13.4	13	13.1
Usaquén									11.9	14.5	15.1	14.4	14.4	14.8	14.7
USME							11.8	12.5	13.4						
Vitelma								11.7	11.5		12.9				
Promedio				13.5	14.8	14.9	14.4	14.2	14.9	12.9	12.7	13.4	14.5	14.5	14.1

Adicionalmente la Tabla 4-10 presenta el comportamiento de las temperaturas máximas y mínimas relativas en cada estación, así como la amplitud térmica durante el año. En ella se observa que la estación de mayor amplitud corresponde a Guaymaral con un promedio de 11.3°C seguido de Suba con 11,2°C mientras que la estación de Puente Aranda se consolida como la de menor amplitud con 7.0 °C. Pueden asociarse estos resultados con la presencia de nubosidad que no permite el ingreso y salida de radiación en la superficie. Esto se puede apreciar en la Figura 4-19 donde se presenta el comportamiento de las temperaturas máximas y mínimas de los últimos años y lo observado en el año. Las temperaturas máximas tendieron a ser menores durante la mitad del año y de mayor

magnitud en el resto del periodo comparado con la historia de la red y con lo esperado en el aeropuerto EIDorado; las temperaturas mínimas presentaron un valor ligeramente por encima del promedio salvo en los meses de mayo, agosto y diciembre donde los valores fueron cercanos al promedio.

Tabla 4-10. Temperaturas máximas, mínimas y amplitud térmica registradas por la RMCAB en el año y su amplitud térmica.

ESTACIÓN	TEMPERATURA MÁXIMA (°C)	TEMPERATURA MÍNIMA (°C)	AMPLITUD TÉRMICA (°C)
Carvajal-Sevillana	20.1	12.2	8
Centro de Alto Rendimiento	20.9	10.1	10.9
Guaymaral	20.9	9.6	11.3
Kennedy	19	11.7	7.2
Las Ferias	19.2	10.6	8.6
Puente Aranda	18	11	7
San Cristóbal	17.4	9.7	7.7
Suba	20.8	9.6	11.2
Tunal	19.4	8.7	10.8
Usaquén	19.6	11.5	8.2

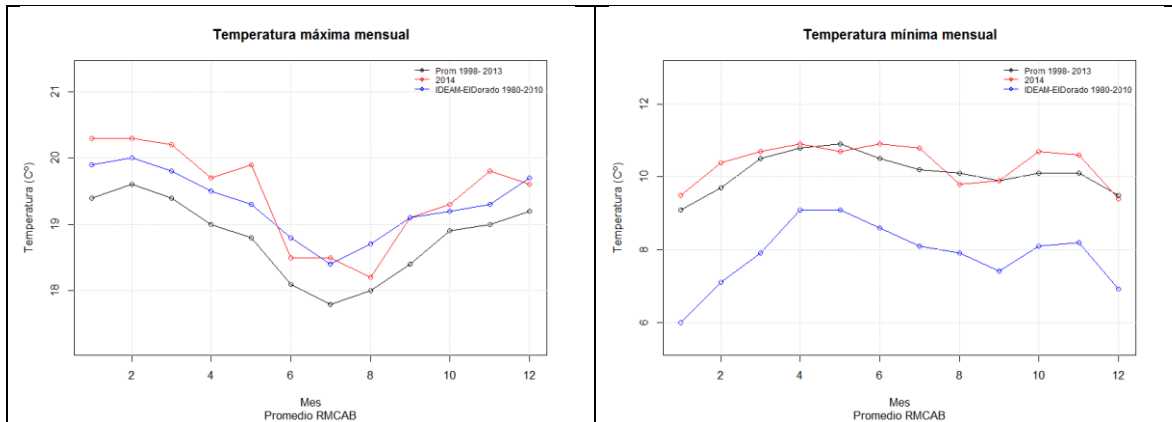


Figura 4-19. Temperatura máxima y mínima relativa mensual de las estaciones de la RMCAB en el periodo 1998- 2013, IDEAM EIDorado 1980-2010 y en 2014.

La Figura 4-20 presenta las condiciones de temperatura promedio para cada estación discriminado por mes y por hora, en donde la escala de colores tiene unidades de °C; en esta sección se observa que las temperaturas máximas y mínimas influyen en el comportamiento promedio de algunas estaciones que no se caracterizan por tener los valores máximos promedio; es decir, estaciones como Guaymaral, Suba y Centro de alto rendimiento presentan jornadas calurosas durante el día y frías en las noches, a diferencia de estaciones como Kennedy y Carvajal-Sevillana que mantienen condiciones menos calurosas durante los días y más cálidas hacia las noches. Resulta significativo mencionar que en Kennedy no se presenta la bimodalidad de temperaturas máximas observadas en el resto de estaciones, alcanzando un pico máximo en julio. También es notorio el comportamiento de las temperaturas de los últimos meses en las estaciones de Kennedy y Carvajal-Sevillana en donde encuentra dos máximos a diferentes horas; el primero a las 4 pm y el segundo cerca de la 1 pm.

El mapa de la Figura 4-21 muestra la ciudad de Bogotá con la distribución de las estaciones geográficamente y la interpolación de los promedios de temperatura para el año sobre esta superficie. Cada isoterma está separada según se esquematiza en la barra de colores. Los

sectores sombreados, principalmente al oriente y sur, corresponden a terrenos que por su condición orográfica, entre otros, no pueden ser representados mediante métodos de interpolación. En este mapa se puede observar que la menor temperatura se encuentra al suroriente de la capital, muy cerca de los promedios más altos de temperatura al sur de la localidad de Kennedy donde resalta el gradiente de hasta 2.4 °C en una distancia no mayor a 2.9 Km. Hacia el oriente, localidades como Chapinero, Usaquén y norte de Suba presentan valores ligeramente por encima de lo ocurrido en zonas como Engativá, Fontibón y sur de Suba.

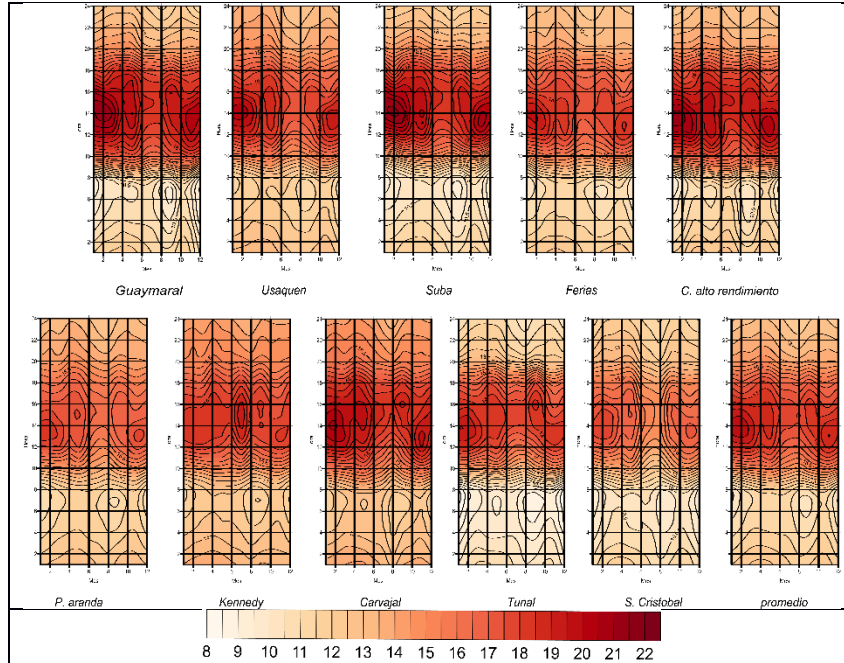


Figura 4-20. Temperatura promedio de las estaciones en 2014. (La escala de colores tiene unidades de °C, el eje de las abscisas representa el mes y el de las ordenadas presenta la hora).

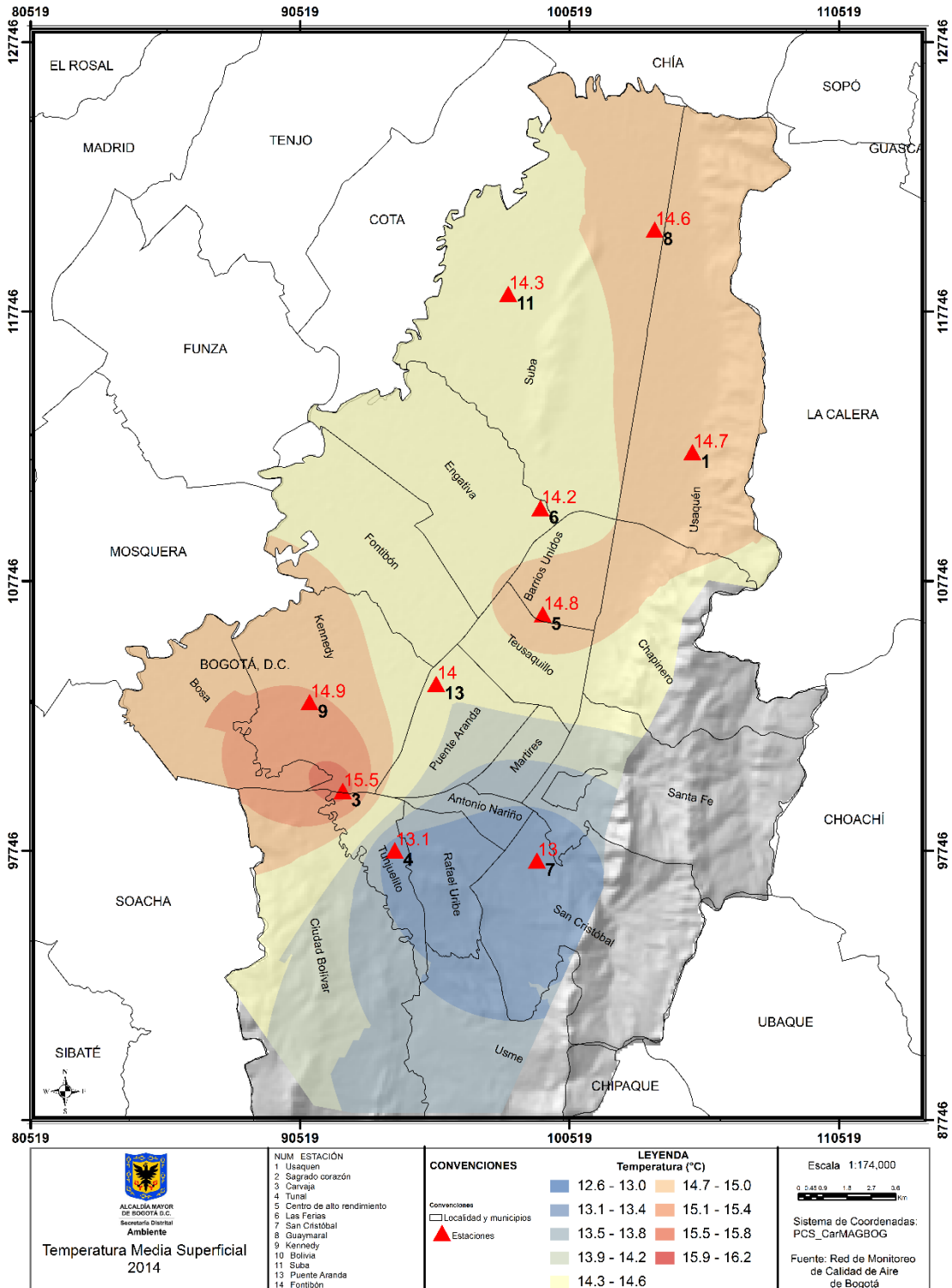


Figura 4-21. Mapa de Temperatura superficial de las estaciones de la RMCAB en 2014.

4.4. Radiación solar

El comportamiento de la radiación solar global fue monitoreado por las estaciones descritas en la Tabla 1-1 la cual presenta la representatividad de los datos durante el año. En la Tabla 4-11 se presenta el acumulado promedio trimestral en W/m^2 y anual para las estaciones de la red y su promedio, estableciendo a San Cristóbal como la estación de mayor acumulado anual y en todos los trimestres salvo en el tercero, donde fue superada por la estación de Kennedy, Guaymaral y Tunal.

Tabla 4-11. Radiación en W/m^2 acumulada promedio trimestral y anual de la RMCAB

Estación	Tri_1	Tri_2	Tri_3	Tri_4	Acum_anual
Centro_de_Alto_Rendimiento	4135	3913	3683	3728	3865
Guaymaral	4837	3787	3968	3903	4124
Kennedy	4332	3578	4013	3902	3956
San_Cristobal	4911	4745	3924	4432	4503
Tunal	4152	3566	3946	3371	3759
promedio_RMCAB	4473	3918	3907	3867	4041

La Figura 4-22 muestra en el eje de las abscisas el mes y en las ordenadas la hora, entre las 6 am y las 7 pm; la gama de colores presenta el acumulado de radiación. Concordante con la Tabla 4-11, San Cristóbal presenta los mayores acumulados a lo largo del año con valores máximos que inician en el primer trimestre hacia el mediodía, a mitad del año a la 1pm y finalizando el periodo en octubre entre las 11a.m y las 12m. Estaciones como Guaymaral y Kennedy presentaron sus mayores acumulados el primer trimestre en horas cercanas al medio día. Fue constante la disminución de la radiación en horas de la tarde en el mes de noviembre y las crestas hacia inicios y mitad de año en todas las estaciones; los comportamientos en las estaciones de Centro de alto rendimiento y Kennedy son similares en cuanto a variabilidad e intensidad.

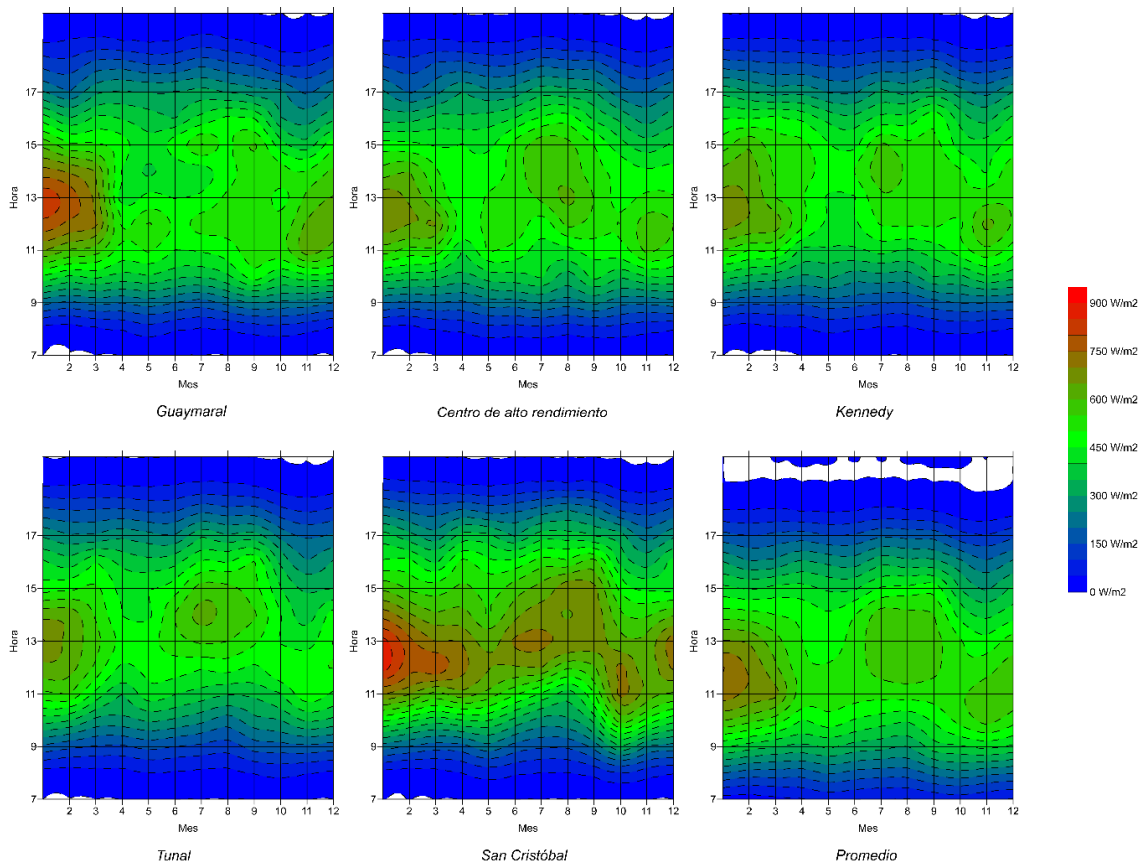


Figura 4-22. Acumulado de radiación de las estaciones (el eje de las abscisas representa el mes mientras que el de las ordenadas presenta la hora).

La Figura 4-23 presenta el comportamiento de la radiación solar durante los últimos trimestres, desde 2008 hasta 2014. En 2014 salvo el primer trimestre, tendieron a estar similares los acumulados, situación que no ha sido común en los años anteriores. De igual forma se nota que en promedio, los valores de radiación fueron superiores al promedio de la red (Figura 4-24); la diferencia más significativa se encontró en el mes de marzo.

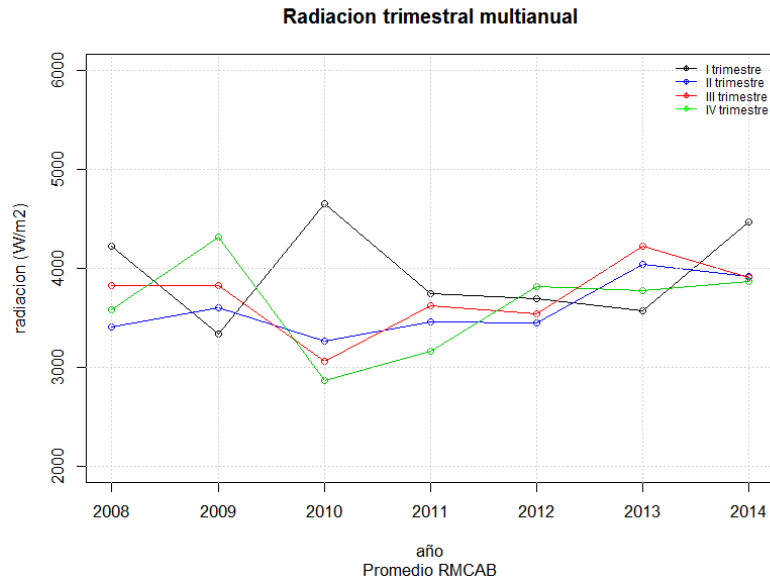


Figura 4-23. Radiación trimestral de los últimos años.

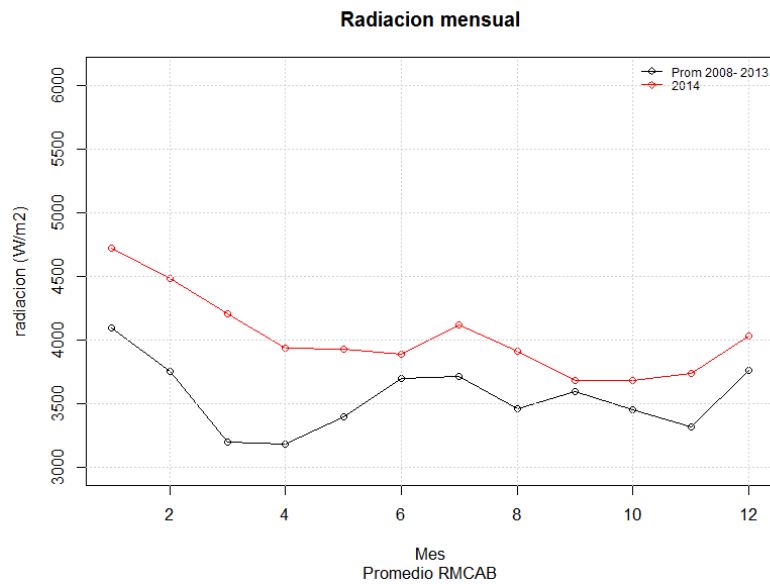


Figura 4-24. Radiación mensual de los últimos años.

4.5. Presión Atmosférica

Los datos de presión atmosférica se registraron en las estaciones mostradas en la Tabla 1-1. Las estaciones que miden la presión presentaron un comportamiento regular según su ubicación la cuál en general, depende de la ubicación geográfica (mayor presión en estaciones ubicadas al occidente de la ciudad).

La Figura 4-25 muestra la presión atmosférica discriminada mensualmente, se observa la monomodalidad característica para la ciudad de Bogotá y que durante el gran parte del año

la presión estuvo por encima del promedio salvo en los meses de mayo, septiembre y octubre. En la Tabla 4-12 se presentan los datos promedio anuales de presión por estación en los últimos años.

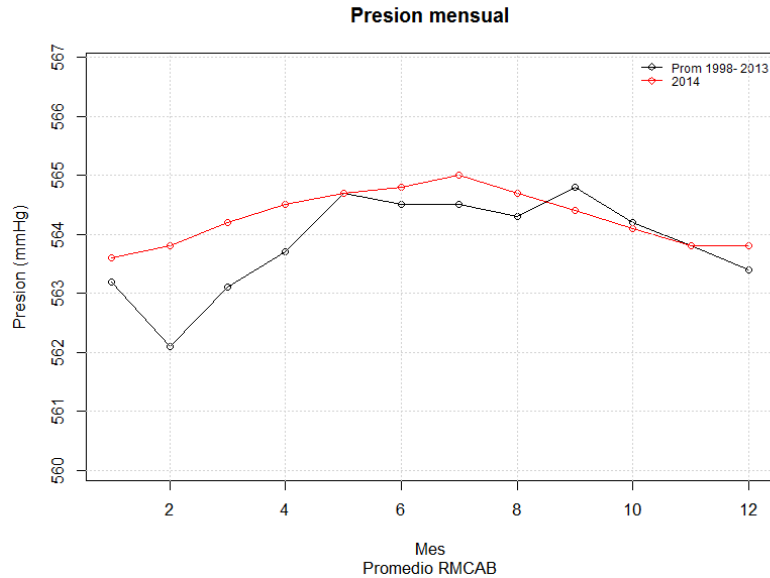


Figura 4-25. Presión atmosférica mensual de las estaciones de la RMCAB.

Tabla 4-12. Presión atmosférica trimestral multianual de las estaciones de la RMCAB.

Estación.	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Guaymaral	564.1	564.2	563.9	564	564	564.1
Kennedy	NA	564.1	563.6	563.7	563.7	563.7
Las_Ferías	564.7	564.7	564.4	564.5	564.6	564.5
Promedio	564.4	564.6	564.3	564.4	564.5	564.1

4.6. Humedad Relativa

La humedad relativa fue monitoreada por las estaciones de la RMCAB como se describe en la Tabla 1-1 la cual presenta la representatividad de los datos tomados. La Figura 4-26 muestra que la humedad relativa en términos trimestrales ha venido disminuyendo y que en 2014 el último trimestre presentó el mayor porcentaje de este parámetro. En la Tabla 4-13 se presentan los promedios de los últimos años en las estaciones de la RMCAB.

Tabla 4-13. Porcentaje de representatividad de los datos de humedad relativa en el año.

Estación	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Centro de Alto Rendimiento	67.9	71	68.6	66.5	66.5	67.3
Guaymaral	73.6	NA	65.1	63	62.3	65.9
Kennedy	67.5	69.2	69.9	66.1	65.2	64.5
Las Ferías	64.6	66.7	66.7	64	62.9	62.8
San Cristobal	NA	NA	NA	60.5	NA	59.1
Tunal	66.1	67.5	67.4	64.2	63.1	63
Promedio	70.2	68.6	67.6	64	64	63.8

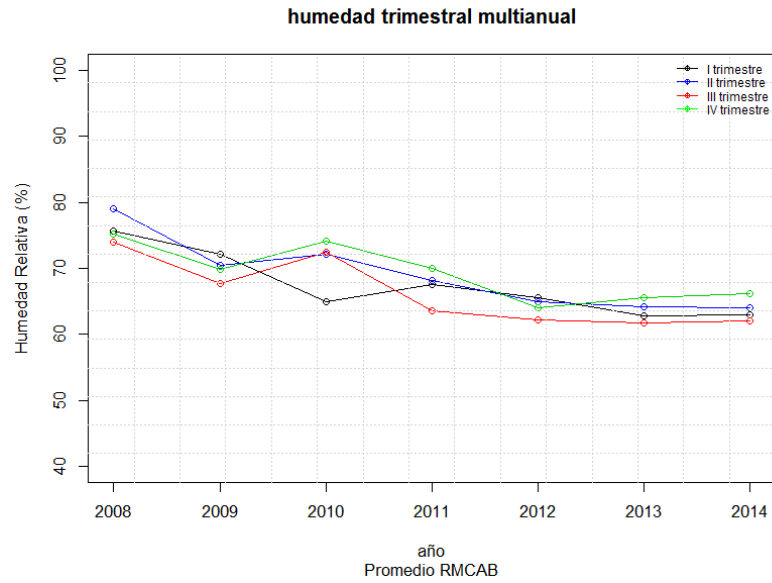


Figura 4-26. Humedad relativa mensual media del periodo 2008- 2013 y su comparación con los meses de 2014

5. Meteorología y Calidad del Aire

5.1. Análisis de vientos vs. Material particulado.

Este capítulo presenta de manera resumida las posibles relaciones existentes entre la concentración de material particulado PM_{10} y las variables velocidad y dirección del viento como explicación a los eventos observados durante el año. Se ha utilizado la información disponible y suficiente de las estaciones de la RMCAB que coincidieron por estación en las tres variables y se han dividido los análisis en 4 grupos horarios; madrugada (1 a 6 horas), mañana (7 a 12 horas), tarde (13 a 18 horas) y noche (19 a 24 horas) con el objeto de agrupar y resumir comportamientos meteorológicos típicos de la ciudad (circulación valle - montaña, convección diurna etc.). Desde la Figura 5-1 hasta la Figura 5-4 se hace énfasis en el comportamiento del PM_{10} en estos grupos horarios con sus respectivos vectores de viento (mapas del costado izquierdo) y se presenta la interpolación de *Kriging* del coeficiente de correlación de Pearson obtenido a partir de los valores de velocidad del viento y de material particulado PM_{10} , a los cuales se le ha sobrepuesto los vectores de viento también interpolados con este método (mapas de la derecha).

Al analizar los mapas se presentan varias consideraciones importantes; inicialmente lo que llama la atención es la predominancia de los elevados valores de PM_{10} durante todas las jornadas en el occidente de la ciudad. En la madrugada, los vientos que tienen características débiles o nulas tienden a ingresar por la zona sur – suroccidental iniciando su recorrido desde Ciudad Bolívar, viajando por Soacha y entrando por Bosa y Kennedy. Este tipo de comportamiento se puede explicar por el cambio de temperatura de las regiones aledañas, como se observó en la Figura 4-20 en donde las noches y madrugadas de la estación de Kennedy y Carvajal-Sevillana presentan temperaturas más elevadas que la zona circundante, particularmente las estaciones de Tunal y San Cristóbal. Estos vientos, de hasta 1.5 m/s en promedio, tienden a perder intensidad a medida que se desplazan por el área capitalina. En la figura del lado derecho, los coeficientes de correlación tienden a ser nulos hacia la zona sur de la ciudad, en especial en la estación de Carvajal-Sevillana y a ser negativos en la zona central y norte. El hecho de un aire frío cercano a la superficie terrestre en este grupo horario, permite intuir una atmósfera comprimida con elevada humedad relativa, impidiendo el proceso de dispersión de contaminantes. En la mañana, al iniciar el flujo de radiación solar (Figura 4-24), inicia el proceso de dilatación de la atmósfera, además del direccionamiento de los vientos en busca de zonas de masas de aire menos densas como consecuencia del calentamiento superficial. No obstante la dinámica de la ciudad ha ingresado una componente importante de PM_{10} que empieza a desplazarse hacia el occidente, partiendo en algunos casos de los cerros orientales y alcanzando las localidades occidentales en donde zonas de Kennedy y Bosa presentan las concentraciones más elevadas. En su mayoría, los índices de correlación son negativos salvo, nuevamente, la estación de Carvajal-Sevillana, sin embargo los valores de correlación son bajos y no se puede atribuir directamente con este análisis. En la tarde se presenta una disminución de la concentración del contaminante asociada a varios factores como el aumento de la altura de la capa de mezcla, inestabilidad atmosférica por calentamiento diurno, por aumento de la velocidad del viento y por el cambio en la dinámica de la ciudad; los vientos con componente suroriental en la zona occidental presentan velocidades de hasta 4 m/s en promedio, mientras que en el norte de la ciudad los valores oscilan entre 2 y 3 m/s, predominantes del este. Hacia el norte la tendencia es a disminuir

la concentración de PM_{10} cuando la velocidad del viento aumenta, mientras que hacia el sur la tendencia es inversa, sugiriendo un posible arrastre de contaminación desde la zona sur en las localidades de Tunjuelito y Ciudad Bolívar, de donde proviene el viento. Por la noche según se observa en la Figura 5-7 las condiciones fueron similares a las de la madrugada en términos de la concentración del PM_{10} y de la correlación con la velocidad del viento. No obstante la dirección continúa predominando del sureste al sur y del noreste este al norte de la ciudad, con velocidades que están cercanas a los 3 m/s hacia el occidente de la ciudad.

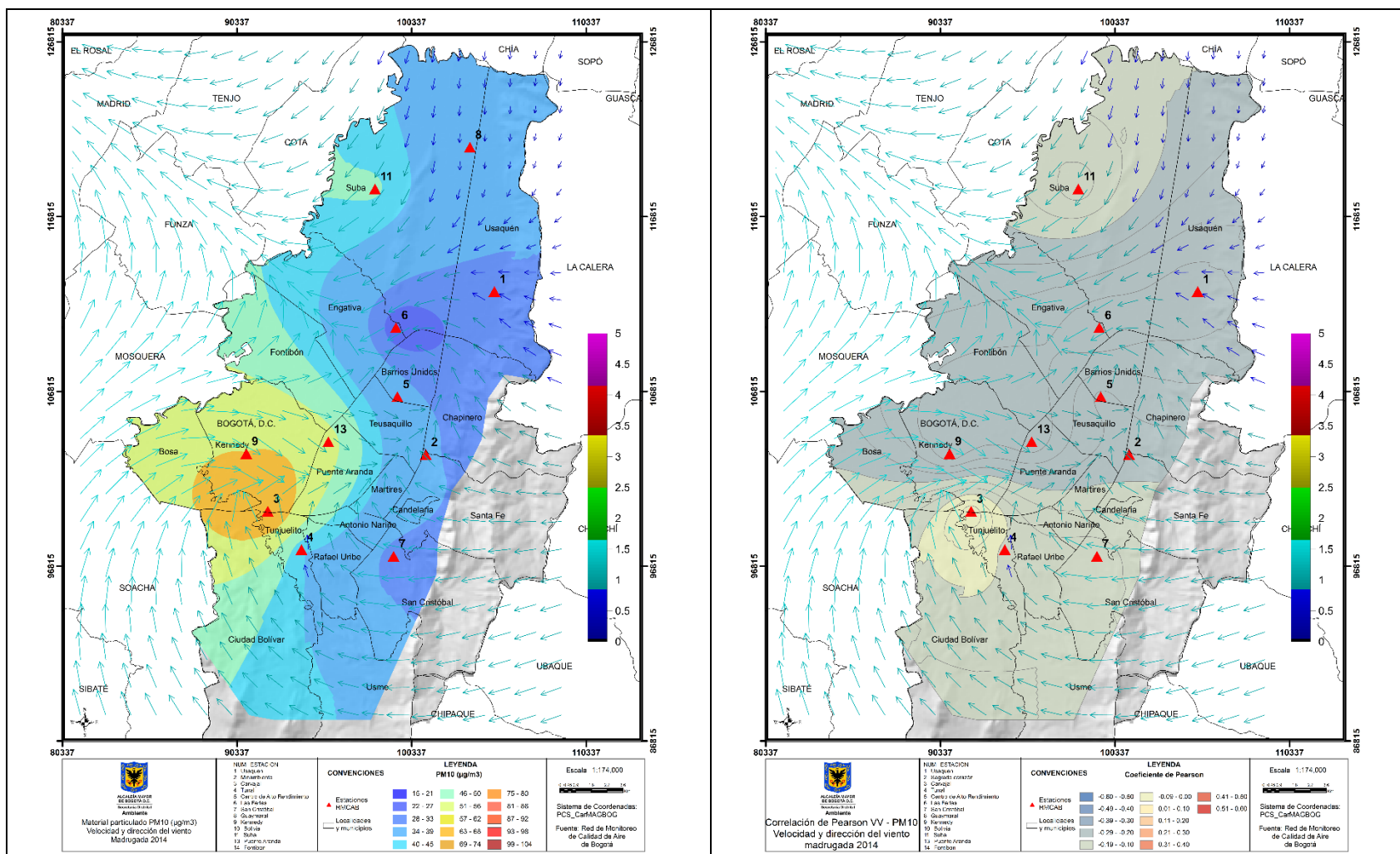
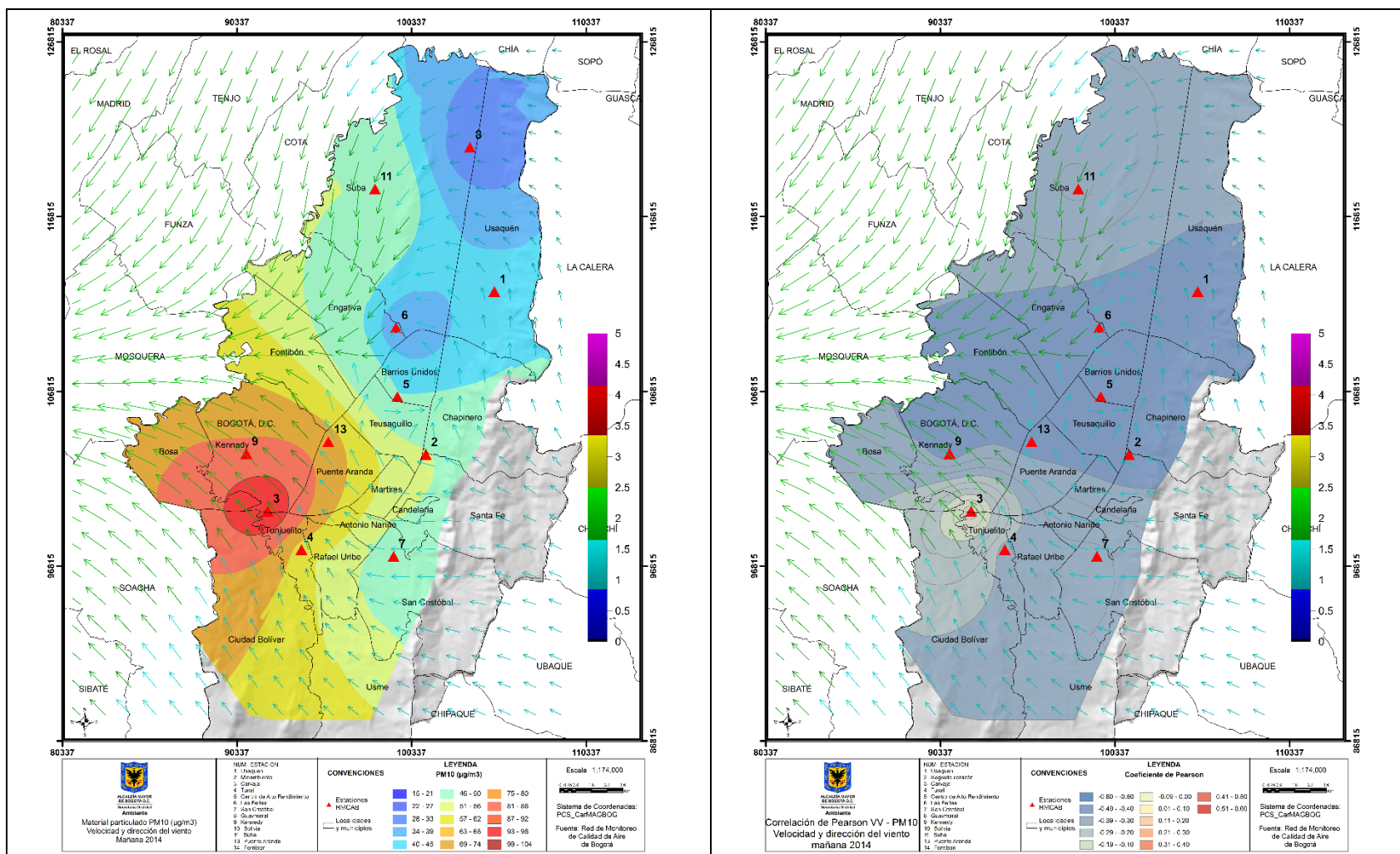
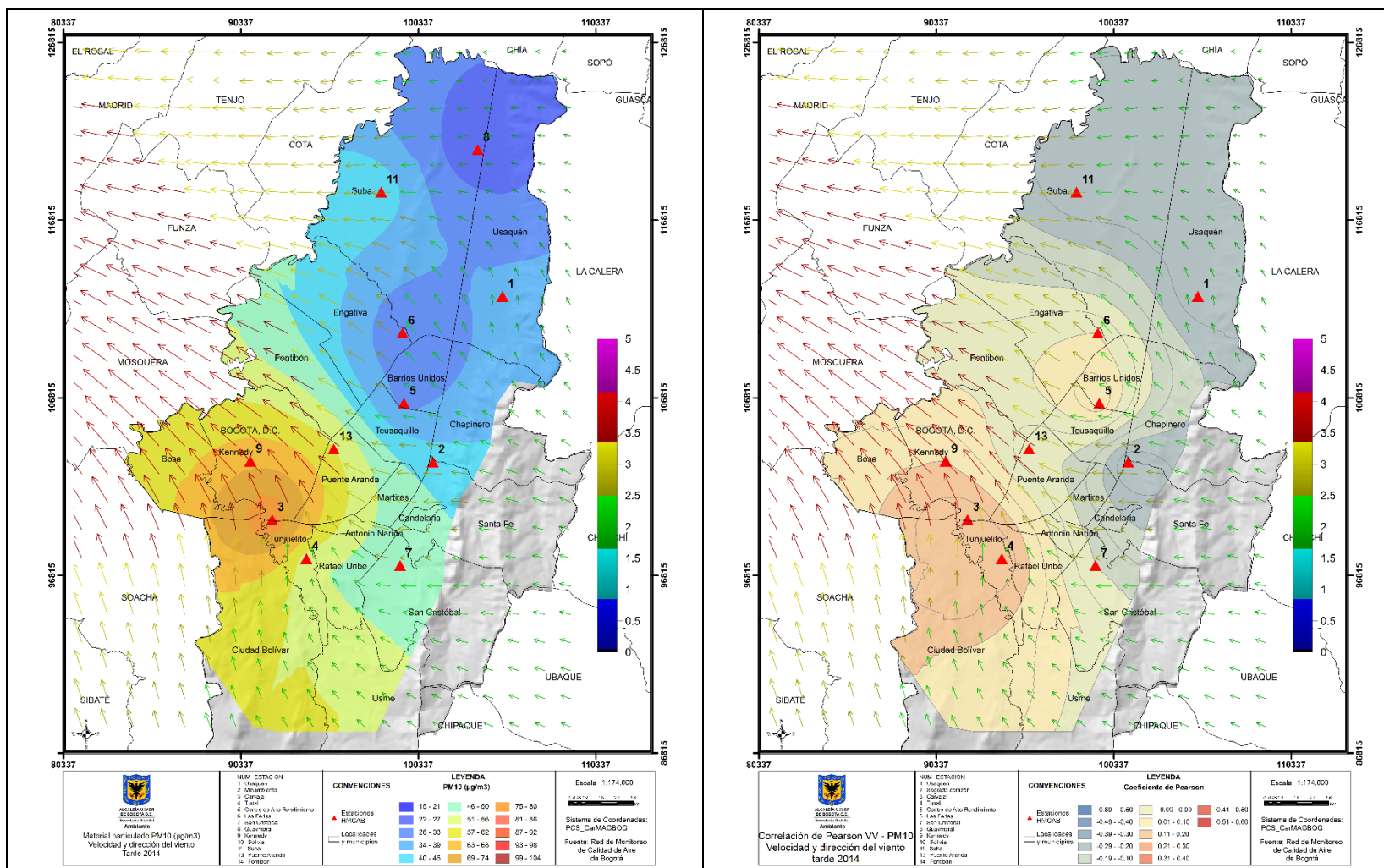
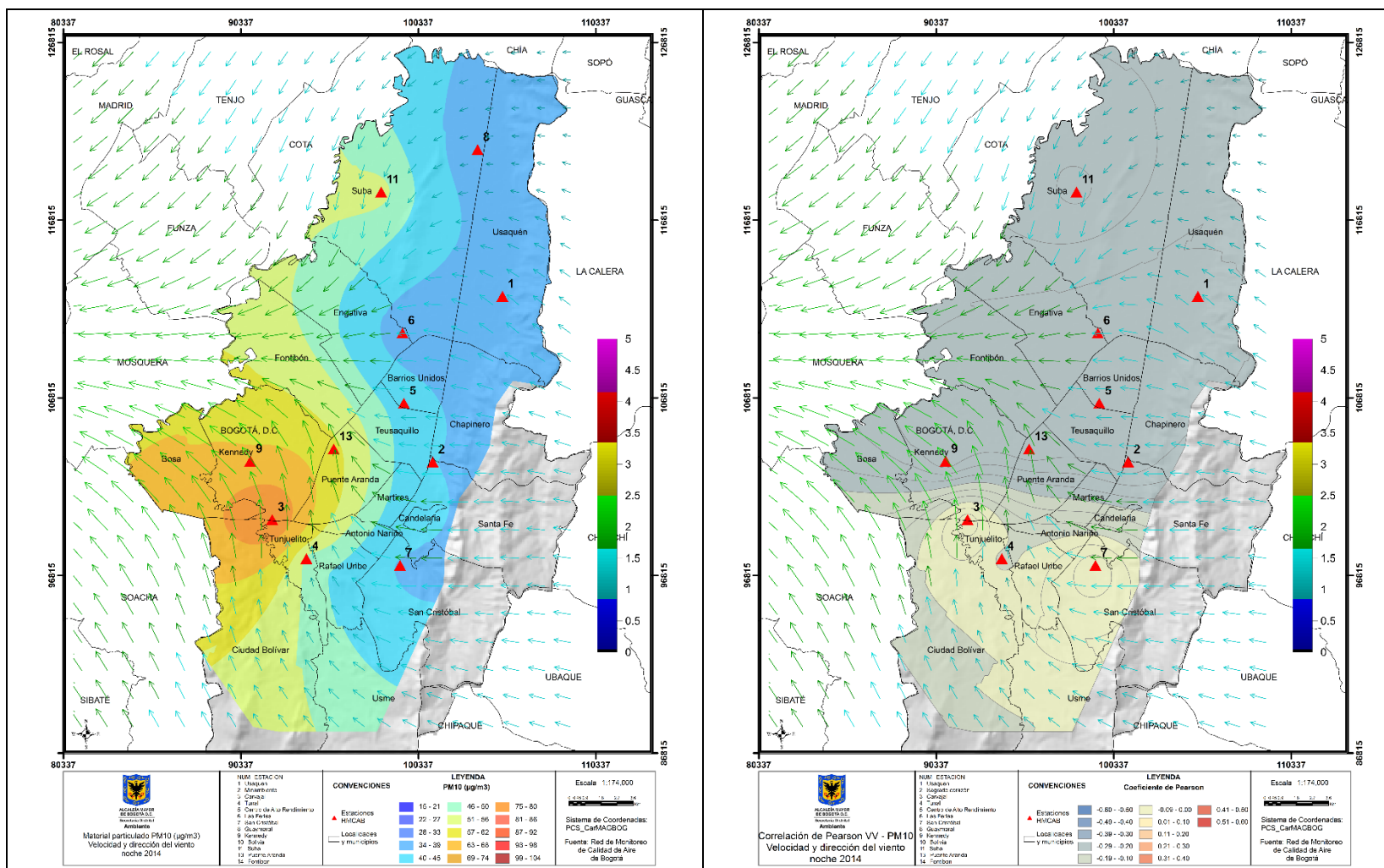


Figura 5-1. PM₁₀ (Superficie en colores figura de la izquierda); Coeficiente de correlación de Pearson (Superficie en colores figura de la derecha) velocidad y dirección (vectores) del viento en Bogotá, horas de la madrugada del año 2014.







5.2. Estudio de caso: días de máxima concentración

Esta sección presentará 2 días de altas inmisiones de material particulado, que por su naturaleza y características se han considerado relevantes para mencionar. El día 27 de junio de 2014, las estaciones de la red registraron un aumento inusual en concentración de material particulado, evento que fue asociado al ingreso de polvo proveniente de África, mientras que el día 6 de noviembre se presentó una emergencia local en Fontibón debido al incendio de una bodega que almacenaba llantas usadas.

6 de noviembre de 2014

5.2.1. Evento de incendio de llantas en Fontibón

Sitio del incendio: Calle 14 con Carrera 123

Las estaciones analizadas de la RMCAB (Puente Aranda, Las Ferias y Centro de Alto Rendimiento) evidenciaron un aumento inusual en las concentraciones de material particulado en horas de la noche del 5 y de la madrugada y mañana del 6 de noviembre con vientos provenientes principalmente del occidente.

Al corte de las 6am del 10 de noviembre, se apreciaron condiciones usuales y dentro de los rangos normales en las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en todas las estaciones de la RMCAB. Por su parte los gases SO_2 , NO_2 , O_3 y CO no presentaron incrementos significativos en lo registrado por las estaciones de la RMCAB durante el periodo del 4 al 10 de noviembre a las 6am. Además, no se presentaron excedencias de ninguno de estos gases contaminantes a la normatividad nacional. Con respecto al reporte del Índice de Calidad de Aire (ICA), todas las estaciones presentaron un comportamiento en la categoría de moderado (amarillo), lo cual se encuentra en el rango usual para Bogotá.

Para determinar las condiciones meteorológicas del día, la Figura 5-5 presenta el perfil vertical atmosférico medido por la radiosonda del IDEAM en el aeropuerto internacional El Dorado del día. Según los índices de estabilidad presentados en los diagramas ($Lift = -1.28$, $CAPE = 87.32$) las condiciones eran levemente inestables y según estos índices se podían esperar tormentas leves o moderadas, aunque durante el día no precipitó, como se observó en los datos de la red. En las primeras horas se presentaban bancos de niebla y la humedad relativa hasta el nivel de 500 hPa fue bastante elevada, en algunos casos alcanzando el 100%, mientras que los vientos en estas capas alcanzaron un máximo de hasta 10 nudos (5.1 m/s), principalmente provenientes del oeste - suroeste. A partir de este nivel se presenta una disminución moderada en la temperatura de rocío, con vientos de hasta 20 nudos (10.2 m/s) con dirección del noroeste hasta alcanzar velocidades de 30 nudos (15.4 m/s) y provenientes del sur en capas altas de la atmósfera. Debido a esto, no se observó un comportamiento significativo que inhibiera el proceso de dispersión. Los mapas de la Figura 5-6 y Figura 5-7 presentan la concentración del material particulado en 4 grupos horarios; madrugada (1 a 6 horas), mañana (7 a 12 horas), tarde (13 a 18 horas) y noche (19 a 24 horas) promedio de PM_{10} y el promedio vectorial de la velocidad y dirección del viento para esos grupos horarios. Durante la jornada, los vientos mostraron una variación significativa con lo observado durante el mes, considerando su dirección del norte con velocidades de hasta 2.5 m/s y confluyendo en zonas aledañas a las localidades

de Tunjuelito, Puente Aranda, Teusaquillo y norte de Ciudad Bolívar debido a un flujo de vientos que gira en sentido de las manecillas del reloj partiendo del sur de la ciudad. Este comportamiento fue acentuado en los grupos horarios de la madrugada y de la noche como se observa en los mapas mientras que, en horas de la mañana los vientos fueron predominantes del noroeste y durante la tarde presentaron direcciones variables con velocidades de hasta 4 m/s. En las imágenes se resalta el hecho de la confinación de concentración de material particulado en la zona de Puente Aranda, hecho que dista geográficamente del promedio de concentración de PM_{10} de la sección anterior. Asimismo se aprecia que en esta zona hay una dirección predominante en 3 de los 4 grupos, correspondiente al noroeste de donde fue conocida la emergencia ambiental ocurrida por el incendio de las llantas en la localidad de Fontibón.

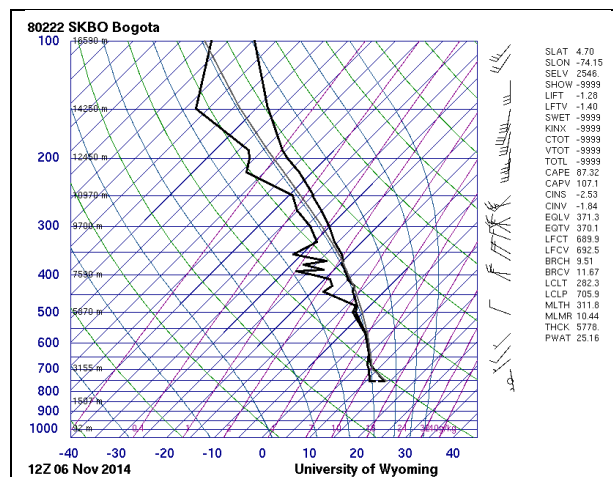


Figura 5-5. Perfil vertical atmosférico medido por la radiosonda del IDEAM el 6 de noviembre de 2014, en el aeropuerto internacional EIDorado. Tomado de la Universidad de Wyoming.

Las rosas de contaminación por material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ se presentan agrupadas en los mapas de la Figura 5-8. Se observa que Las Ferias, Puente Aranda y Centro de Alto Rendimiento tienen una contribución destacable de material particulado con vientos provenientes predominantemente del oeste, dirección hacia la que se presentó la emergencia con respecto a la ubicación de estas estaciones. Los vientos que llegan a Ministerio de Ambiente tienen direcciones más variables y una de ellas corresponde al oeste lo cual está asociado con el aumento inusual de sus concentraciones durante este día. En las estaciones ubicadas al norte (Guaymaral, Usaquén y Suba) y al sur (Carvajal-Sevillana, Kennedy, Tunal y San Cristóbal), no se observaron aumentos de concentración a causa del incendio y esto se atribuye a que los vientos que arriban a estos sitios no están predominantemente asociados al lugar del incendio.

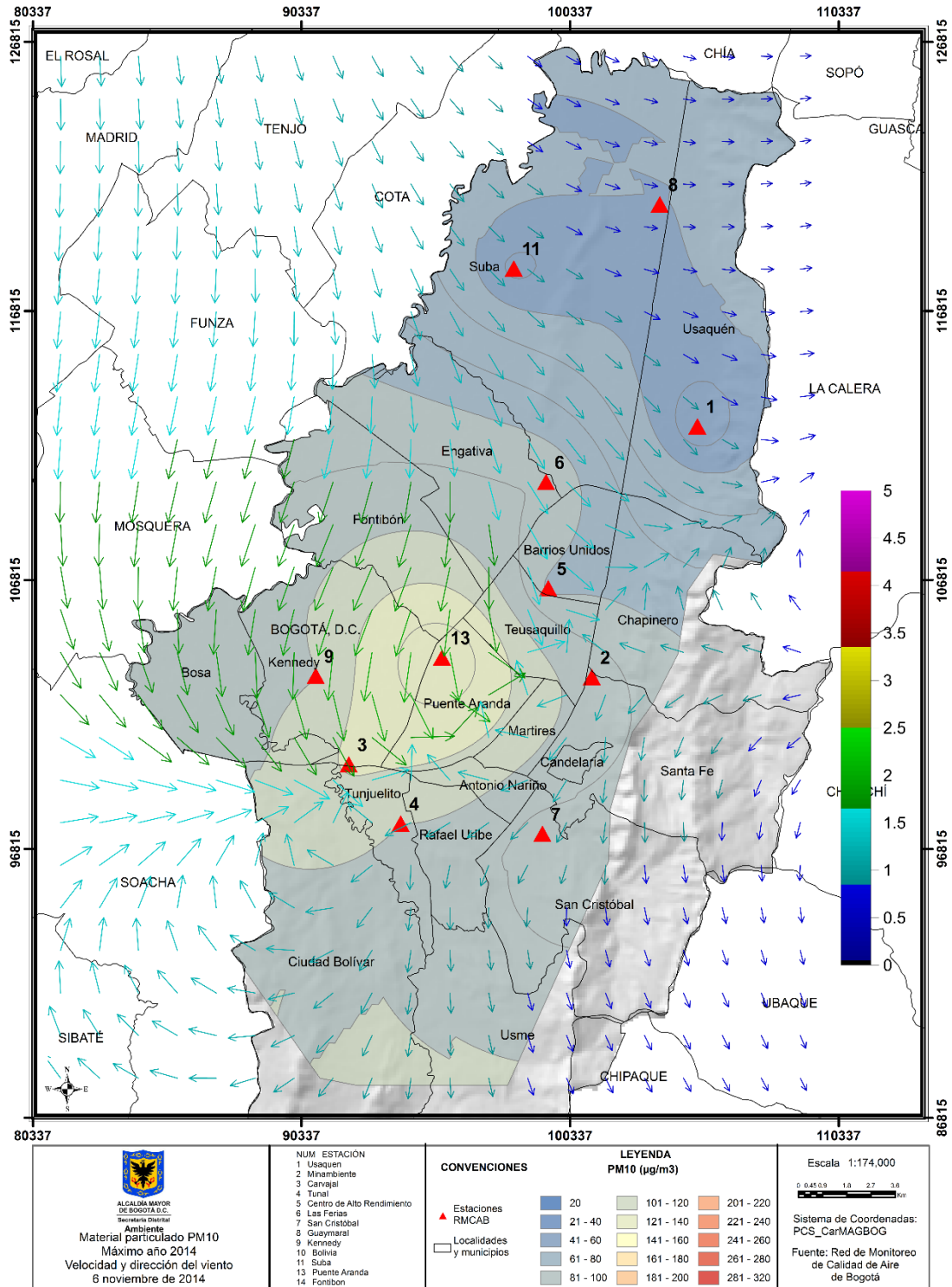


Figura 5-6 PM₁₀ (Superficie en colores figura); velocidad y dirección (vectores) del viento en Bogotá para el 6 de noviembre de 2014.

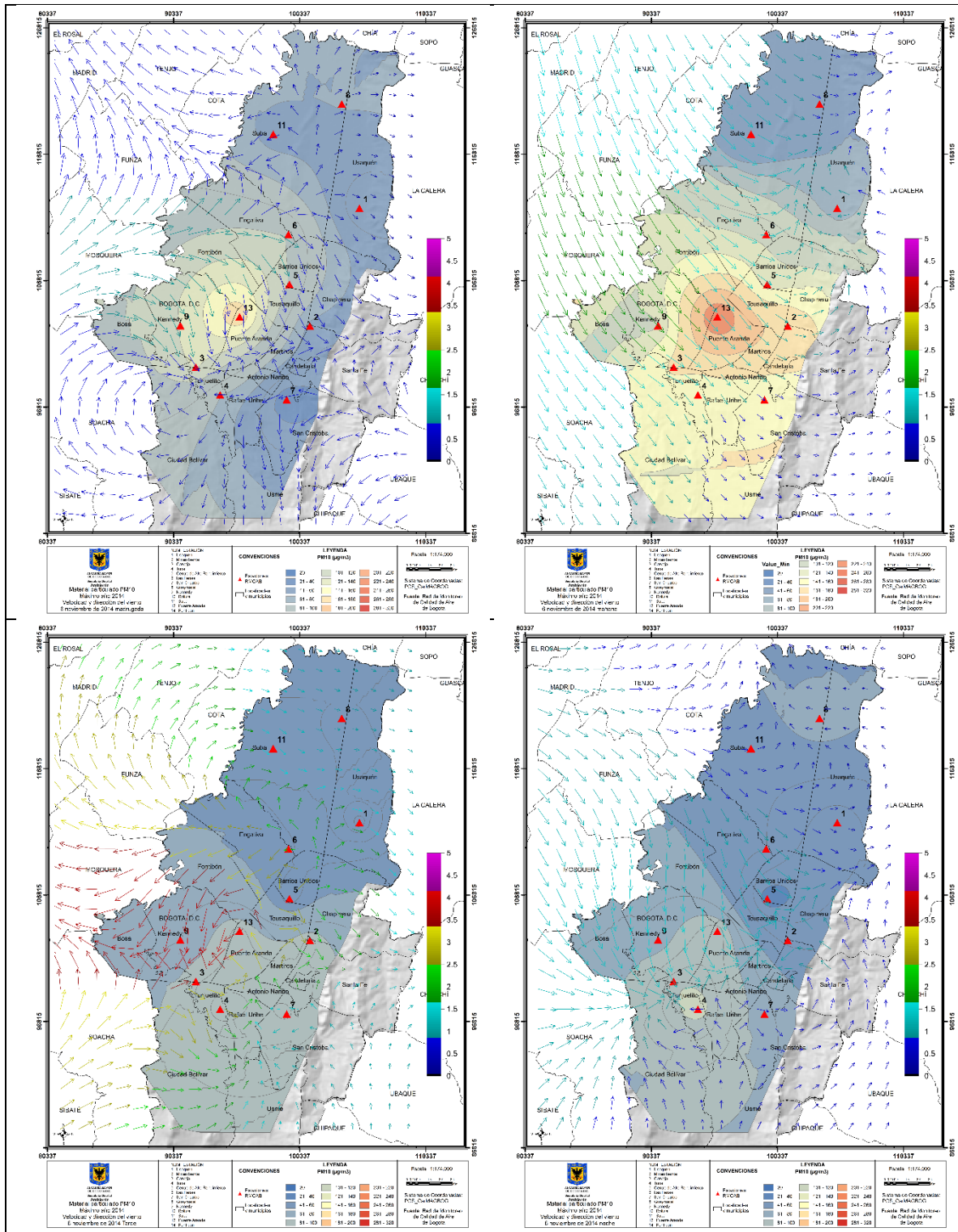


Figura 5-7. PM₁₀ (Superficie en colores figura); velocidad y dirección (vectores) del viento en Bogotá para el 6 de noviembre de 2014 en horas de la madrugada, mañana, tarde y noche.

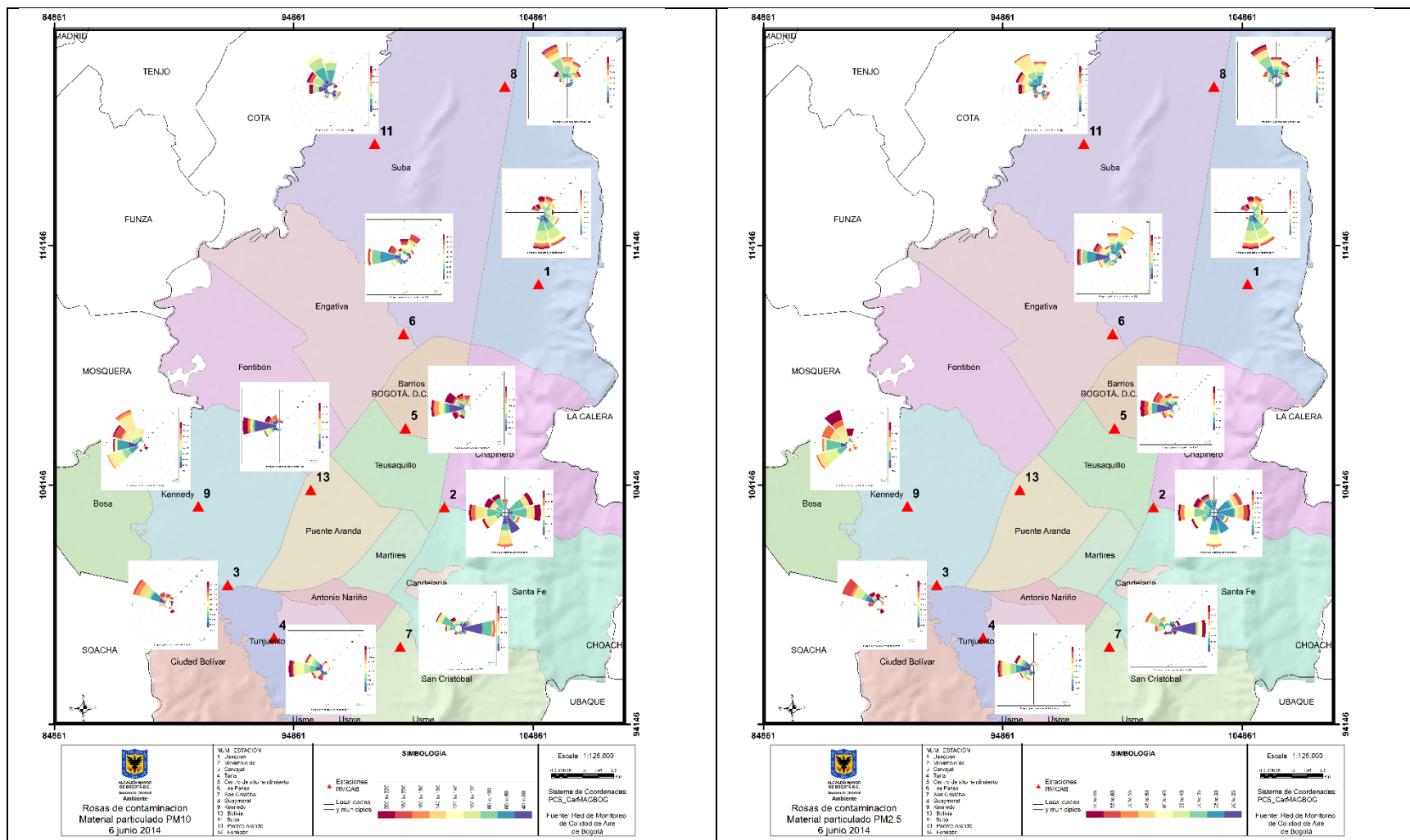


Figura 5-8. Rosas de contaminación de material particulado (a) PM₁₀ y (b) PM_{2.5} para el día 6 de junio de 2014.

27 de junio de 2014

5.2.2. Transporte de polvo del Sahara a Suramérica en junio de 2014

El 27 de junio de 2014 las estaciones de la RMCAB presentaron un aumento significativo en sus concentraciones de material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$. La Tabla 5-1 presenta los valores de estos contaminantes en dicho día. Como referencia, el límite máximo permisible en un tiempo de exposición diario es $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ (Resolución 610 de 2010 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial), el cual fue superado por la totalidad de las estaciones de la RMCAB para PM_{10} y en Las Ferias, Kennedy, Tunal y Carvajal-Sevillana para $PM_{2.5}$, especialmente para esta última. Las máximas concentraciones reportadas fueron $243 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la estación Fontibón y $77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Carvajal-Sevillana para PM_{10} y $PM_{2.5}$, respectivamente.

Tabla 5-1. Concentraciones de PM_{10} y de $PM_{2.5}$ para el 27 de junio de 2014 en las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá. Fuente: Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá.

Estación	Concentración de PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Concentración de $PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Guaymaral	133	
Usaquén	125	46
Suba	142	
Las Ferias	101	52
Centro de Alto Rendimiento	182	47
Min. Ambiente	120	43
Fontibón	243	
Puente Aranda	199	
Kennedy	161	59
Carvajal-Sevillana	240	77
Tunal	213	52
San Cristóbal	207	44

De acuerdo a las imágenes tomadas por el satélite *Suomi NPP* de la NASA, en junio de 2014 ocurrió un transporte de material particulado del desierto del Sahara. El día 23 una corriente proveniente de África Occidental inició su recorrido por el Océano Atlántico ayudada con vientos provenientes del este. En los días posteriores, se reportó que este fenómeno causó afectaciones en la calidad del aire en áreas tan remotas como el sureste de Estados Unidos (*NASA Earth Observatory, 2014*). Como puede observarse en la Figura 5-9, la corriente de polvo proveniente del Sahara se dirigió al norte de Suramérica el 25 de junio. Los datos de la RMCAB indican que esta pluma de contaminación llegó a Bogotá en días cercanos al 27 de junio de 2014 ocasionando niveles elevados de material particulado.

Las imágenes del satélite Terra de la NASA, instrumento MODIS, muestran que el polvo pudo haberse originado de Mauritania, Senegal y el Sahara Occidental, principalmente. De acuerdo a la NASA, se ha reportado que el polvo del Sahara puede tener efectos negativos

en la calidad del aire del continente americano. La Figura 5-10 presenta el índice de aerosoles para el 25 de junio de 2014 a partir de información tomada por el satélite Suomi NPP de la NASA (*NASA's Goddard Space Flight Center, 2014*). En la imagen puede observarse con mayor claridad que el polvo del Sahara proviene de países ubicados en el noroeste del continente africano, los cuales cruzan el Océano Atlántico para alcanzar finalmente el norte de Suramérica.

Comportamiento local

La Figura 5-11 presenta el perfil vertical atmosférico medido por la radiosonda del IDEAM del día, en el aeropuerto internacional El Dorado. Según los índices de estabilidad presentados en el diagrama ($Lift = 7.25$, $CAPE = 0.0$) las condiciones eran muy estables por lo cual no se registró lluvia durante el día. A la hora de la medida se presentaron algunas inversiones térmicas en capas medias, la más significativa y con un moderado gradiente de temperatura cerca de los 600 mb la cual favoreció que se mantuviera la concentración de material particulado durante algunas horas y no se iniciara el proceso de mezcla y dispersión. Es posible que por esta razón, se presentara el mayor valor de concentración de PM_{10} en horas de la madrugada, como se observa en los mapas de la Figura 5-13, en donde fue moderadamente mayor en este grupo horario y en particular en la zona suroccidental en la localidad de Fontibón, sector cuyos vientos fueron predominantes del noreste, y en el sur de la ciudad donde los vientos presentaron direcciones variables. En la mañana se mantuvieron los valores elevados de concentración en las zonas antes descritas, con una particularidad que corresponde a las altas velocidades de los vientos en la zona occidental lo cual no es común en horas de la mañana (incluso en la madrugada se presentaron vientos de hasta 2.5 m/s) con direcciones del oeste y que pudieron favorecer el transporte de contaminantes desde los municipios de la sabana occidente. Por la tarde, la concentración tendió a disminuir aunque los vientos mantuvieron velocidades elevadas; no obstante a esta hora el proceso de convección y de dispersión es más significativo que en los grupos horarios anteriores. Finalmente en horas de la noche se observaron valores normales de PM_{10} con velocidades de los vientos elevadas y direcciones predominantes del este en el norte y oriente de la ciudad, del oeste al occidente y del suroeste al sur.

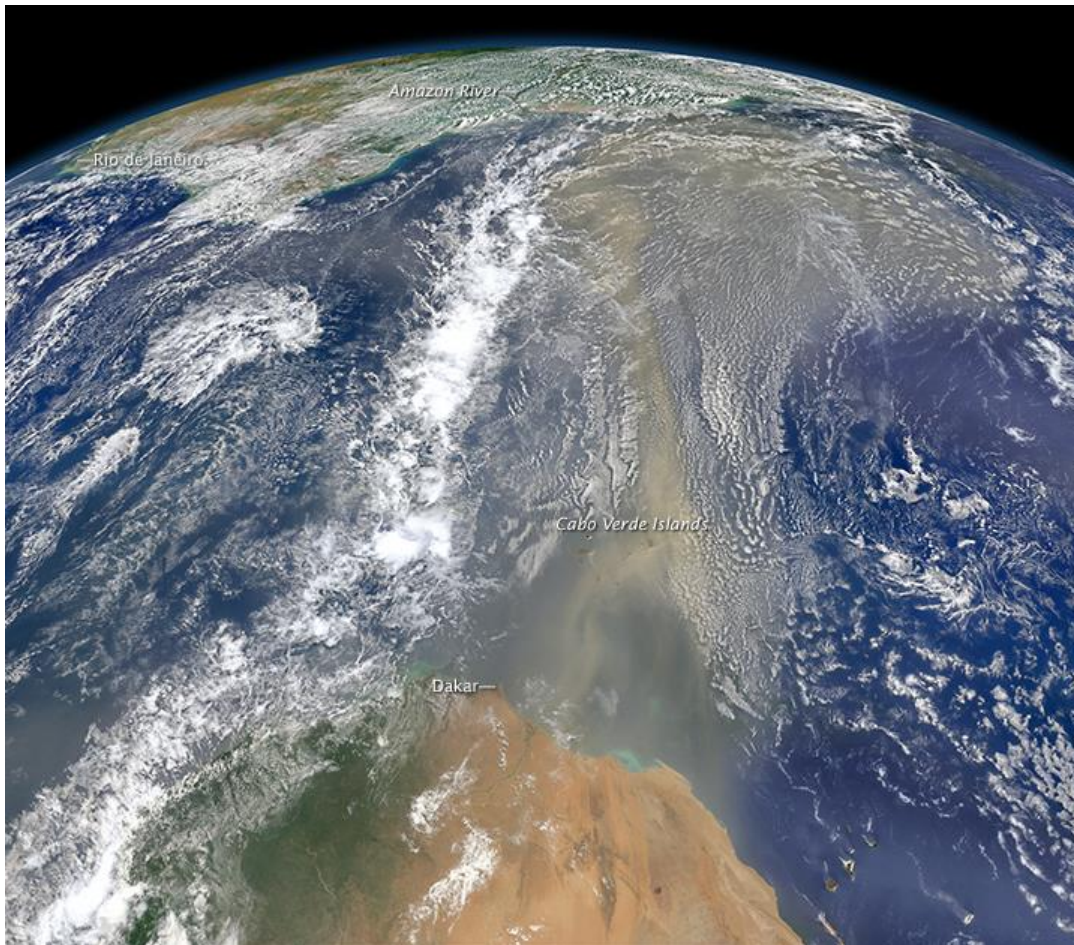


Figura 5-9. Corriente de polvo proveniente del Sahara con dirección a Suramérica. Fuente: NASA Earth Observatory (<http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=83966>). Imagen del 24 de junio de 2014.

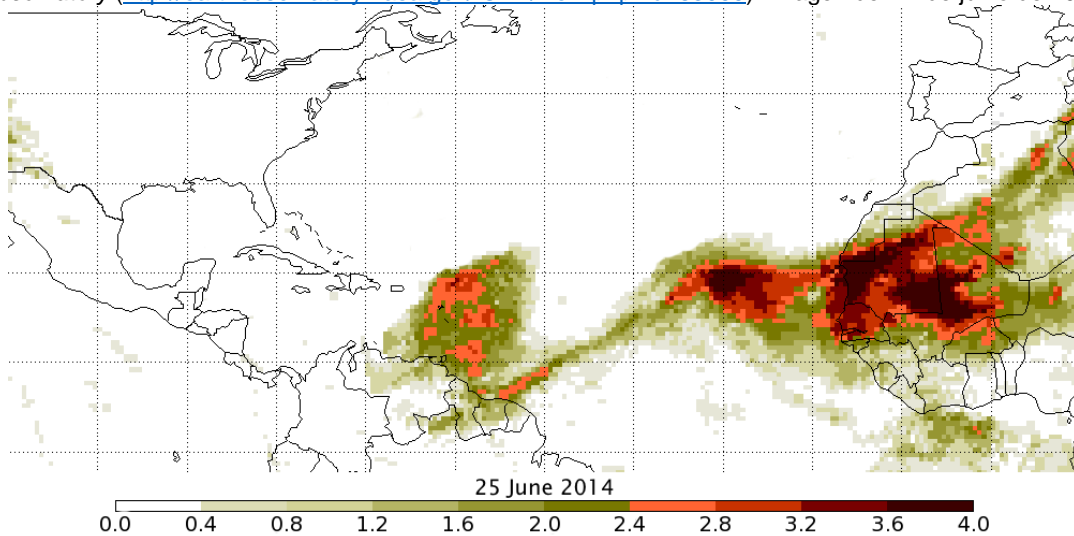


Figura 5-10. Índice de aerosoles del 25 de junio de 2014. Fuente: NASA Ozone Mapping and Profiler Suite. Fuente: <http://ozoneaq.gsfc.nasa.gov/omps/blog/2014/06/saharan-dust>

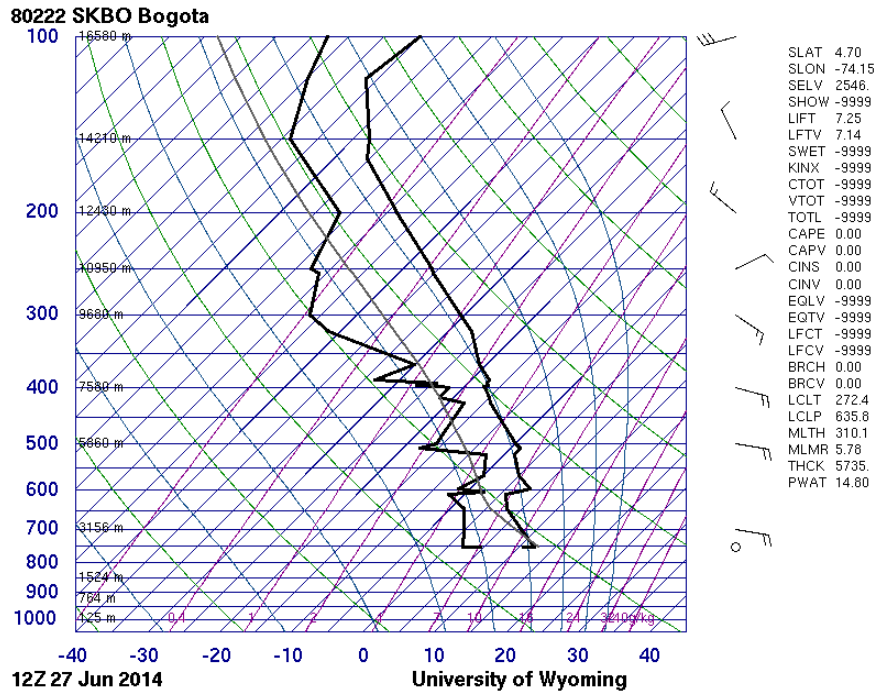


Figura 5-11. Perfil vertical atmosférico medido por la radiosonda del IDEAM el 27 de junio de 2014, en el aeropuerto internacional EIDorado. Tomado de la Universidad de Wyoming.

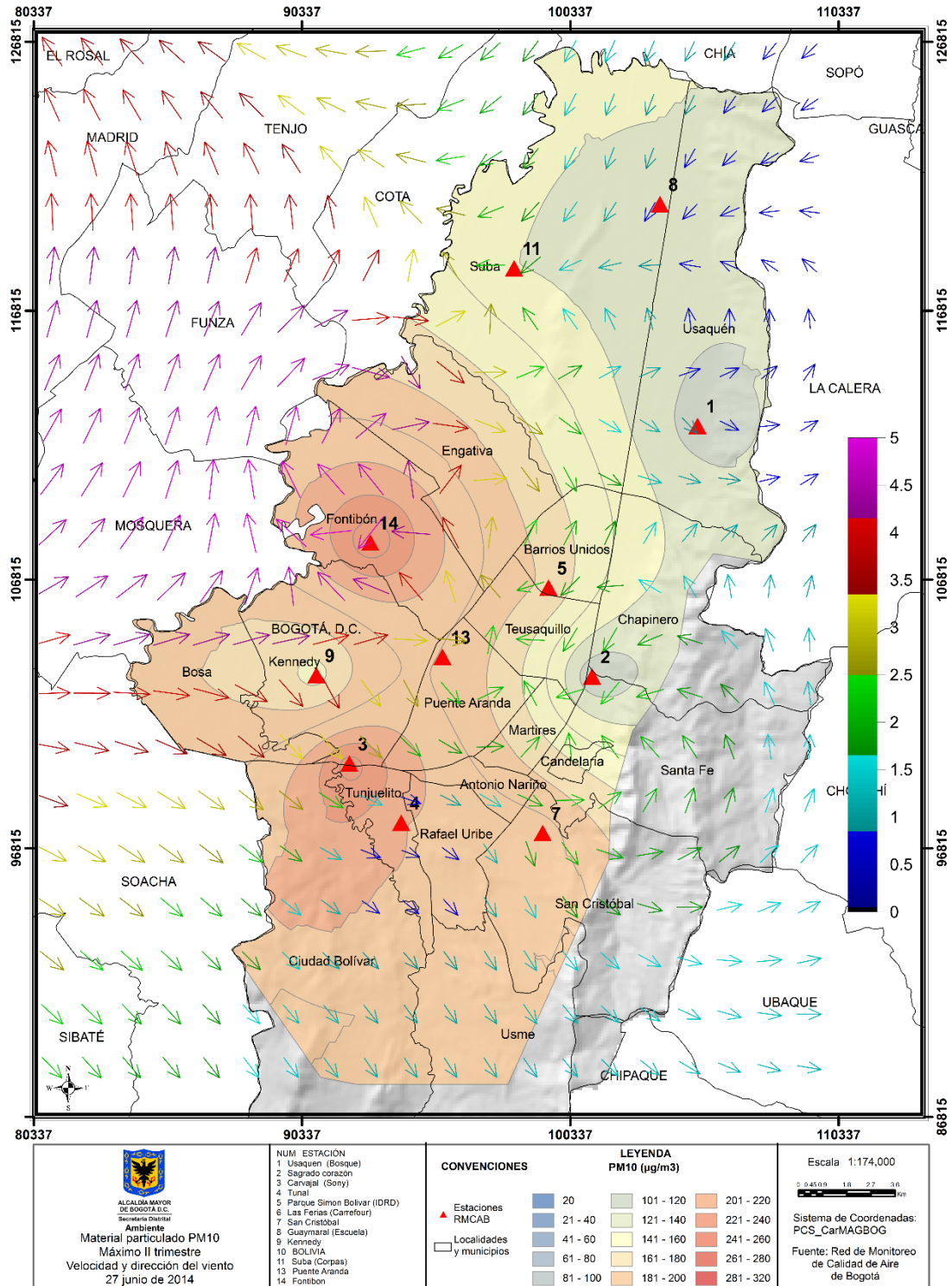


Figura 5-12 PM₁₀ (Superficie en colores figura); velocidad y dirección (vectores) del viento en Bogotá para el 27 de junio de 2014.

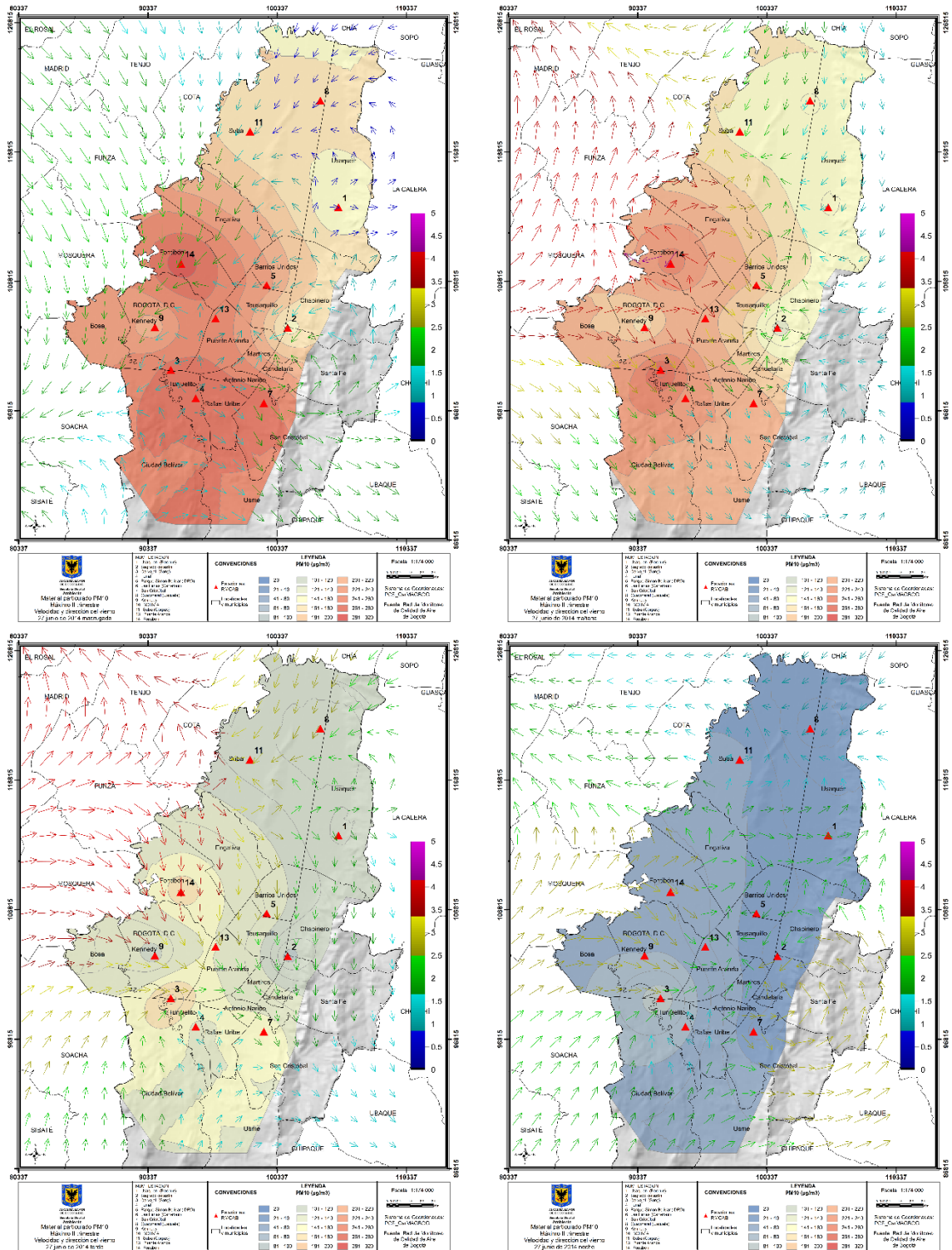


Figura 5-13. PM₁₀ (Superficie en colores figura); velocidad y dirección (vectores) del viento en Bogotá para el 27 de junio de 2014 en horas de la madrugada, mañana, tarde y noche.

Bibliografía

- Carslaw, D. (2013). *The openair manual - open source tool for analyzing air pollution data. Manual for version 0.9-0*. King's College London.
- Carslaw, D., & Ropkins, K. (2012). openair - an R package for air quality data analysis. *Environmental Modelling & Software, Volume 27-28*, 52-61.
- El Niño/Southern Oscillation (ENSO) Diagnostic Discussion*. (s.f.). Recuperado el febrero de 2014, de Climatic Prediction Center: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/enso_advisory/
- European Commission - Environment. (22 de agosto de 2014). *Air Quality Standards*. Obtenido de <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm>
- Hurtado, G. (2000). *La precipitación en Colombia*. Bogotá.
- Hurtado, G. (s.f.). *La precipitación en Colombia*.
- IDEAM. (2004). *Estudio de la caracterización climática de Bogotá y cuenca alta del río Tunjuelo*. Bogotá, Colombia.
- IDEAM. (2013). *Instituto de hidrología meteorología y estudios ambientales*. Recuperado el junio de 2013, de sitio web de IDEAM: www.ideam.gov.co
- Instituto de hidrología meteorología y estudios ambientales*. (2013). Recuperado el junio de 2013, de sitio web de IDEAM: www.ideam.gov.co
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire: manual de operación de sistemas de vigilancia de la calidad del aire*.
- NASA Earth Observatory. (5 de julio de 2014). *Saharan Dust on the Move*. Obtenido de <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=83966>
- NASA's Goddard Space Flight Center. (26 de junio de 2014). *Saharan Dust*. Obtenido de <http://ozoneaq.gsfc.nasa.gov/omps/blog/2014/06/saharan-dust>
- NOAA/ National Weather Service. Climate Prediction Center. (04 de agosto de 2014). *Historical El Niño/ La Niña episodes (1950-present)*. Obtenido de http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml
- Organización Mundial de la Salud. (2006). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. Ginebra.
- R Core Team. (2014). *R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing*. Vienna, Austria. Obtenido de <http://www.R-project.org/>
- SDA. (2011). *Plan decenal de descontaminación del Aire para Bogotá*. En S. d. ambiente, *Plan decenal de descontaminación del Aire para Bogotá*. Bogotá.
- Secretaría distrital de Ambiente. (2011). *Plan decenal de descontaminación del Aire para Bogotá*. En S. d. ambiente, *Plan decenal de descontaminación del Aire para Bogotá*. Bogotá.

- U.S. Environmental Protection Agency. (14 de diciembre de 2012). *National Ambient Air Quality Standards (NAAQS)*. Obtenido de <http://epa.gov/air/criteria.html>
- U.S. Environmental Protection Agency. (14 de agosto de 2014). *Carbon Monoxide*. Obtenido de <http://www.epa.gov/airquality/carbonmonoxide/>
- U.S. Environmental Protection Agency. (15 de agosto de 2014). *Nitrogen Dioxide*. Obtenido de <http://www.epa.gov/airquality/nitrogenoxides/>
- U.S. Environmental Protection Agency. (15 de agosto de 2014). *Sulfur Dioxide*. Obtenido de <http://www.epa.gov/airquality/sulfurdioxide/>
- U.S. Environmental Protection Agency EPA. (2014). *AIRNow. Particle Pollution (PM10) and (PM2.5)*.
- U.S. Environmental Protection Agency EPA/Office of Air Quality Planning and Standards. (2013). *Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality - the Air Quality Index (AQI)*. Research Triangle Park, North Carolina.
- U.S. Government Printing Office. (2014). *Electronic Code of Federal Regulations. Title 40 - Protection of Environment*.

Glosario

Aire: fluido que forma la atmósfera de la Tierra, constituido por una mezcla gaseosa cuya composición normal es de por lo menos, veinte por ciento (20%) de oxígeno, setenta y siete por ciento (77%) de nitrógeno y proporciones variables de gases inertes y vapor de agua en relación volumétrica.

Aire cero: es el aire sometido a un proceso de depuración por procedimientos artificiales. Se utiliza para diluir mezclas de concentración conocida de gases de referencia durante el proceso de calibración o para ajustar el cero a los equipos de monitoreo. La purificación del aire se realiza para eliminar contaminantes que alteren las concentraciones de las mezclas o la respuesta al cero de los equipos.

Agentes contaminantes convencionales: se entiende por agentes contaminantes convencionales los contaminantes primarios (monóxido de carbono, material particulado, óxidos de azufre e hidrocarburos) y contaminantes secundarios (ozono, dióxido de nitrógeno).

Analizador: equipo instrumental necesario para realizar en análisis del aire ambiente mediante el uso de las propiedades físicas y químicas y que produce señales de salida que pueden ser cíclicas o puntuales.

Anemómetro: instrumento utilizado para medir la velocidad del viento. Los dos tipos principales de anemómetros son los rotativos de cubeta y los de hélice.

Aseguramiento de la Calidad (AC): sistema integrado de actividades administrativas entre las cuales se incluye la planificación, la implementación, la evaluación, la información y el mejoramiento de la calidad para asegurar que un proceso, producto o servicio sea del tipo y calidad necesaria y esperada por el cliente. [EPA].

Auditoría: evaluación sistemática e independiente para determinar si las actividades relacionadas con el programa de calidad y sus resultados cumplen con las medidas planeadas, si esas medidas son adecuadas de acuerdo con los objetivos y si son implementadas en forma efectiva. [EPA].

Bandera: registro generado por un equipo automático de monitoreo que permite identificar el estado del dato reportado.

Barómetro: instrumento para medir la presión atmosférica.

Bitácora: libro en que se apuntan las actividades realizadas durante las visitas a las estaciones de la red de monitoreo de calidad del aire.

Calibración: conjunto de operaciones que establece, bajo condiciones específicas, la relación entre los valores indicados por un instrumento de medición, sistema de medición o valores representados por una unidad de medida y los valores conocidos correspondientes a una medición.

Cilindro de gas patrón certificado: es el recipiente que contiene un gas o mezcla de gases cuya composición ha sido medida y certificada por el fabricante.

Concentración de fondo: fracción de la calidad del aire observada que no se puede relacionar directamente con las fuentes que se estudian en el área de interés.

Concentración de una sustancia en el aire: es la relación que existe entre el peso o el volumen de una sustancia y la unidad de volumen de aire en la cual está contenida.

Condiciones normales para normas de calidad del aire: las normas de emisión previstas en la Resolución 610 de 2010 están establecidas teniendo en cuenta las condiciones de referencia de 25°C y 760 mm Hg (1 atmósfera de presión).

Confiabilidad: capacidad de un equipo o sistema de realizar su función de la manera prevista bajo condiciones indicadas.

Contaminación atmosférica: es el fenómeno de acumulación o de concentración de contaminantes en el aire.

Contaminantes: son sustancias o elementos en estado sólido, líquido gaseoso, causantes de efectos adversos en el medio ambiente, los recursos naturales renovables y la salud humana, que solos o en combinación, o como productos de reacción, se emiten al aire como resultado de actividades humanas, de causas naturales o de una combinación de estas.

Datalogger: Dispositivo que sirve para almacenar información digital temporalmente.

Diagrama de caja (box-plot): Gráfica usada en análisis estadístico que permite tener una idea visual de la distribución de los datos, determinar si hay simetría, ver el grado de variabilidad existente y finalmente detectar datos atípicos.

Ecuación para la conversión de unidades: Para hacer la conversión de unidades de concentración de partes por millón (ppm) a microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) se aplicará la siguiente ecuación:

$$C \left[\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right] = \frac{C[\text{ppm}] \times \text{PM}}{24,466} \times 10^3$$

Se adoptan las convenciones siguientes para efecto de la aplicación de la ecuación establecida en la presente definición:

$C \left[\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right]$ = Concentración dada en peso de un contaminante por unidad de volumen de aire en microgramos por metro cúbico.

$C[\text{ppm}]$ = Concentración por unidad de volumen de aire en partes por millón.

PM = Peso molecular del agente contaminante conocido en kilogramos por kmol.

24,466 = Volumen de una kmol en m^3/kmol a temperatura de 298,15 K y presión de 101,325 kPa.

Episodio de contaminación: es toda situación donde un contaminante alcanza niveles de concentración elevados en poco tiempo, de manera que puede afectar severamente la salud humana.

Equipo para Calibración: es el instrumento o conjunto de dispositivos que son patrón de referencia sobre el que se compara la operación de un equipo de medición.

Estabilidad atmosférica: característica de la atmósfera que afecta el movimiento vertical del aire.

Estación de monitoreo: es el conjunto de equipos de medición de contaminantes atmosféricos de referencia y de variables meteorológicas, manuales o automáticos, que están situados en posición estratégica dentro del diseño de una red.

Estándar de calidad del aire: valores de concentración de contaminantes que han sido aprobados como límites a cumplir en una zona determinada.

Excedencia: una excedencia de los valores límite de calidad del aire ocurre cuando la concentración de los contaminantes criterio excede los límites máximos permisibles establecidos por la Resolución 610 de 2010.

Gas de calibración: término comúnmente usado para describir cualquier gas (estándar primario o secundario) utilizado para calibrar.

Generador de aire cero: dispositivo utilizado para generar aire cero.

Hidrometeoro: fenómeno formado por un conjunto de partículas acuosas, líquidas o sólidas que caen a través de la atmósfera. Las partículas acuosas pueden estar en suspensión, ser remontadas por el viento desde la superficie terrestre o ser depositadas sobre objetos situados en la atmósfera libre. Entre los principales se encuentran la lluvia, llovizna, nieve, granizo, niebla, neblina, rocío, escarcha, chubasco y tromba.

Índice: expresión numérica, de carácter adimensional. Obtenida de la fusión de varias variables ambientales mediante criterios de ponderación específicamente definidos.

Isohuma: línea que une puntos con un mismo valor de humedad relativa sobre un plano.

Isotaca: línea trazada en un mapa que une los puntos de igual velocidad del viento.

Isoterma: es una línea trazada sobre un mapa con la que se unen puntos, donde la temperatura tiene el mismo valor.

Isoyeta: es una línea trazada sobre un mapa con la que se unen puntos, donde se registra igual cantidad de precipitación.

Material particulado: término general aplicado a partículas sólidas de dimensiones y origen diferentes, que generalmente permanecen suspendidas en un gas durante algún tiempo.

Media aritmética: es la sumatoria de todos los datos a promediar dividida por el número total de datos.

Media móvil: se calcula del mismo modo que la media aritmética para un periodo de n datos, y se va recalculando a medida que se agregan nuevos datos, partiendo del último dato y manteniendo siempre el número de datos correspondiente al periodo definido.

Método equivalente: es el procedimiento de medición y análisis señalado en la presente resolución, el cual puede producir resultados similares a los del método de referencia en la determinación de la concentración de una sustancia en el aire ambiente, y que es seleccionado para reemplazarlo.

Método de referencia: es el procedimiento de medición y análisis probado exhaustivamente, señalado en la presente resolución, que debe utilizarse para determinar la concentración de una sustancia contaminante en el aire ambiente y deberán realizarse bajo los estrictos parámetros técnicos.

Monitoreo: en el sentido más amplio de la palabra, medición continua para seguir la evolución de un parámetro durante un período de tiempo.

Nivel Normal (Nivel I): es aquel en que la concentración de contaminantes en el aire y su tiempo de exposición o duración son tales, que no producen efectos nocivos, directos ni indirectos, en el medio ambiente o la salud humana.

Nivel de exposición: concentración de un contaminante a la que está sometida la población en una zona determinada, en un momento determinado.

Nivel de Prevención (Nivel II): es aquel que se presenta cuando las concentraciones de los contaminantes en el aire y su tiempo de exposición o duración, causan efectos adversos y manifiestos, aunque leves, en la salud humana o en el medio ambiente tales como irritación de las mucosas, alergias, enfermedades leves de las vías respiratorias o efectos dañinos en las plantas, disminución de la visibilidad u otros efectos nocivos evidentes.

Nivel de Alerta (Nivel III): es aquel que se presenta cuando la concentración de contaminantes en el aire y su duración o tiempo de exposición, puede causar alteraciones manifiestas en el medio ambiente o la salud humana y en especial alteraciones de algunas funciones fisiológicas vitales, enfermedades crónicas en organismos vivos y reducción de la expectativa de vida en la población expuesta.

Nivel de emergencia (Nivel IV): es aquel que se presenta cuando la concentración de contaminantes en el aire y su tiempo de exposición o duración, puede causar enfermedades agudas o graves u ocasionar la muerte de organismos vivos, y en especial de los seres humanos.

Norma de calidad del aire o nivel de inmisión: es el nivel de concentración legalmente permisible de sustancias contaminantes o fenómenos contaminantes presentes en el aire, establecido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, con el fin de preservar la buena calidad del medio ambiente, los recursos naturales renovables y la salud humana.

Obstáculo: elemento que interfiere con la correcta toma de una muestra de aire que será analizada por un analizador automático de calidad del aire o con la correcta medición de un parámetro meteorológico.

Operaciones de puesta en marcha y parada: toda operación realizada al poner una actividad, un elemento del equipo o un dispositivo en servicio o fuera de servicio, o ponerlo o sacarlo de un estado de reposo.

Precisión: grado de concordancia existente entre los resultados independientes de un ensayo, obtenidos en condiciones estipuladas.

Promedio anual: promedio de los datos diarios de concentración del contaminante cumpliendo la representatividad temporal mínima del 75%, que para el caso equivale a un mínimo de 273 días. En el caso de PST el promedio es geométrico y no aritmético.

Promedio diario: promedio de los datos horarios del contaminante cumpliendo la representatividad temporal mínima del 75%, que para el caso equivale a un mínimo de 18 horas.

Promedio Geométrico: antilogaritmo de la media aritmética de los logaritmos de los valores observados. Su cálculo sigue la siguiente ecuación:

$$C_{\text{prom geom}} = 10^{\left[\frac{\sum_{i=1}^n \log(C_i)}{n} \right]} \quad \text{para } i = 1, 2, 3 \dots, n$$

Donde:

$C_{\text{prom geom}}$: Promedio geométrico de concentración

$\sum_{i=1}^n \log(C_i)$: Suma de los n logaritmos de los valores de concentración del contaminante i .

$10^{\left[\frac{\sum_{i=1}^n \log(C_i)}{n} \right]}$: Antilogaritmo del promedio de los logaritmos para los “ n ” valores de concentración del contaminante i .

Protocolo: plan escrito y detallado que permite realizar las actividades relacionadas con la operación de la red de manera organizada y repetida.

Protocolo de comunicación: se trata de un conjunto de reglas que hace que la transmisión entre dos máquinas sea posible, bajo criterios de calidad, eficiencia y confiabilidad. Los protocolos se pueden clasificar como: orientados a bit, cuando ellos solos proveen la información necesaria para establecer y mantener activa una conexión; y orientado a byte cuando su estructura tiene conjuntos bits de control, datos e información de protocolo.

Rango crítico: véase Rango de tolerancia.

Rango de tolerancia: Nivel de concentración máxima de un contaminante, al cual se puede exponer una población por un periodo de tiempo dado, sin tener consecuencias nocivas para su salud.

Red automática de monitoreo de calidad del aire: es el conjunto de instrumentos automáticos fijos de medición, utilizados para medir los contaminantes en el aire en forma simultánea y sistemática, con el fin de verificar la calidad del aire en una zona específica.

Repetitividad: grado de concordancia entre los resultados de pruebas independientes realizadas en una misma muestra en un período corto de tiempo por el mismo analista, usando el mismo método y equipamiento. [EPA].

Representatividad: grado en que los datos caracterizan en forma exacta y precisa a una población, a las variaciones de un parámetro en el punto de muestreo, a las condiciones de un proceso o a las condiciones ambientales. [EPA].

Sensor: dispositivo que detecta una determinada acción externa como temperatura, presión, entre otras y la transmite adecuadamente.

Sustancia: todo elemento químico y sus compuestos, según se presentan en estado natural o producido por la industria, ya sea en forma sólida, líquida o gaseosa.

Sustancias Peligrosas: son aquellas que, aisladas o en combinación con otras, por sus características tóxicas, explosivas, corrosivas, inflamables, volátiles, combustibles, radiactivas o reactivas, pueden causar daño a la salud humana, a los recursos naturales renovables o al medio ambiente.

Toma-muestras: conducto por el cual se transporta el gas a ser evaluado desde el aire ambiente hasta el equipo de medición.

Unidades: Las unidades más utilizadas son:

mg/m³: miligramos por metro cúbico.

µg/m³: microgramos por metro cúbico.

ppm: partes por millón.

ppb: partes por billón.

Validación: confirmación por medio de análisis que incluye la revisión de cada aspecto del procedimiento de medición entre los cuales están la operación del método, calibración de equipos y análisis de los datos.

Anexos

A. Lectura de Gráficos de *boxplot*

La siguiente figura presenta un ejemplo de un gráfico *boxplot*.

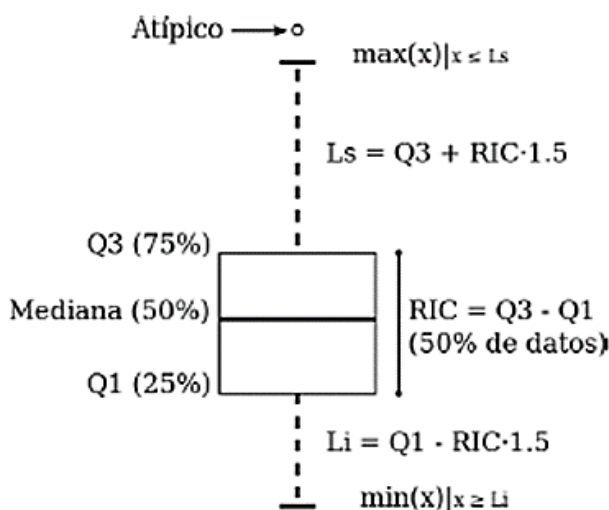


Figura 0-1. Gráfico de *boxplot* con una descripción de sus componentes.

El gráfico es construido con base en un conjunto de datos de los cuales se presume una distribución normal o gaussiana. El conjunto de datos se ordena en forma ascendente, luego los puntos presentados en el gráfico corresponden así: **mediana**, equivale al valor correspondiente al 50% de los datos. **Q1**, cuartil 1, equivale al valor correspondiente al 25% de los datos. **Q3**, cuartil 3, equivale al valor correspondiente al 75% de los datos. **Li**, límite inferior, corresponde a $Q1 - (RIC \times 1.5)$, donde RIC equivale al Rango Intercuartílico ($Q3 - Q1$). **Ls**, límite superior, corresponde a $Q3 + (RIC \times 1.5)$, donde RIC equivale al Rango Intercuartílico ($Q3 - Q1$). A los puntos por fuera de los límites se les llama valores **atípicos**.

B. Factores de conversión de unidades de concentración para gases

La siguiente tabla presenta los factores de conversión de unidades que deben ser aplicados a las concentraciones de los gases en partes por millón (ppm) y en partes por billón (ppb) para ser convertidos a mg/m³ y µg/m³, respectivamente:

Tabla 0-1. Factores de conversión de unidades para gases contaminantes. Las unidades resultantes (mg/m³ y µg/m³) estarán en condiciones de referencia correspondientes a 25°C y 760 mm Hg.

Gas	Multiplicar por	Para convertir
CO	1,1449	ppm a mg/m ³
SO ₂	2,6186	ppb a µg/m ³
NO ₂	1,8804	ppb a µg/m ³
O ₃	1,9620	ppb a µg/m ³

Es importante mencionar que el resultado de cada una de las conversiones se encuentra a una presión de 760 mm Hg y a una temperatura de 25°C, que son las condiciones de referencia según los términos establecidos en la Resolución 610 de 2010 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

El factor de conversión se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{Factor de Conversión [ppb o ppm]} = \frac{M * P}{\bar{R} * T} * \frac{1}{1000} \left[\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \text{ o } \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right]$$

Donde:

M: masa molar del gas contaminante [g/mol]

P: presión atmosférica [Pa]

\bar{R} : constante universal de los gases ideales = 8,314472 $\frac{\text{Pa.m}^3}{\text{mol.K}}$

T: temperatura absoluta [K]

C. Diagramas de caja con el ciclo diario de las concentraciones horarias de PM₁₀, PM_{2.5}, O₃, NO₂, CO y SO₂.

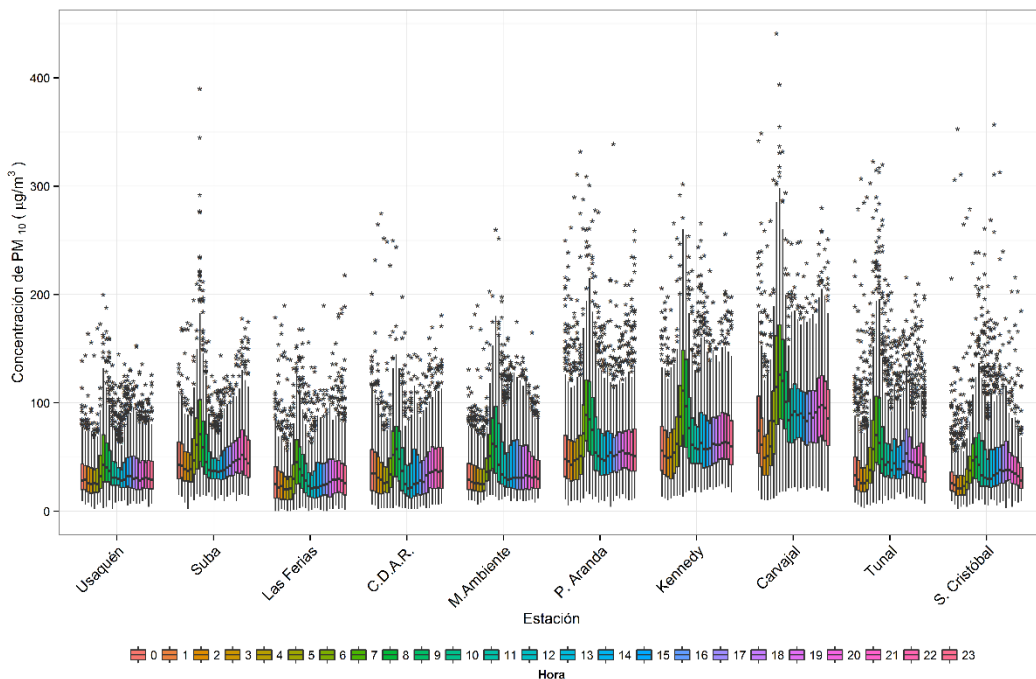


Figura 0-2. Diagrama de cajas con el ciclo diario de PM₁₀ por estación durante el año 2014.

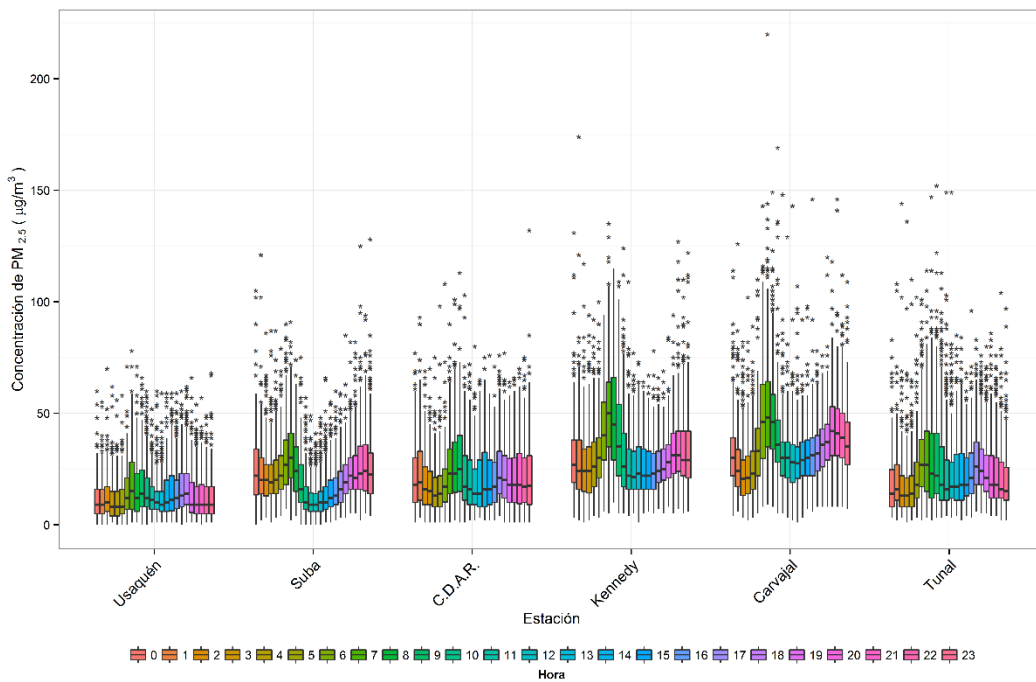


Figura 0-3. Diagrama de cajas con el ciclo diario de PM_{2.5} por estación durante el año 2014.

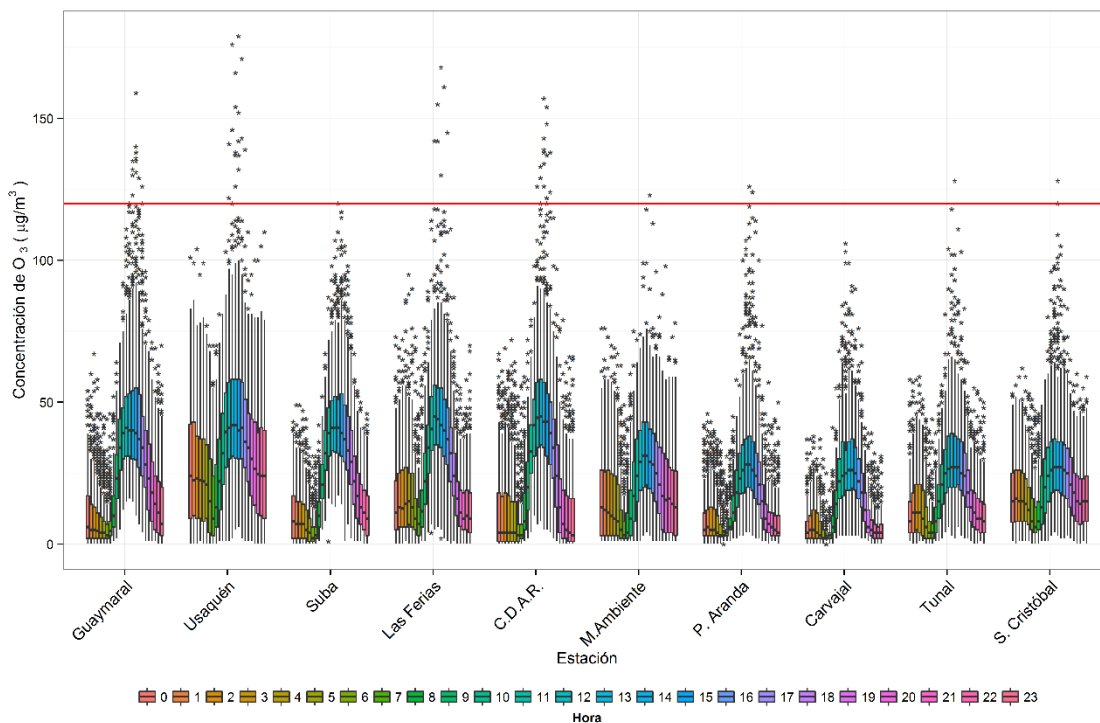


Figura 0-4. Diagrama de cajas con el ciclo diario de O_3 por estación durante el año 2014.

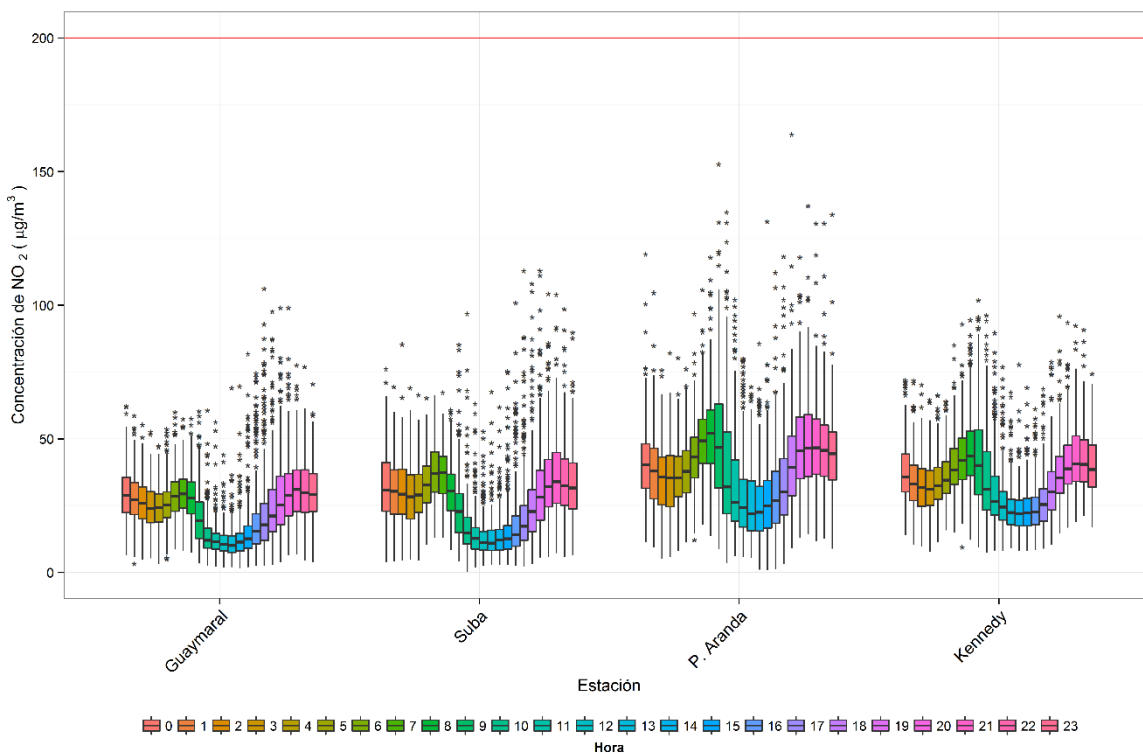


Figura 0-5. Diagrama de cajas con el ciclo diario de NO_2 por estación durante el año 2014.

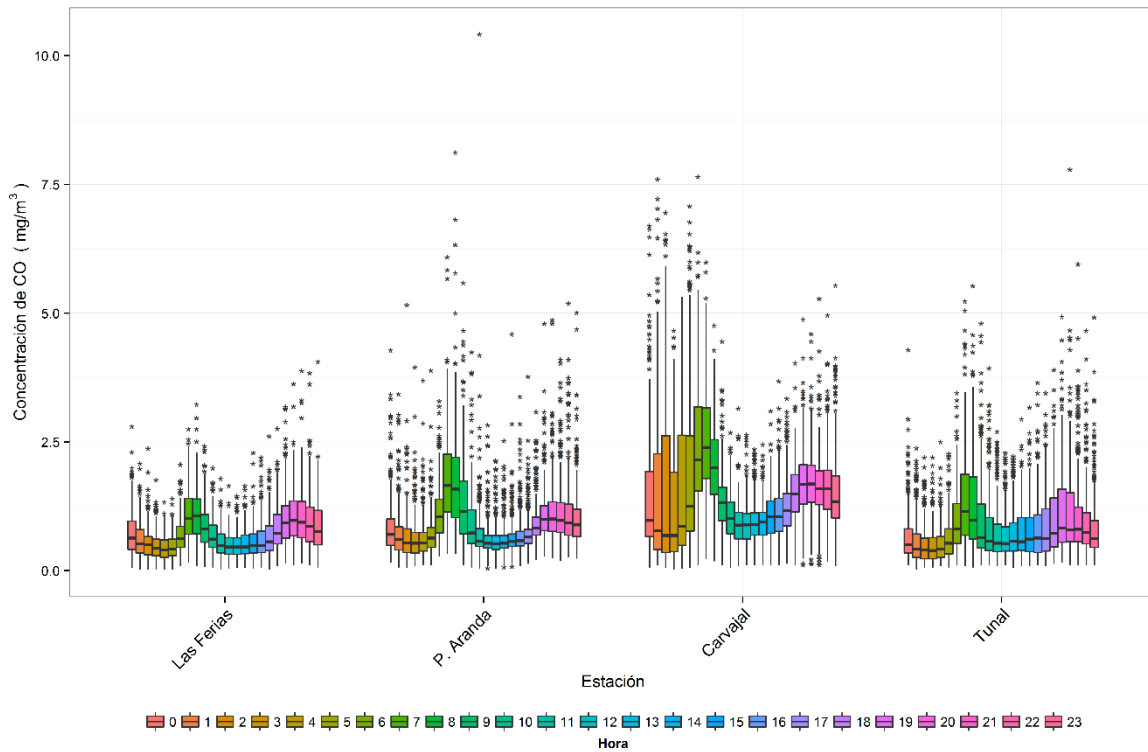


Figura 0-6. Diagrama de cajas con el ciclo diario de CO por estación durante el año 2014.

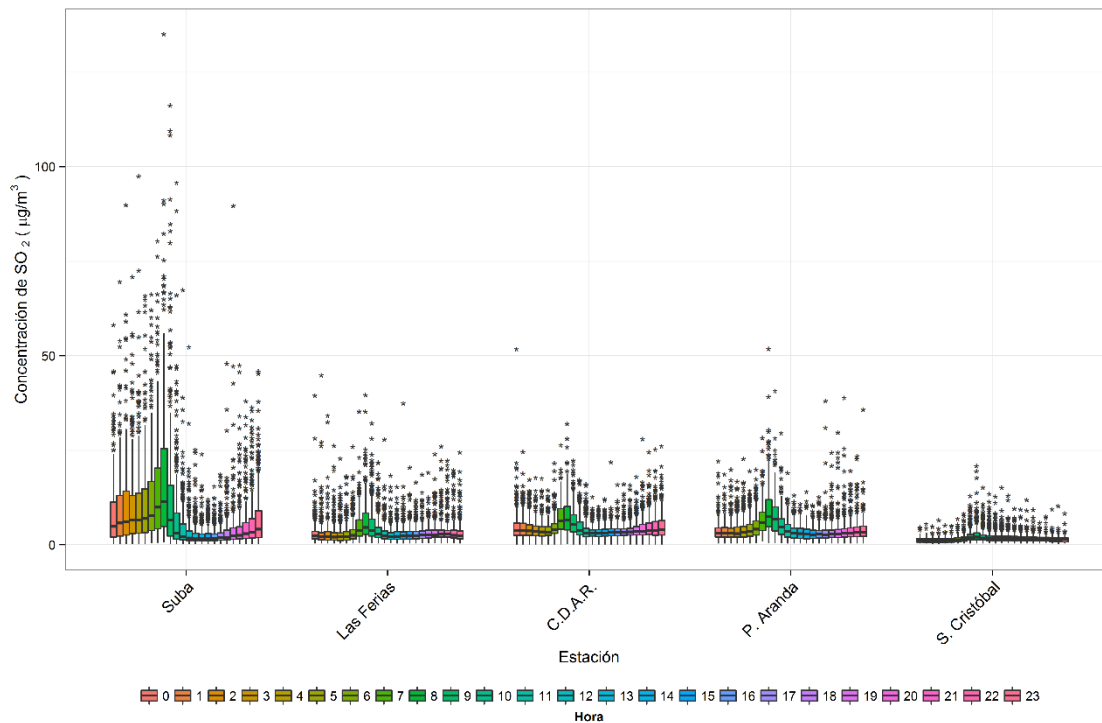


Figura 0-7. Diagrama de cajas con el ciclo diario de SO₂ por estación durante el año 2014.

ÚLTIMA PÁGINA
FIN DEL INFORME