



MONITOREO INDICATIVO DE CONTAMINANTES NO CONVENCIONALES  
UTILIZANDO ANALIZADORES PASIVOS

CONVENIO CVC-UNIVALLE 0770 DE 2015

CONTRATISTA



**INVESTIGADORA PRINCIPAL:**  
MARTHA ISABEL PÁEZ MELO, PHD.  
PROFESORA TITULAR  
UNIVERSIDAD DEL VALLE

DICIEMBRE DE 2015

## Tabla de Contenido.

GENERALIDADES .....	5
1. RESUMEN EJECUTIVO.....	6
2. OBJETIVOS.....	8
2.1 Objetivo general .....	8
2.2 Objetivos específicos.....	8
3. RESULTADOS DE LOS COMPROMISOS ADQUIRIDOS Y GENERACIÓN DE CONOCIMIENTO .....	9
4. MARCO CONCEPTUAL Y NORMATIVO .....	10
4.1 Marco conceptual.....	10
4.2 Marco normativo.....	25
5. METODOLOGÍA IMPLEMENTADA .....	26
5.1 Sitio de estudio .....	26
5.2 Estrategia de muestreo y análisis de las muestras.....	27
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	58
6.1 Concentraciones de los análisis medidos en el primer semestre del 2015.....	59
6.2 Evaluación estadística de los datos de las campañas del primer semestre de 2015.....	65
6.3 Distribución espacial de los resultados de las campañas del primer semestre de 2015.....	71
6.4 Análisis de los resultados en los “hotspot” seleccionados a partir de la distribución espacial obtenida en el monitoreo del primer semestre del 2015.....	83
6.5 Concentraciones de los monitoreos correspondientes al segundo semestre del 2015.....	85
6.6 Evaluación de los datos obtenidos durante el año 2015 en las 22 estaciones monitoreadas. ....	95
6.7 Evaluación estadística de los datos de las cuatro campañas de 2015.....	132
6.8 Análisis comparativo de los muestreos realizados en el primer semestre de 2014 y 2015.....	136
7. CONSIDERACIONES FINALES, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	156
8. Bibliografía .....	159
ANEXOS .....	165

## Índice de Tablas.

Tabla 1. Objetivos y resultados obtenidos en el marco del convenio CVC-UNIVALLE 0077 DE 2015 .....	9
Tabla 2. Tipo de muestreadores pasivos utilizados en este trabajo .....	24
Tabla 3. Niveles máximos permisibles para contaminantes no convencionales con efectos carcinogénicos. .	25
Tabla 4. Fechas en las cuales se realizaron las campañas de muestreos mediante los convenios CVC-UNIVALLE. ....	27
Tabla 5. Nombre y posicionamiento geográfico de los 44 puntos de monitoreo.....	29
Tabla 6. Resumen climatológicos durante los meses de muestreo en el año 2014 .....	52
Tabla 7. Resumen climatológico durante los meses de muestreo en el año 2015.....	53
Tabla 8. Número de estaciones monitoreadas por campaña .....	56
Tabla 9. Nombre, y ubicación de los 22 puntos seleccionados. ....	57
Tabla 10. Resumen estadístico de los COVs analizados durante el primer semestre de 2014 y 2015.....	155

## Índice de Figuras.

Figura 1. Estructura del n-octano ( <a href="http://www.chemspider.com">http://www.chemspider.com</a> ) .....	11
Figura 2. Estructura del etilbenceno ( <a href="http://www.chemspider.com">http://www.chemspider.com</a> ).....	11
Figura 3. Benceno ( <a href="http://www.chemspider.com">http://www.chemspider.com</a> ) .....	12
Figura 4. Tolueno ( <a href="http://www.chemspider.com">http://www.chemspider.com</a> ) .....	14
Figura 5. Isómeros del xileno: (1) o-xileno (2) m-xileno (3) p-xileno .....	16
Figura 6. Química de los óxidos de nitrógeno durante el día. (Tomado y modificado de (Galán D.2006).....	18
Figura 7. Química de los óxidos de nitrógeno durante la noche. (Tomado y modificado de (Galán D.2006)...	19
Figura 8. Formación de Ozono (Galán D. 2006).....	19
Figura 9. Esquema del proceso de difusión.....	20
Figura 10. Localización de la ciudad de Cali, Colombia. ....	26
Figura 11. Ubicación de los puntos de monitoreo.....	28
Figura 12. Alturas a las que fueron izados los artefactos en cada estación de monitor. ....	28
Figura 13. Dendogramas aplicados para la selección de los 22 “hotspot” .....	55
Figura 14. Ubicación de los 22 puntos seleccionados. ....	56
Figura 15. Esquema representativo de los compuestos evaluados durante los años 2014 y 2015.....	58
Figura 16. Resultados de las campañas febrero-marzo y marzo-abril del 2015, para los COVs y el primer monitoreo del SO <sub>2</sub> . ....	62
Figura 17. Comportamiento estadístico de los datos de benceno en las campañas del primer semestre de 2015.....	66
Figura 18. Comportamiento estadístico de los datos de tolueno en las campañas del primer semestre de 2015. ....	67
Figura 19. Comportamiento estadístico de los datos de xilenos, campañas del primer semestre de 2015.....	68
Figura 20. Comportamiento estadístico de los datos de etilbencenos, campañas del primer semestre del 2015. ....	69

Figura 21. Comportamiento estadístico de los datos de n—octano y nonano, campañas del primer semestre del 2015.....	70
Figura 22. Comportamiento estadístico de los datos de SO <sub>2</sub> , campañas del primer semestre del 2015.....	71
Figura 23. Descripción de los puntos de mayor interés en la presencia de benceno.....	73
Figura 25. Variación espacial del benceno en la campaña marzo-abril del 2015.....	74
Figura 24. Variación espacial del benceno en la campaña febrero-marzo del 2015.....	74
Figura 26. Variación espacial del tolueno en la campaña febrero-marzo del 2015.....	75
Figura 27. Variación espacial del tolueno en la campaña marzo-abril del 2015.....	75
Figura 28. Variación espacial del etilbenceno en la campaña febrero-marzo del 2015.....	76
Figura 29. Variación espacial del etilbenceno en la campaña marzo-abril del 2015.....	76
Figura 30. Variación espacial del m,p-xileno en la campaña febrero-marzo del 2015.....	77
Figura 31. Variación espacial del m,p-xileno en la campaña marzo-abril del 2015.....	77
Figura 32. Variación espacial de la o-xileno en la campaña febrero-marzo del 2015.....	78
Figura 33. Variación espacial de la o-xileno en la campaña marzo-abril del 2015.....	78
Figura 35. Variación espacial de la n-octano en la campaña marzo-abril del 2015.....	79
Figura 34. Variación espacial de la n-octano en la campaña febrero-marzo del 2015.....	79
Figura 36. Variación espacial del nonano en la campaña febrero-marzo del 2015.....	80
Figura 37. Variación espacial del nonano en la campaña marzo-abril del 2015.....	80
Figura 38. Variación espacial del SO <sub>2</sub> en la campaña marzo-abril del 2015.....	81
Figura 39. Distribución espacial del benceno- rutas del transporte masivo MIO febrero-marzo del 2015.....	81
Figura 40. Distribución espacial del tolueno-rutas del transporte masivo MIO febrero-marzo del 2015.....	82
Figura 41. Concentraciones obtenidas en cada una de las estaciones muestreadas durante el segundo semestre del 2015, para los COVs, SO <sub>2</sub> , NO y NO <sub>2</sub> .....	90
Figura 42. Información sobre la precipitación y radiación solar de cuatro estaciones meteorológicas de la ciudad de Cali durante los periodos de muestreo en el segundo semestre del 2015.....	92
Figura 43. Reporte de las concentraciones que han superado los 40 µg/m <sup>3</sup> de NO <sub>2</sub> por estación.....	94
Figura 44. Concentraciones de benceno durante el año 2015.....	96
Figura 45. Distribución espacial de benceno durante el primer semestre de 2015.....	97
Figura 46. Distribución espacial de benceno durante el segundo semestre de 2015.....	98
Figura 47. Concentraciones de tolueno durante el año 2015.....	99
Figura 48. Distribución espacial de tolueno durante el primer semestre de 2015.....	100
Figura 49. Distribución espacial de tolueno durante el segundo semestre de 2015.....	101
Figura 50. Concentraciones de etilbenceno durante el año 2015.....	102
Figura 51. Distribución espacial de etilbenceno durante el primer semestre de 2015.....	103
Figura 52. Distribución espacial el segundo de etilbenceno durante semestre de 2015.....	104
Figura 53. Concentraciones de m,p-xileno durante el año 2015.....	105
Figura 54. Distribución espacial de m,p-xileno durante el primer semestre de 2015.....	106
Figura 55. Distribución espacial de m,p-xilenos durante el segundo semestre de 2015.....	107
Figura 56. Concentraciones de o-xileno durante el año 2015.....	108
Figura 57. Distribución espacial de o-xileno durante el primer semestre de 2015.....	109
Figura 58. Distribución espacial de o-xileno durante el segundo semestre de 2015.....	110



Figura 59. Concentraciones de n-octano durante el año 2015 .....	111
Figura 60. Distribución espacial de n-octano durante el primer semestre de 2015. ....	112
Figura 61. Distribución espacial de n-octano durante el segundo semestre de 2015. ....	113
Figura 62. Concentraciones de nonano durante el año 2015. ....	114
Figura 63. Distribución espacial de nonano durante el primer semestre de 2015. ....	115
Figura 64. Distribución espacial de nonano durante el segundo semestre de 2015. ....	116
Figura 65. Concentraciones de SO <sub>2</sub> durante el año 2015. ....	117
Figura 66. Concentraciones de SO <sub>2</sub> durante el primer muestreo de 2015. ....	117
Figura 67. Distribución espacial de SO <sub>2</sub> durante el segundo semestre de 2015. ....	118
Figura 68. Concentraciones de NO durante el segundo semestre de 2015. ....	119
Figura 69. Distribución espacial de NO durante el segundo semestre de 2015. ....	120
Figura 70. Concentraciones de NO <sub>2</sub> durante el segundo semestre de 2015. ....	121
Figura 71. Distribución espacial de NO <sub>2</sub> durante el segundo semestre de 2015. ....	122
Figura 72. Datos meteorológicos recopilados durante los meses de muestreo en la zona norte de Cali. ....	123
Figura 73. Datos meteorológicos recopilados durante los meses de muestreo en la zona sur de Cali. ....	124
Figura 74. Datos meteorológicos recopilados durante los meses de muestreo en la zona centro de Cali. ....	125
Figura 75. Datos meteorológicos recopilados durante los meses de muestreo en la zona oriente de Cali. ....	126
Figura 76. Evolución anual de los COVs en la atmósfera en la ciudad de Cali. ....	130
Figura 77. Gráfica del comportamiento estadístico del benceno durante el 2015 .....	132
Figura 78. Gráfica del comportamiento estadístico del tolueno durante el 2015 .....	132
Figura 79. Gráfica del comportamiento estadístico del m,p-xileno, o-xileno y etil-benceno durante el 2015. ....	133
Figura 80. Gráfica del comportamiento estadístico del n-octano y nonano durante el 2015. ....	134
Figura 81. Gráfica del comportamiento estadístico del SO <sub>2</sub> durante el 2015. ....	135
Figura 82. Correlación lineal entre los m,p-xilenos y el o-xileno durante el 2015. ....	135
Figura 83. Correlación lineal entre el benceno y el tolueno durante el 2015. ....	136
Figura 84. Variabilidad de los COVs monitoreados durante el primer semestre del 2014 y 2015. ....	141
Figura 85. Variabilidad espacial de las cinco campañas realizadas entre 2014 y 2015 para el benceno. ....	142
Figura 86. Variabilidad espacial de las cinco campañas realizadas entre 2014 y 2015 para el tolueno. ....	143
Figura 87. Variabilidad espacial de las cinco campañas realizadas entre 2014 y 2015 para el etilbenceno. ....	144
Figura 88. Variabilidad espacial de las cinco campañas realizadas entre 2014 y 2015 para los m,p-xilenos. ....	145
Figura 89. Variabilidad espacial de las cinco campañas realizadas entre 2014 y 2015 para los o-xileno. ....	146
Figura 90. Variabilidad espacial de las cinco campañas realizadas entre 2014 y 2015 para n-octano. ....	147
Figura 91. Variabilidad espacial de las cinco campañas realizadas entre 2014 y 2015 para nonano. ....	148
Figura 92. Comportamiento estadístico del benceno durante febrero-marzo de 2014 y 2015. ....	150
Figura 93. Comportamiento estadístico del benceno durante marzo-abril de 2014 y 2015. ....	151
Figura 94. Diagramas de cajas y bigotes para los compuestos monitoreados durante el primer semestre de 2014 y 2015. ....	154

## GENERALIDADES.

**TÍTULO Y CÓDIGO:** Monitoreo Indicativo de Contaminantes No Convencionales Utilizando Analizadores Pasivos.

**NÚMERO DEL CONTRATO:** Convenio CVC-Univalle 0770 de 2015.

**ENTIDAD EJECUTORA:** Universidad del Valle

**INVESTIGADOR PRINCIPAL:** Martha Isabel Páez Melo

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN:** Grupo de Investigación en Contaminación Ambiental por Metales y Plaguicidas, GICAMP

**GRUPO DE TRABAJO:**

Claudia Patricia escobar, Tecnóloga Química y Tecnóloga de Control Ambiental

**COLABORADORES EN LA REALIZACIÓN DEL PROYECTO:**

Fabián Méndez, PhD.

Julio César Herrera, PhD

Gisela Arizabaleta Moreno, Ing.

Jefferson Valdés Basto, Estad.

Jairo Fernando Copete Tamos, Tec. Pro.

Germán Restrepo, MSc.

## 1. RESUMEN EJECUTIVO.

Este estudio se realizó en el marco del CONVENIO CVC-UNIVALLE 0077 DE 2015 donde el objetivo principal fue evaluar la presencia y la dinámica de compuestos orgánicos volátiles COVs e inorgánicos como  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$  en la atmósfera de la ciudad de Cali,

Los artefactos colectores utilizados fueron muestreadores pasivos suministrados por el IVL Swedish Environmental Research Institute, que funcionan por el proceso de difusión regido por la Ley de Fick para la captación de gases. Poseen en su interior un filtro impregnado con una sustancia absorbente específica que retiene el gas a analizar para ser evaluado posteriormente por técnicas espectrofotométricas, cromatográficas y de espectrometría de masas.

Los dispositivos se instalaron teniendo en cuenta una distribución adecuada siguiendo una grilla del Sistema de Coordenadas geográficas y la norma EN 13528 de 2003 de la Comunidad Europea. Esta distribución de 44 estaciones cubrió las 22 comunas de la Ciudad de Cali y se habían instalado en un proyecto anterior durante el 2014.

Los COVs evaluados de tipo aromático fueron benceno, tolueno, xilenos, Etil-benceno e hidrocarburos alifáticos como octano y nonano. Los inorgánicos fueron  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  y  $\text{NO}$ .

Durante el año 2015 se realizaron cuatro campañas, dos en el primer semestre (febrero-marzo y marzo-abril), y dos en el segundo semestre (septiembre-octubre, octubre-noviembre). En febrero-marzo se evaluaron los COVs y marzo-abril, los COVs + $\text{SO}_2$ , en las 44 estaciones de la ciudad de Cali. Durante el segundo semestre se evaluaron COVs + $\text{SO}_2$ + $\text{NO}$ + $\text{NO}_2$  en 22 de las 44 estaciones las cuales se seleccionaron estadísticamente a partir de las 44 originales y los datos recopilados durante 2014 y el primer semestre de 2015. Durante los muestreos fueron instalados muestreadores blanco que permitieron ajustar los valores medidos y evaluar la forma de trabajo.

De las 44 estaciones del primer semestre y 22 del segundo semestre de monitoreo ninguna sobrepasó la Norma Colombiana Anual de Calidad del Aire ni la Guía Anual de la Organización Mundial de la Salud para los COVs aunque estuvieron muy cerca del límite para el benceno ( $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) la AV3°N\_44, CALL44\_K1, LA\_LUNA, BASE\_AEREA, C\_C\_CALEÑO. En el caso del  $\text{NO}_2$  la Organización Mundial de la Salud indica que el límite es  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$   $\text{NO}_2$ , de media anual y  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en una hora. Los valores promedio de 8 estaciones (AV3°N\_44, C\_C\_CALEÑO, 14\_CALIMA, HERMITA, CHAPINERO, LA LUNA, CALL44\_K1, LA\_LUNA) que están por encima de esta norma establecida, aunque el promedio de la ciudad es de  $35.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . La distribución espacial del  $\text{SO}_2$  permitió confirmar que además de su producción por la combustión de las gasolinas está siendo influido por el transporte en las corrientes de vientos que arrastran material desde los corregimientos del noroeste de la ciudad y la zona industrial de Yumbo.

Los datos recopilados durante el 2015 permitieron por primera vez hacer la primera aproximación de la "huella dactilar" de la contaminación atmosférica de la ciudad de Cali

donde se ve la influencia temporal de las condiciones meteorológicas, el tiempo de vida de los compuestos y de las posibles diferentes fuentes de contaminación.

La distribución espacial de los contaminantes ha permitido ubicar las zonas de riesgo para los diferentes compuestos monitoreados las cuales se caracterizan por estar muy cerca de las zonas de tránsito de la ciudad.

Los datos recopilados durante el primer semestre del 2015 fueron contrastados con los obtenidos durante el primer semestre del 2014 que se realizaron en febrero-marzo, marzo-abril y junio-julio. Este análisis permitió confirmar que para los periodos de febrero-marzo de los dos años las varianzas no fueron significativas, lo que indica que el comportamiento fue estadísticamente similar. También se pudo concluir que en el único periodo de verano evaluado la influencia de la alta radiación solar y baja pluviosidad facilitaron las reacciones fotoquímicas de degradación, observándose una disminución en las concentraciones de los COVs.

El estudio nos permite concluir que la principal fuente de contaminación es el flujo vehicular, las estaciones de gasolina, las quemadas de madera y carbones, requiriendo una mayor evaluación de las fuentes fijas industriales.

Las zonas denominadas de riesgo deben ser monitoreadas y posiblemente intervenidas pues las personas que laboran en las vías o las frecuentan están expuestas a estas concentraciones de manera crónica puede generar riesgo pues como en el caso del benceno puede ser cancerígeno a niveles bajos por largos periodos de exposición y además se considera como una fuente de material particulado por sus reacciones de descomposición.

## 2. OBJETIVOS.

### 2.1 Objetivo general.

Evaluar la presencia y la dinámica de compuestos orgánicos no convencionales en la atmósfera de la ciudad de Cali.

### 2.2 Objetivos específicos.

- Monitorear la presencia de COVs, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> utilizando muestreadores pasivos en las 22 comunas de la ciudad de Cali.
- Determinar la distribución espacial de los compuestos monitoreados.
- Analizar el espacio-temporalidad de los resultados obtenidos durante los periodos monitoreados en 2013-2014 y 2015
- Determinar la evaluación de riesgo en la población de la ciudad de Cali por los compuestos monitoreados

### 3. RESULTADOS DE LOS COMPROMISOS ADQUIRIDOS Y GENERACIÓN DE CONOCIMIENTO.

La presente Tabla resume todos los compromisos adquiridos y los resultados inmediatos de la labor ejecutada en el proyecto.

*Tabla 1. Objetivos y resultados obtenidos en el marco del convenio CVC-UNIVALLE 0077 DE 2015*

OBJETIVOS	RESULTADOS ESPERADOS	RESULTADO OBTENIDO	INDICADOR VERIFICABLE
Monitorear la presencia de contaminantes no convencionales utilizando muestreadores pasivos en las 22 comunas de la ciudad de Cali.	Encontrar los valores de las concentraciones de los ocho compuestos evaluados, para poder localizar las zonas que presentan la mayor concentración	Ubicación de los 44 puntos de muestreo según la Norma Europea 13528 de 2013 y las concentraciones de los compuestos de interés en cada una de las campañas realizadas	Gráfica con la distribución de las concentraciones en las campañas realizadas, por estación.
Determinar la distribución espacial de los compuestos monitoreados.	Visualizar los puntos de la ciudad de Cali donde se esté generando la mayor concentración de compuestos COVs, NO <sub>x</sub> y SO <sub>2</sub>	Ubicación de los “hotspot” y zonas con mayor contenidos de compuestos COVs, NO <sub>x</sub> y SO <sub>2</sub>	Mapas con estimación kriging en el análisis espacial de los contaminantes analizados.
Analizar el espacio-temporalidad de los resultados obtenidos durante los periodos monitoreados en 2014 y 2015	Teniendo en cuenta los periodos en los cuales se realizaron los monitoreos tratar de correlacionarlos con los periodos secos y de lluvia	Se estableció la época en la cual hay disminución de la presencia de los COVs debido a los procesos de foto-degradación.	Gráfica descriptiva de la variación de temporalidad de los compuestos medidos durante los periodos de mayor presencia de radiación solar
Determinar la evaluación de riesgo en la población de la ciudad de Cali por los compuestos monitoreados.	Determinar las variaciones de los diferentes compuestos evaluados en cada una de las campañas realizadas durante los años 2014 y 2015.	Descripción de la variabilidad temporal de las concentraciones de los contaminantes evaluados.	Gráficas comparativas y ubicación de las zonas que potencialmente podrían generar riesgo a la salud humana en la ciudad de Cali.
<b>PORCENTAJE ALCANZADO DE COMPROMISOS ADQUIRIDOS = 100%</b>		<b>LOS COMENTARIOS SOBRE EL PORCENTAJE REALIZADO: SE ALCANZO EL 100% DE LOS COMPROMISOS ADQUIRIDOS</b>	

## 4. MARCO CONCEPTUAL Y NORMATIVO

### 4.1 Marco conceptual.

#### Compuestos orgánicos volátiles.

Se le asigna el nombre de compuesto orgánico volátil (COVs) a todo compuesto orgánico que tenga a 293,15 K una presión de vapor de 0,01 kPa o más, un punto de ebullición inicial menor o igual a 250 °C a una presión estándar de 101,3 kPa o que tenga una volatilidad equivalente en las condiciones particulares de uso, (Begerow et al., 1996; Schneider et al., 2001). Dentro de la categoría de compuesto orgánico volátil se incluyen diferentes tipos de compuestos químicos, tales como los hidrocarburos alifáticos, los aromáticos y los clorados, y éteres, aldehídos, cetonas, ácidos y alcoholes. Existen diferentes tipos de clasificación según su peligrasidad, composición, usos, etc.

Generalmente los compuestos orgánicos volátiles (COVs) se consideran contaminantes del aire y cuando se mezclan con óxidos de nitrógeno reaccionan para formar ozono troposférico, el cual en elevadas concentraciones genera problemas en la salud de los seres vivos, también participan activamente en numerosas reacciones en la troposfera y en la estratosfera, contribuyendo a la formación del smog fotoquímico y al efecto invernadero.

Las principales fuentes de COVs están relacionadas directa o indirectamente con el petróleo y sus derivados, es decir vapores procedentes de automóviles debido a una combustión incompleta (aromáticos, olefinas y parafinas), emanaciones de industrias de pinturas, tintas, lacas y esmaltes (alcanos y cicloalcanos), vapores de gasolinas que son emitidos desde tanques de almacenamiento, escape de disolventes empleados en pinturas u operaciones de desengrasado y limpieza (hexano, ciclohexano y aromáticos derivados del tolueno y xileno); vapores procedentes de adhesivos (metil-etil cetona, derivados tipo nafta, tricloroetano); aplicación de aerosoles; emisiones de industrias de plásticos (compuestos clorados) (Chung y Lee 2001).

Los efectos de los compuestos orgánicos volátiles para la salud pueden variar mucho según el compuesto y comprenden desde un alto grado de toxicidad hasta ausencia de efectos conocidos. Esos efectos dependerán de la naturaleza de cada compuesto y del grado y del período de exposición al mismo. Las exposiciones a largo plazo a los compuestos orgánicos volátiles pueden causar lesiones del hígado, los riñones y el sistema nervioso central. La exposición a corto plazo puede causar irritación de los ojos y las vías respiratorias, dolor de cabeza, mareo, trastornos visuales, fatiga, pérdida de coordinación, reacciones alérgicas de la piel, náusea y trastornos de la memoria.

Algunos COVs son muy tóxicos, como el benceno, el óxido de estireno, el percloroetileno o el tricloroetileno, que son cancerígenos, o el formaldehído y el estireno, que además son disruptores endocrinos (<http://www.istas.net/risctox/index.asp?idpagina=621>).



A continuación se registran las características generales de los compuestos aromáticos benceno, tolueno, xilenos (BTX), etil benceno y n-octano y n-nonano.

- *n-Octano. N° CAS: 111-65-9*

**Generalidades:** el octano (o n-octano) es un alcano lineal de 8 átomos de carbono, de fórmula  $C_8H_{18}$ , y posee varios isómeros. El isómero de más importancia es el 2, 2,4-Trimetilpentano (generalmente llamado isoctano) porque fue seleccionado como punto de referencia 100 para la escala del octanaje, en la que el heptano tiene el punto de referencia 0. Se obtiene con sus isómeros mediante la destilación fraccionada de varios petróleos.

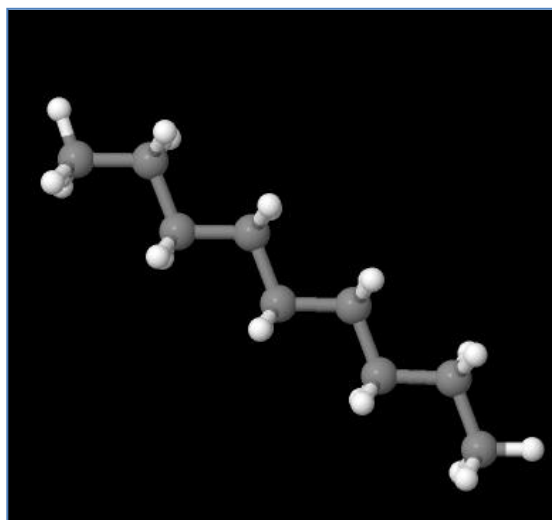


Figura 1. Estructura del n-octano (<http://www.chemspider.com>)

Es un líquido de olor característico, que posee un punto de ebullición de  $125.7^{\circ}C$ , punto de fusión de  $-56.8^{\circ}C$ , densidad relativa (agua = 1) de 0.70, insoluble en el agua y posee una presión de vapor de kPa a  $20^{\circ}C$ : 1.47. Su principal aplicación es como combustible y se encuentra asociado como componente de las naftas (ver Figura 1).

**Riesgos y toxicología:** El n-octano es un inflamable y por encima de  $31^{\circ}C$ : pueden formarse mezclas explosivas vapor/aire. La sustancia irrita los ojos, la piel y el tracto respiratorio. La ingestión del líquido puede dar lugar a la aspiración del mismo por los pulmones y la consiguiente neumonitis química. La sustancia puede causar efectos en el sistema nervioso central. La exposición al vapor puede causar disminución de la consciencia (Ficha Técnica 2013).

- *Etilbenceno. No CAS 100-41-4*

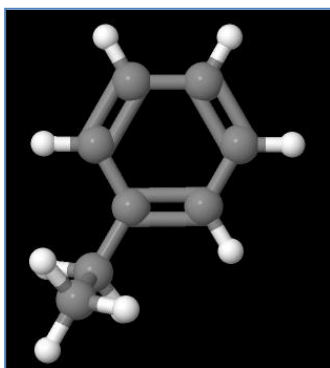


Figura 2. Estructura del etilbenceno (<http://www.chemspider.com>)

**Generalidades:** el etilbenceno es un hidrocarburo alifático-aromático (areno), constituido por un anillo aromático y un grupo etilo. Es un líquido inflamable, incoloro, de olor similar a la gasolina. Es un compuesto volátil con una presión de vapor a  $25^{\circ}C$  de 9.6 mm de Hg, siendo esto un importante mecanismo que facilita su distribución en el medio ambiente. Su solubilidad en agua es baja, 169 mg/l a  $25^{\circ}C$  por lo tanto se evapora fácilmente desde la superficie tanto del agua como de los suelos. El tiempo de vida media de su volatilización desde ríos y lagos se ha estimado en 1.1 y 99

horas, respectivamente.



En el aire reacciona con los radicales hidroxilo generados por vía fotoquímica, aunque la hidrólisis no es una importante vía para su transformación y se biodegrada con rapidez en el medio ambiente en condiciones aerobias.

El etilbenceno se utiliza fundamentalmente como base para la síntesis de estireno y como componente de la gasolina (fracción BTEX) y el combustible de aviación. Es también un contaminante ubicuo de suelos y aguas subterráneas.

*Riesgos y toxicología:* Su comportamiento toxico cinético es muy similar al de los xilenos absorbiéndose preferentemente por inhalación, aunque también la ingestión da lugar a su absorción de forma rápida y eficaz. La absorción cutánea es más lenta. Se metaboliza en el hígado por oxidación del sustituyente etilo, con formación de ácidos mandélico y fenilgloxálico como principales productos metabólicos. Estos metabolitos de conjugan a continuación con glicina y se excretan en la orina. (Http://www.calidadaire.df.gob.mx/calidadaire, 2014).

- *Benceno N° CAS 96-09-3.*

*Generalidades:* El benceno es un compuesto orgánico, líquido, incoloro, de olor dulce y sabor ligeramente amargo, constituido por seis átomos de carbono y seis átomos de hidrógeno en su estructura molecular, cuyo arreglo forma cadenas carbonadas cerradas en modo de anillo (hidrocarburo aromático).

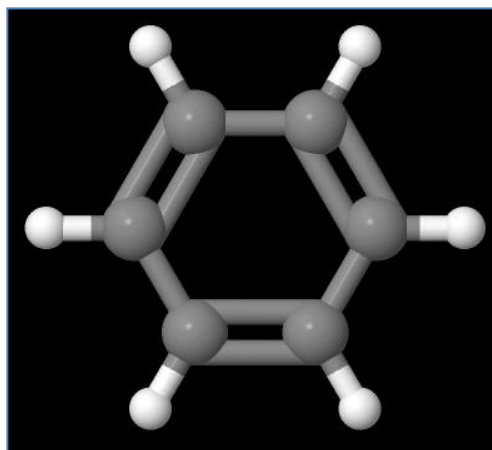


Figura 3. Benceno (<http://www.chemspider.com>)

El benceno presenta una presión de vapor de 94.8 mm de Hg a 25 °C, por lo que la volatilización es el proceso más importante para su distribución en el ambiente. Se evapora fácilmente desde la superficie de suelos y aguas y presenta una baja tendencia de adsorción en sedimentos. En fase de vapor reacciona en el aire con radicales hidroxilo generados por vía fotolítica, lo cual, constituye un mecanismo para su degradación con un tiempo de vida media de 13 días.

La lluvia lo remueve con facilidad de la atmósfera (solubilidad en agua: 1.790 mg/l a 25°C).

La biodegradación del benceno en medio aerobio parece ser muy lenta, tanto en suelos como en aguas, por lo que esta ruta de transformación no es importante. Tampoco experimenta la hidrólisis en el ambiente.

*Riesgos y toxicología:* Las principales fuentes de exposición al benceno son las emisiones a la atmósfera así como el consumo de tabaco. Los fumadores poseen una carga corporal 10 veces mayor que los no fumadores.

La ruta de exposición más importante es la inhalación, aunque la ingestión también es una vía eficaz de absorción. La vía cutánea es más lenta y precisa el contacto directo prolongado con el producto líquido. Aproximadamente el 50 a 60% del benceno inhalado, se exhala sin metabolizar.

El benceno se distribuye a través del torrente sanguíneo a todos los tejidos del organismo. Alcanza las concentraciones más elevadas en tejidos con lípidos y en el sistema nervioso central. El metabolismo del benceno tiene lugar preferentemente en el hígado y en la médula ósea. En esta última, el benceno presenta su mayor toxicidad frente al sistema hematopoyético.

El principal efecto tóxico del benceno es su actividad cancerígena, como agente causal de la leucemia. Por otra parte el efecto tóxico no cancerígeno más importante sobre el sistema hematopoyético es la anemia aplásica.

La hematotoxicidad del benceno se manifiesta en la médula ósea con la destrucción progresiva de componentes mieloides y eritroides, lo que produce un descenso de plaquetas y otras células en la sangre. Las lesiones en médula ósea causadas por la exposición al benceno, presentan un comportamiento dosis-dependiente, tanto en personas, como en animales de laboratorio.

La anemia aplásica tiene una tasa de mortalidad del 50% de las personas afectadas.

El benceno posee efectos depresores sobre el sistema nervioso central. Produce mareo, debilidad, euforia, náuseas y dolor de cabeza en exposiciones moderadas. Al aumentar la dosis, los efectos sobre el sistema nervioso central son visión borrosa, temblor, respiración rápida, parálisis, inconciencia e incluso la muerte.

El benceno también es un agente irritante de la piel, que causa la disolución de lípidos del estrato córneo de la epidermis con formación de eritema, vesículas y dermatitis (Clayton y Clayton, 1994).

El benceno está clasificado como agente cancerígeno de grupo 1 por la IARC, es decir, es cancerígeno para personas, y se considera que la evidencia es suficiente tanto en estudios realizados en personas como en animales de laboratorio (1987).

Los efectos cancerígenos del benceno se han manifestado en múltiples estudios epidemiológicos realizados en trabajadores de la industria petroquímica, la fabricación de calzado, entre otras". (<http://www.calidadaire.df.gob.mx/calidadaire>, 2014).

- *Tolueno N° CAS: 108-88-3.*

**Generalidades:** el tolueno es un líquido incoloro con un característico olor aromático. Es menos denso que el agua, inmisible en ella y sus vapores son más densos que el aire. Posee un punto de ebullición de 111 °C, un punto de fusión: -95 °C, una densidad de 0.87 g/ml (a 20 °C), 0.8623 (a 25 °C) y una densidad de vapor de 3.14 y la presión de vapor (a 30 °C) es de 37.7 mm de Hg. (<http://www.quimica.unam.mx/IMG/pdf/17tolueno.pdf>, 2014)

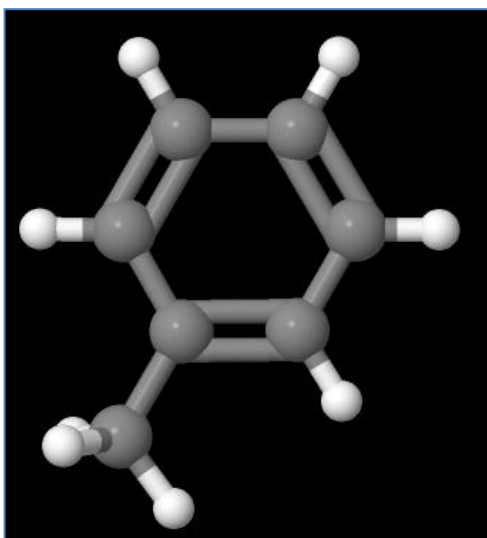


Figura 4. Tolueno (<http://www.chemspider.com>)

Es utilizado en combustibles para automóviles y aviones; como disolvente de pinturas, barnices, hules, gomas, etil celulosa, poliestireno, polialcohol vinílico, ceras, aceites y resinas, reemplazando al benceno. También se utiliza como materia prima en la elaboración de una gran variedad de productos como benceno, ácido benzoico, fenol, benzaldehído, explosivos (TNT), colorantes, productos farmacéuticos (por ejemplo, aspirina), adhesivos, detergentes, monómeros para fibras sintéticas, sacarinas, saborizantes y perfumes. Es producido, principalmente, por reformación catalítica de las fracciones de petróleo ricas en naftenos.

El tolueno procede en las ciudades de las emisiones generadas por el funcionamiento de los motores de gasolina y diesel. Puede ser emitido también a la atmósfera como consecuencia de la manipulación de productos que lo contengan como pinturas, disolventes, etc. Una vez en la atmósfera, este compuesto presenta una reactividad elevada y participa en diferentes mecanismos fotoquímicos, teniendo una influencia notable en los procesos de formación del ozono. Las estrategias de control y reducción de las emisiones de tolueno a la atmósfera implican el uso en proporciones elevadas de compuestos oxigenados dentro de la formulación de las gasolinas.

**Riesgos y toxicología:** La Agencia Ambiental Americana ha calificado al tolueno como no sospechoso de causar cáncer en las personas a partir de dos estudios epidemiológicos donde no se detectó un incremento significativo a padecer cáncer como resultado de la inhalación del tolueno. Sin embargo si se observan de forma crónica otro tipo de resultados toxicológicos cuando se producen exposiciones agudas aunque durante un corto espacio de tiempo o en exposiciones a bajas concentraciones durante largos períodos de tiempo. Los síntomas más habituales a estas exposiciones están formados por sueño, dolor de cabeza y náuseas que son siempre reversibles una vez desaparece la exposición al contaminante (<http://www.calidadaire.df.gob.mx/calidadaire>, 2014).

- Xilenos N° CAS 1330-20-7.

*Generalidades:* xileno es el nombre de los dimetilbencenos. Por la posición relativa de los grupos metilo en el anillo bencénico, se distinguen tres isómeros: orto-xileno (1,2-dimetilbenceno), meta-xileno (1,3-dimetilbenceno) y para-xileno (1,4-dimetilbenceno).

Se trata de hidrocarburos alifático-aromáticos (arenos), líquidos, incoloros, inflamables e insolubles en agua. Los xilenos son contaminantes ubicuos, cuya presencia medioambiental contribuye como fuentes naturales las plantas y los incendios forestales.

La distribución medioambiental de los xilenos está condicionada fundamentalmente por la volatilización (presión de vapor a 25°C, 7.99mm de Hg). En fase vapor, los xilenos reaccionan con los radicales hidroxilos generados por mecanismos fotoquímicos, con un tiempo de vida media en el aire de 1 a 2 días. Su movilidad en suelos es moderada y depende de la composición de los mismos y del pH. En el medio acuático tiende a absorberse moderadamente a los sedimentos.

La biodegradación medioambiental de los xilenos tiene lugar activamente en el medio aerobio (tiempo de vida de 3.3 horas). La hidrólisis no constituye una vía de transformación ambiental relevante para los xilenos.

Su nombre proviene del griego xylon que significa madera, en alusión a su procedencia, ya que se obtenían tradicionalmente de la destilación del alquitrán de la madera. El xileno bruto es una mezcla de los tres isómeros y se obtiene por destilación del alquitrán de hulla o por craqueo catalítico del petróleo.

Los xilenos, o dimetilbencenos, se utilizan en grandes cantidades en múltiples aplicaciones, entre las que destaca su uso como disolvente y como componente de las gasolinas y combustible de aviación, formando parte de la fracción denominada BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos).

Otras aplicaciones importantes son la industria de la goma y caucho, y cada uno de los isómeros por separado constituye la base de la obtención de numerosos compuestos orgánicos, como los ácidos ftálicos, isoftálico y terftálico, así como el dimetilterftálico, todos ellos utilizados en la obtención de plastificantes y componentes de fibra y película de poliéster.

Como disolvente, suele utilizarse una mezcla de los tres isómeros conocida con la denominación de tolueno técnico, constituido por 40% de m-xileno y 20% de cada uno de los otros dos isómeros y etilbenceno, con pequeñas cantidades de tolueno (<http://www.calidadaire.df.gob.mx/calidadaire>, 2014).

Los xilenos (orto, meta y para-xileno) proceden en las atmósferas urbanas de la combustión incompleta de las gasolinas y en los vehículos dotados de catalizador,

aparece como consecuencia de daño o destrucción de este como resultado de su agotamiento o envenenamiento por otros agentes contaminantes.

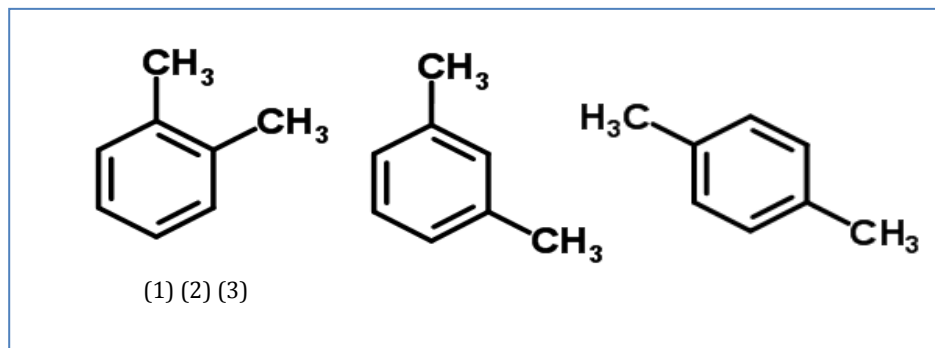


Figura 5. Isómeros del xileno: (1) o-xileno (2) m-xileno (3) p-xileno

*Riesgos y toxicidad:* Como en el caso del tolueno, la Agencia Ambiental Americana ha descartado a estos compuestos como causantes de carcinogénesis en las personas aunque si es un compuesto tóxico capaz de dar lugar a otro tipo de afecciones sobre la salud de las personas.

La inhalación de mezclas de xilenos produce irritación del tracto respiratorio y gastrointestinal con náuseas, vómitos y otro tipo de efectos neurológicos. Los estudios toxicológicos realizados en animales, concluyen que la exposición continua a mezclas de xilenos origina efectos nocivos sobre el desarrollo fetal, con daños sobre el desarrollo esquelético, retraso en la osificación, reducción del tamaño fetal con hemorragias internas, y/o disminución del espesor y capacidad de fijación del calcio en la cáscara de los huevos en aves (<http://www10.ava.es/rccava/03contaminantes6.html> 2014).

### Compuestos inorgánicos volátiles.

- $\text{SO}_2$  N° CAS 7446-09-5.

Por definición es un gas incoloro, irritante, no inflamable y con un olor acre e irritante y penetrante a concentraciones superiores a 3 ppm, que consiste en un átomo de azufre y dos de oxígeno ( $\text{SO}_2$ ). Es considerado un contaminante primario.

En contaminación atmosférica se considera el  $\text{SO}_2$  una sustancia reductora que con el tiempo y en contacto con el aire y la humedad sufre la acción de diversos oxidantes formando trióxidos. El dióxido de azufre es un intermedio importante en la producción del ácido sulfúrico. La velocidad de esta reacción en condiciones normales es baja. En agua se disuelve formando una disolución ácida, (Zaror, 2000).

Los gases volcánicos y el metabolismo anaerobio contribuyen con alrededor de un 20% al total de  $\text{SO}_2$  de la atmósfera. La principal fuente antropogénica de óxido de azufre es la combustión de combustibles fósiles ricos en azufre, como por ejemplo el carbón y el petróleo combustible, y representa cerca de un tercio del total del  $\text{SO}_2$  atmosférico. Durante las horas y días siguientes, el  $\text{SO}_2$  se oxida todavía más, convirtiéndose en

sulfato y ácido sulfúrico suspendidos en pequeñas partículas que se eliminan del aire mediante precipitación y/o deposición seca. Esta deposición de azufre es, junto con la deposición similar de nitrógeno procedente de las emisiones de NO<sub>x</sub> y NH<sub>3</sub>, la causa de la acidificación de los ecosistemas (suelo, lagos y ríos), fenómeno conocido como “lluvia ácida”.

La principal fuente de emisión de dióxido de azufre a la atmósfera es la combustión de productos petrolíferos y de carbón. Otra fuente muy importante es la oxidación del H<sub>2</sub>S.

El destino del SO<sub>2</sub> en la atmósfera es su oxidación o su deposición. La oxidación puede tener por vía homogénea o heterogénea (acuosa o en partículas) siendo más efectiva la oxidación heterogénea. La deposición del SO<sub>2</sub> puede ser seca o húmeda. La seca comprende la absorción del SO<sub>2</sub> en el agua, la adsorción en materiales y la incorporación al metabolismo de plantas. La deposición seca del SO<sub>2</sub> es muy efectiva. La deposición húmeda incluye la incorporación del SO<sub>2</sub> a nubes o el arrastre por agua de lluvia.

Se debe tener en cuenta que el SO<sub>2</sub>, al ser considerado uno de los contaminantes atmosféricos primarios, está asociado a grandes problemas medioambientales como por ejemplo la acidificación, intoxicación y al cambio climático.

- *Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>).*

Este es un término genérico que hace referencia a una serie de gases muy reactivos que contienen nitrógeno y oxígeno en diferentes proporciones (NO<sub>x</sub> =NO + NO<sub>2</sub>). Se utiliza normalmente la notación NO<sub>x</sub> para representar al NO y NO<sub>2</sub> implicados en la contaminación del aire. Una característica de estos dos compuestos es que participan en la formación de los contaminantes secundarios que producen la contaminación fotoquímica.

Existen ocho óxidos de nitrógeno distintos, pero normalmente solo tienen interés como contaminantes dos de ellos, el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>). El resto se encuentra en equilibrio con estos dos, pero en concentraciones tan extraordinariamente bajas que carecen de importancia.

Los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) son contaminantes gaseosos que se forman principalmente a través de procesos de combustión. El NO<sub>2</sub> es uno de los contaminantes comunes que en el aire junto a las partículas en suspensión genera una atmósfera de color naranja.

La reacción del NO con el oxígeno para generar NO<sub>2</sub> no se produce en la zona de combustión, debido a la inestabilidad de este a elevadas temperaturas. Sólo cuando la temperatura desciende por debajo de los 600°C se empieza a formar NO<sub>2</sub>, aunque en cantidades muy reducidas, pues la velocidad de reacción es muy baja. De tal manera que la mayor parte de los NO<sub>x</sub> emitidos a la atmósfera lo son en la forma NO, siendo el NO<sub>2</sub> fundamentalmente un contaminante de tipo secundario. (Carnicer J. 2008).



Su origen puede ser natural en los procesos de quema de la biomasa, océanos, suelos y procesos donde involucran la luz solar. A nivel antropogénico, los procesos industriales y las actividades humanas.

Estos compuestos a nivel atmosférico sufren complejas transformaciones químicas y físicas, enfocadas principalmente a la formación de ozono en aéreas urbanas y regionales. La forma predominante del nitrógeno oxidado, en las capas bajas de la atmósfera, depende de factores como la intensidad de la luz solar, temperatura, emisión de contaminantes, tiempo transcurrido de dichas emisiones etc. (Galán D.2006).

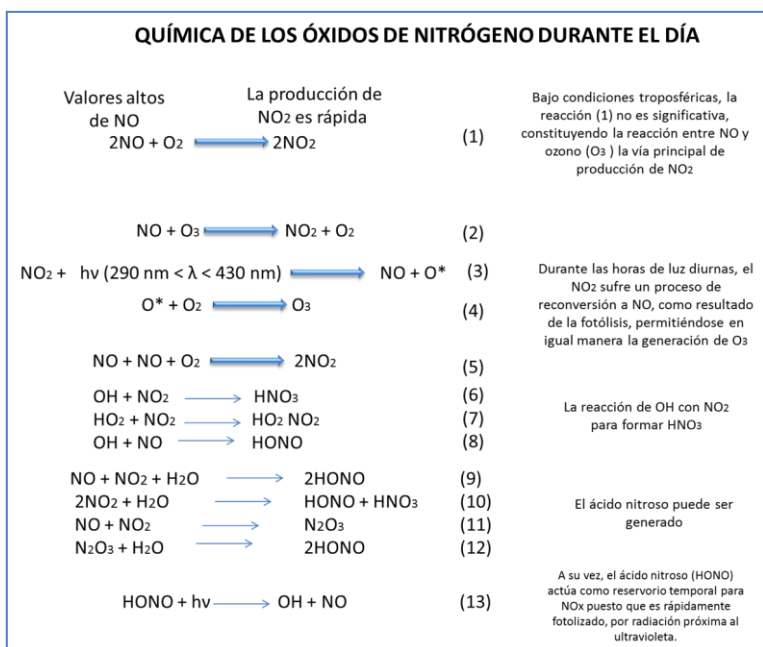


Figura 6. Química de los óxidos de nitrógeno durante el día. (Tomado y modificado de (Galán D.2006)

La química atmosférica de los óxidos de nitrógeno presenta gran diferencia si se trata de la química diurna o la química nocturna, o sea que la presencia de la luz solar es importante para la producción de compuestos secundarios (ver Figuras 6 y 7). La principal diferencia se encuentra en la formación de ozono. Durante la química diurna el dióxido de nitrógeno sufre un proceso de reconversión a monóxido de nitrógeno, como resultado de su fotólisis, permitiendo la generación de ozono (Figura 8). Sin embargo, durante la química nocturna, al existir ausencia de luz solar, el

dióxido de nitrógeno no sufre un proceso de fotólisis convirtiéndose lentamente en trióxido de nitrógeno, quien a su vez reacciona con dióxido de nitrógeno para generar ácido nítrico. (Galán D.2006).

La química ambiental que presentan los óxidos de nitrógeno es relevante debido a que participan de forma directa en los procesos de formación de contaminantes secundarios como ozono, ácido nítrico, nitrato de amonio, etc., que son perjudiciales para la salud humana y el medio ambiente.

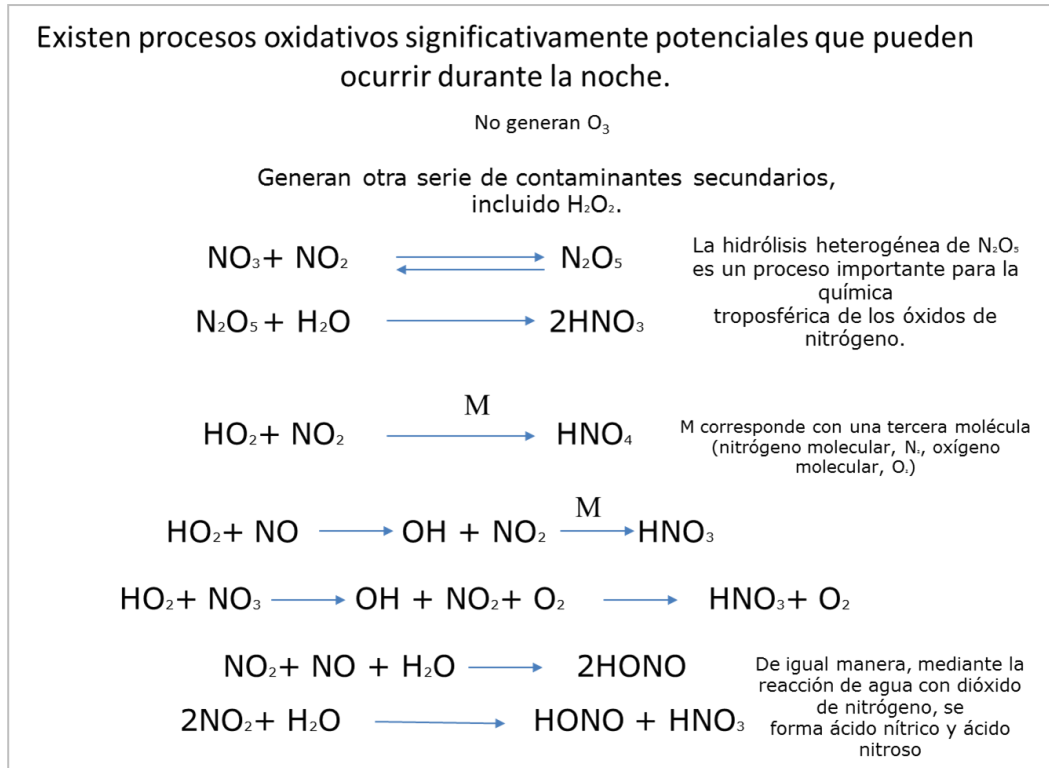


Figura 7. Química de los óxidos de nitrógeno durante la noche. (Tomado y modificado de (Galán D.2006)

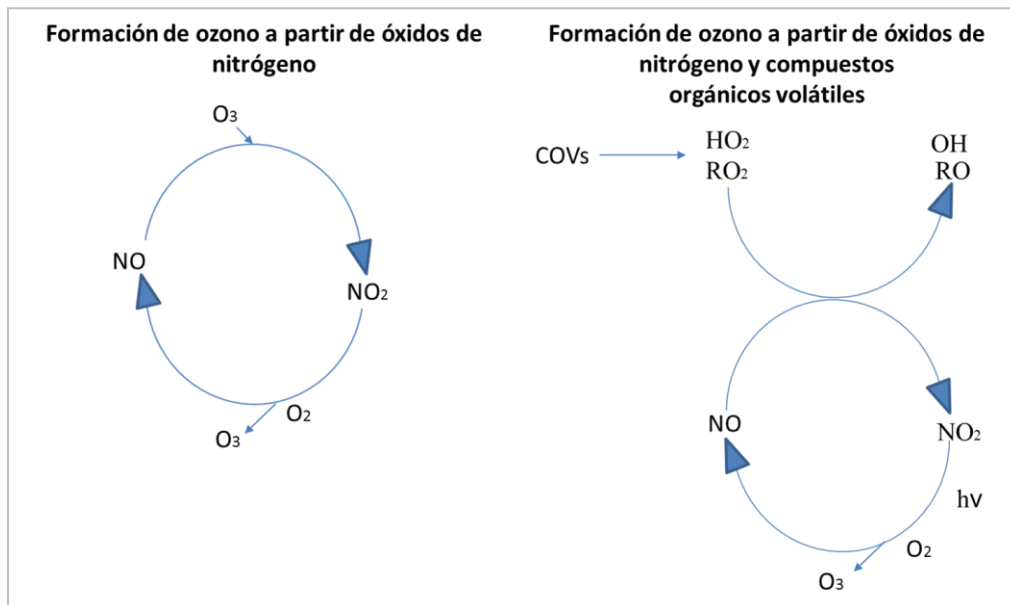
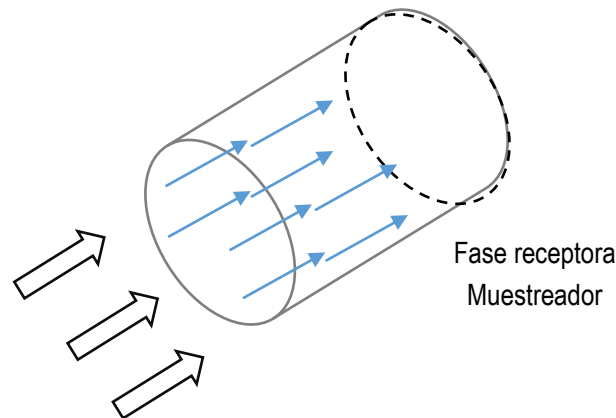


Figura 8. Formación de Ozono (Galán D. 2006)



### Muestreo pasivo: principio del funcionamiento.

Los muestreadores pasivos para la captación de gases se rigen por la Ley de Fick; en la Figura 9, se muestra el principio básico de funcionamiento que consiste en la difusión libre de los analitos desde una zona de alta concentración (aire) hacia una zona de recepción (interior del tubo captador), mediado por un flujo constante. La captación estará regida por el tiempo de exposición y el área del captador que está expuesto al contaminante.



*Figura 9 .Esquema del proceso de difusión*

En el difusor pasivo existe un volumen de aire donde se produce un gradiente de concentraciones desde la parte externa del volumen en contacto con el ambiente exterior y con una concentración ambiental, hasta la parte interna, donde se encuentra el agente absorbente y que tiene una concentración nula de dicho contaminante a determinar. El gradiente de concentraciones producido es la fuerza que mueve al contaminante por difusión a través del captador hasta llegar al absorbente.

El concepto de la Ley de Fick se basa en que las moléculas de gas difunden en todas direcciones con igual probabilidad. Estadísticamente se tiene que la suma de todos los movimientos de las moléculas genera un transporte neto en la dirección de la concentración decreciente puesto que el número de moléculas que se mueve desde un punto en una determinada dirección es directamente proporcional a la concentración en dicho punto. Se entiende entonces que el proceso de difusión intenta eliminar el gradiente de concentraciones presentes en un espacio determinado con el movimiento de las moléculas hacia la zona donde hay una menor concentración de ellas.

Matemáticamente la Ley de Fick se expresa mediante la ecuación:

$$F = D * \frac{[X]}{L}$$

F: flujo del contaminante X, en moles por centímetro cuadrado y minutos (mol/cm<sup>2</sup> min)

D: Coeficiente de difusión del gas, en centímetros cuadrados por minuto (cm<sup>2</sup>/min)

[X]: concentración ambiental del contaminante X, en moles por centímetro cúbico (mol/cm<sup>3</sup>)

L: Longitud de la zona de difusión en centímetros (cm)

La cantidad de gas Q en moles, que difunde a través de un captador pasivo con un área a (cm<sup>2</sup>) y una longitud L (cm) por unidad de tiempo es:

$$Q = F * a * t$$

Sustituyendo el valor de F de la primera expresión:

$$Q = D * \frac{[X]}{L} * a * t$$

Teniendo en cuenta que el cociente de captación, S (cm<sup>3</sup>/min) es:

$$S = \frac{D * a}{L}$$

Sustituyendo en la ecuación anterior se obtiene:

$$Q = S * [X] * t$$

Despejando la concentración

$$[X] = \frac{Q}{S * t}$$

Así que conociendo el coeficiente de captación (S) del captador pasivo, la cantidad de gas en moles que se ha difundido a través del muestreador (Q) y el tiempo que ha estado expuesto (t) se tendrá la medida de la concentración ambiental promedio del contaminante X en el aire durante el periodo de muestreo. (Ferm M. 2002)

- *Factores clave en los captadores pasivos.*

Para asegurar su buen funcionamiento y el máximo rendimiento del captador es importante tener en cuenta:

- La elección del absorbente
- La geometría del captador

- Los efectos de los factores ambientales
- La temperatura y la presión
- La humedad
- Las variaciones bruscas de la concentración exterior
- La velocidad del viento

La selección y el uso de absorbente adecuado debe garantizar una elevada absorción del contaminante, de tal manera que la presión de vapor residual de la sustancia muestreada en la superficie del absorbente será muy pequeña con relación a la concentración del contaminante en el ambiente y la velocidad de captación será próxima a la del estado estacionario. Si el adsorbente es débil, la presión de vapor residual del contaminante no será nula, de tal manera que la diferencia de concentración entre el ambiente y el muestreador, que es el principio impulsor del proceso de difusión, será menor y el flujo del contaminante decrecerá con el tiempo de muestreo. También puede ocurrir la retro-difusión o difusión inversa y esto ocurre cuando la concentración del contaminante es mayor en la superficie del adsorbente que en el medio ambiente externo de tal manera que la difusión iría en sentido contrario.

La geometría del captador es crítica puesto que la sección transversal del captador y la longitud de difusión en el interior del captador determinan el coeficiente de captación o la velocidad de captación. Dependiendo de la forma varía su coeficiente de muestreo. Si el captador tiene forma de tubo su coeficiente de muestreo será del orden de 1 mL/min o menos. Si el captador tiene forma de disco el coeficiente de captación es intermedio, del orden de 10mL/min.

Los factores ambientales como la velocidad del aire, la variación brusca de los contaminantes, la humedad y la temperatura pueden afectar la capacidad de absorción de los captadores pasivos. La temperatura y la presión son relevantes debido a que afectan directamente el coeficiente de difusión.

- *Tipos de captadores utilizados en este estudio.*

Los captadores utilizados en este estudio fueron obtenidos en el laboratorio certificado IVL SWEDISH ENVIRONMENTAL RESEARCH INSTITUTE. Para cada sustancia de interés fueron preparados y estandarizados a condiciones tropicales y subtropicales para ser aplicados en campañas de 28 días, a 25°C. (Ferm y Rodhe, 1997). Ver Tabla 2.

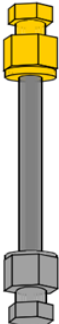
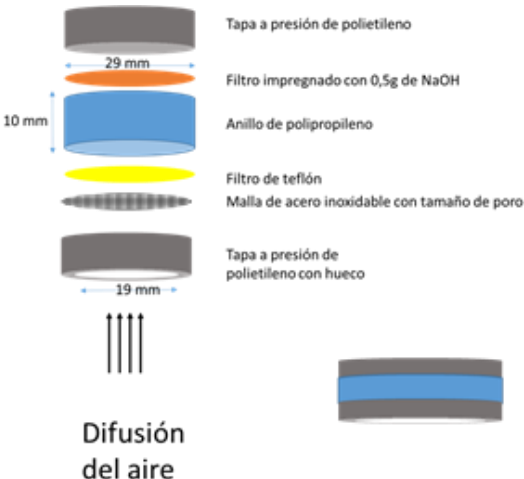
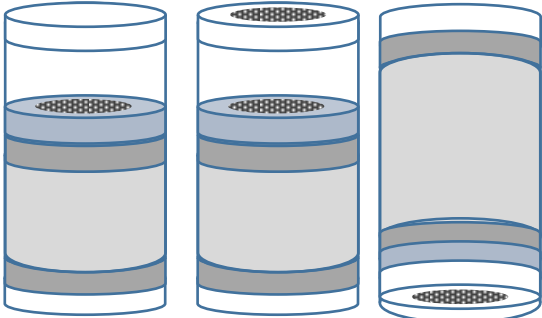
El uso de muestreadores de sistemas pasivos solventa las dificultades esenciales que presentan los colectores activos. (Koutrakis P., 1993). Su bajo costo de adquisición, facilidad analítica de medición, la sencillez en su manipulación, la facilidad de transporte y la versatilidad de ubicación en el momento de localizarlos en los muestreos, hacen de los sistemas pasivos la herramienta idónea para la ejecución de estudios.

Su información obtenida a partir de los muestreadores pasivos es fiable y permite localizar una mayor cantidad de muestreadores, permitiendo llevar a cabo campañas a gran escala cubriendo grandes áreas de muestreo, estudios de base, observación de tendencias e

ingreso de información sobre las modalidades de contaminación del aire. Actualmente es el método más idóneo para hacer estudios de base o discriminatorios para la evaluación de la distribución espacial de los contaminantes y son muy utilizados para identificar zonas calientes donde existen elevadas concentraciones de dichos contaminantes (Dahal B., 2016).

Los muestreadores se instalaron en todas las estaciones, siguiendo la norma y el protocolo sugerido por el IVL SWEDISH ENVIRONMENTAL RESEARCH INSTITUTE, la cual recomienda la adecuada orientación y soporte para asegurar la difusión molecular y para reducir las interferencias químicas. El muestreador se ubica en la parte interior de una placa de soporte metálico para evitar el impacto directo del viento y las salpicaduras de la precipitación.

Tabla 2. Tipo de muestreadores pasivos utilizados en este trabajo

TIPO DE MUESTREADOR	CARÁCTERÍSTICAS																		
<p style="text-align: center;"><b>CAPTADOR PARA COVs</b></p> <div style="display: flex; align-items: center;"> <table border="1" style="margin-right: 20px;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="text-align: center;">Carbopack B</th> </tr> <tr> <th style="text-align: left;">GAS</th> <th style="text-align: left;"><math>\mu\text{g m}^{-3}</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Benzene</td><td>0,30-150</td></tr> <tr><td>Toluene</td><td>0,28-90</td></tr> <tr><td>n-octane</td><td>0,20-240</td></tr> <tr><td>ethyl benzene</td><td>0,10-230</td></tr> <tr><td>m+p xylene</td><td>0,18-240</td></tr> <tr><td>o-xylene</td><td>0,20-270</td></tr> <tr><td>n-npne</td><td>0,12-220</td></tr> </tbody> </table>  </div>	Carbopack B		GAS	$\mu\text{g m}^{-3}$	Benzene	0,30-150	Toluene	0,28-90	n-octane	0,20-240	ethyl benzene	0,10-230	m+p xylene	0,18-240	o-xylene	0,20-270	n-npne	0,12-220	<p>Los muestreadores son tubos de acero inoxidable de 6.3 mm de diámetro externo, 90 mm de longitud y 5.5 mm de diámetro interno, rellenos con Carbopack B material específico para hidrocarburos de C<sub>2</sub> a C<sub>8</sub>, con una superficie específica de 90 m<sup>2</sup>/g (Martin et al., 2007; Pilidis et al., 2005).</p>
Carbopack B																			
GAS	$\mu\text{g m}^{-3}$																		
Benzene	0,30-150																		
Toluene	0,28-90																		
n-octane	0,20-240																		
ethyl benzene	0,10-230																		
m+p xylene	0,18-240																		
o-xylene	0,20-270																		
n-npne	0,12-220																		
<p style="text-align: center;"><b>CAPTADOR PARA SO<sub>2</sub></b></p>  <p style="text-align: center;">Difusión del aire</p>	<p>Estos captadores para SO<sub>2</sub> se basan en el uso de un filtro de celulosa impregnada de NaOH. Las concentraciones se miden utilizando la técnica de muestreo pasivo, que dependen de una reacción química y de difusión laminar, respectivamente. Los filtros impregnados selectivamente se utilizan para recoger muestras de especies específicas como en el caso del SO<sub>2</sub>, y la velocidad a la que una especie de gas en particular se difunde en el muestreador depende del coeficiente de difusión del gas.</p>																		
<p style="text-align: center;"><b>CAPTADOR PARA NO<sub>x</sub></b></p> 	<p>Es un captador de dos caras. En una de ellas se determina NO<sub>2</sub> y en la otra NO<sub>x</sub>. La cantidad de NO se calcula como la diferencia entre ambos extremos. El absorbente para captar NO<sub>2</sub> es TEA (trietanolamina) y para captar NO<sub>x</sub> es un reactivo propio de la empresa Ogawa.</p>																		

## 4.2 Marco normativo.

El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, en el documento emitido bajo la Resolución número 610 del 24 de marzo de 2010, donde modifica la Resolución 601 del 4 de abril de 2006, establece las normas de calidad del aire para niveles máximos permisibles para contaminantes no convencionales con efectos carcinogénicos y umbrales para las principales sustancias generadoras de olores ofensivos, establece los umbrales para dos de los tres compuestos orgánicos (benceno, tolueno) evaluados en este proyecto y para el SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub>.

*Tabla 3. Niveles máximos permisibles para contaminantes no convencionales con efectos carcinogénicos.*

Contaminante No Convencional	Nivel Máximo Permissible (µg/m <sup>3</sup> )	Tiempo de Exposición
Benceno	5	Anual
Tolueno	260	1 semana
	1.000	30 minutos
SO <sub>2</sub>	80	Anual
	250	24 horas
	750	3 horas
NO <sub>2</sub>	100	1 hora
	150	8 horas
	200	1 hora

Actualmente el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial está en el proceso de la elaboración de un protocolo de monitoreo sobre calidad de aire, el cual está siendo preparado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM. En este trabajo nos hemos acogido a la norma europea Norma EN 13528, en la cual el uso de dispositivos de monitoreo pasivo (captadores difusivos) es avalado; se incluye además todo lo concerniente a su correcta aplicación, siendo una guía para la selección, uso y mantenimiento.

## 5. METODOLOGÍA IMPLEMENTADA.

### 5.1 Sitio de estudio.

Cali es la capital del departamento del Valle del Cauca, ubicada en el suroccidente del país (Figura 10). Su población estimada para 2014 es de 2.344.703 habitantes, para una densidad de 156.9 habitantes por km<sup>2</sup> (Cali en cifras 2013).

- *Información geográfica de la ciudad de Cali.*

Se encuentra ubicada geográficamente a 3°27'26" Latitud norte y 76°31'42" Longitud oeste (Meridiano de Greenwich). Posee una altura sobre el nivel del mar (m) (Coordenadas 110.000N, 110.000E) de 1,070, con una altura máxima (m) (Farallones) de 4,070, y una altura mínima (m) (Oriente) de 950 (Cali en cifras 2013).

La ciudad de Cali posee una extensión municipal 560.3 km<sup>2</sup>, una longitud de 17 km de Sur a Norte y 12 km de Oriente a Occidente. Su superficie por comunas es de 120.9 km<sup>2</sup>, por corregimientos 437.2 km<sup>2</sup>, por protección al Río Cauca 2.2 km<sup>2</sup>. Su superficie respecto al suelo urbano es de 120.9 km<sup>2</sup>, suelo rural 410.9 km<sup>2</sup>, suelo de expansión 16.5 km<sup>2</sup>, suelo suburbano 9.7 km<sup>2</sup>, suelo de protección Río Cauca 2.2 km<sup>2</sup> (Cali en cifras 2013).



Figura 10. Localización de la ciudad de Cali, Colombia.

La ciudad de Cali presenta una división territorial por comunas las cuales se crearon a partir del Acuerdo 15 de agosto 11 de 1988, donde se estableció la sectorización del Municipio de Cali, organizándose el área urbana en 20 Comunas y el área rural en 15

Corregimientos. El Acuerdo 10 de agosto 10 de 1998 crea la Comuna 21. El Acuerdo 134 de agosto 10 de 2004 crea la Comuna 22, (Cali en cifras 2013).

Santiago de Cali tiene un clima de sabana tropical en términos generales, con temporadas de lluvias y secas que se alternan durante el año. De diciembre a marzo y de julio a agosto es el ciclo conocido como estación seca. De abril a junio y de agosto a diciembre el de estación lluviosa. La ciudad se encuentra en una cordillera, lo cual produce microclimas. La porción noroeste de la ciudad, ubicada a 2,000 metros del nivel del mar, es más seca que la porción del sudoeste, que está a 4,000 metros de altura. Se reporta una temperatura promedio (°C) 24.6 y una precipitación anual de 1,588.0 mm.

## 5.2 Estrategia de muestreo y análisis de las muestras.

- *Periodos muestreados.*

Se realizaron nueve campañas durante 2014 y 2015 (ver Tabla 4). Las fechas en las cuales se realizaron los monitoreos lamentablemente no se pudieron planear con la temporalidad deseada. Los resultados obtenidos son la primera línea base de estos contaminantes en la atmósfera de la ciudad de Cali y permiten la ubicación de las zonas más críticas y de mayor riesgo para la salud humana.

*Tabla 4. Fechas en las cuales se realizaron las campañas de muestreos mediante los convenios CVC-UNIVALLE.*

CAMPAÑAS	FECHAS	AÑO
1	febrero 17 a marzo 17	2014
2	marzo 17 a abril 21	2014
3	junio 3 a julio 2	2014
4	febrero 25 a marzo 26	2015
5	marzo 26 a abril 23	2015
6	Septiembre 23 a octubre 21	2015
7	Octubre 21 a noviembre 18	2015

- *Selección de los puntos de monitoreo.*

Se seleccionaron 44 puntos tratando de ajustarlos a una red regular ortogonal con cuadrícula de 1 km x 1 km (Figura 11). Los puntos de la grilla sufrieron modificaciones en campo debido a que fue necesario que coincidieran con el cumplimiento de la NORMA EUROPEA EN 13528-3 (AENOR, 2013). La localización de los puntos pretendía incluir fuentes de emisiones móviles y fuentes fijas de la ciudad.



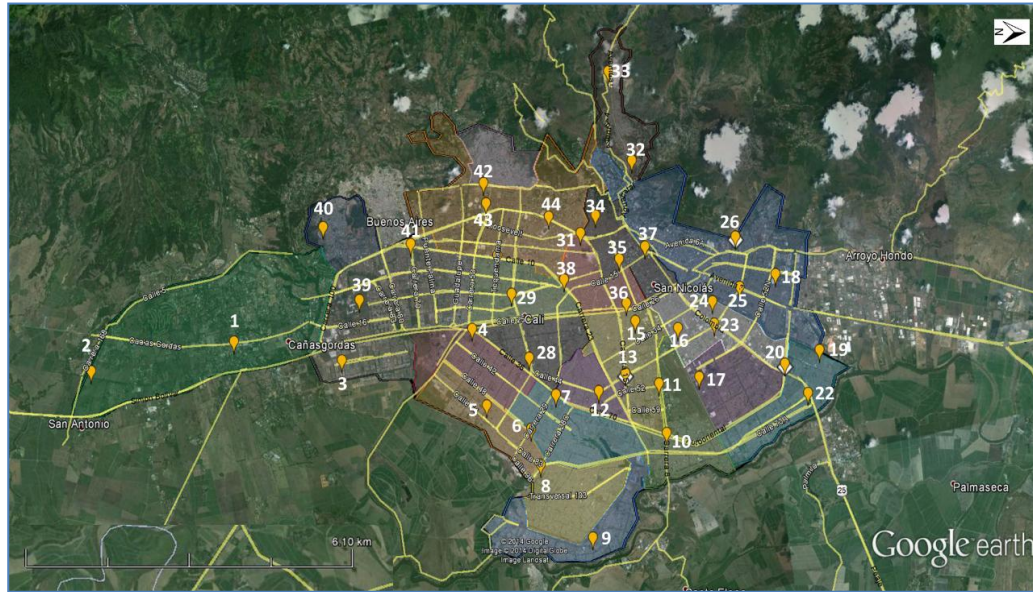


Figura 11. Ubicación de los puntos de monitoreo.

Se aseguró en cada punto de muestreo que la zona fuese un área abierta, (ver Tabla 5) sin estructuras mayores de 1 m en un radio 20 m del punto donde se ubicó el artefacto, evitando la presencia de obstáculos como construcciones, árboles y se evitó la presencia de postes con luminarias, puesto que la luz emitida por estas lámparas pueden generar ruidos e interferencias en la captación de los contaminantes.

Los captadores fueron izados en los sitios seleccionados entre los 6 y 9 metros de altura y solo dos de ellos fueron colocados en el segundo piso de una construcción debido a la seguridad de la zona a monitorear (Figura 12). A estos niveles se reducía la posibilidad de manipulación por desconocidos.

Figura 12. Alturas a las que fueron izados los artefactos en cada estación de monitor.



Tabla 5. Nombre y posicionamiento geográfico de los 44 puntos de monitoreo

NÚMERO	NOMBRE	COMUNA	Y	X	NÚMERO	NOMBRE	COMUNA	Y	X
1	ICESI	22	03°20'36"	-076°31'50"	23	CALL44_K1	4	03°28'11"	-076°30'35"
2	PAN_DAGMA	22	2	-076°31'52"	24	CASA_BOLIVARIANO	4	03°28'13"	-076°30'54"
3	CALICANTO	17	03°22'14"	-076°31'14"	25	AV3°N_44	2	03°28'41"	-076°31'01"
4	M_I_URRUTIA	16	03°24'22"	-076°31'16"	26	CHIPICHAPE	2	03°28'45"	-076°31'44"
5	C.A.L.I_15_VALLADO	15	03°24'23"	-076°30'09"	27	BLANCO_CHIPICHAPE	2	03°28'45"	-076°31'44"
6	ET_DAGMA	13	03°25'01"	-076°29'41"	28	PRIMAVERA	11	03°25'11"	-076°30'41"
7	CONFANDI_CALIPSO	13	03°25'30"	-076°30'05"	29	GUABAL	10	03°25'05"	-076°31'38"
8	C.A.I._MOJICA	14	03°25'04"	-076°29'09"	30	AUTOPISTA_CON_44	19	03°24'58"	-076°32'13"
9	COMPARTIR_DAGMA	21	03°25'41"	-076°27'58"	31	CLUB_NOEL	3	03°26'20"	-076°32'16"
10	PUENTE_1000_DIAS	7	03°27'08"	-076°29'12"	32	AGUACATAL	1	03°27'20"	-076°33'07"
11	BASE_AEREA	7	03°27'09"	-076°29'55"	33	TERRON	1	03°27'12"	-076°34'25"
12	NUEVA_FLORESTA	12	03°26'11"	-076°30'00"	34	SAN_CAYETANO	3	03°26'37"	-076°32'28"
13	CHAPINERO	12	03°26'39"	-076°30'10"	35	C_C_CALEÑO	3	03°26'52.1"	-076°31'47.1"
14	BLANCO_CHAPINERO	12	03°26'39"	-076°30'10"	36	ERA_DAGMA	9	03°26'51.6"	-076°31'08.5"
15	BENJ_HERRERA	4	03°26'57"	-076°30'52"	37	ERMITA	3	03°27'18.4"	-076°31'52.6"
16	CONF_DELICIAS	8	03°27'36"	-076°30'38"	38	LA_LUNA	9	03°25'56.9"	-076°31'40.2"
17	MAIZENA	5	03°27'48"	-076°29'53"	39	UNIVALLE	17	03°22'40.7"	-076°32'01.4"
18	FLORA_DAGMA	2	03°29'17"	-076°31'05"	40	MADIGAL	18	03°22'19.1"	-076°33'09.1"
19	FLORALIA	6	03°29'46"	-076°29'53"	41	PREMIER	17	03°23'38.3"	-076°32'38.8"
20	14_CALIMA	4	03°29'11"	-076°29'48"	42	SILOE	20	03°24'57.0"	-076°33'16.2"
21	BLANCO_14_CALIMA	4	03°29'11"	-076°29'48"	43	CAÑAVERALEJO	19	03°24'56.0"	-076°32'58.7"
22	ENTRADA_C._CALI	6	03°29'28"	-076°29'19"	44	PARQUE_BANDERAS	19	03°25'52.8"	-076°32'35.8"

- *Descripción de los puntos de monitoreo.*

A continuación se presenta un registro gráfico, geográfico y una pequeña descripción de cada uno de los puntos seleccionados. Como se observa en el reporte gráfico, cada uno de los puntos de monitoreo cumple con la norma Europea EN 13528-3 (AENOR, 2013) seguida en este proyecto.

Punto 1. ICESI. N3°20'36" W76°31'50" Comuna 22.



El muestreador se encuentra sobre un separador izado en un poste a 5.30 metros de altura y sobre el nivel del mar a 1.026 metros. Lo rodea un centro comercial de 2 pisos con parqueadero bastante arborizado pero a más de 20 m, amplias vías y un restaurante de techo alto en paja.

Punto 2. PAN\_DAGMA. N3°18'16" W76°31'52" Comuna 22.



El muestreador está ubicado en la antena de la estación a una altura de 5.15 metros y sobre el nivel del mar a 995 metros. El lugar es rural y se caracteriza principalmente por ser campo abierto con árboles a una distancia apropiada para el medidor.



Punto 3. CALICANTO. N3°22'14" W76°31'14" Comuna 17.



El muestreador está ubicado en un poste sobre la glorieta a una altura de 6.00 metros y sobre el nivel del mar a 974 metros. Este sector, aunque tiene muchas construcciones con vocación de vivienda familiar, goza de grandes zonas verdes como esta con árboles que están creciendo.

Punto 4. M\_I\_URRUTIA. N3°24'22" W76°31'16" Comuna 16.



El muestreador está ubicado en un poste frente al centro deportivo a una altura de 6.90 metros y sobre el nivel del mar a 967 metros. Al frente pasa la autopista Simón Bolívar, vía amplia y arborizada, con casa alejadas del dispositivo.

Punto 5. C.A.L.I\_15\_VALLADO. N3°24'23" W76°30'09" Comuna 15.



En un cuarto piso fue ubicado el muestreador a 13.40 metros de altura y sobre el nivel del mar a 970 metros. Desde este punto se ve que el sector prioritariamente es de vivienda no mayor a 2 pisos, con buena arborización.

Punto 6. ET\_DAGMA. N3°25'01" W76°29'41" Comuna 13.



Sobre la antena de la estación del DAGMA se encuentra instalado el muestreador a una altura de 6.40 metros del suelo y sobre el nivel del mar a 971 metros. Esta es un área abierta de pastos, casas de 1 piso y árboles a distancia apropiada para el medidor.

Punto 7. COMFANDI\_CALIPSO. N3°25'30" W76°30'05" COMUNA 13.



Ubicado en un poste al interior del club Comfandi, el muestreador tiene un panorama que comprende el espacio abierto de las canchas deportivas y una autopista importante por su amplitud y flujo vehicular. El medidor de aire está izado a 6.10 metros y sobre el nivel del mar a 972 metros.

Punto 8. C.A.I.\_MOJICA. N3°25'04" W76°29'09" .Comuna 14.



El muestreador está sobre un poste al costado de la vía, a 7.10 metros de altura y sobre el nivel del mar a 968 metros. Presenta paisaje conformado por calles vehiculares amplias, casas de 3 pisos máximo y algunos árboles diseminados por toda la zona.



Punto 9. COMPARTIR\_DAGMA. N3°25'41" W76°27'58". Comuna 21.



Sobre el separador se encuentra el muestreador izado en un poste a 6.40 metros de altura y sobre el nivel del mar a 972 metros. El paisaje comprende inicialmente vías de doble calzada, algunos árboles no muy altos sobre el mismo separador, casas de hasta 3 pisos y una amplia planta de energía.

Punto 10. PUENTE\_1000\_DIAS. N3°27'08" W76°29'12" Comuna 7.



El muestreador está ubicado en un parque del sector frente a la obra de puentes que reemplazó la popular glorieta de Alfonso López. La altura del dispositivo en el poste es de 7.30 metros y sobre el nivel del mar 975 metros. Al frente está una vía con doble sentido muy amplia y de gran flujo vehicular.

Punto 11. BASE\_AEREA N3°27'09" W76°29'55". Comuna 7.



Ubicado en el poste del separador está el muestreador a una altura de 6.63 metros y sobre el nivel del mar a 962 metros. Por ser una intersección vial hay espacio abierto, solo cuenta con árboles a una distancia permitida y algunas construcciones de 2 y 3 pisos.

Punto 12. NUEVA\_FLORESTA. N3°26'11" W76°30'00" Comuna 12.



Sobre la esquina de maya se encuentra el poste con el muestreador izado a 6.10 metros y 968 metros respecto el nivel del mar. Dos vías muy transitadas cruzan por este sector y una hilera de casas al otro lado de la calle da muestra de un lugar residencial con algunos visos comerciales.



Punto 13. CHAPINERO. N3°26'11" W76°30'10" Comuna 12.



Los muestreadores, un blanco de campo y un medidor, se encuentran instalados en el poste ubicado al ingreso de la estación del transporte masivo integrado, la altura sobre el suelo de éstos es 6.60 metros y sobre el nivel mar 993 metros. Están rodeados de vías importantes en una intersección donde se encuentran también viviendas y locales comerciales no mayores a 3 pisos y pocos árboles.

Punto 14. CHAPINERO. N3°26'11" W76°30'10" Comuna 12 BLANCO DE CAMPO.

Punto 15. BENJ\_HERRERA. N3°26'57" W76°30'52". Comuna 8.



Zona mixta con industria y viviendas de calles amplias y poca vegetación alta. En un poste de esquina se encuentra el medidor a una altura de 6.30 metros suficiente para superar las edificaciones y sobre el nivel del mar el dispositivo está a 985 metros.

Punto 16. CONF\_DELICIAS. N3°27'36" W76°30'38". Comuna 4.



El lugar al interior donde está el muestreador es un club deportivo con paredes no superior a 3 metros de alto, el dispositivo se encuentra a 5.80 metros del suelo y sobre el nivel del mar 982 metros. Hacia el exterior se puede notar pocas construcciones de 2 plantas y baja presencia de árboles.

Punto 17. MAIZENA. N3°26'48" W76°29'53". Comuna 5.



El muestreador se encuentra izado en el poste ubicado entre la bahía y la calle a una altura de 5.70 metros y con 978 metros sobre el nivel del mar. Esta zona tiene dos calles amplias de gran circulación y en la acera opuesta un conjunto de apartamentos de 5 pisos. La industria más cercana tiene un cerco reforzado con single de menor altura al dispositivo, también hay otras fábricas en ladrillo limpio.

Punto 18. FLORA\_DAGMA. N3°29'17" W76°31'05". Comuna 2.



La Estación del DAGMA ubicada en el parqueadero de un importante almacén al norte de la ciudad, se encuentra a una altura de 15.07 metros que supera a grandes árboles que rodean el lugar, sin contar con edificios u otro tipo de construcciones a la vista y con 982 metros sobre el nivel del mar.

Punto 19. FLORALIA. N3°29'46" W76°29'53". Comuna 6.



El muestreador izado en el poste de la cancha al lado del farillón tiene una altura de 6.50 metros y 968 metros sobre el nivel del mar. Está rodeado de espacios deportivos y árboles a una distancia favorable.



Punto 20. 14\_CALIMA. N3°29'11" W76°29'48". Comuna 4.



El separador de la vía es zona abierta donde quedaron el muestreador y el blanco izados en un poste a una altura de 6.50 metros y sobre el nivel del mar a 969 metros. Como se puede apreciar existen unidades de vivienda de varios pisos a gran distancia y de la misma forma, hay árboles bastante alejados.

Punto 21. 14\_CALIMA. N3°29'11" W76°29'48". Comuna 4. BLANCO DE CAMPO.

Punto 22. ENTRADA\_C.\_CALI. N3°29'28" W76°29'19". Comuna 6.



El muestreador está en un poste del separador de la vía a una altura de 5.80 metros y 966 metros sobre el nivel del mar. Zona vehicular muy transitada sin muchas construcciones, tan solo una casa de 3 pisos y algunos árboles no muy grandes.

Punto 23. CALL44\_K1. N3°28'11" W76°30'35". Comuna 4.



Como toda intersección vial, esta zona cuenta con un espacio muy abierto y particularmente existen construcciones bajas y con poca arborización. El muestreador fue ubicado en un poste del separador de la calle 44 a una altura de 6.40 metros y sobre el nivel del mar a 983 metros.

Punto 24. CASA\_BOLIVARIANO. N3°28'13" W76°30'54". Comuna 4.



El muestreador esta izado en una terraza de casa medianera a una altura de 6.20 metros y 984 metros sobre el nivel del mar. La vivienda se encuentra en una zona residencial con construcciones de 2 y 3 pisos, y con pocos árboles cercanos.

Punto 25. AV3°N\_44. N3°28'41" W76°31'01". Comuna 2.



Sostenida a un poste del separador se encuentra el muestreador en una zona abierta, por ser una intersección vial de gran flujo automotiz, pocos árboles de gran altura habitan en este lugar y solo hay cerca una edificación de 3 pisos.

Punto 26. CHIPICHAPE. N3°28'45" W76°31'44". Comuna 2.



Amarrado a un poste de gran altura y al lado de la vía se encuentran los muestreadores, rodeados de un edificio en construcción, un montículo lleno de maleza, las paredes no muy altas de una empresa y la calle con ningún obstáculo atravesado.



Punto 27. CHIPICHAPE. N3°28'45" W76°31'44". Comuna 2. BLANCO DE CAMPO.

Punto 28. PRIMAVERA. N3°25'11" W076°30'41". Comuna 11.



Muestreador ubicado sobre el poste a un lado del canal de aguas a 6.60 metros de altura y sobre el nivel del mar 970 metros. Este lugar es una intersección rodeada de un centro comercial, una bomba de gasolina, casas de 1 a 3 pisos y algunos árboles a distancias apropiadas para el medidor de aire.

Punto 29. GUABAL N3°25'05" W76°31'38". Comuna 10.



El muestreador está instalado en un poste sobre el separador de la calle 14 a una altura de 6.60 metros y sobre el nivel del mar a 990 metros. Este es una intersección muy amplia y cuenta con una bomba de gasolina en una esquina, por otro lado hay casas y finamente los árboles del sector están a la distancia necesaria.



Punto 30. AUTOPISTA\_CON\_44. N3°24'58" W76°32'13". Comuna 10.



El muestreador se encuentra izado en un poste donde hace esquina la autopista con la carrera 44 a 9.90 metros de altura y sobre el nivel del mar a 986 metros. Estas vías son amplias y con un cruce de puentes elevados hacia el sur y oriente, a diferencia de occidente que tiene construcciones que no superan los 2 pisos y al norte la calle de 8 carriles.

Punto 31. CLUB\_NOEL. N3°26'20" W76°32'13". Comuna 3.



Sobre una acera de la vía más importante de la ciudad, se encuentra elevado en un poste el muestreador de este sector. Rodeado por un puente peatonal y una edificación de 2 pisos como barreras más visibles, puesto que por los otros lados está despejado con construcciones suficientemente lejanas y escasa vegetación alta.

Punto 32. AGUACATAL. N3°27'20" W76°33'07". Comuna 1.



Sobre una pendiente se encuentra la casa pintada de color blanco donde reposa el muestreador. A los lados y atrás se extiende la cuadra con edificaciones de 2 y 3 pisos. Al frente tiene en primer plano la única vía del sector, en segundo plano; el verde de los árboles y de fondo, construcciones que se elevan sobre una montaña del oeste de la ciudad.

Punto 33. TERRON. N3°27'12" W76°34'25". Comuna 1.



El tercer piso descubierto de una casa lado frontal es donde está izado el muestreador de este punto. Las casas contiguas no presentan alturas superiores, por lo cual solo se observan las montañas en la lejanía.

Punto 34. SAN\_CAYETANO. N3°26'37" W76°32'28". Comuna 3.



El muestreador se encuentra en el poste de la esquina, como lo marca el círculo, donde confluyen cuatro vías de poca afluencia vehicular. También se hay construcciones de 1, 2 y 3 pisos con pocos árboles de gran altura.

Punto 35. C\_C\_CALEÑO. N3°26'52.1" W76°31'47.1". Comuna 3.



Por este lugar tan transitado del centro está ubicado un muestreador en el poste del separador. En uno de los lados se encuentra el edificio blanco (Palacio de Justicia) y diagonal a este se encuentra otro edificio de menor tamaño enchapado en ladrillo limpio. Terminando de conformar estas esquinas está un pequeño centro comercial y un lote encerrado con malla.

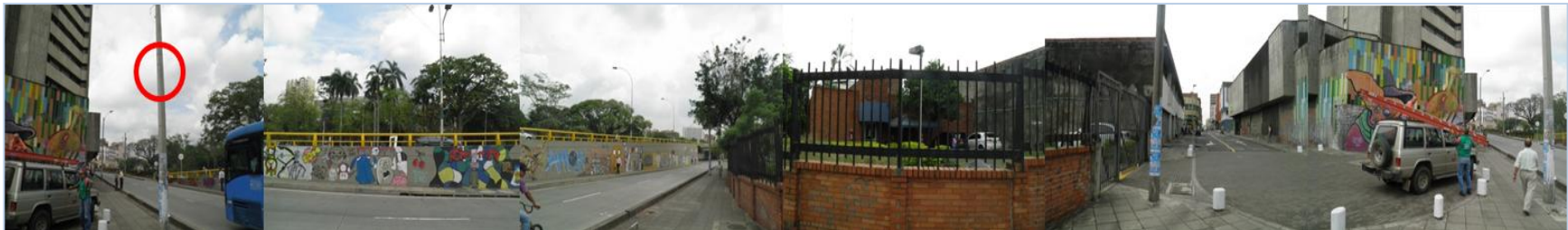


Punto 36. ERA\_DAGMA. N3°26'51.6" W76°31'08.5". Comuna 9.



La Institución Educativa “República de Argentina” es donde reposa la estación del DAGMA, en la cual se encuentra instalado el muestreador. La altura que alcanza el dispositivo es de 8.10 metros y sobre el nivel del mar 986 metros. La zona tiene casas de 1 y 2 pisos, pocos árboles de bajo crecimiento y palmas.

Punto 37. ERMITA N3°27'18.4" W76°31'52.6". Comuna 3.



El muestreador ubicado en un poste cuenta con una edificación alta como único obstáculo, por otra parte se ve una fila de árboles lejanos y en primer plano la vía que deja un gran espacio abierto.

Punto 38. LA\_LUNA. N3°27'18.4" W76°31'52". Comuna 9.



Esta zona la conforma construcciones de hasta 4 pisos, pero prevalecen las de 2, al igual que amplias vías muy transitadas por ser hoy de vocación comercial. El muestreador se encuentra ubicado en un poste del separador sobre la calle 13, a 7.15 metros de altura y sobre el nivel del mar a 984 metros.

Punto 39. UNIVALLE. N3°22'40" W76°32'61". Comuna 17.



El muestreador se encuentra en una antena de la estación del DAGMA a una altura de 4.20 metros y sobre el nivel del mar a 993 metros. Esta zona es un campo abierto especialmente con árboles de mediana altura.



Punto 40. MADIGAL. N3°22'19" W76°33'09". Comuna 18.



Este muestreador está ubicado en un poste fuera de la unidad de viviendas a 6.80 metros y sobre el nivel del mar a 1.064 metros. El punto tiene una vista abierta a toda la ciudad por el oriente y norte; al sur están los bloques de los apartamentos, y por el occidente tiene un montículo que se antepone a la cadena de montañas de los farallones.

Punto 41. PREMIER. N3°23'38" W76°32'38". Comuna 17.



Ubicado a un costado de la autopista sur oriental sentido norte sur, se encuentra el poste con el muestreador a una altura de 6.80 metros y sobre el nivel del mar a 995 metros. Esta es una vía importante de la ciudad y cuenta en este punto, además de un canal de aguas lluvias, con dos construcciones grandes de comercio por un lado, y por el otro; viviendas entre las cuales hace presencia casas y edificios de hasta 4 pisos.

Punto 42. SILOE. N3°24'57" W76°33'16". Comuna 2.



El muestreador está instalado en el poste del separado cercano a la glorieta a 5.90 metros de altura y sobre el nivel del mar a 1.005 metros. El sector es vehicular específicamente, pero cuenta con construcciones no mayores a 2 pisos, un vivero, arborización a la distancia apropiada y tráfico constante de carros.

Punto 43. CAÑAVERALEJO. N3°24'56" W76°32'58". Comuna 19.



Contiguo a la estación del Miocable se encuentra el muestreador izado en un poste a 6.80 metros de altura y sobre el nivel del mar a 1.000 metros. Este lugar cuenta con amplio espacio sin construcción alguna al lado norte y occidente respecto al medidor, en el sentido sur- oriente está el complejo del MIO.



Punto 44. PARQUE\_BANDERAS N3°25'52.8" W76°32'35". Comuna 19.



El muestreador se ubicó en un poste contiguo a la vía, a una altura de 7.35 metros y sobre el nivel del mar a 1.002 metros. La zona está dispuesta con un parque bastante arborizado, amplias vías muy transitadas y a una distancia no menor de 50 metros, construcciones hasta de 5 pisos y la estación del servicio de transporte MIO.

- *Información meteorológica de la ciudad de Cali.*

En general, los vientos en Cali proceden del norte en el norte de la ciudad, del nororiente en el sur y del noroccidente en el occidente. Se tienden a presentar velocidades bajas en el norte y sur de la ciudad y velocidades un poco más altas en el occidente de la misma.

En Cali, los vientos más fuertes se presentan en enero y entre los meses de julio a septiembre, mientras que, los más bajos se presentan en abril, mayo, octubre y noviembre. Durante el día, las velocidades más altas se dan en la tarde (desde las dos o tres de la tarde en adelante) y las primeras horas de la noche y las más bajas en la noche y la madrugada (IDEAM–METEO/007-2010).

Las épocas secas van de diciembre a marzo y de julio a agosto y la época de lluvias de abril a junio y de agosto a diciembre. Sin embargo, hay un período del año en el que hay mayor probabilidad de lluvias frecuentes que comprende los meses de abril, mayo y junio, mientras que los períodos más calurosos y secos del año se extienden entre los meses de diciembre y marzo (generado por influencia de los vientos alisios del noroeste) y entre los meses de junio y agosto (generado por influencia de los vientos alisios del suroeste).

A continuación, en la Tabla 6 y la Tabla 7, se recopila directamente la información consignada en los boletines generados por el grupo de calidad de aire del DAGMA en sus reportes mensuales respecto a la meteorología de los meses de trabajo.

([http://www.cali.gov.co/dagma/publicaciones/sistema\\_de\\_vigilancia\\_de\\_calidad\\_del\\_aire\\_de\\_cali\\_svcac\\_pub](http://www.cali.gov.co/dagma/publicaciones/sistema_de_vigilancia_de_calidad_del_aire_de_cali_svcac_pub))

Tabla 6. Resumen climatológicos durante los meses de muestreo en el año 2014

MES	VIENTOS	PRECIPITACIÓN
1 al 28 de febrero	<p><b>Norte:</b> Los vientos predominantes provienen principalmente del sureste de la ciudad, aunque la tendencia no es muy fuerte del todo, con algunos vientos provenientes del este.</p> <p><b>Centro:</b> Los vientos predominantes provienen en su mayoría principalmente del sur.</p> <p>El 99% de los datos horarios monitoreados durante el mes de Febrero en el centro de la ciudad, registraron una intensidad de la velocidad de los vientos menor a 4 m/s, esto muestra que hubo una relativa calma y el viento fue suave durante el mes.</p>	En 13 de los 28 días transcurridos del mes de Febrero se presentaron lluvias en la ciudad.
1 al 31 de Marzo	<p><b>Norte:</b> Los vientos predominantes provienen Principalmente del sureste de la ciudad, aunque se observó que en términos generales la mayor frecuencia de la velocidad de vientos esta entre 0 y 2.4 m/s.</p> <p><b>Sur:</b> Algunos vientos predominantes provienen del sur (Jamundí y demás municipios circunvecinos), y otros vientos provienen del noreste. Los vientos predominantes provienen en su mayoría principalmente del sur. Se observó que en términos generales la mayor frecuencia de la velocidad de vientos esta entre 0 y 2.4 m/s.</p> <p>El 99% de los datos horarios monitoreados durante el mes de Marzo en el centro de la ciudad, registraron una intensidad de la velocidad de los vientos menor a 4 m/s, esto muestra que hubo una relativa calma y el viento fue suave durante el mes.</p>	En 14 de los 31 días transcurridos del mes de Marzo se presentaron lluvias en la ciudad.
1 al 30 de abril	<p><b>Sur (Estación PAN_DAGMA):</b> Los vientos predominantes no son claros ya que se observan vientos que provienen tanto del noroeste como el suroeste. Las frecuencias de las velocidades de los vientos registrados en las estaciones FLORA_DAGMA y PAN_DAGMA muestra que la mayor frecuencia de estos están por debajo de 2 m/s.</p>	En la estación PAN_DAGMA, se registraron 17 días de lluvias ligeras, mientras que en la estación FLORA_DAGMA se registraron 13 días de lluvia y la mayor frecuencia de precipitación se registró en la estación PAN_DAGMA con un nivel de 37.6 mm.
1 al 30 de junio	<p><b>Norte:</b> Los vientos predominantes provienen Principalmente del oeste y noreste de la ciudad.</p> <p><b>Sur:</b> Los vientos predominantes provienen en su Mayoría principalmente del noreste.</p>	En la estación PAN_DAGMA se registraron 12 días de lluvia, mientras que en las estaciones ERA_DAGMA y Compartir se registraron 9 días de lluvia, la mayor frecuencia de precipitación se registró en la estación PAN_DAGMA con un nivel de 47.3 mm.
1 al 30 de julio	<p><b>Norte:</b> Los vientos predominantes provienen Principalmente del oeste y sureste de la ciudad.</p> <p><b>Sur:</b> Los vientos predominantes provienen principalmente del noreste. La mayor frecuencias de las velocidades de los vientos registrados en las estaciones FLORA_DAGMA y PAN_DAGMA por debajo de 2 m/s.</p>	En la estación PAN_DAGMA se registraron 8 días de muy ligeras lluvias, mientras que en las estaciones ERA-Obrero y Compartir se registraron 7 días de muy ligeras lluvia. La mayor frecuencia de precipitación se registró en la estación PAN_DAGMA con un nivel de 31.7 mm.

NOTA: El informe es transcrito tal cual, solo se aplicó cambio a la nomenclatura de los nombres de las estaciones, por los utilizados en este estudio

Tabla 7. Resumen climatológico durante los meses de muestreo en el año 2015

MES	VIENTOS	PRECIPITACIÓN
1 al 28 de febrero	<b>Sur</b> (Estación PAN_DAGMA): Los vientos predominantes provienen en su Mayoría principalmente del norte. <b>Norte.</b> Los vientos registrados en las estaciones FLORA_DAGMA y PAN_DAGMA muestran que la mayor frecuencia de estos están por debajo de 2 m/s.	En la estación PAN_DAGMA se registraron 9 días de lluvias ligeras, mientras que en la estación FLORA_DAGMA se registraron 10 días de lluvia, la mayor frecuencia de precipitación se registró en la estación PAN_DAGMA con un nivel de 55.2 mm.
1 al 31 de Marzo	<b>Sur</b> (Estación PAN_DAGMA): Los vientos predominantes no son claros se reportan vientos que provienen tanto del noroeste como el suroeste. La frecuencias de las velocidades de los vientos registrados en las estaciones FLORA_DAGMA y PAN_DAGMA muestran que la mayor frecuencia de estos están por debajo de 2 m/s.	En la estación PANCE_DAGMA se registraron 14 días de lluvias ligeras, mientras que en la estación FLORA_DAGMA se registraron 17 días de lluvia. La mayor frecuencia de precipitación se registró en la estación PANCE_DAGMA con un nivel de 31.6 mm.
1 al 30 de abril	<b>Sur</b> (Estación PAN_DAGMA): Los vientos predominantes no son claros se reportan vientos que provienen tanto del noroeste como el suroeste. La frecuencias de las velocidades de los vientos registrados en las estaciones FLORA_DAGMA y PAN_DAGMA muestran que la mayor frecuencia de estos vientos están por debajo de 2 m/s.	En la estación PAN_DAGMA, se registraron 17 días de lluvias ligeras, mientras que en la estación FLORA_DAGMA se registraron 13 días de lluvia y la mayor frecuencia de precipitación se registró en la estación PAN_DAGMA con un nivel de 37.6 mm.
1 al 30 de septiembre	<b>Sur</b> ((Estación PAN_DAGMA): Las corrientes predominantes provienen tanto del suroeste como algunas del norte. Los vientos de mayor intensidad (entre 3 y 5 m/s) provienen del norte. Las frecuencias de las velocidades de los vientos registrados en las estaciones La FLORA_DAGMA y PAN_DAGMA, muestran que la Mayor frecuencia de estos vientos están por debajo de 2 m/s según.	En la estación PAN_DAGMA, se registraron 8 días de lluvias ligeras, mientras que en la estación FLORA_DAGMA se registraron 3 días de lluvias ligeras. La Mayor frecuencia de precipitación se registró en la estación PAN_DAGMA, con un nivel de 6.6 mm.
1 al 31 de octubre	<b>Sur</b> (Estación PAN_DAGMA): Las corrientes predominantes provienen tanto del nororiente como algunas del suroriente. Los vientos de mayor intensidad (Entre 3 y 5 m/s) provienen del norte. Las frecuencias de las velocidades de los vientos registrados en las estaciones FLORA_DAGMA y PAN_DAGMA muestran que la mayor frecuencia de estos están por debajo de 2 m/s.	En la estación PAN_DAGMA se registraron 16 días de lluvias ligeras, mientras que en la estación FLORA_DAGMA se registraron 10 días de lluvias ligeras. La mayor frecuencia de precipitación horaria se registró en la estación PAN_DAGMA con un nivel de 24,8 mm.
1 al 30 de noviembre	<b>Sur</b> (Estación PAN_DAGMA): Se encontró que las corrientes predominantes provienen en gran mayoría del nororiente. Los vientos de mayor intensidad (Entre 3 y 4 m/s) provienen del norte. <b>Oriente</b> (COMPARTIR_DAGMA): Se encontró que las corrientes predominantes provienen en gran mayoría del oriente y sur. Los vientos de mayor intensidad (Entre 5 y 8 m/s) no son definidos en su proveniencia.	En la estación PAN_DAGMA se registraron 17 días de lluvias ligeras, mientras que en la estación La Flora se registraron 13 días de lluvias ligeras. la mayor frecuencia de precipitación horaria se registró en la estación PAN_DAGMA con un nivel de 60.4 mm.

NOTA: El informe es transcrito tal cual, solo se aplicó cambio a la nomenclatura de los nombres de las estaciones, por los utilizados en este estudio.

- *Reducción de los 44 puntos de monitoreo a 22 puntos. Selección “hotspot”.*

Una vez realizados los monitoreos durante el primer semestre del 2014 de los cuarenta y cuatro puntos, incluidos tres blancos de calibración, se analizaron las variaciones de las concentraciones de los COVs y debido a que no fueron concluyentes para la reducción de los puntos de monitoreo, nuevamente en los dos meses iniciales del 2015 se monitorearon las 44 estaciones. A esta matriz de datos se les realizó un Análisis Clúster, o Análisis de Conglomerados, donde la técnica estadística multivalente permitió agrupar un conjunto de datos donde los perfiles del grupo fueran muy similares entre sí (cohesión interna del grupo). Ver anexo 1.

Para lograr una mejor optimización de los recursos y con la información colectada en los 3 muestreos de 2014 y 2 en el 2015, se procedió a generar una matriz de datos (ver anexo 1) a partir de benceno (B), tolueno (T), etilbenceno (E) y xilenos totales (Xt) de tal manera que por el método de clúster, se logrará la selección de los “hotspot”, que de ahora en adelante serían los más significativos y representativos para seguir monitoreando la ciudad de Cali, de una manera eficiente y económica.

Se escogió el análisis clúster debido que los grupos son desconocidos a priori y son precisamente lo que queremos determinar. Así que el objetivo fue obtener clasificaciones (clusterings), de manera exploratoria. Se partió del siguiente problema: Dado un conjunto de individuos (de N elementos) caracterizados por la información de n variables  $X_j$ , ( $j = 1, 2, \dots, n$ ), y se clasificaron de manera que los individuos pertenecientes a un grupo (clúster) (y siempre con respecto a la información disponible) sean tan similares entre sí como sea posible, siendo los distintos grupos entre ellos tan disimilares como sea posible. Para todos los clúster realizados se aplicó como método de distancia la distancia euclidiana; los métodos utilizados fueron Promedio, Centroide, Completo, Mediana, Sencillo, Ward (ver Figura 13). A partir de estos conjuntos de datos, se seleccionaron 22 de los 44 puntos de tal manera que fueran altamente representativos y considerados zonas críticas de alto riesgo que debían continuar siendo monitoreadas, (ver Tabla 8). No se realizó ninguna variación en las alturas del posicionamiento del muestreador. Los puntos seleccionados se registraron en la Tabla 9. Estos son: PAN\_DAGMA, C.A.L.I\_15\_VALLADO, COMPARTIR\_DAGMA, BASE\_AEREA, PRIMAVERA, CHAPINERO, BEJAMIIN\_HERRERA, CONFANDI\_DELICIAS, MAIZENA,, 14\_CALIMA, CALLE\_44\_K1, AV 3°N 44, FLORA\_DAGMA, ERMITA, C.C\_CALEÑO, ERA\_DAGMA, LA\_LUNA, GUABAL, PARAQUE\_BANDERAS, SILOE, MADRIGAL, UNIVALLE.

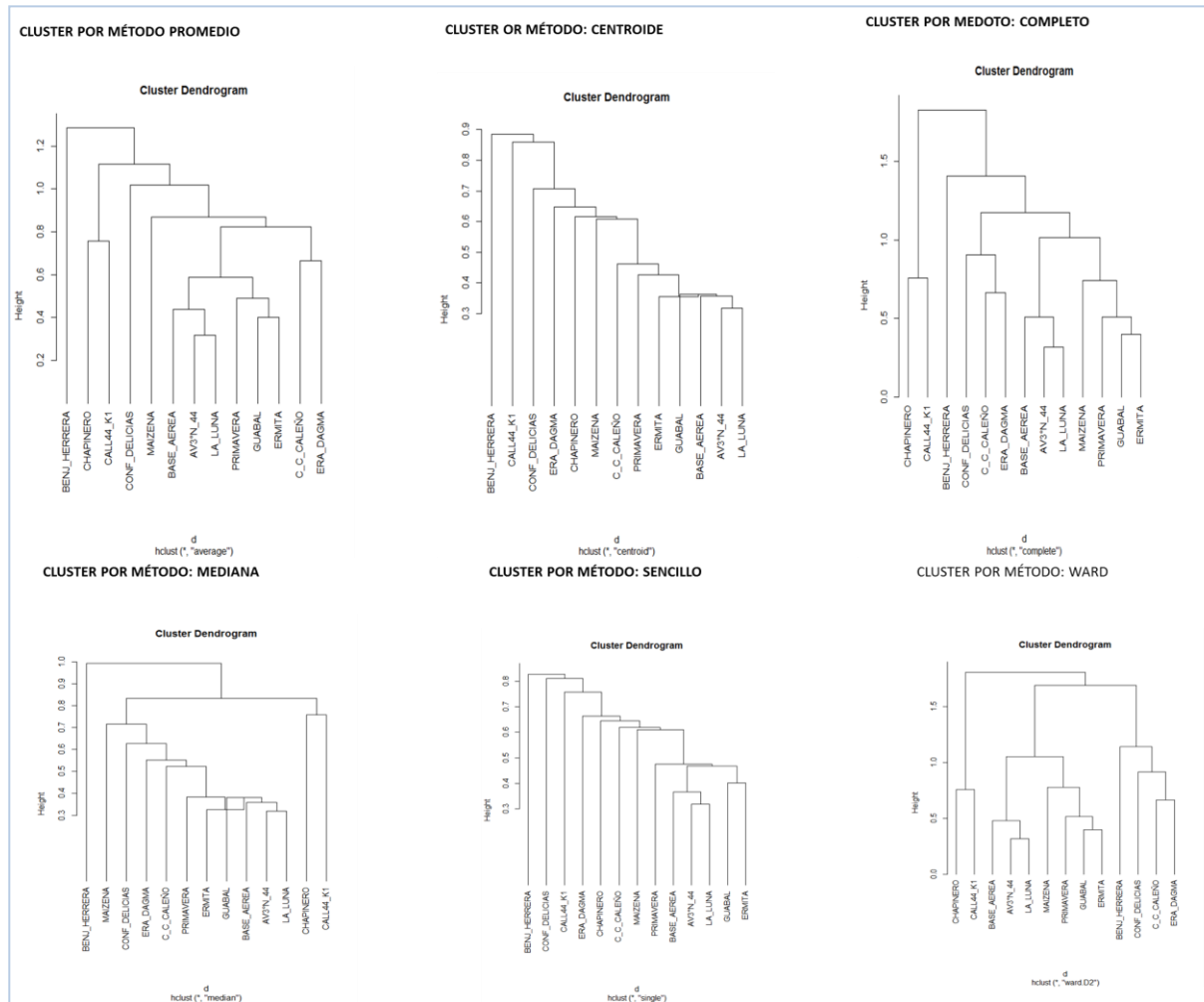


Figura 13. Dendrogramas aplicados para la selección de los 22 “hotspot”



Tabla 8. Número de estaciones monitoreadas por campaña

CAMPAÑA	AÑO DE MEDICIÓN	NÚMERO DE PUNTOS	ANALITOS EVALUADOS	CRITERIO
1	2014	44	COVs	Cubrimiento de las 22 comunas tratando de colocar 2 por comuna
2	2014	44	COVs	
3	2014	44	COVs	
4	2015	44	COVs	
5	2015	44	COVs, SO <sub>2</sub>	
6	2015	22	COVs, SO <sub>2</sub> y NOx	Monitoreo en los 22 "hotspot"
7	2015	22	COVs, SO <sub>2</sub> y NOx	Monitoreo en los 22 "hotspot"

- Localización de los 22 puntos de muestreo.

Los 22 puntos seleccionados se muestran en la Figura 14 y en la Tabla 9 se registra su posicionamiento geográfico.

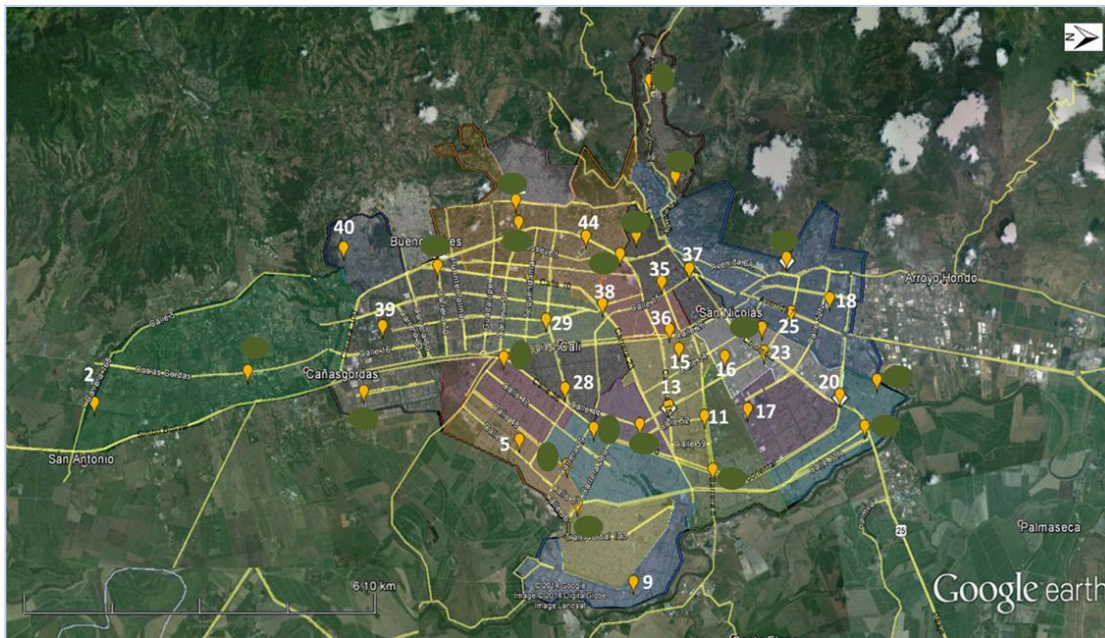


Figura 14. Ubicación de los 22 puntos seleccionados.



Tabla 9. Nombre, y ubicación de los 22 puntos seleccionados.

NÚMERO	NOMBRE	COMUNA	LATITUD	LONGITUD
2	PAN_DAGMA	22	3,30444	-76,53111
5	C.A.L.I_15_VALLADO	15	3,40667	-76,50278
9	COMPARTIR_DAGMA	21	3,42806	-76,46611
11	BASE_AEREA	7	3,45250	-76,49861
13	CHAPINERO	12	3,44417	-76,50278
15	BENJ_HERRERA	4	3,44917	-76,51444
16	CONF_DELICIAS	8	3,46000	-76,51056
17	MAIZENA	5	3,46333	-76,49806
18	FLORA_DAGMA	2	3,48806	-76,51806
20	14_CALIMA	4	3,48639	-76,49667
23	CALL44_K1	4	3,46972	-76,50972
25	AV3°N_44	2	3,47806	-76,51694
28	PRIMAVERA	11	3,41972	-76,51139
29	GUABAL	10	3,41806	-76,52722
35	C_C_CALEÑO	3	3,44781	-76,52972
36	ERA_DAGMA	9	3,44767	-76,51889
37	ERMITA	3	3,45511	-76,53111
38	LA_LUNA	9	3,43247	-76,52778
39	UNIVALLE	17	3,37797	-76,53361
40	MADRIGAL	18	3,37197	-76,55250
42	SILOE	20	3,41583	-76,55444
44	PARQUE_BANDERAS	19	3,43133	-76,54306

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Los resultados se presentarán (Figura 15) de la siguiente manera: inicialmente se mostrarán los datos recopilados durante el 2015 en el primer semestre (1 y 2), luego los del segundo semestre del 2015 (3 y 4), y posteriormente se compararán y analizarán el conjunto total de datos de 2015 como año.

A continuación se analizarán 2014 y 2015 como primer semestre, por ser los únicos datos que hay de 2014.

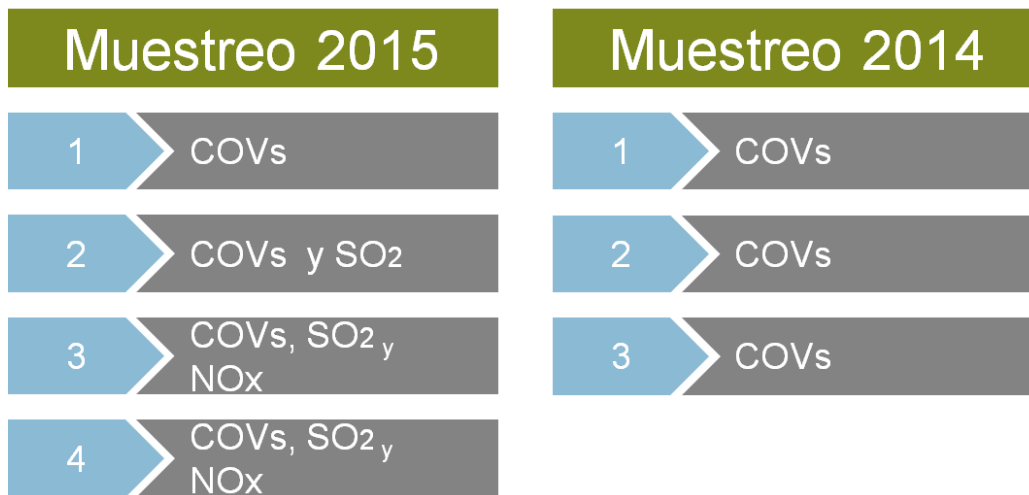
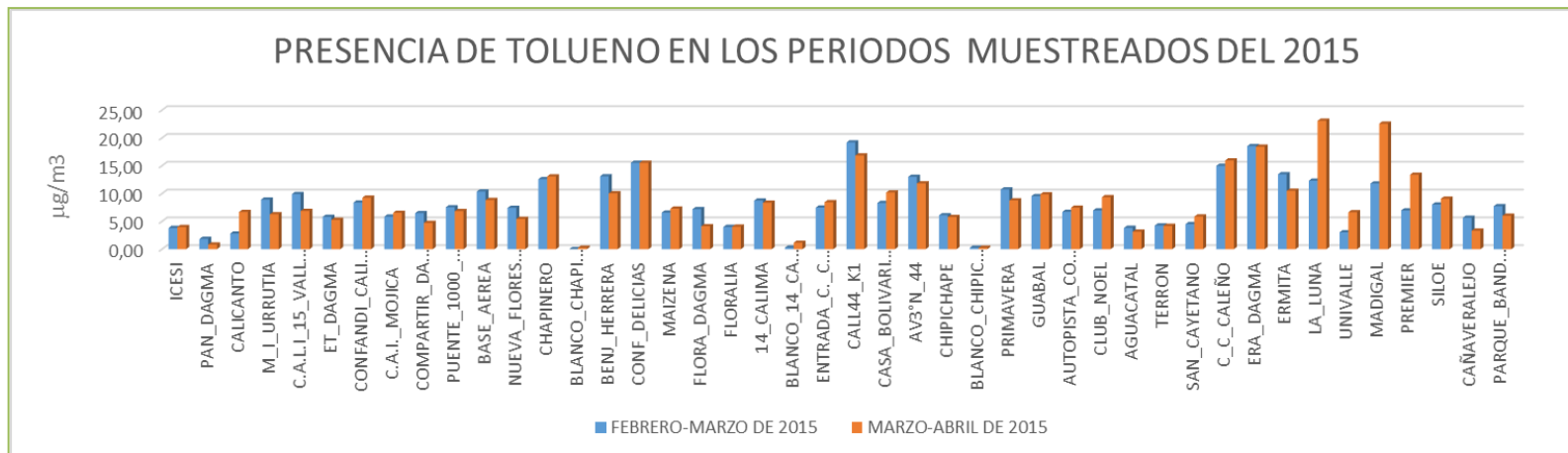
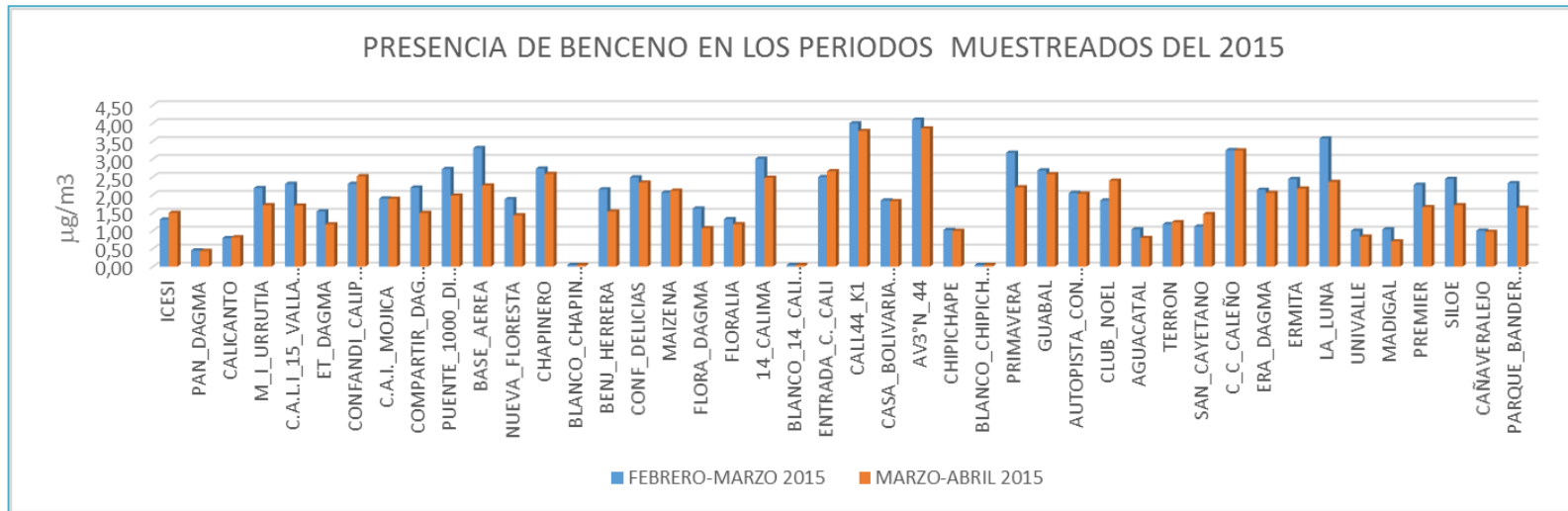


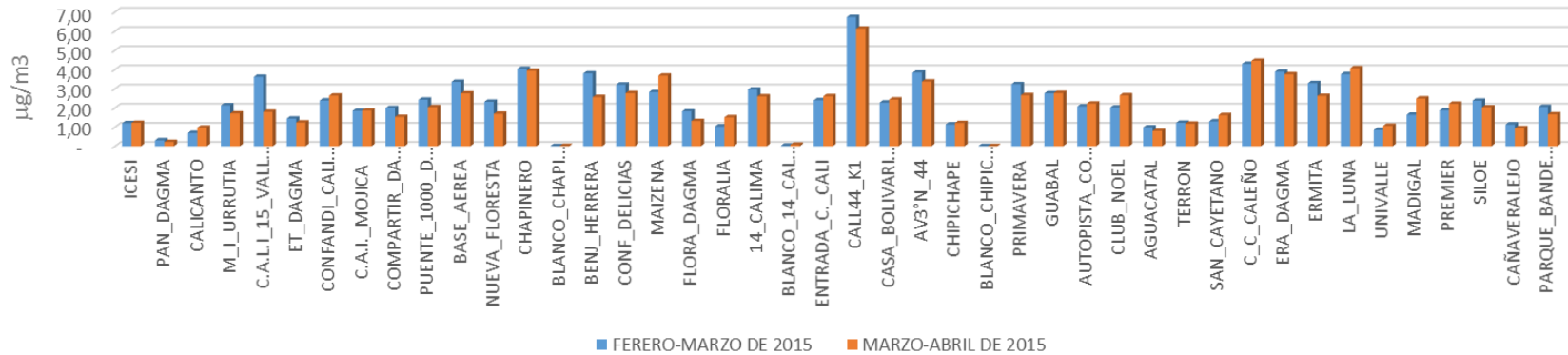
Figura 15. Esquema representativo de los compuestos evaluados durante los años 2014 y 2015

### 6.1 Concentraciones de los analitos medidos en el primer semestre del 2015

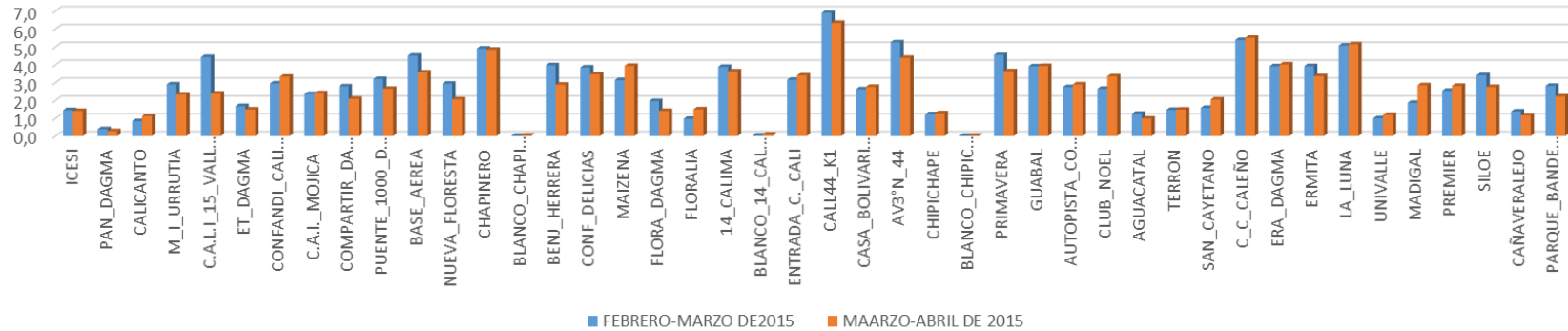
Los resultados de las campañas febrero-marzo y marzo-abril del 2015, para los COVs y SO<sub>2</sub> en el segundo bimestre (marzo-abril) del primer semestre del 2015, se registran en la Figura 16.

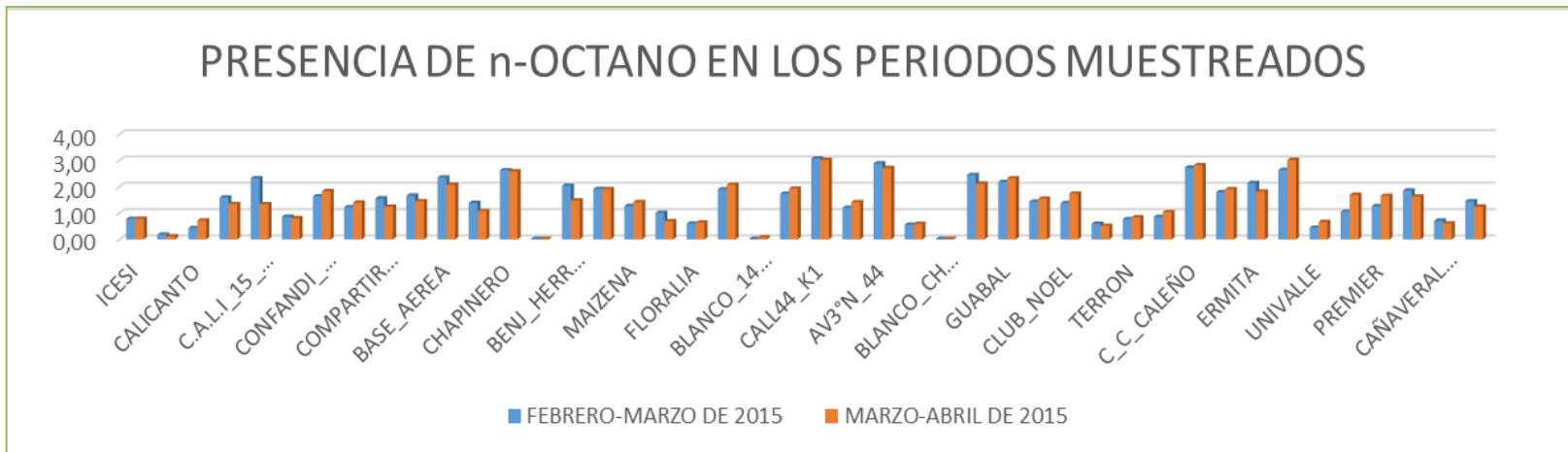
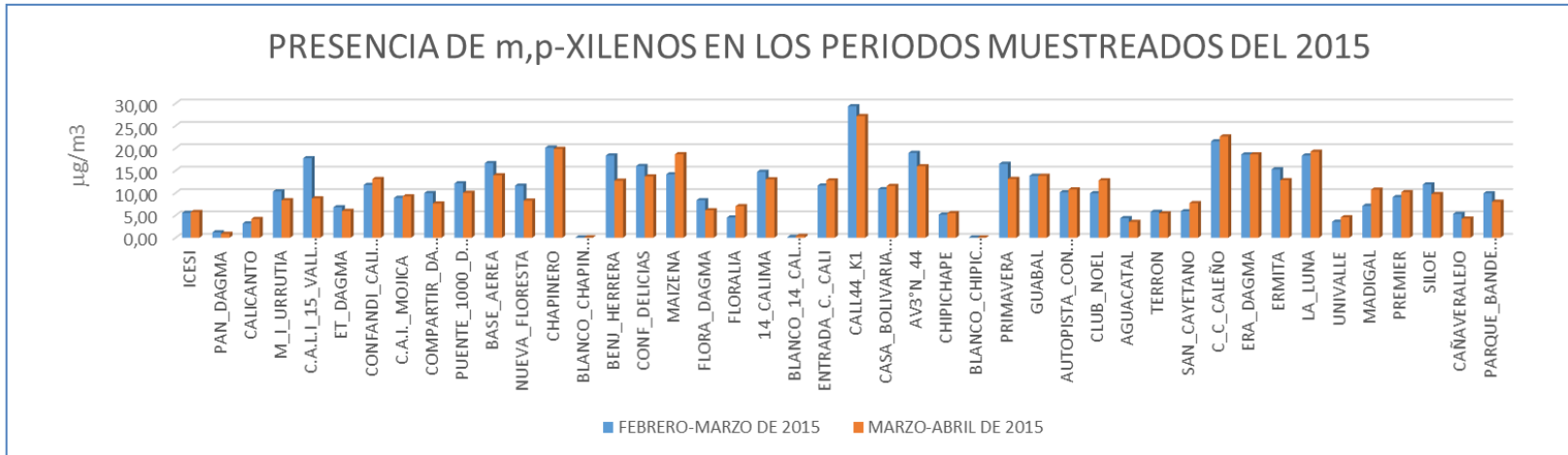


### PRESENCIA DE ETIL-BENCENO EN LOS PERIODOS MUESTREADOS DEL 2015



### PRESENCIA DE o-XILENO EN LOS PERIODOS MUESTREADOS DEL 2015





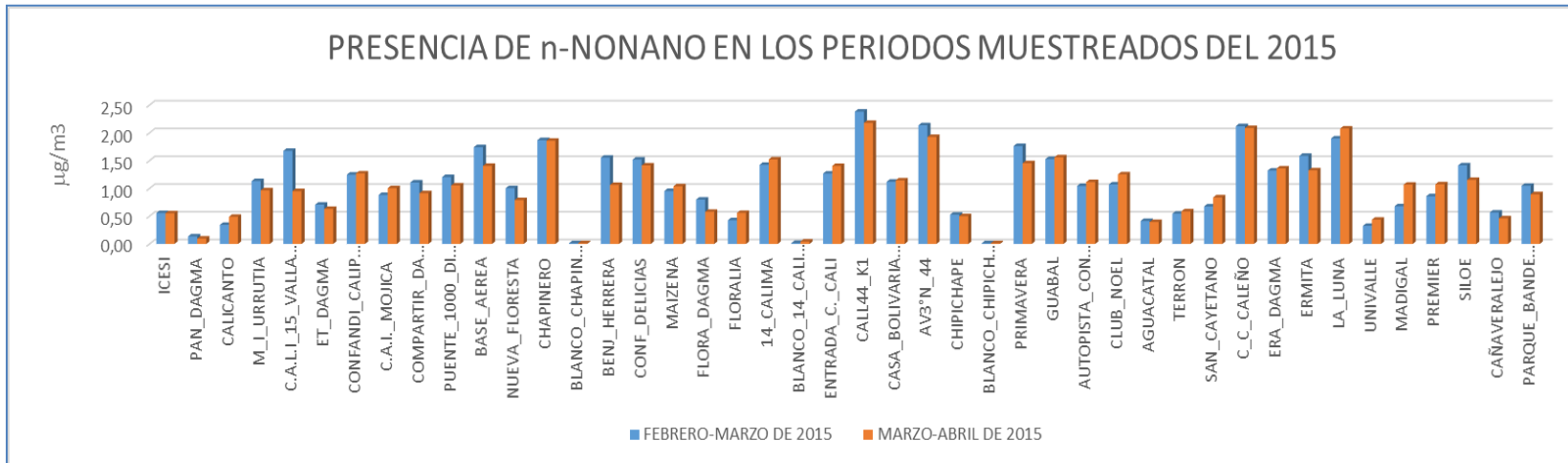


Figura 16. Resultados de las campañas febrero-marzo y marzo-abril del 2015, para los COVs y el primer monitoreo del SO2.



- *Benceno.*

Las concentraciones del bimestre monitoreado febrero-marzo y marzo-abril en el área urbana de Cali muestran que los valores reportados para el benceno no superan la Norma Colombiana Anual de calidad de aire  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Las estaciones que se acercan al valor máximo permisible para benceno en el aire son, en su orden: AV3°N\_44 (4,09) > CALL44\_K1 (3,99), las cuales a lo largo de todos los muestreos han presentado los valores más altos. También se registran LA\_LUNA, la BASE\_AEREA, el C\_C\_CALEÑO, CHAPINERO, la PRIMAVERA, 14\_CALIMA, el GUABAL, la ERMITA. Aunque los valores están por debajo de la norma, esta situación es preocupante si se tiene en cuenta lo expresado por la Organización Mundial de la Salud donde no recomienda un valor seguro de exposición para esta molécula y sí la considera cancerígena siendo el principal efecto en salud la leucemia (OMS 2004). Se indica que cuando ocurre una intoxicación crónica produce de modo selectivo una afectación en la médula ósea “admitiéndose la existencia de una relación causal entre altas exposiciones a benceno y el desarrollo de pancitopenia, anemia aplásica y leucemia” (NTP 486,1994).

Las estaciones reportadas con niveles superiores a  $3.00 \mu\text{g}/\text{m}^3$  durante febrero-marzo, se encuentran ubicadas en zonas de alto tránsito vehicular y demarcadas con los números 25 > 23 > 38 > 11 > 35 > 28 > 20, y en marzo-abril 25 > 23 > 35 respectivamente.

El hidrocarburo aromático que constituye las gasolinas ( $\pm 2\%$  en volumen) es el benceno, aunque su contenido es bajo se considera una de las principales fuentes de este compuesto en las atmósferas urbanas. Se genera principalmente en las zonas de distribución, depósito y venta de las gasolinas y en, segundo lugar, de la combustión incompleta de estas gasolinas en los motores de los automóviles.

- *Tolueno, etilbenceno, xilenos, n-octano y nonano.*

Los datos obtenidos por los muestreadores pasivos para tolueno, etilbenceno, xilenos, n-octano y nonano en las 44 estaciones del área urbana de la ciudad de Cali se registran en la Figura 16. Las concentraciones registradas son inferiores a la Norma Colombiana Semanal para tolueno de  $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , y para el caso del etil-benceno y los xilenos, todos los valores registrados están por debajo de la Guía Anual de la Organización Mundial de la Salud que reporta  $22.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $870 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente, de tal manera que no se registra problema de contaminación del aire en el área de estudio.

Aunque los valores detectados de los compuestos aromáticos, benceno, tolueno, y xilenos (BTX) no superan la norma, se sabe que son los compuestos más peligrosos de la gasolina (Perigo J.F. 2005, Adami G. 2006). Existe el riesgo de toxicidad aguda o crónica en humanos durante la producción, distribución y uso de la gasolina (Bruckner J.V., 2001). Trabajos sobre exposición humana y de animales a gasolinas sin plomo han reportado Hepatotoxicidad y nefrotoxicidad (Perigo J.F., 2005, Adami G., 2006, Benson J.M., 2011). Por ejemplo, adenoma renal (Benson J.M., 2011), la actividad sérica elevada de las enzimas hepáticas (Patrick-Iwuanyanwa K.C.,

2011), urea, creatinina y de potasio, y la disminución de cloro y sodio en animales de laboratorio (Uboh FE, 2009). En trabajadores dedicados a conducir automotores se ha detectado, proteinuria, actividad sérica elevada de las enzimas hepáticas (aspartato aminotransferasa, fosfatasa alcalina, alanina aminotransferasa), y una serie de cambios totales en los niveles de bilirrubina y el hígado graso (Lippmann S.J., 2011) (Neghab M.2015).

- $SO_2$ .

Las concentraciones de  $SO_2$  monitoreadas están muy por debajo de los valores de la norma Colombiana (ver Tabla 3 y Figura 16). Se resaltan los valores más altos obtenidos, con el ánimo de ubicar las posibles zonas de origen o más afectadas. ENTRADA\_C.\_CALI (11.9), 14\_CALIMA (8.5), FLORALIA (8.2), CALL44\_K1 (7.6), AV3°N\_44 (7,3), MAIZENA (7.2), FLORA\_DAGMA (6.8), CHIPICHAPE (6.7), CONF\_DELICIAS (5.7), CASA\_BOLIVARIANO (5.6), ERMITA(5.4) todas en  $\mu g/m^3$ .

Como se tiene claro las fuentes artificiales o antropogénicas de esta sustancia, se asignan a la producción energética y térmica derivada del consumo de combustibles que contienen azufre debido a que el azufre se encuentra presente en diversas proporciones en una gran parte de los combustibles fósiles, tanto sólidos como líquidos. Los combustibles líquidos y gaseosos en sus procesamientos de obtención y refinamiento pierden el azufre nocivo, de ahí, que los vehículos, con sus carburantes de petróleo refinado no constituya una fuente grave de contaminación de  $SO_2$ . Aunque los niveles de  $SO_2$  generados por las emisiones de automóviles se han reducido progresivamente y comparativamente son más bajos que las fuentes industriales, todavía están involucrados como fuentes de contaminación.

En general, la contaminación por  $SO_2$  que proviene de los procesos industriales a menudo se origina de las operaciones de fundición debido a que muchos elementos útiles se presentan normalmente en forma de sulfuros. Las gangas sulfurosas, por ejemplo, constituyen fuentes de cobre ( $CuFeS_2$  y  $Cu_2S$ ), Cinc ( $ZnS$ ) y plomo ( $PbS$ ). La mayor parte de las gangas sulfurosas se concentran y luego se tuestan en presencia de aire, con el fin de convertir los sulfuros en óxidos, que se reducen con mayor facilidad.

Las estaciones que reportan la presencia más alta de  $SO_2$ , están ubicadas en la zona norte de la ciudad y en la zona industrial, también ubicada en el nor-orientado de la ciudad. Se puede sugerir que su presencia se puede deber a material arrastrado por los vientos provenientes de la zona industrial de Yumbo que se mueven en dirección norte- sur y noreste sur de manera preferente, y de la zona industrial de Cali.

En la atmósfera el  $SO_2$  puede sufrir oxidación o deposición. La oxidación puede ocurrir por vía homogénea o heterogénea (acuosa o en partículas) siendo la más efectiva la oxidación heterogénea. La deposición puede ocurrir por vía seca o vía húmeda. La seca comprende la absorción del  $SO_2$  en el agua debido a que es muy soluble en ella, la absorción en materiales y la incorporación al metabolismo de plantas. La deposición seca del  $SO_2$  es muy efectiva. La

deposición húmeda incluye la incorporación del  $\text{SO}_2$  a nubes o el arrastre por agua de lluvia. La retención en nubes incluye todos los procesos que tienen lugar en el interior de las nubes y que contribuyen a la eliminación de diversas especies atmosféricas; mientras que el arrastre por agua de lluvia consiste en el proceso de eliminación directo de estas mismas especies, por la caída de la precipitación. (<https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2004/1/IQ588/1/material/> ).

En laboratorios de investigación se han evaluado los efectos del  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$ , en un ambiente mixto como ( $\text{NO}_2 + \text{SO}_2$ ) o ( $\text{SO}_2 + \text{O}_3$ ) en presencia de varios sustratos como el cobre, el zinc o el níquel donde se ha determinado que tienen un impacto influyente en la salud humana y en el deterioro de materiales con estos sustratos (Ameur-Bouddabbous, 2012).

La presencia del  $\text{SO}_2$  puede generar lluvias ácidas debido a la presencia del peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), que, naturalmente, puede ser producido por la iluminación durante tormentas eléctricas junto con el oxígeno y el ozono. El peróxido de hidrógeno actúa como oxidante eficaz en la conversión de dióxido de azufre disuelto ( $\text{SO}_2$ ) a ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) que acidifica nubes y posteriormente el agua de lluvia. Esta teoría ha sido evaluada en agua lluvia de Miami (EE.UU.), en el noroeste de España y en el Reino Unido. El efecto de la lluvia ácida afecta las cosechas, el pH de los ríos, el desgaste de materiales y edificios (Sánchez, 2015).

La presencia del  $\text{SO}_2$  tiene gran importancia debido a la toxicidad que tiene para la vegetación. En general se presentan daños agudos cuando son expuestas a concentraciones del orden de  $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$  por periodos cortos o por la exposición a concentraciones relativamente bajas durante largos periodos. Las plantas se ven afectadas durante su periodo de crecimiento en especial algunas coníferas o daños extremos por la aparición de necrosis apicales de color rojo o anaranjado.

## 6.2 Evaluación estadística de los datos de las campañas del primer semestre de 2015.

- *Benceno.*

En la Figura 17 se describe el comportamiento estadístico del benceno durante las dos campañas del 2015.

El diagrama permite decir que su distribución no corresponde a una distribución normal, con una asimetría de 0.45, aunque son solo dos campañas, cada una con 44 puntos, en las gráficas estadísticas se puede observar que cuando se normalizaron a una recta, la dispersión ocurre en los valores más altos y en los valores más bajos, pero que los valores medios tienden a ajustarse a una normal. Los diagramas de bigotes muestran una mediana de 1.96 la cual no está muy alejado de la media (1.92) con un nivel de confianza del 95%, de tal manera que las observaciones realizadas tratando de ajustar los datos a un comportamiento normal es correcto debido a ser moderadamente asimétricas.

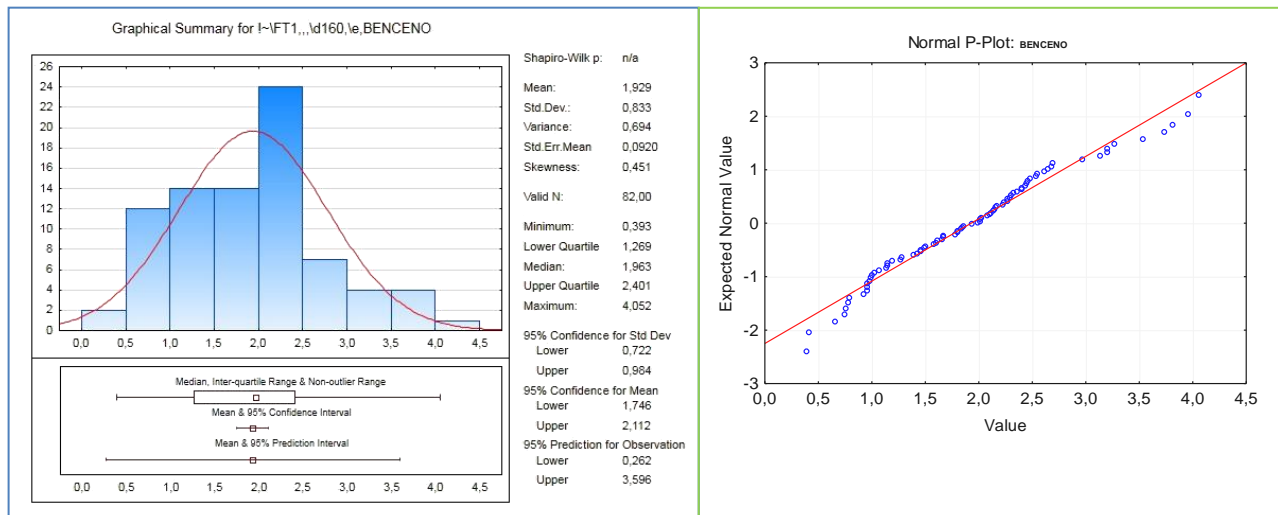


Figura 17. Comportamiento estadístico de los datos de benceno en las campañas del primer semestre de 2015.

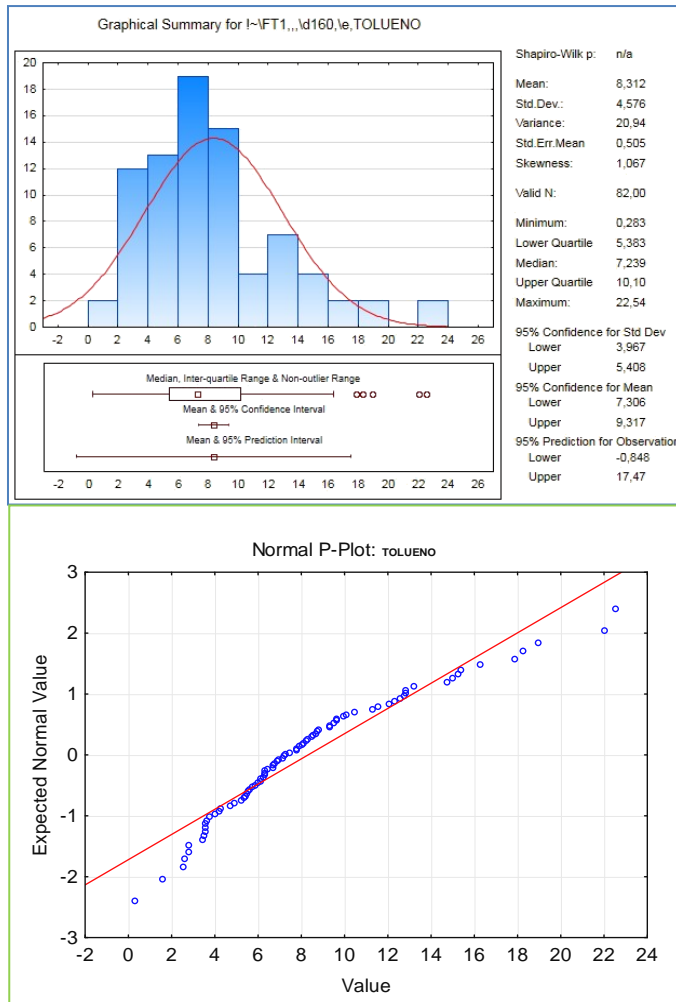
El primer diagrama de bigotes permite observar que esta vez los valores tuvieron un valor máximo de 4.05, pero todos fueron consecutivos sin apreciarse que existiera uno atípico dentro del rango de valores medidos, las estaciones de monitoreo que presentaron los mayores valores fueron en su orden AV3°N\_44, CALL44\_K1, LA\_LUNA, BASE\_AEREA, C\_C\_CALEÑO, PRIMAVERA, 14\_CALIMA y CHAPINERO, sitios que corresponden a zonas de alto flujo vehicular y uno muy cercano al aeropuerto de la base aérea. El diagrama de bigotes ubica la mediana en la zona baja del conjunto de datos, aspecto que se observa en todos los compuestos evaluados.

- *Tolueno.*

Los valores medidos durante las dos campañas del 2015 fueron menores al límite semanal de 260  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  establecido por la Norma Colombiana para el tolueno. Esto indica que los valores encontrados están muy por debajo de una situación de riesgo por este compuesto.

Como se observa en las gráficas estadísticas (Figura 18) este compuesto presenta una mayor dispersión en sus datos y oscila entre valores de 2.54 a 22.54  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , siendo el compuesto que más se aleja a una normalización de una recta y posee una distribución moderadamente asimétrica con una asimetría de 1.06. Las gráficas de bigotes muestran una mediana de 7.2, ubicada en la zona baja del conjunto de datos y el valor de la media en el intervalo de confianza del 95% y el intervalo de predicción están muy cercanos lo que permite analizar estos datos bajo el concepto de normalidad. De tal manera que sus varianzas en los valores atípicos se pueden asociar a las posibles fuentes y a su actividad fotoquímica y reacciones asociadas a la formación de ozono (Alonso L. <http://www.magrama.gob.es/>)

Figura 18. Comportamiento estadístico de los datos de tolueno en las campañas del primer semestre de 2015.



Se resaltan los datos atípicamente altos como son los de la estación de LA\_LUNA, en la primera campaña presenta el valor más alto ( $22.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y en la segunda disminuye a la mitad. Al observar detenidamente la estación, esta es considerada un cruce de alto flujo vehicular y generalmente con congestión del sector además de estar rodeada por edificios; la variación en los datos se puede deber a la acción fotoquímica y al efecto de los edificios sobre los vientos.

La estación denominada MADRIGAL, localizada en una reciente zona residencial del suroccidente de Cali y enclavada en la base de una zona montañosa, presentó un valor atípicamente alto. Por encontrarse alejada de la zona de alto flujo vehicular se puede sospechar que este dato puede ser asociado a la residualidad generada por la manufactura de coque a partir de carbón, ya que esta zona aloja algunas minas de carbón que se han manejado de forma artesanal (ATSDR, 2001).

Continúan los valores altos en la estación ERA\_DAGMA, localizada en la zona centro donde se encuentran talleres y comercio de reparaciones automotriz así como la

cercanía de una vía principal de transporte. La estación CONF\_DELICIAS, también presentó datos altos en los dos periodos monitoreados, posiblemente por el flujo vehicular; y por encontrarse en obra, la movilidad de los vehículos era más lenta y por tanto es posible que tuviera lugar un mayor consumo de combustible, (Lozhkina O.V, 2016).

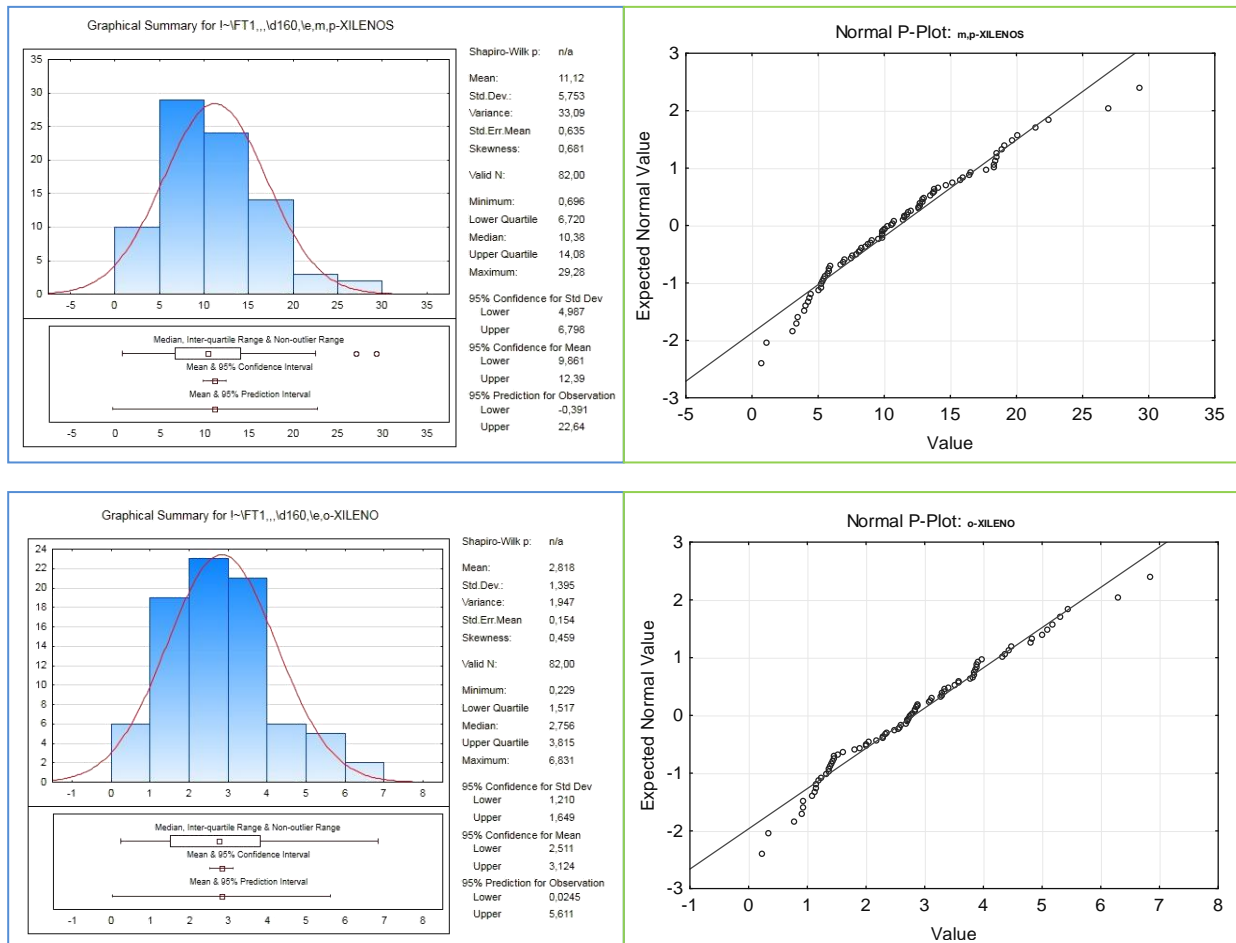
Los motores de diesel y gasolina son las principales fuentes que generan emisiones de tolueno a la atmósfera y este criterio corresponde a los sitios de mayor ocurrencia en la ciudad de Cali, puesto que coinciden con las vías de mayor movilidad del transporte masivo y movilidad de automotores. También se ajusta a las zonas de industrias relacionadas con el uso de pinturas, adhesivos y estaciones de gasolina.

- *Xilenos.*

El comportamiento estadístico de las concentraciones de xilenos en los dos periodos de monitoreo se observan en la Figura 19. La Norma Colombiana no establece un valor límite para este contaminante. La Organización Mundial de la Salud sugiere un valor guía anual de  $870 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , y  $4800 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como promedio de 24 h para los xilenos, (WHO, 2000) lo que indica que no hay problemas de contaminación del aire por xilenos en los sitios evaluados. Es importante anotar que los xilenos están asociados con la contaminación de aguas superficiales y subterráneas.

La presencia de los xilenos (Orto, Meta y Para xileno) en la atmósfera urbana se debe a la combustión incompleta de las gasolinas y en los vehículos dotados de catalizador, aparece como consecuencia de daño o destrucción de este, como resultado de su agotamiento o envenenamiento por otros agentes contaminantes. Los xilenos, en particular el m-xileno, son un elemento activo fotoquímicamente en la formación de ozono (Hamdi K., 2016)

Figura 19. Comportamiento estadístico de los datos de xilenos, campañas del primer semestre de 2015.





Los xilenos han sido clasificados por la Agencia Ambiental Americana como compuestos NO causantes de carcinogénesis en las personas, aunque sí es un compuesto tóxico capaz de dar lugar a otro tipo de afecciones sobre la salud de las personas. La inhalación de la mezcla de xilenos se asocia a la irritación del tracto respiratorio y gastrointestinal y a efectos neurológicos. En animales, estudios toxicológicos los asocian teratogénesis con mal desarrollo fetal y con daños sobre el desarrollo esquelético, (Parisellia F., 2009).

Los datos de los xilenos presentan distribución moderadamente asimétricas (ver Figura 19), positivas con valores de 0.61 para los m,p-xilenos y de 0.45, para el orto se presentaron los valores más altos en las estaciones CALL44\_K1, C\_C\_CALEÑO, CHAPINERO, AV3°N\_44, LA\_LUNA, siendo las dos primeras las que se caracterizaron por tener mayor flujo vehicular haciendo la circulación más lenta, aumentando el consumo de combustible.

- *Etilbenceno.*

En la Figura 20 se registran las gráficas estadísticas de las dos campañas realizadas durante el 2015. De este compuesto no existe normatividad colombiana aunque la Organización Mundial de la Salud recomienda un valor guía de 22.000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  como promedio anual. Las concentraciones registradas en la ciudad de Cali son inferiores a este valor, lo que indica que los niveles de etilbenceno no son preocupantes.

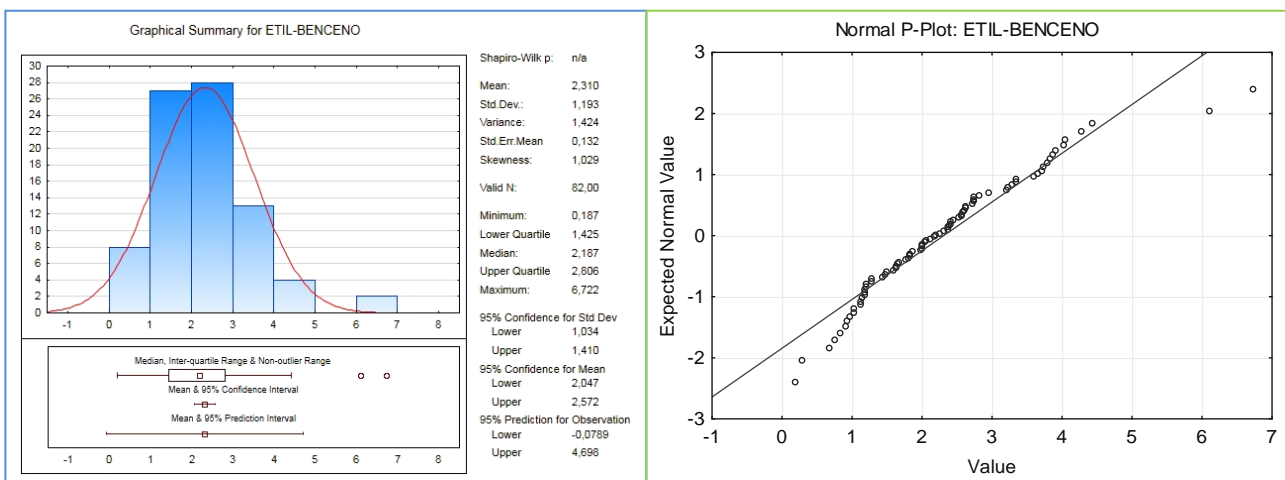


Figura 20. Comportamiento estadístico de los datos de etilbencenos, campañas del primer semestre del 2015.

Evaluando los datos obtenidos, se observa que las estaciones que poseen valores significativamente altos corresponden a CALL44\_K1, C\_C\_CALEÑO, LA\_LUNA, y CHAPINERO. Estos puntos coinciden con la combustión de hidrocarburos pero también con su presencia en materiales de construcción, adhesivos, materiales para arquitectura de interiores, recubrimientos tales como pinturas, barnices y tintes para el manejo de madera, elementos identificado como las principales fuentes de compuestos orgánicos volátiles (COV), tanto en entornos residenciales y no residenciales (Gennaro G.,2015).

- *n-Octano y nonano.*

Para estos compuestos no existen límites máximos permisibles en el aire. La forma de exponerse a estos compuestos es respirando el aire que lo contenga o por ingestión accidental. Los hidrocarburos alifáticos son compuestos frecuentemente utilizados en las industrias de obtención y recuperación de aceites, fabricación de pinturas, tintas, colas, adhesivos, así como materia prima de síntesis orgánica y como disolventes de aceites, grasas, caucho, resinas, etc., su interés facilita disponer de información que pueda asociar su presencia con la de los otros hidrocarburos solubles en las mismas matrices o por estar asociados a los hidrocarburos de los combustibles principalmente generados en el proceso de combustión de las gasolinas. En las dos campañas realizadas se observó que las zonas con mayor cantidad corresponden a CALL44\_K1, LA LUNA, AV3°N\_44, C\_C\_CALEÑO, LA\_LUNA, CHAPINERO.

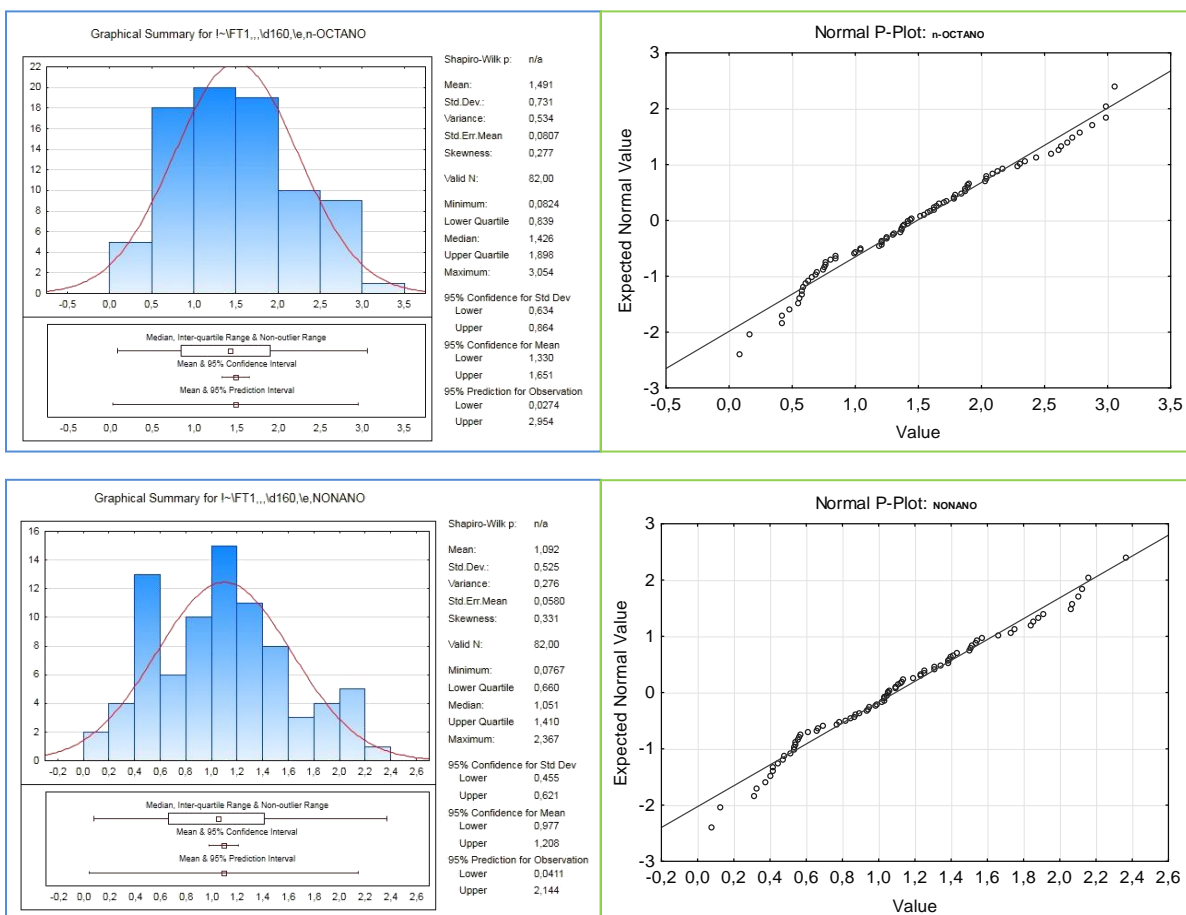


Figura 21. Comportamiento estadístico de los datos de *n*-octano y nonano, campañas del primer semestre del 2015.

Estos datos presentan la menor asimetría, (ver Figura 21) siendo los que más dejan percibir una distribución normal, además coinciden con los puntos más nombrados en la presencia de contaminantes por hidrocarburos aromáticos, reconfirmando los puntos calientes.

- SO<sub>2</sub>.

Estos primeros datos monitoreados de SO<sub>2</sub> en este trabajo permiten observar que están muy por debajo de la norma colombiana (80 µg/m<sup>3</sup>) pero su ubicación permite deducir que en general sus fuentes están principalmente en la zona nor-oriental de la ciudad de Cali, puesto que las estaciones de monitoreo que reportaron los valores más altos corresponden a las ubicadas en la parte nor-oriental de la ciudad siendo en su orden la ENTRADA\_C.\_CALI, 14\_CALIMA, FLORALIA, CALL44\_K1, AV3°N\_44, MAIZENA, FLORA\_DAGMA, CHIPICHAPE.

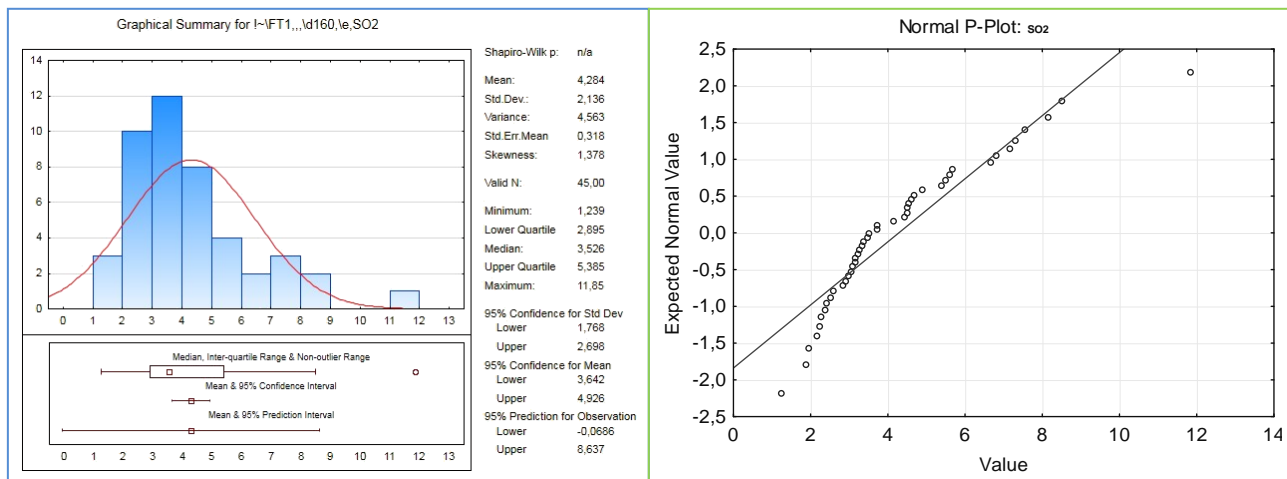


Figura 22. Comportamiento estadístico de los datos de SO<sub>2</sub>, campañas del primer semestre del 2015.

Los resultados estadísticamente presentan una mayor dispersión y una mayor asimetría (ver Figura 22). Siendo los primeros colectados en este estudio solo permiten encontrar la zona geoespacial de mayor incidencia. Aunque al visualizarlos en un diagrama de bigotes, por ahora se podría decir que hay un valor atípico alto y que las medias y medianas no se alejan entre sí.

### 6.3 Distribución espacial de los resultados de las campañas del primer semestre de 2015.

A los datos obtenidos se les aplicó geoestadística del Kriging o regresión Gaussiana, que permitió a través del atributo observado (en este caso los valores medidos) generar la interpolación a partir de modelado por covarianzas de los valores, creando mapas que permiten ubicar la distribución espacial de los contaminantes y visualizar las zonas denominadas “puntos calientes”, para los cuales se eligieron polinomios que permitieran optimizar la suavidad de los valores ajustados (Behera S. N., 2015). La combinación de los resultados del muestreo de aire pasivo con el método de Kriging permitió la optimización de la red en la selección de los puntos de monitoreo de tal manera que se tienen identificados los sitios de monitoreo requeridos para la medición continua en la ciudad de Cali.

Se parte de la información colectada por el Banco Mundial a más de 100 ciudades de países industrializados y no industrializados, donde se ha encontrado que el aire en muchas zonas urbanas presenta altos índices de contaminantes siendo poco saludable para la población (World Bank 2003). La ciudad de Cali ha experimentado una tasa de crecimiento muy rápido en el desarrollo socio-económico y de infraestructuras en las últimas dos décadas. Con una población de más de dos millones y un parque automotor calculado en el 2015 de 514231,34 vehículos, en una malla vial de 2481,0 Km, el volumen de tráfico en el área urbana está generando congestiones que inciden de manera negativa en la movilidad y afectan la productividad de la ciudad (Arboleda 2012). La intensa actividad industrial o el elevado tráfico vehicular generan en las comunidades preocupación sobre la calidad de su medio ambiente y el impacto que puede tener este sobre la salud de la población.

La comprensión de las variaciones espaciales de la contaminación del aire urbano es necesaria no sólo como base para la evaluación de la exposición, sino también para ayudar en la identificación de los "hotspot" y otras áreas que están en necesidad de intervención específica, así como para la gestión del tráfico y otras políticas de desarrollo (Lebret 2000).

Los puntos de interés para la presencia de compuestos orgánicos volátiles son las estaciones 25, 23, 35, 38, 11, 28, 20 que corresponden a AV3°N\_44, CALL44\_K1, C\_C\_CALEÑO, LA LUNA, BASE\_AEREA, PRIMAVERA, 14\_CALIMA (ver Figura 23) se ubicaron a partir de la representación espacial de los resultados aplicando kriging con el programa ArcMap 10.1 (ver Figuras de la 24-40).

En las Figuras 39 y 40 se registra la distribución espacial tanto del benceno como del tolueno de la campaña de febrero-marzo del 2015, las rutas del transporte masivo MIO y las principales vías de la ciudad donde se ve claramente la coincidencia de los valores encontrados y las rutas de los móviles.

#### Punto 25. AV3°N\_44. N3°28'41" W76°31'01". Comuna 2.



#### Punto 23. CALL44\_K1. N3°28'11" W76°30'35". Comuna 4.





Punto 35. C\_C\_CALEÑO. N3°26'52.1" W76°31'47.1". Comuna 3.



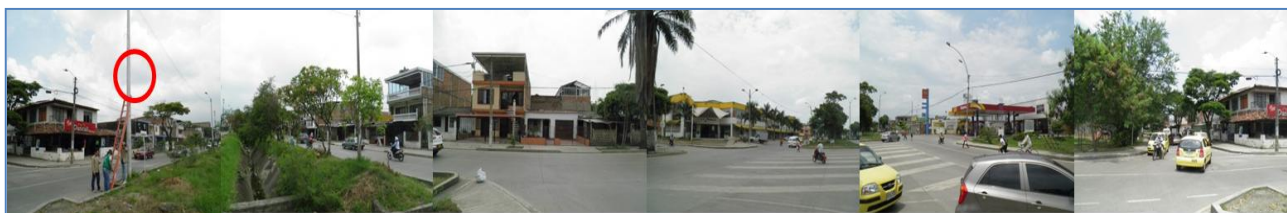
Punto 38. LA\_LUNA N3°27'18.4" W76°31'52". Comuna 9.



Punto 11. BASE\_AEREA N3°27'09" W76°29'55".Comuna 7.



Punto 28. PRIMAVERA. N3°25'11" W076°30'41". Comuna 11.



Punto 20. 14\_CALIMA. N3°29'11" W76°29'48". Comuna 4.



Figura 23. Descripción de los puntos de mayor interés en la presencia de benceno.



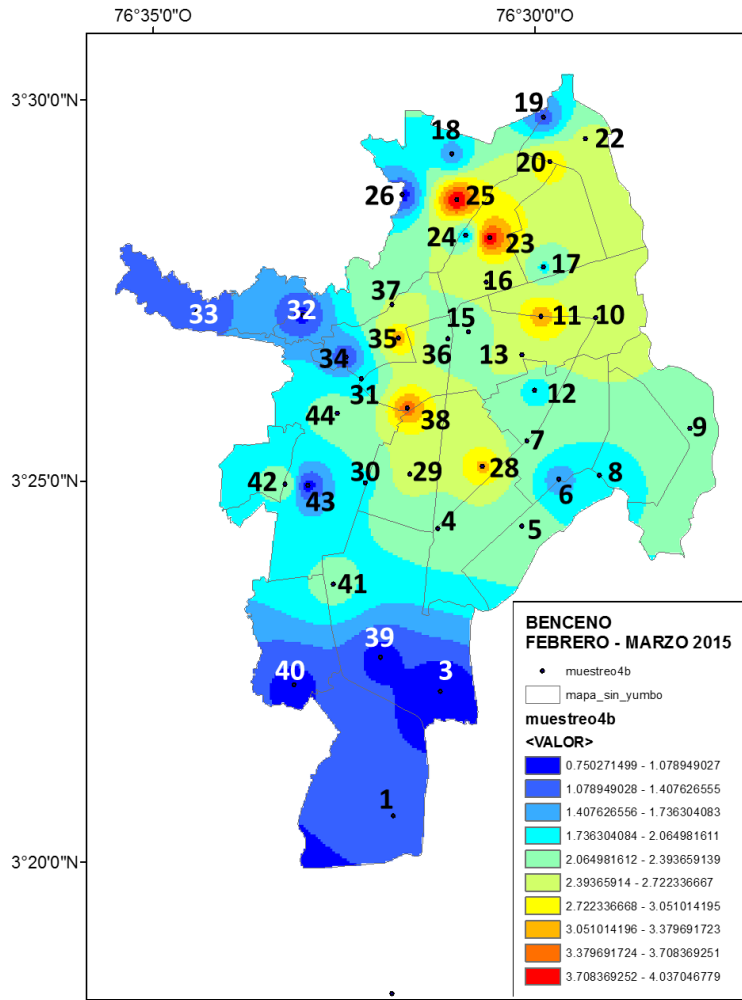


Figura 25. Variación espacial del benceno en la campaña febrero-marzo del 2015.

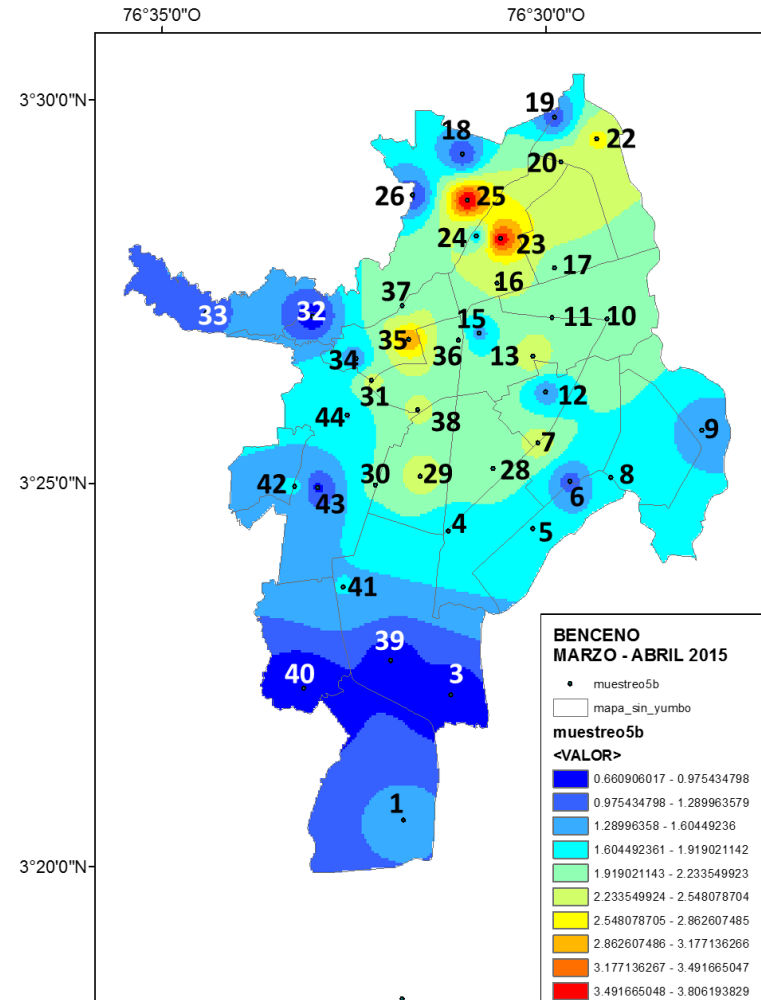


Figura 24. Variación espacial del benceno en la campaña marzo-abril del 2015.

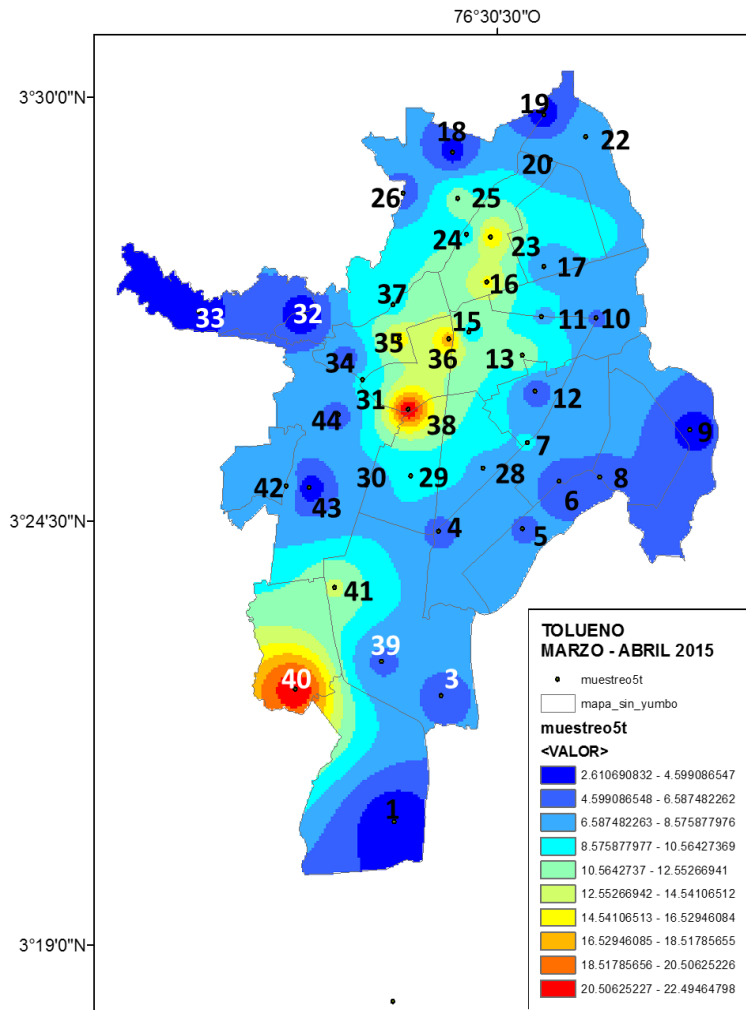


Figura 26. Variación espacial del tolueno en la campaña febrero-marzo del 2015

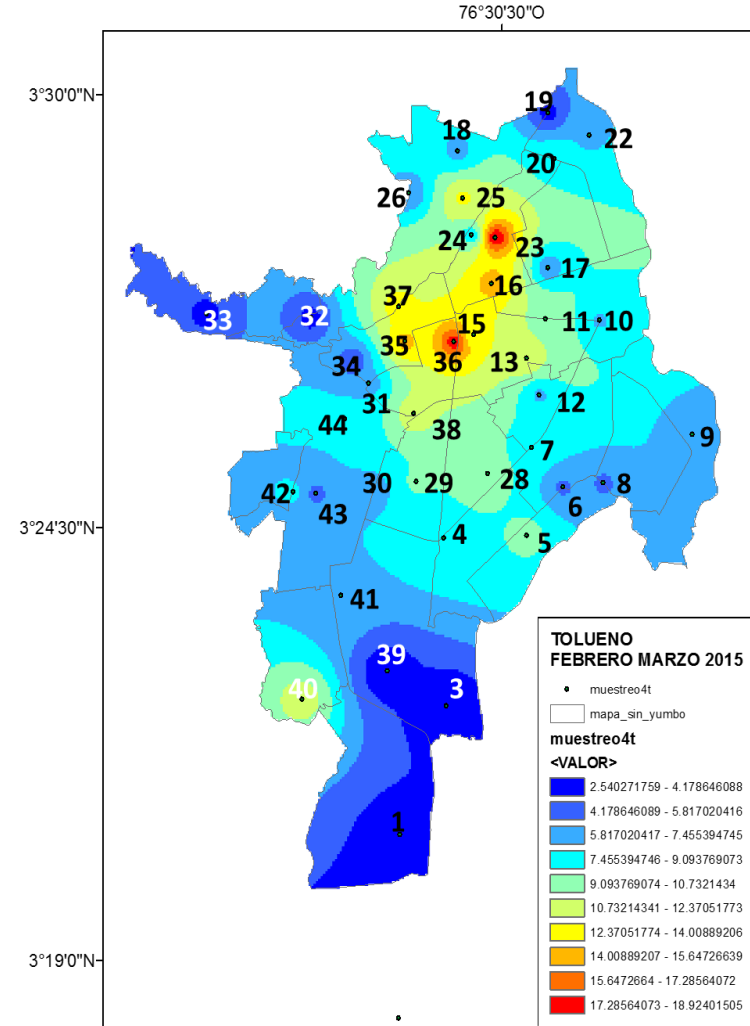


Figura 27. Variación espacial del tolueno en la campaña marzo-abril del 2015.

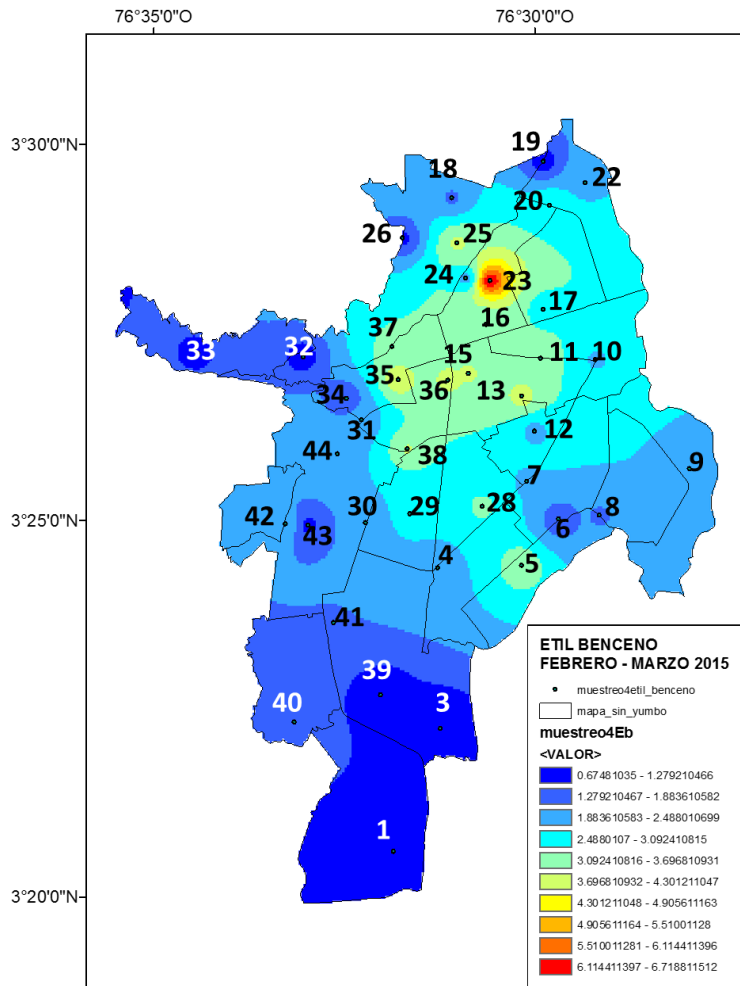


Figura 28. Variación espacial del etilbenceno en la campaña febrero-marzo del 2015

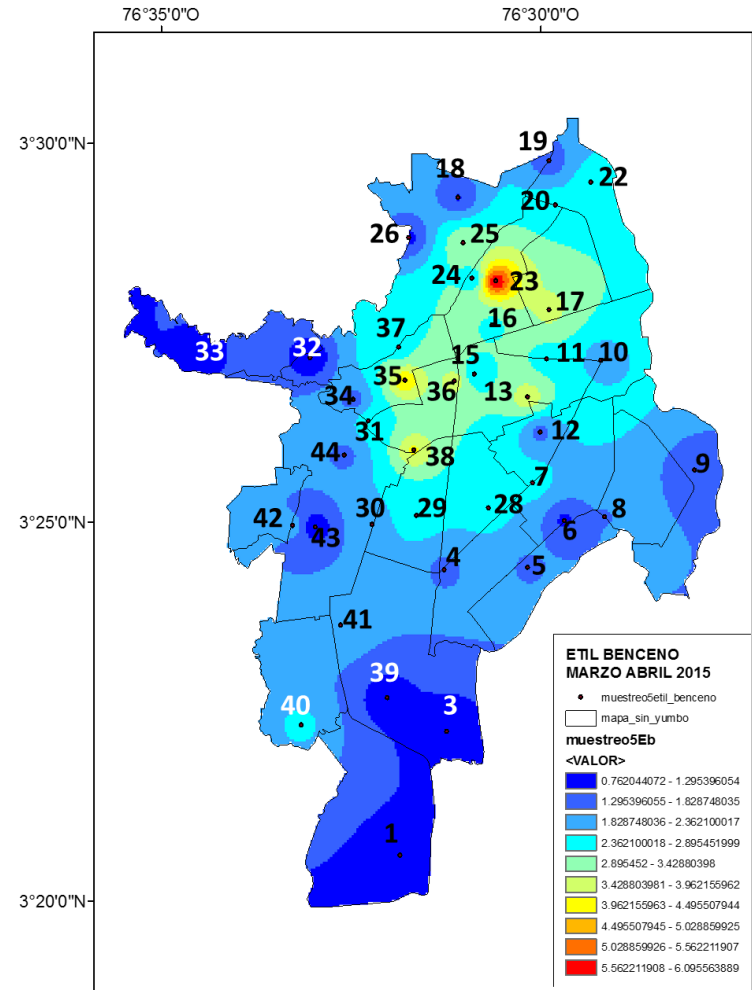


Figura 29. Variación espacial del etilbenceno en la campaña marzo-abril del 2015.

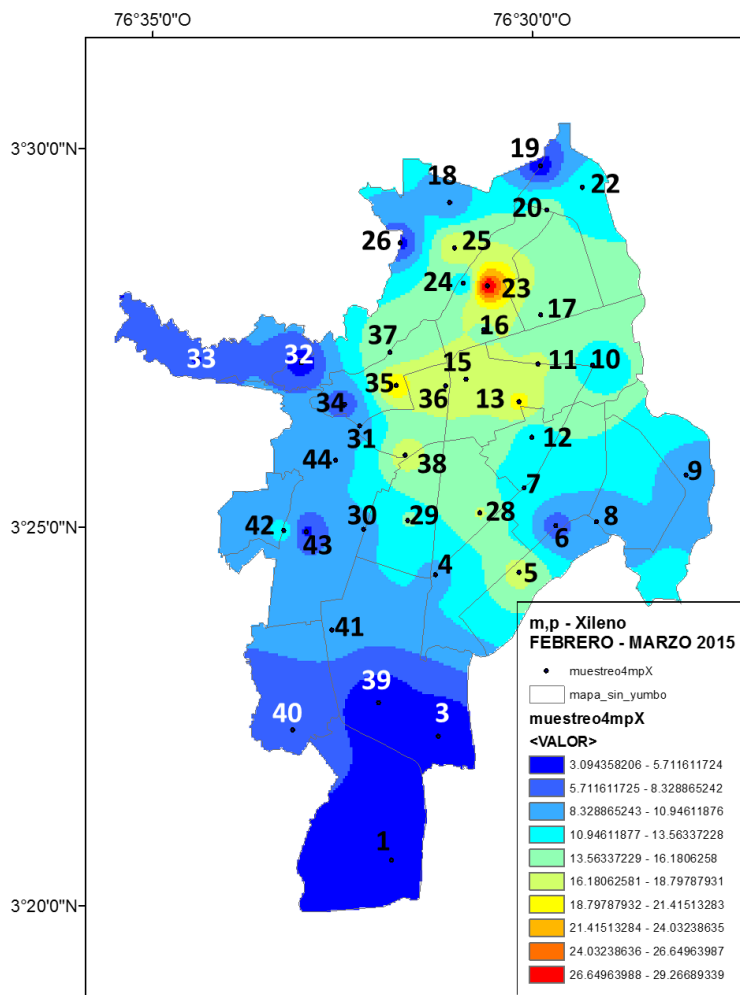


Figura 30. Variación espacial del m,p-xileno en la campaña febrero-marzo del 2015

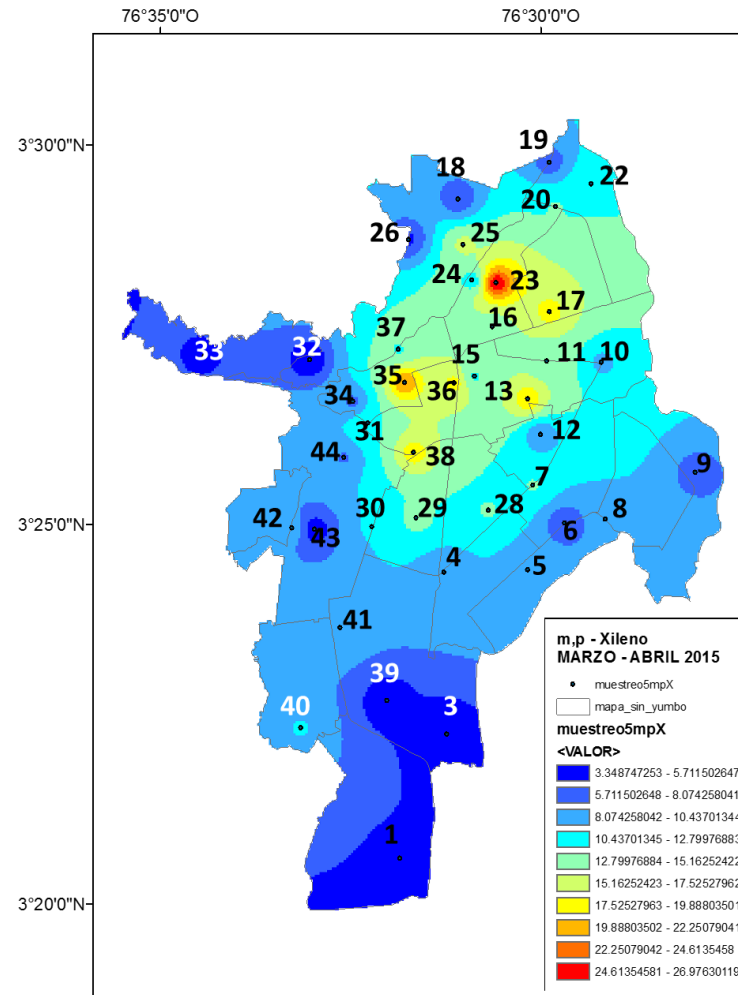


Figura 31. Variación espacial del m,p-xileno en la campaña marzo-abril del 2015.

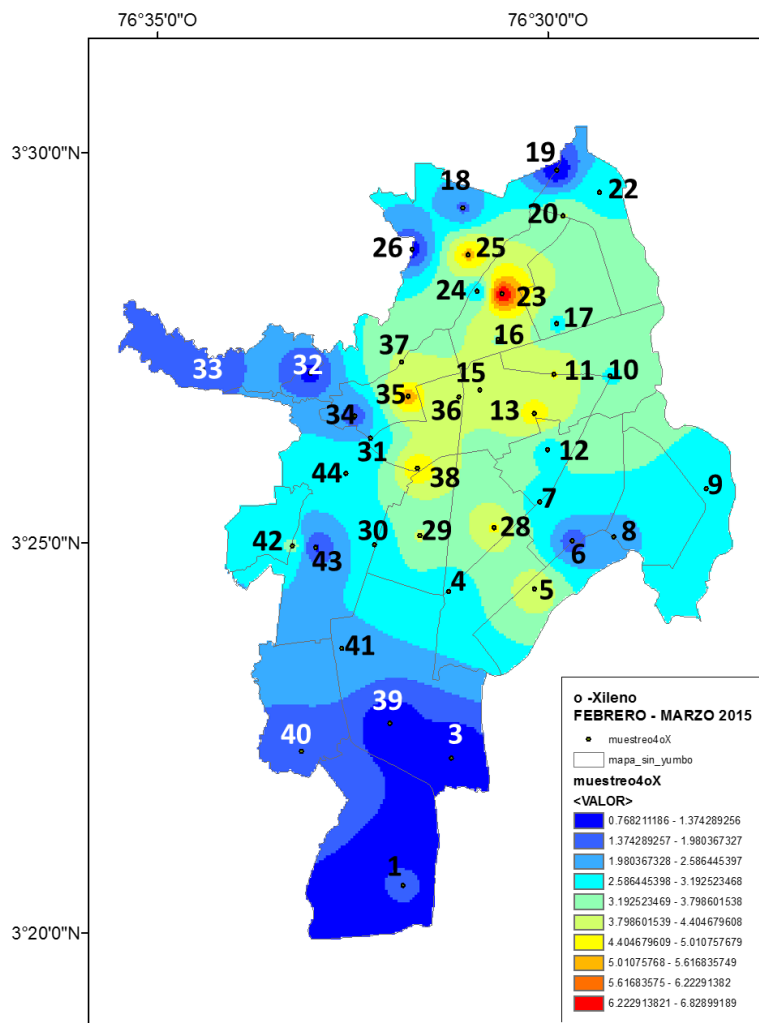


Figura 32. Variación espacial de la o-xileno en la campaña febrero-marzo del 2015.

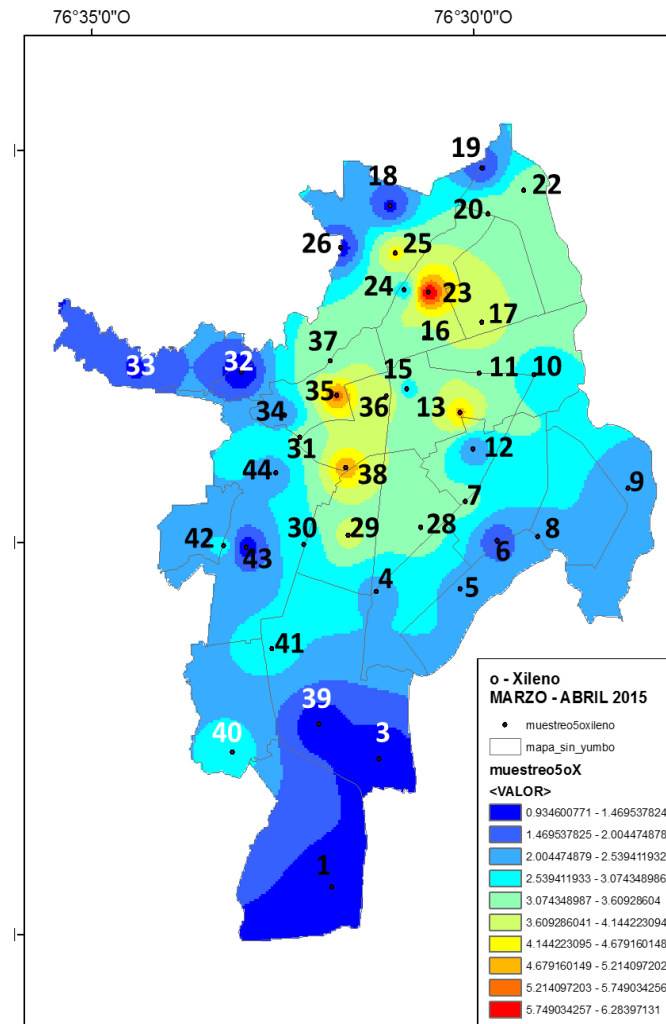


Figura 33. Variación espacial de la o-xileno en la campaña marzo-abril del 2015.



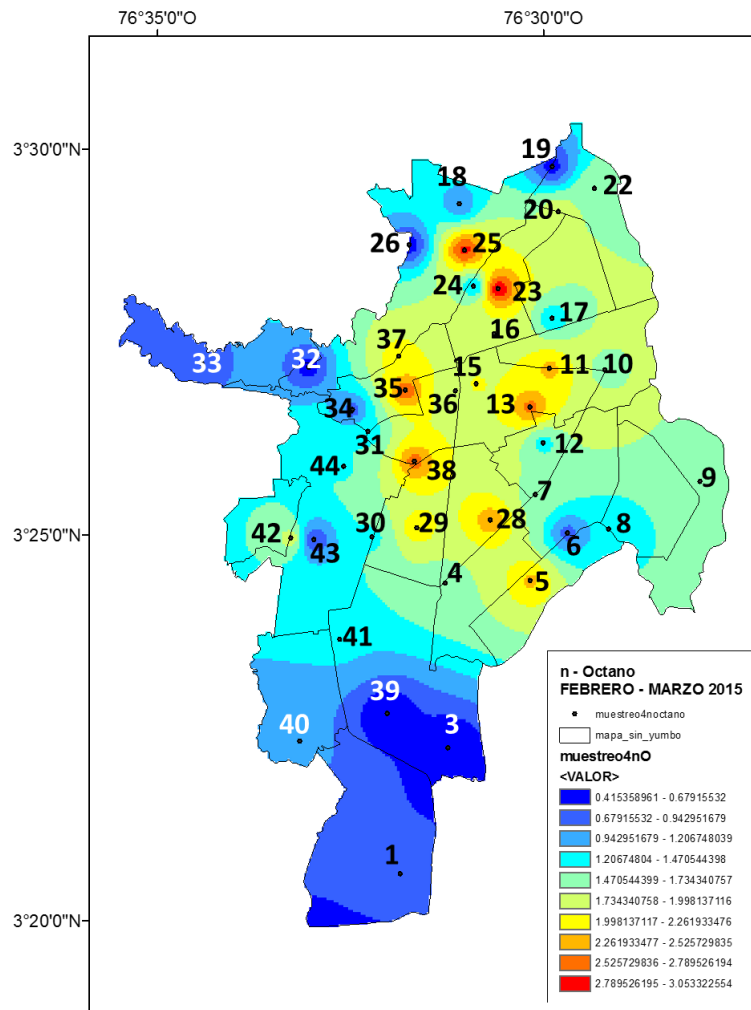


Figura 35. Variación espacial de la n-octano en la campaña febrero-marzo del 2015.

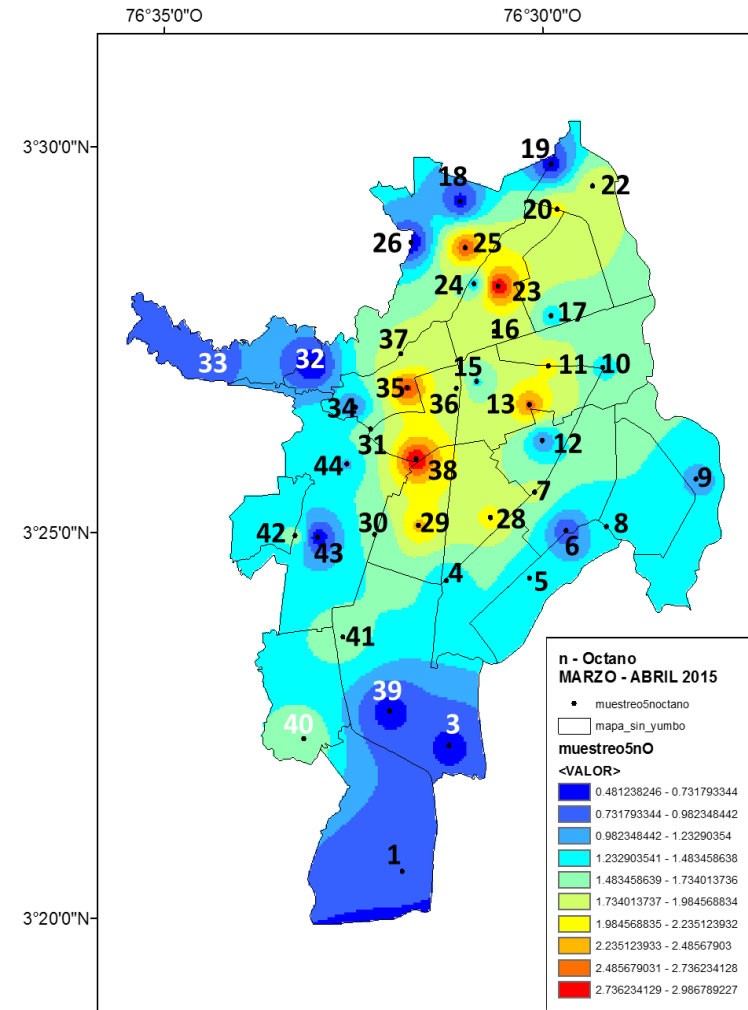


Figura 34. Variación espacial de la n-octano en la campaña marzo-abril del 2015.

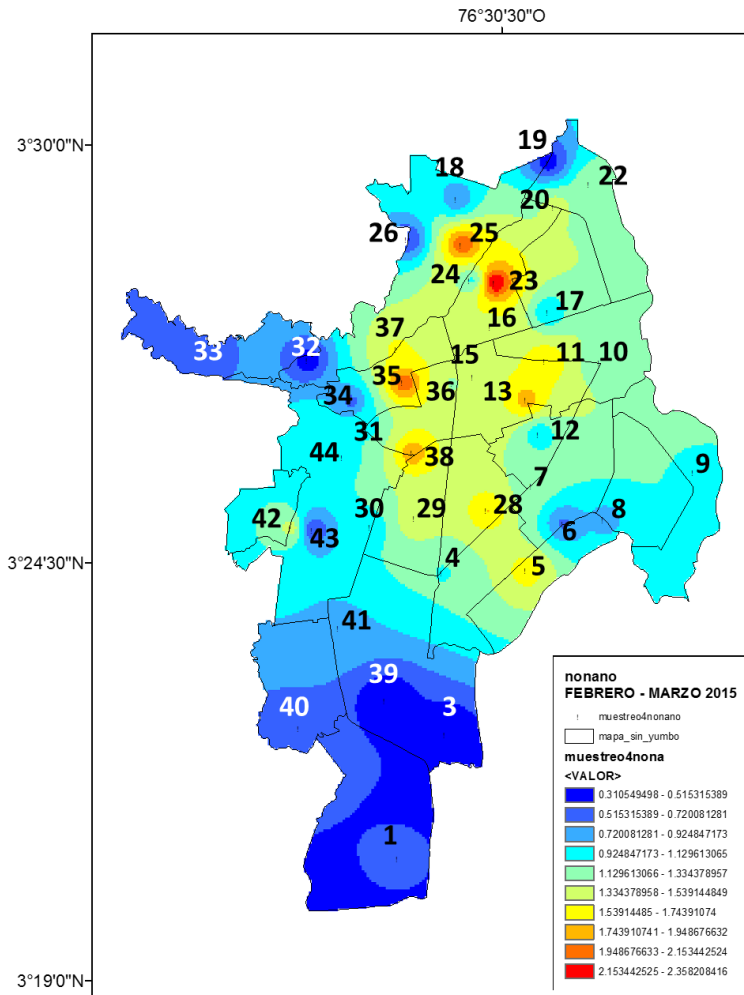


Figura 36. Variación espacial del nonano en la campaña febrero-marzo del 2015.

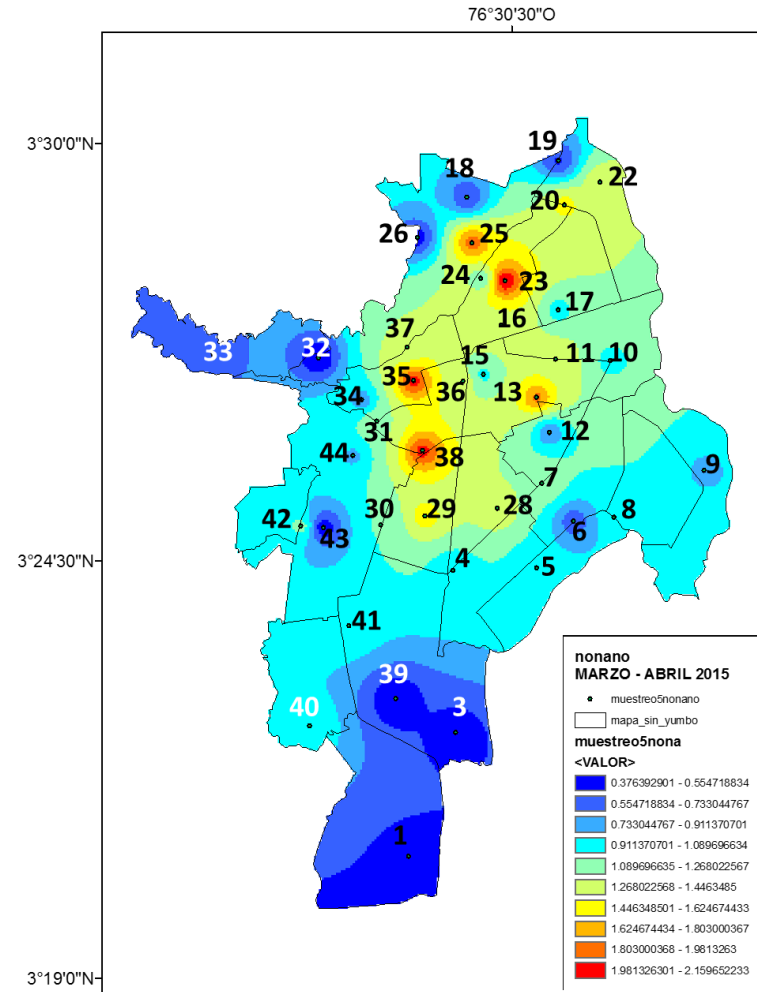


Figura 37. Variación espacial del nonano en la campaña marzo-abril del 2015.

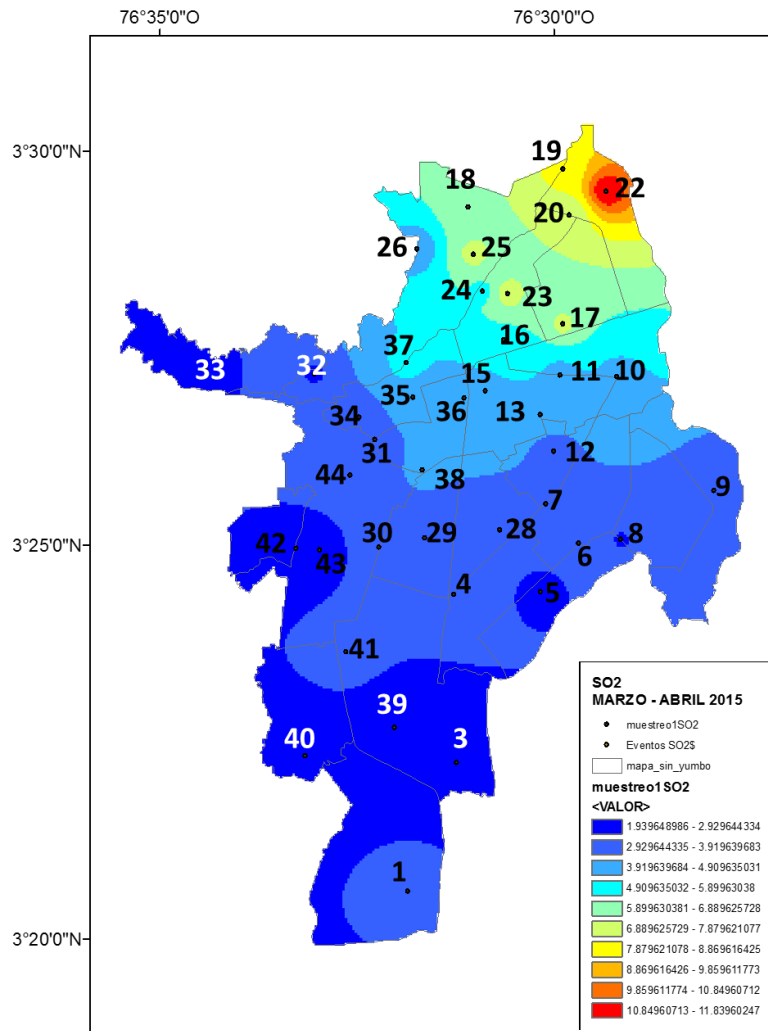


Figura 38. Variación espacial del SO<sub>2</sub> en la campaña marzo-abril del 2015.

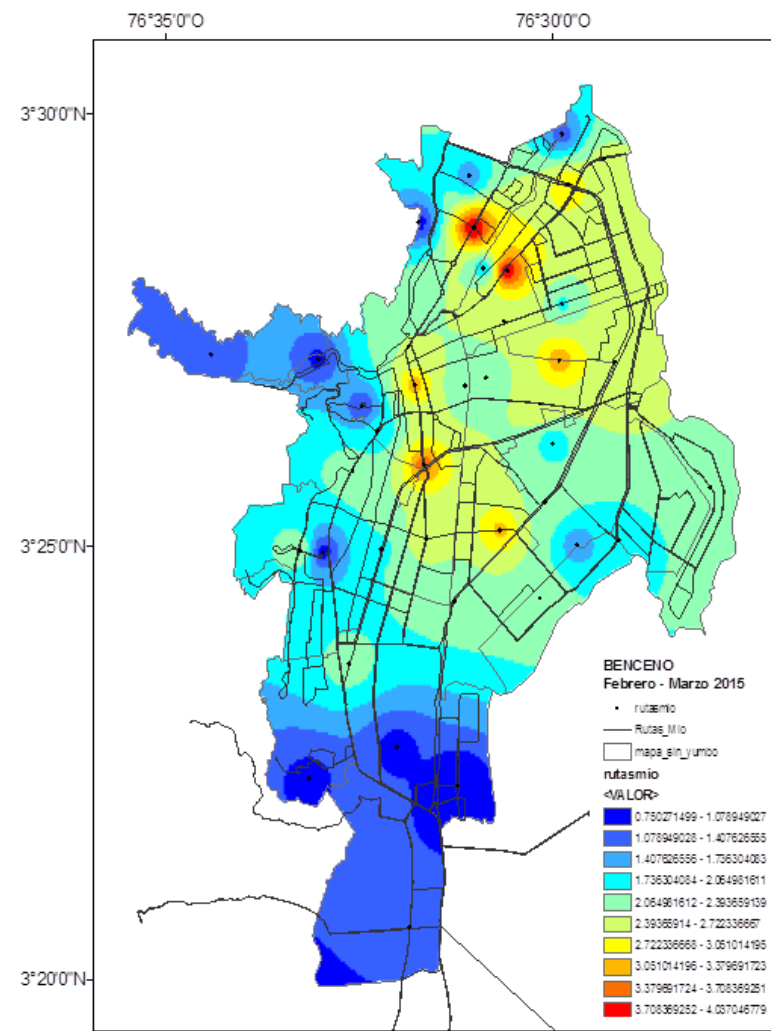


Figura 39. Distribución espacial del benceno- rutas del transporte masivo MIO febrero-marzo del 2015.

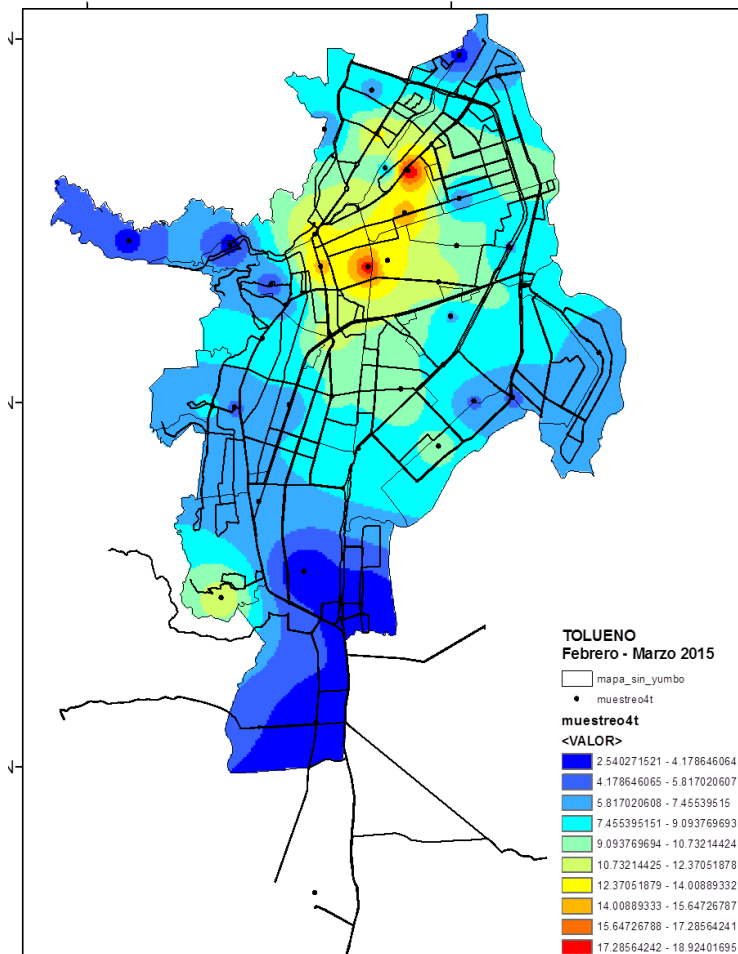


Figura 40. Distribución espacial del tolueno-rutas del transporte masivo MIO febrero-marzo del 2015.

#### 6.4 Análisis de los resultados en los “hotspot” seleccionados a partir de la distribución espacial obtenida en el monitoreo del primer semestre del 2015.

C\_C\_CALEÑO, LA LUNA, están localizados en el centro geográfico del área urbana de la ciudad. Es uno de los puntos de los denominados 'Centro' de la ciudad, el lugar de mayor concentración comercial y de comercios informales. En el sector de LA LUNA, la gran mayoría de las construcciones son viviendas unifamiliares de uno o dos pisos, alternadas con lotes y viviendas abandonadas, y pequeños comercios y bodegas. Corresponde a un cruce de la autopista sur (6 carriles de norte a sur) y 4 carriles de la calle 13. De igual manera, se analiza el punto C\_C\_CALEÑO, ubicado en la Carrera 10 vía de 6 carriles oriente-occidente, con calle 13, zona rodeada de edificios de dos y tres pisos y el de la fiscalía (10 pisos) y una estación del transporte masivo MIO (centro). Por esta vía circulan la gran mayoría de transportes colectivos de la ciudad, algunos de ellos de tipo campero con bastantes años de uso. Así que sus valores altos en los COVs corresponden a un alto flujo vehicular y esta congestión hace que su velocidad se vea reducida con un alto consumo de combustible.

AV3°N\_44, CALL44\_K1, el primer punto corresponde a la avenida tercera Norte donde hay dos carriles norte sur y dos sur norte y en el medio dos vías amplias para la vía del transporte masivo MIO y además la 44 tiene 4 carriles dos oriente occidente y dos occidente oriente. Rodeado por construcciones de 2 y tres pisos de altura, zona comercial bancaria, restaurantes, oficinas, comercio de tipo formal, pero es una vía utilizada en la zona norte para salir y entrar de la ciudad y por donde se da preferencia a los desplazamientos de la zona norte. Básicamente es el volumen del flujo vehicular el que puede ser el origen del alto contenido de contaminantes.

BASE\_AEREA, los aeropuertos son una de las mayores fuentes de contaminación del aire en cualquier ciudad del mundo (Vichi F., 2016, Freeman A. I., 2015). En primer lugar, la posible contaminación producida en los aeropuertos por los aviones equipados con turborreactores y turbohélices se debe a que queman cantidades muy grandes de combustible en el momento de despegar generando COVs, SO<sub>2</sub>, NOx y material particulado, así como el combustible evaporado durante el abastecimiento y la espera de autorización para despegar y aterrizar (The Danish Ecological Council, 2012). También se debe tener en cuenta los vehículos internos del aeropuerto que consumen combustibles fósiles, talleres de reparación y mantenimiento, montacargas, subestaciones y equipos de soldadura.

CALL44\_K1, corresponde a una rotonda donde convergen la Troncal carrera 1, con 6 carriles para el transporte en general y una vía para el transporte masivo MIO con estación (Popular) y la carrera 44 de oriente a occidente con 4 carriles. La zona corresponde a un área muy abierta poco arborizada pero con alto flujo vehicular, es vía de tránsito en el corazón para la ciudad de Cali, cercana y vía a la zona industrial y a 1760 metros de la pista de la base aérea. Es posible que por efecto de los vientos se mueva la contaminación del aeropuerto de la base aérea y contribuya a su valor detectado.

PRIMAVERA, corresponde a una zona de vivienda popular ubicada al oriente de la ciudad, no es una zona industrial, un caño y la carrera 39, aunque es una vía principal no posee un alto flujo



vehicular, solo como posible punto crítico hay una estación de venta de gasolina cerca al punto de muestreo.

14\_CALIMA, este punto pertenece a la comuna 4, y es la entrada a la ciudad de Cali vía Palmira y una de las entradas del norte de la ciudad, con una alta densidad vehicular, ya que esta frente a un centro comercial con alto movimiento comercial, carros de parqueo. La calle 70 posee 6 carriles tanto de oriente a occidente y en sentido contrario, y la carrera primera, también es una vía con alta movilidad y 6 carriles de movimiento.

Dentro de los puntos para tener en cuenta se quiere destacar el denominado MADRIGAL, localizada en la comuna 18 y como se dijo anteriormente, presento valore atípicos para los COVs, la cual se debe tener en cuenta par monitoreo posiblemente originados por las antiguas minas de carbón.

- $SO_2$ .

En la Figura 38 se registra la dispersión generada por los primeros datos de  $SO_2$  obtenidos en este trabajo. Se puede ver que la mayor concentración se encuentra en la zona nororiental de la ciudad de Cali, sufriendo una disminución en esa misma dirección, aunque el valor más alto no supera los  $12mg/m^3$ . Las estaciones involucradas en su orden de mayor a menor son: ENTRADA\_C.\_CALI, 14\_CALIMA, FLORALIA, CALL44\_K1, AV3°N\_44, MAIZENA, FLORA\_DAGMA, CHIPICHAPE.

El gran aporte de  $SO_2$  que se registra en estas estaciones se debe a la influencia de la zona industrial (estación MAIZENA) circundante y a la afluencia de vehículos en algunos puntos como ENTRADA\_C.\_CALI, 14\_CALIMA. La dirección predominante de los vientos en el sentido noreste, favorece el arrastre y la dispersión de los contaminantes hacia los sitios de monitoreo. Esto hace suponer que además hay una mayor contribución de la zona rural de Palmira, aportada por los corregimientos de La Dolores y Cauceseco donde hay carencia de buenos acueductos y alcantarillados, generando el uso de pozos sépticos (Palmira Avanza, 2014) los cuales en los periodos de lluvias actúan como lodos de aguas residuales generando  $SO_2$  dentro de su proceso de descomposición. Además su población trabaja en la fundición artesanal de acero, primaria de cobre, plomo, además del uso del carbón como combustible procesos donde la producción de  $SO_2$  es importante. La problemática que presenta la vereda de Piles con la quema de madera ilegal para obtener carbón sería importante tenerla en cuenta, ya que es muy probable que sea una posible fuente de este contaminante.

- *Benceno y tolueno con el mapa de movilidad del transporte masivo de Cali.*

Las Figuras 39 y 40 presentan la distribución de benceno y tolueno en concordancia con las principales vías de movilidad del transporte masivo MIO de la ciudad de Cali. Se puede ver con claridad una mayor coincidencia entre la distribución de benceno y las vías, que con la de tolueno.

La variabilidad que presentan las concentraciones de tolueno se pueden deber a su actividad fotoquímica que hacen que sus valores se vean afectadas por la luz solar.

Este análisis comparativo pretende dejar la inquietud sobre la opción de cambiar el combustible del transporte masivo. Esta alternativa ya ha generado controversia en otras ciudades como Medellín donde la propuesta a corto plazo es el uso de gas y a mediano o largo plazo la implementación del uso de corriente eléctrica. Fundamentalmente los contradictores hablan de “la escasez de gas a futuro” y quienes están a favor indican que “El gas es la mejor opción según todas las cifras, el gas registra bajos índices de emisiones nocivas para la salud, es decir, alrededor de 50 partículas de azufre por millón, que son las mismas del diésel de óptima calidad”. La mejor alternativa para tener en cuenta en un plan de desarrollo está el uso de la corriente eléctrica dicen: “Mientras que la vida útil de un vehículo de gas alcanza 10 años, la de un eléctrico llega hasta 20.”, señaló Andrés Emiro Ruiz. El mismo comentario dice: “en Cali ya se definió que el MIO empezará a rodar desde este fin de año con diesel”. La decisión, que se habría basado en criterios técnicos, se dio, gracias a que el diesel que se utilizará es mucho más limpio que el que normalmente se usa para transporte masivo en Colombia. Los buses operarán con un diesel de 500 partículas por millón de azufre, mientras que en el resto del país manejan alrededor de las 4.000 partículas, a excepción de Bogotá”. (Portafolio, 2008)

### 6.5 Concentraciones de los monitoreos correspondientes al segundo semestre del 2015.

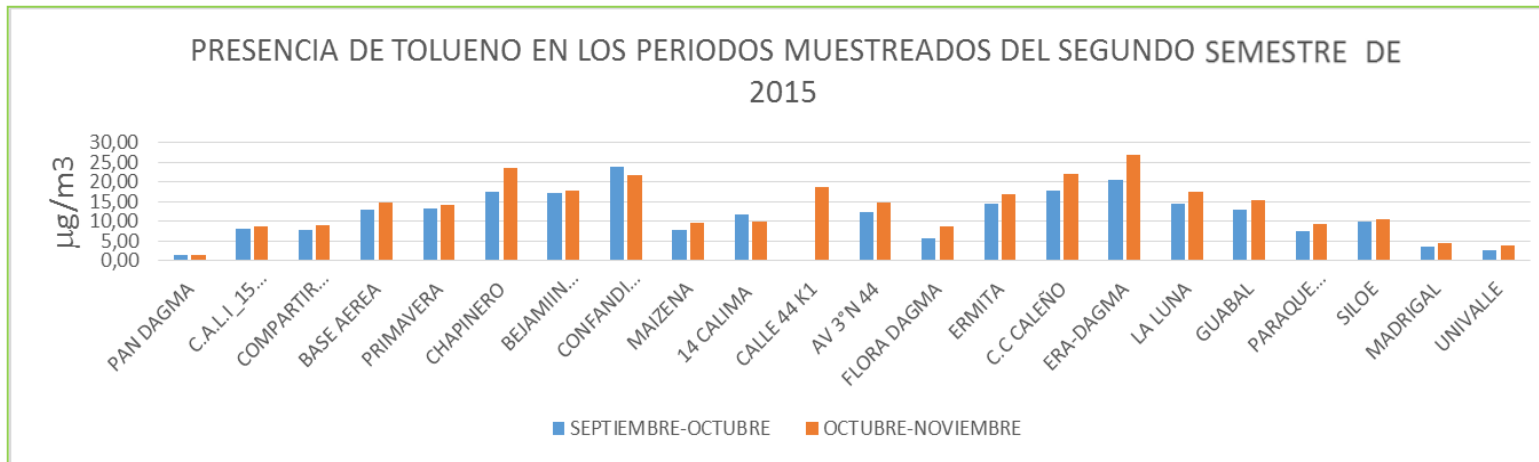
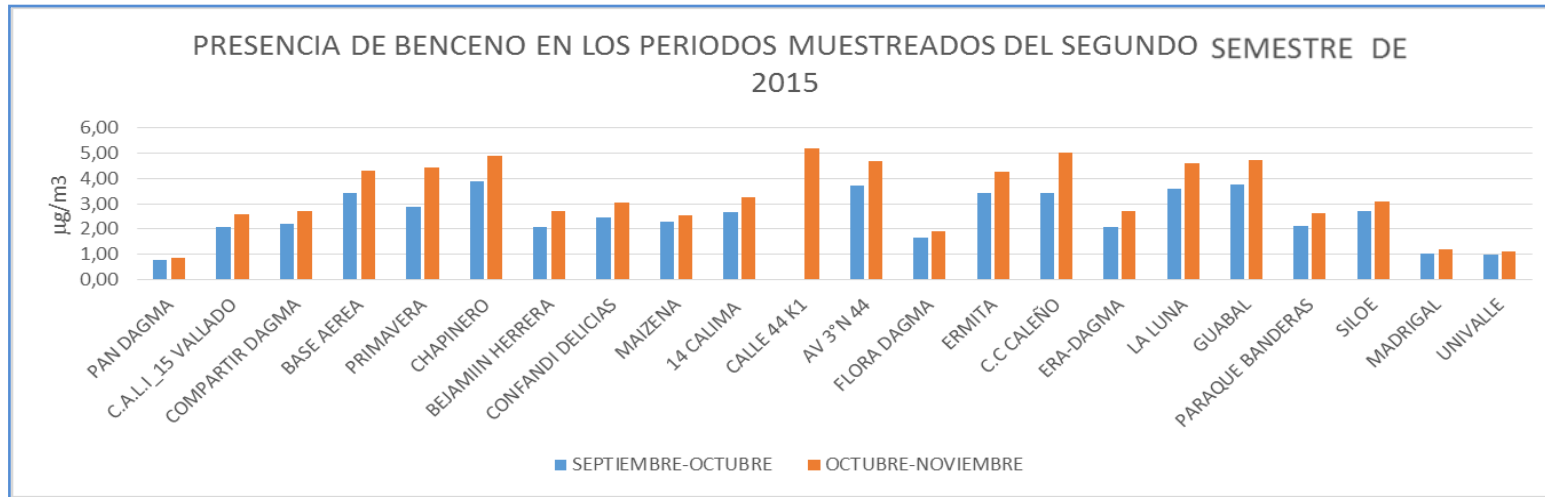
Durante este periodo del segundo semestre del 2015 se realizaron dos muestreos uno en el mes de septiembre-octubre y el segundo en el mes octubre-noviembre. Al reducir el número de estaciones se pudo medir simultáneamente COVs, SO<sub>2</sub>, y NO<sub>x</sub>, en las 22 estaciones seleccionadas. Sus concentraciones se grafican en la Figura 41. Se debe observar que la estación CALLE44\_K1, solo tiene un dato debido a que el muestreador sufrió un desperfecto y se descartó su dato.

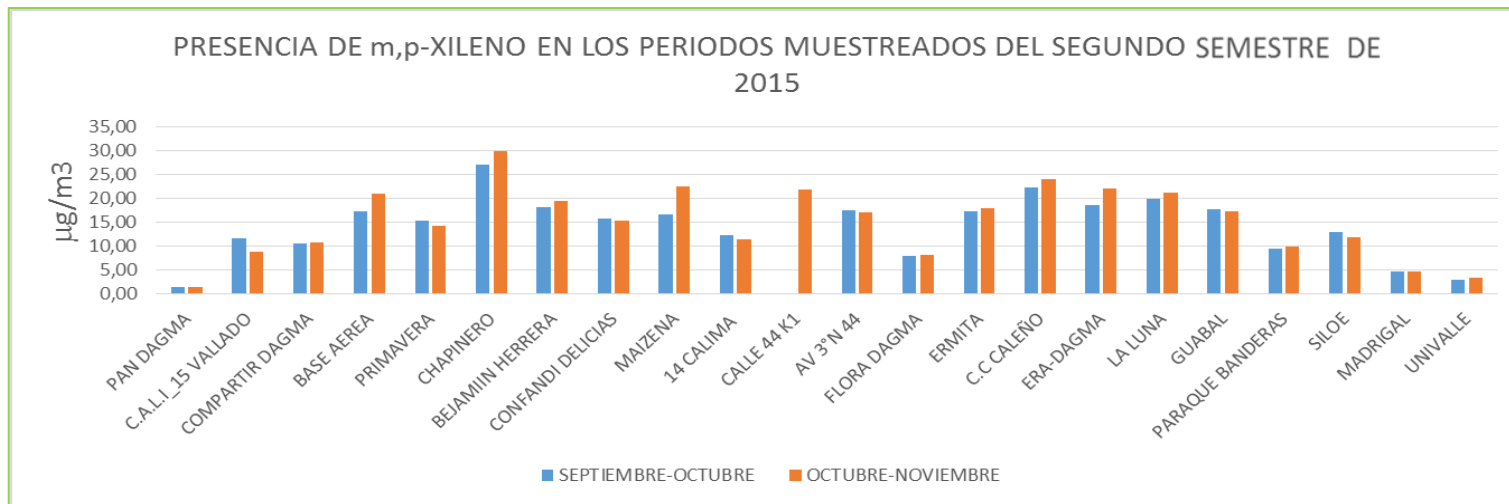
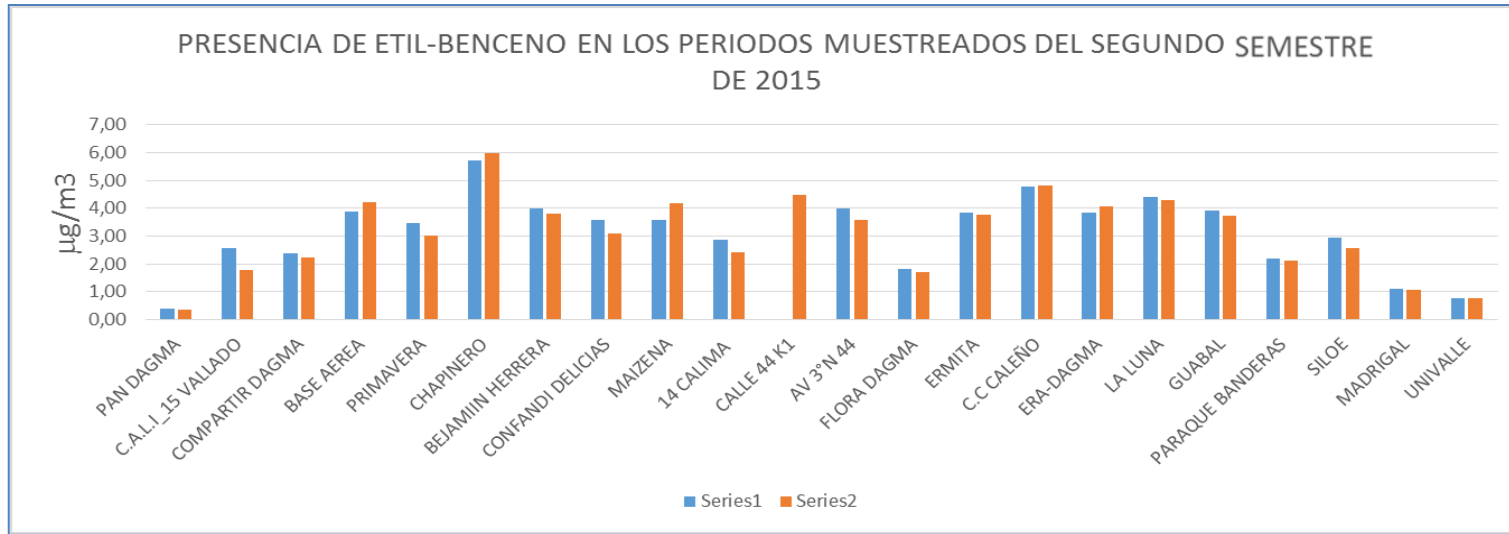
En la Figura 41 se reporta la información meteorológica colectada para la ciudad de Cali durante los periodos muestreados en el segundo semestre del 2015. Esta evaluación es interesante debido a que son los primeros datos recopilados de los meses después del verano de mitad de año (segundo semestre).

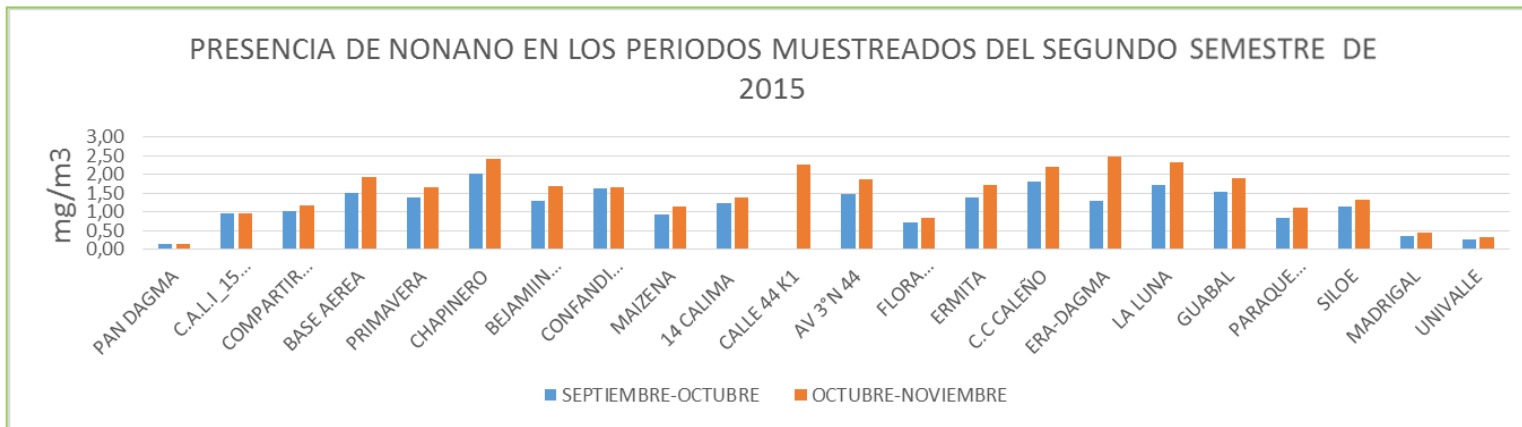
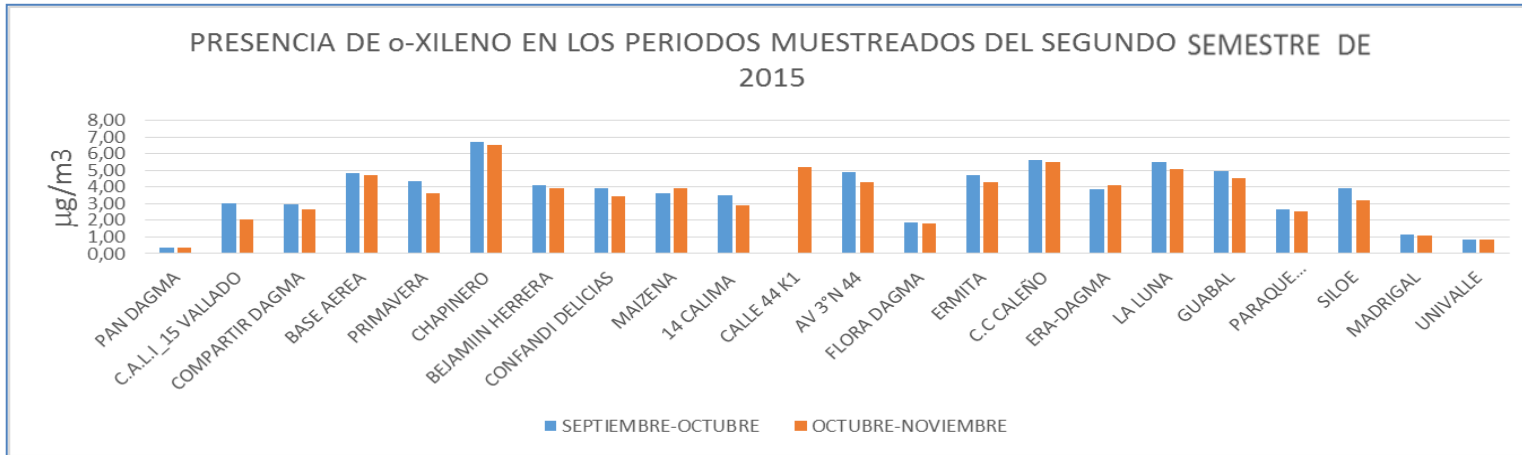
- *Benceno.*

Las concentraciones de benceno en las 22 estaciones presentaron el mismo comportamiento, sus valores no superaron la norma nacional 5 µg/m<sup>3</sup>, y siempre fue superior el periodo octubre-noviembre que el de septiembre-octubre, seguramente porque en este último la influencia de la radiación solar fue menor, disminuyendo el proceso de descomposición fotoquímico (periodo de más lluvia, mas nubes, menos sol, (Figura 42).

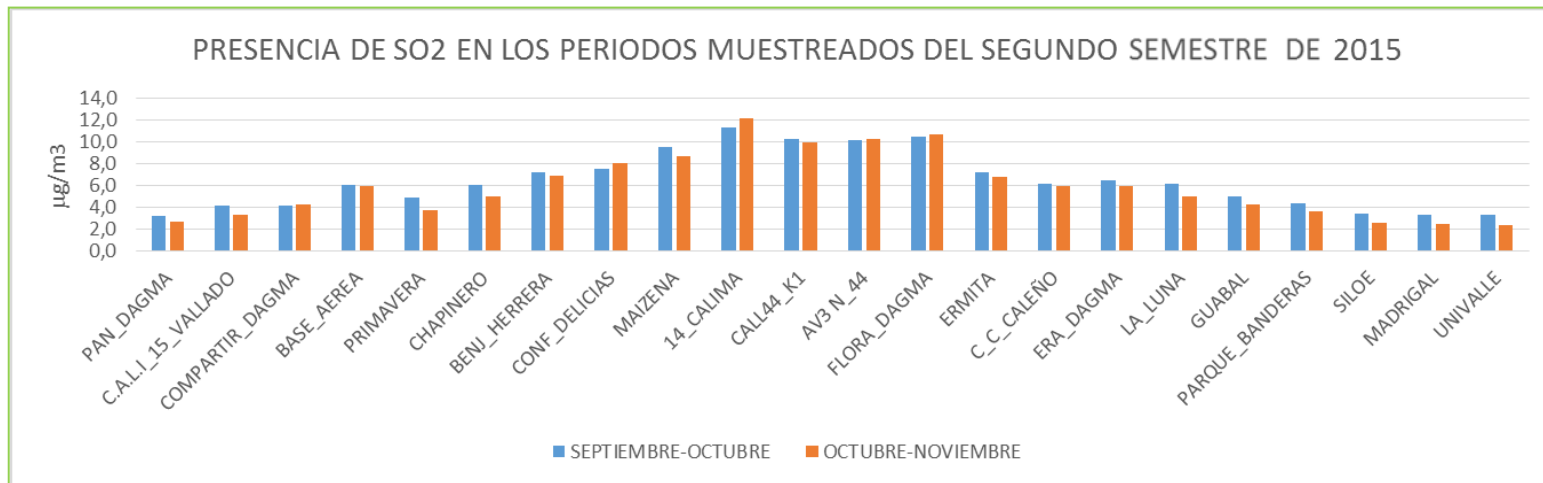
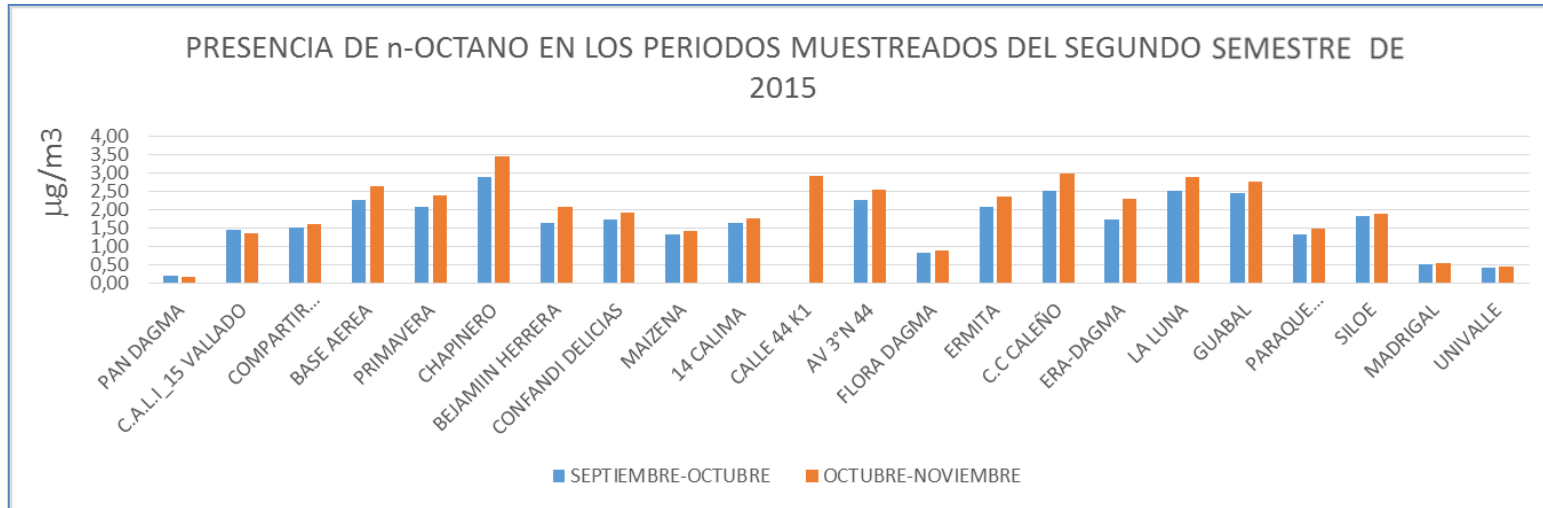
DE











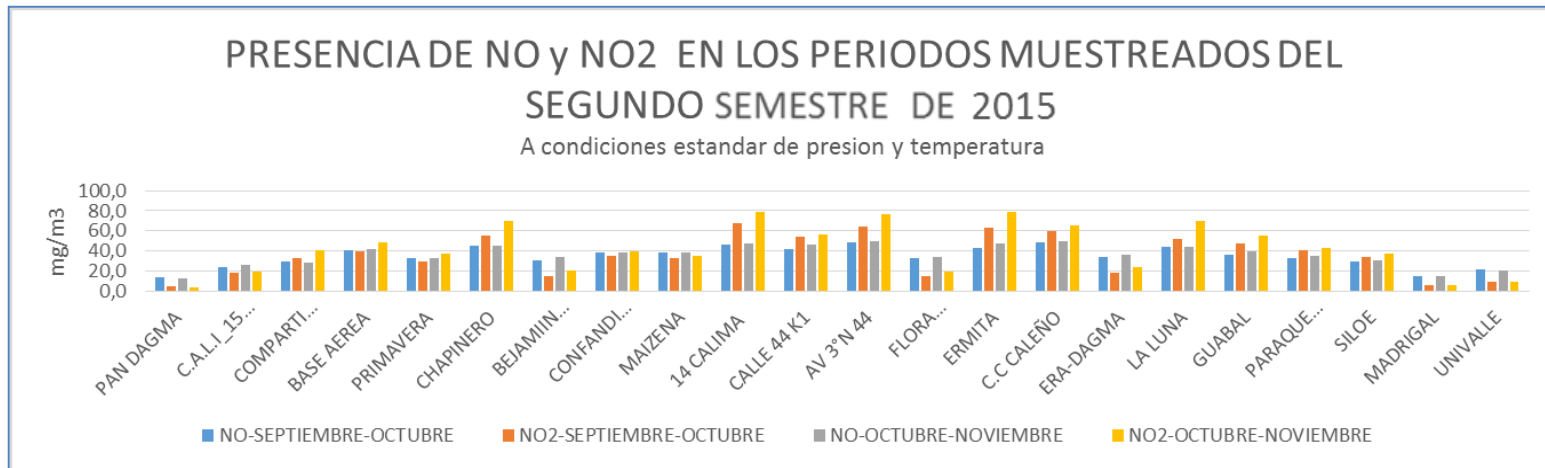
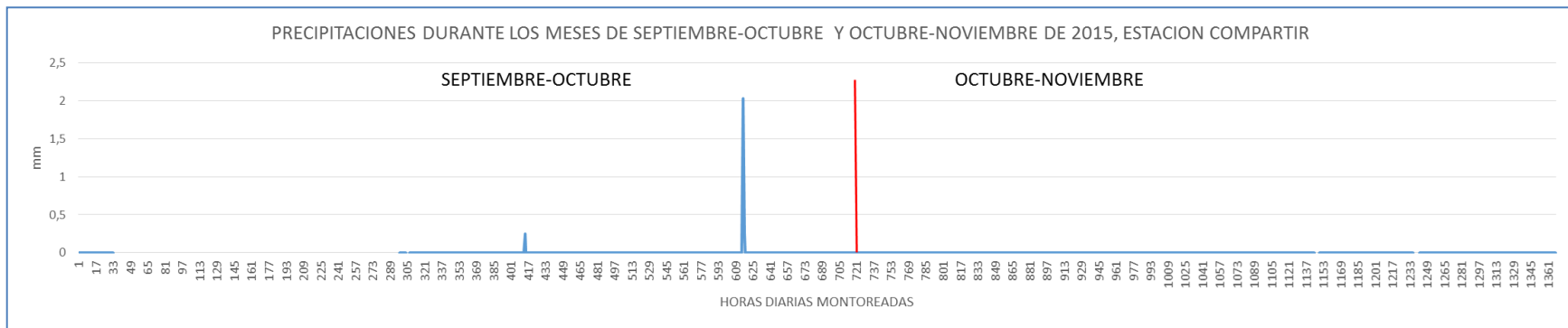
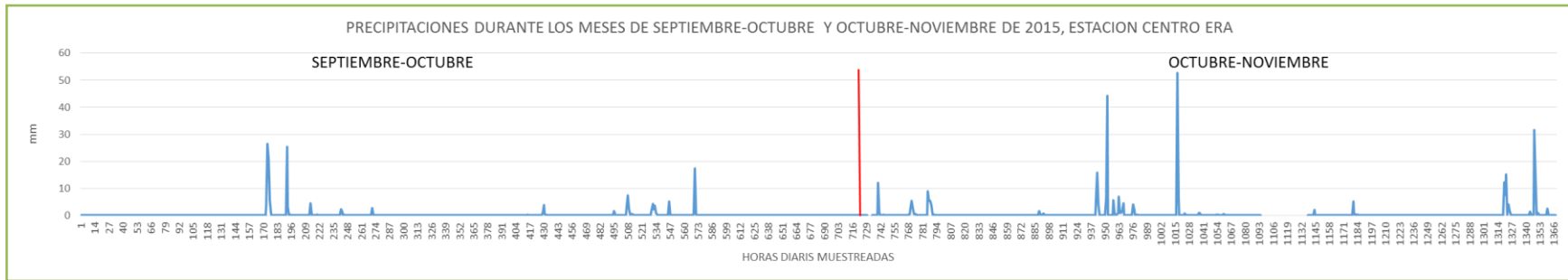
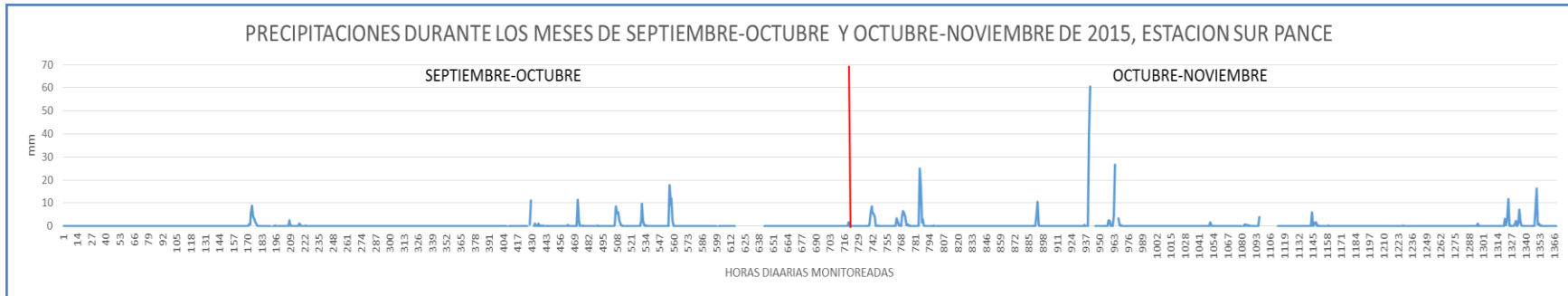


Figura 41. Concentraciones obtenidas en cada una de las estaciones muestreadas durante el segundo semestre del 2015, para los COVs, SO<sub>2</sub>, NO y NO<sub>2</sub>.



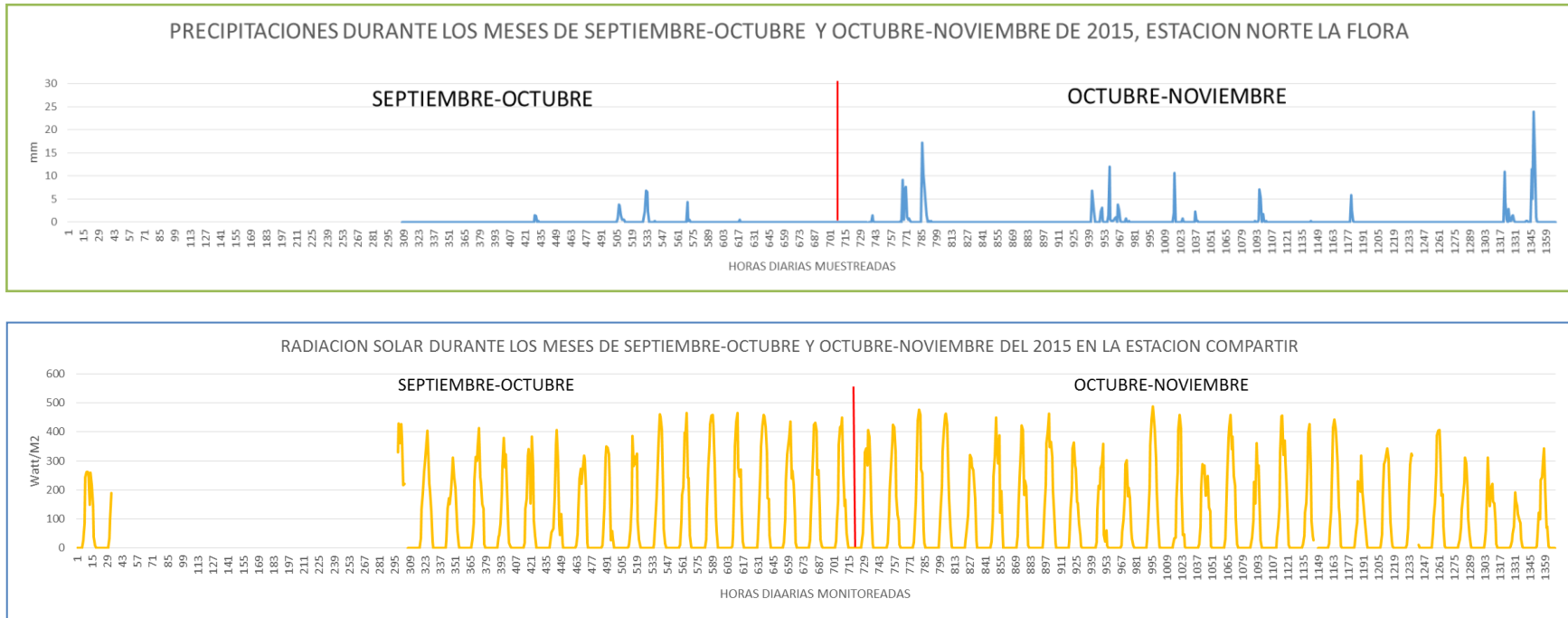


Figura 42. Información sobre la precipitación y radiación solar de cuatro estaciones meteorológicas de la ciudad de Cali durante los periodos de muestreo en el segundo semestre del 2015.

Las estaciones que se acercan al valor máximo permisible para benceno en el aire son en su orden: CALL44\_K1>, C\_C\_CALEÑO>, CHAPINERO>, AV3°N\_44>, GUABAL>, LA\_LUNA>, PRIMAVERA>, BASE\_AEREA>, 14\_CALIMA> y SILOE, valores por debajo de la norma pero preocupantes (OMS 2004). Nuevamente se observa que las estaciones reportadas se encuentran en zonas de alto flujo vehicular o cercanas a estaciones de distribución de gasolina.

- *Tolueno, etilbenceno, xilenos, n-octano y nonano.*

Los datos reportados (Figura 41) para el tolueno al igual que el benceno fueron superiores en el muestreo octubre-noviembre a las obtenidas en septiembre-octubre, esto sigue siendo interesante ya que se nota la influencia meteorológica (más lluvia, menos sol) en la variación de los datos. La única estación que presentó mayor presencia de tolueno que benceno fue CONFANDIDELICIAS, este comportamiento puede deberse a que cerca de la estación se encuentra un taller de reparación automotriz, que seguramente hace un alto uso de pinturas y solventes.

El comportamiento del etil-benceno, los m,p-xilenos y o-xilenos (Figura 41) no siguen tan claro el mismo comportamiento del benceno y el tolueno, pero su variabilidad en los datos obtenidos en los dos muestreos permiten visualizar mayor concentración en el periodo noviembre-diciembre que septiembre-octubre. Como en este caso, no es siempre explicable el comportamiento de todos los COVs. Resulta sumamente complicado identificar de forma precisa todas las posibles fuentes de emisión de COVs, su densidad, tipo de compuestos que emiten y su intensidad, para establecer en un instante dado la forma (relación causa-efecto) en que las emisiones de COVs afectan a la calidad del aire de un área determinada (Gómez M. C., 2006). Los COVs alifáticos también presentan mayores concentraciones en octubre-noviembre que en septiembre-octubre.

- *SO<sub>2</sub>.*

Los datos reportados fueron mayores en septiembre-octubre que en octubre-noviembre. Su ubicación registra que los datos más altos corresponden a las estaciones ubicadas en la zona nororiental de la ciudad. Como la principal fuente de producción es la generación de coque, además de los combustibles fósiles, se sigue ubicando a La Dolores, Piles, y Caucaseco, aunque cuando se analiza la distribución espacial por krigging se considera la zona de Yumbo.

El SO<sub>2</sub> actualmente se asocia como uno de los responsables directos de los problemas del sistema respiratorio en salud pública. La OMS establece límites mínimos de umbral de contaminación por este tóxico, el cual no es superado por los datos monitoreados.

La concentración de SO<sub>2</sub> en períodos promedio de 10 minutos no debería ser mayor a 500 µg/m<sup>3</sup>. La OMS (OMS, 1999) reporta que un porcentaje de las personas con asma experimenta cambios en la función pulmonar y síntomas respiratorios tras períodos de exposición al SO<sub>2</sub> de tan sólo 10 minutos. La revisión de la directriz referente a la concentración de SO<sub>2</sub> en 24 horas, ha descendido de 125 a 20 µg/m<sup>3</sup>. También han considerado que el SO<sub>2</sub> en niveles de concentración



ambiental incluso inferiores a los establecidos en las recomendaciones internacionales o en las legislaciones europeas, es capaz de producir alteraciones en la salud de sujetos sensibles (ancianos, asmáticos y broncópatas) y de modificar de forma significativa la incidencia de mortalidad por causas respiratorias y cardiacas.

- NO Y NO<sub>2</sub>.

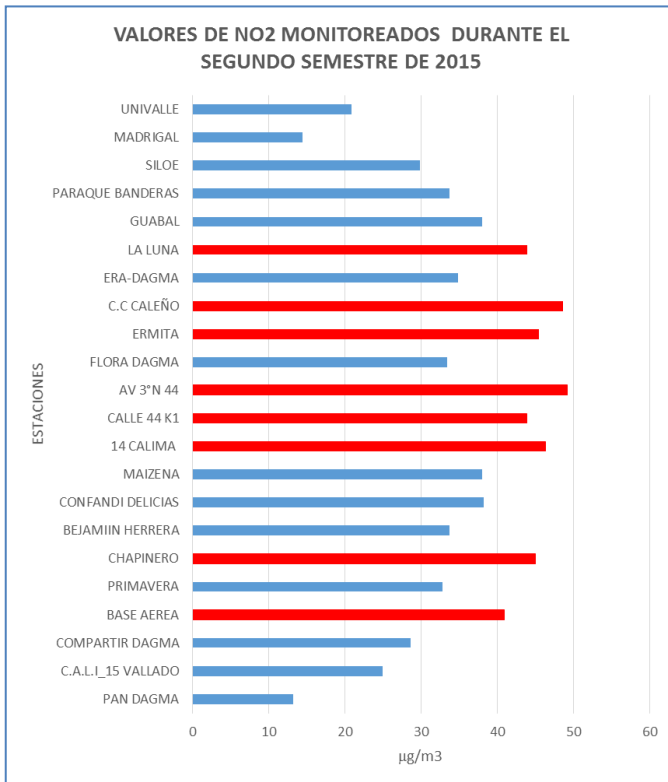


Figura 43. Reporte de las concentraciones que han superado los 40 µg/m<sup>3</sup> de NO<sub>2</sub> por estación.

Los datos obtenidos durante el periodo de septiembre-octubre de una manera general fueron menores que los obtenidos en octubre-noviembre. Las concentraciones de NO fueron menores e iguales a las de NO<sub>2</sub> durante el primer muestreo y en el periodo octubre-noviembre las concentraciones de NO fueron menores a las de NO<sub>2</sub>.

En realidad, la EPA regula sólo el bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) como un suplente para esta familia de compuestos porque es la forma más predominante de NO<sub>x</sub> en la atmósfera, que es generada por actividades antropogénicas. El NO<sub>2</sub> no es sólo un contaminante importante del aire por sí sólo, sino que también reacciona en la atmósfera para formar ozono (O<sub>3</sub>) y lluvia ácida. Las variaciones observadas pueden coincidir con las reacciones químicas que se suceden en la atmósfera. Por esto se puede plantear que la disminución de NO<sub>2</sub> en periodos de sol es lógica ya que por el proceso con la luz ultravioleta puede formarse el monóxido

(NO<sub>2</sub> + hv → NO + O), pero esta disminución se debería asociar con la formación de ozono troposférico (O + O<sub>2</sub> → O<sub>3</sub>) y este ozono a su vez puede reaccionar y formar el (NO + O<sub>3</sub> → NO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub>) y, de acuerdo a la química atmosférica del nitrógeno pueden verse involucradas en la formación de aerosoles y lluvia ácida.

La oxidación del N<sub>2</sub>O por el O<sub>3</sub> puede ocurrir a cualquier temperatura y genera a la vez oxígeno molecular (O<sub>2</sub>) y NO o dos moléculas de NO unidas como su dímero, el bióxido de dinitrógeno (N<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Después el NO o N<sub>2</sub>O<sub>2</sub> se oxida rápidamente (en alrededor de dos horas) a NO<sub>2</sub>. El NO<sub>2</sub>, a su vez, crea una molécula de ozono a partir de una molécula de oxígeno (O<sub>2</sub>) cuando es golpeado por un fotón de energía ionizadora proveniente de la luz solar. El N<sub>2</sub>O es también un "Gas de Invernadero" que, como el bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), absorbe la radiación infrarroja de longitud de onda larga para retener el calor que irradia la Tierra, y de esa manera contribuye al calentamiento global (EPA, 1999).

Los valores establecidos por la OMS (OMS, 1999., OMS, 2005) indican que para el  $\text{NO}_2$ ,  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de media anual y  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en una hora. Los valores promedio del monitoreo realizado, muestran 8 estaciones que están por encima de esta norma establecida de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , aunque el promedio de la ciudad es de  $35.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Figura 43).

Las estaciones que han superado la norma son: AV 3°N 44 con 49.2, C.C CALEÑO con 48.6, 14\_CALIMA con 46.3, ERMITA con 45.4, CHAPINERO con 45.0, CALLE44K1, con 43.9, LA\_LUNA 43.9 y BASE\_\_AEREA 40.9. Analizando la ubicación de las estaciones, se puede concluir que el origen de estos valores está en la alta densidad del tráfico, es decir la quema del combustible de los automotores. El valor es preocupante aunque estamos en promedio de ciudad por debajo de la norma y comparativamente frente a otras ciudades como Madrid de  $73.61 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Laureti T. 2014). La NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) ha realizado a partir de las imágenes satelitales un estudio comparativo de las concentraciones de  $\text{NO}_2$  en ciudades con un número cercano al millón de habitantes y ha podido concluir que en las ciudades europeas son mucho más alta que los estimados en India y China. Además, en poblaciones grandes de más de diez millones de personas, estos valores repuntan hasta alcanzar un 14% más en Europa.

## 6.6 Evaluación de los datos obtenidos durante el año 2015 en las 22 estaciones monitoreadas.

Debido a que durante el segundo semestre se trabajó con 22 estaciones, este será el parámetro para evaluar los resultados obtenidos en los cuatro muestreos durante todo el 2015.

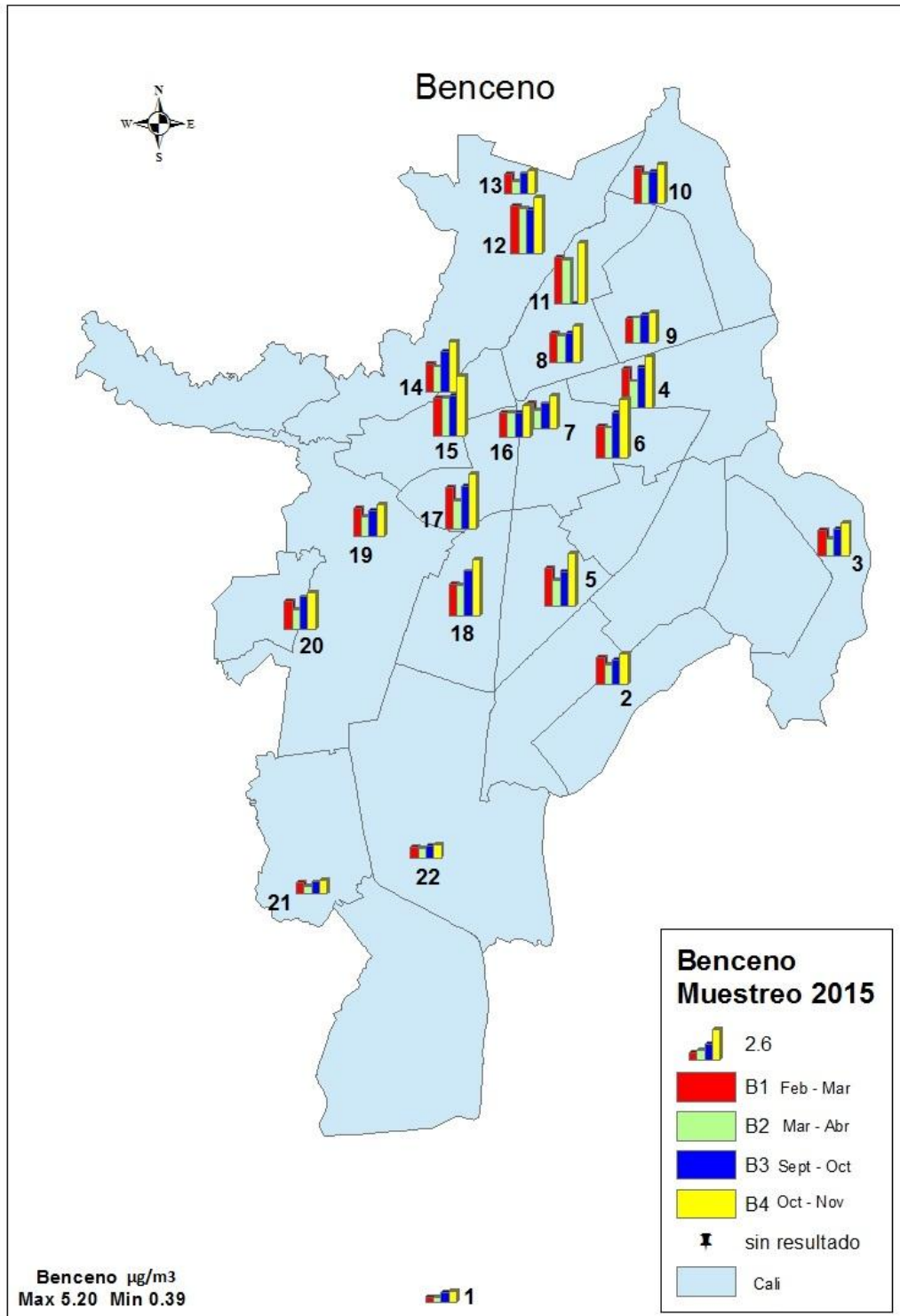


Figura 44. Concentraciones de benceno durante el año 2015.

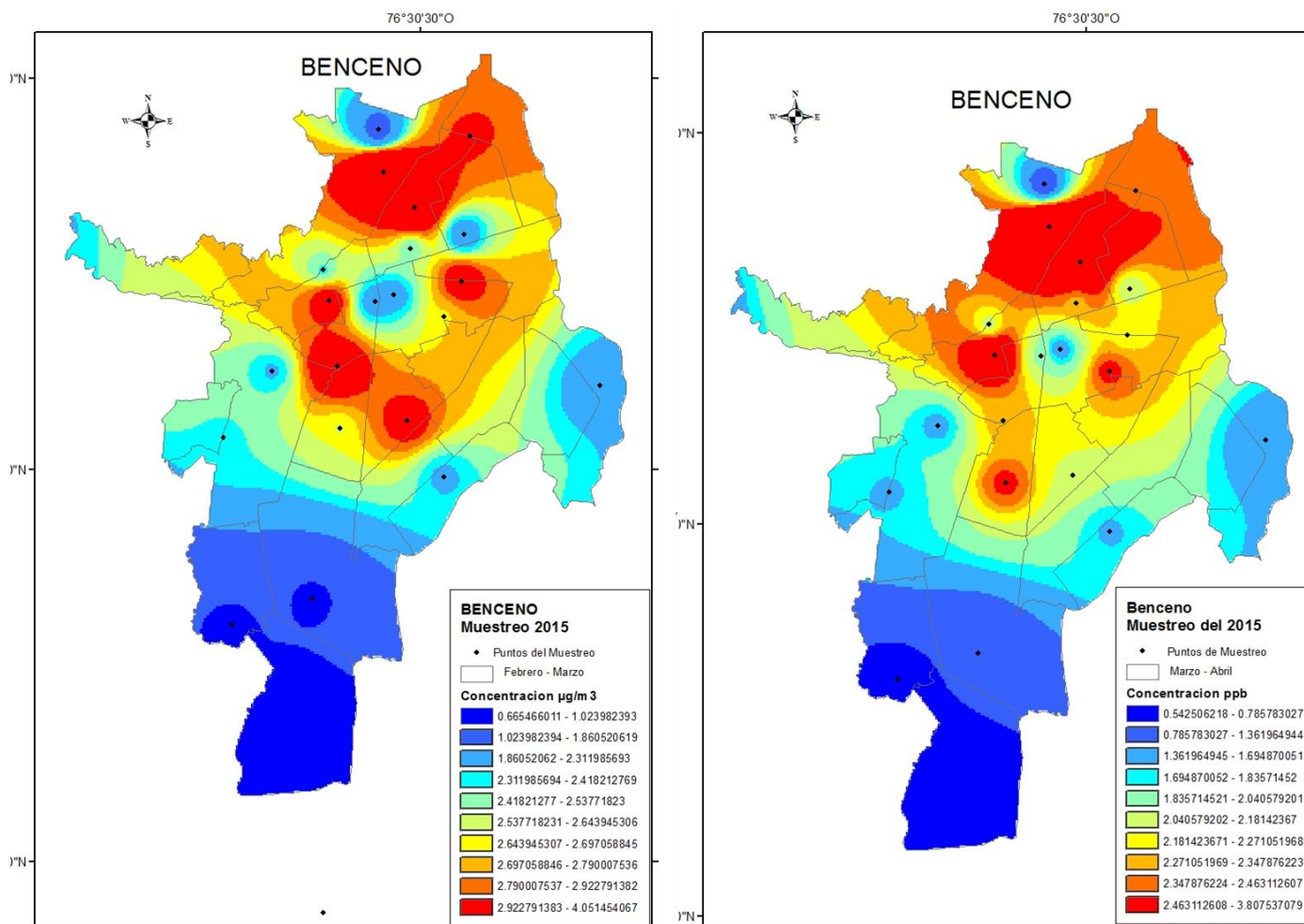


Figura 45. Distribución espacial de benceno durante el primer semestre de 2015.

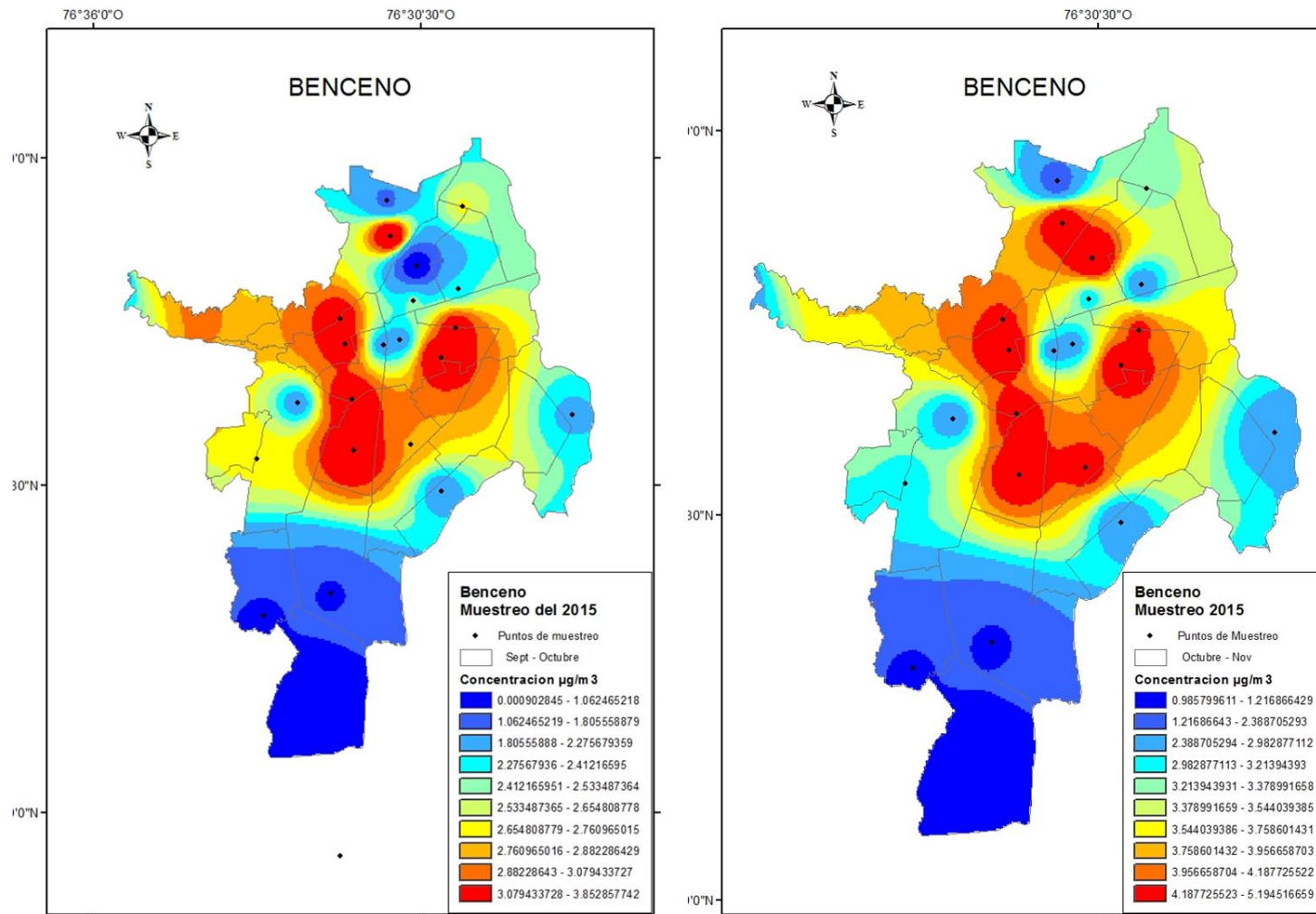


Figura 46. Distribución espacial de benceno durante el segundo semestre de 2015.



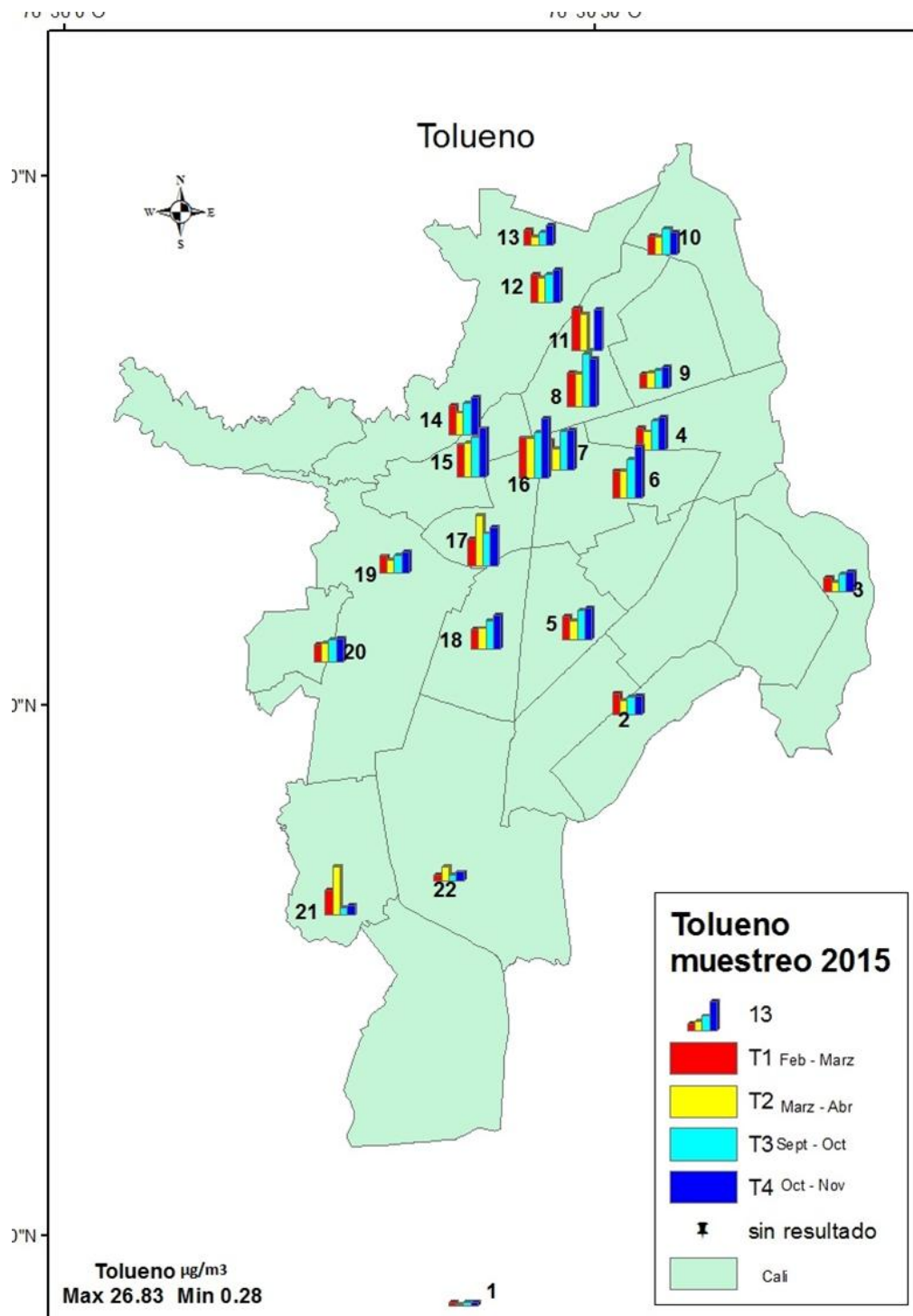


Figura 47. Concentraciones de tolueno durante el año 2015.

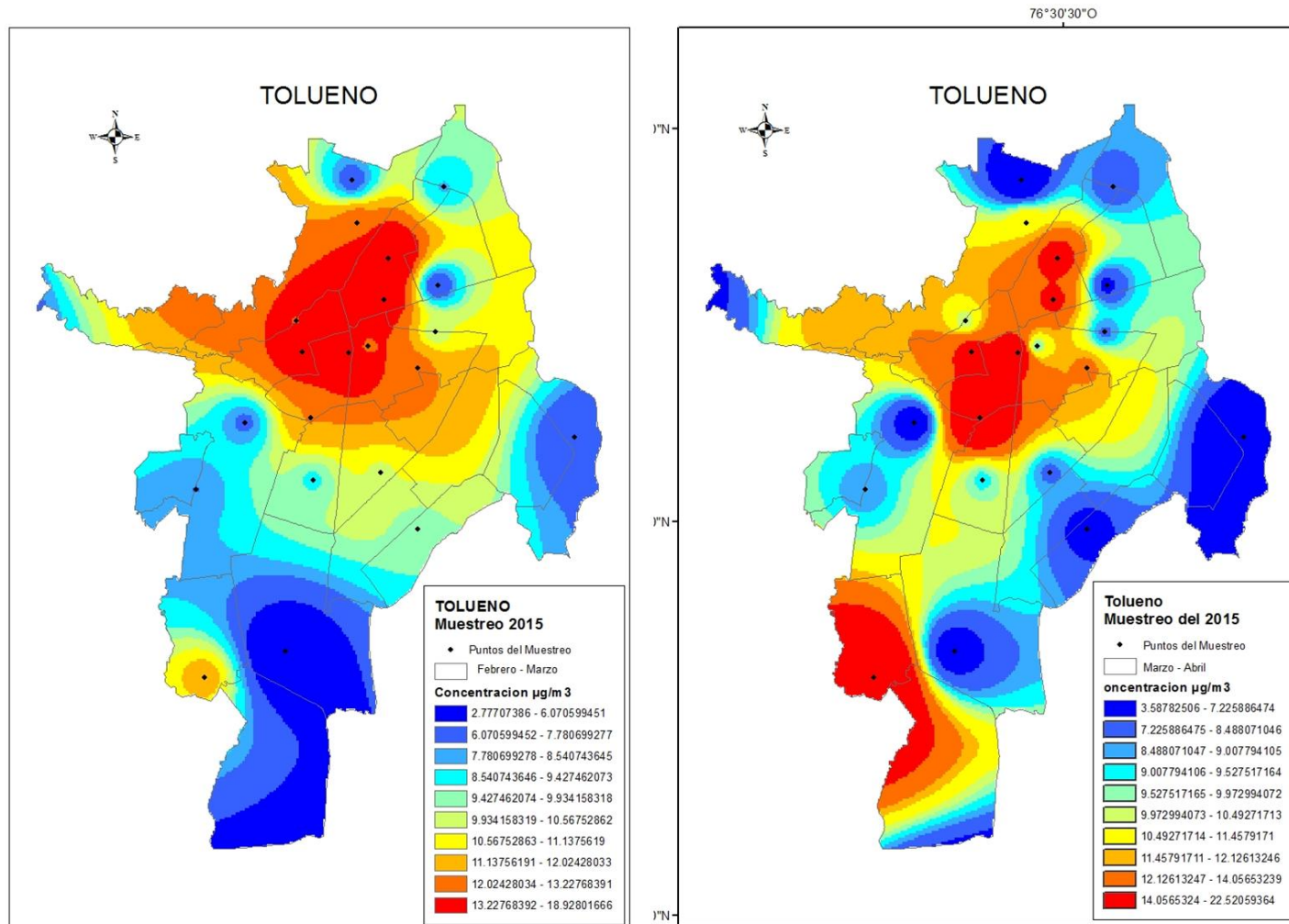


Figura 48. Distribución espacial de tolueno durante el primer semestre de 2015.

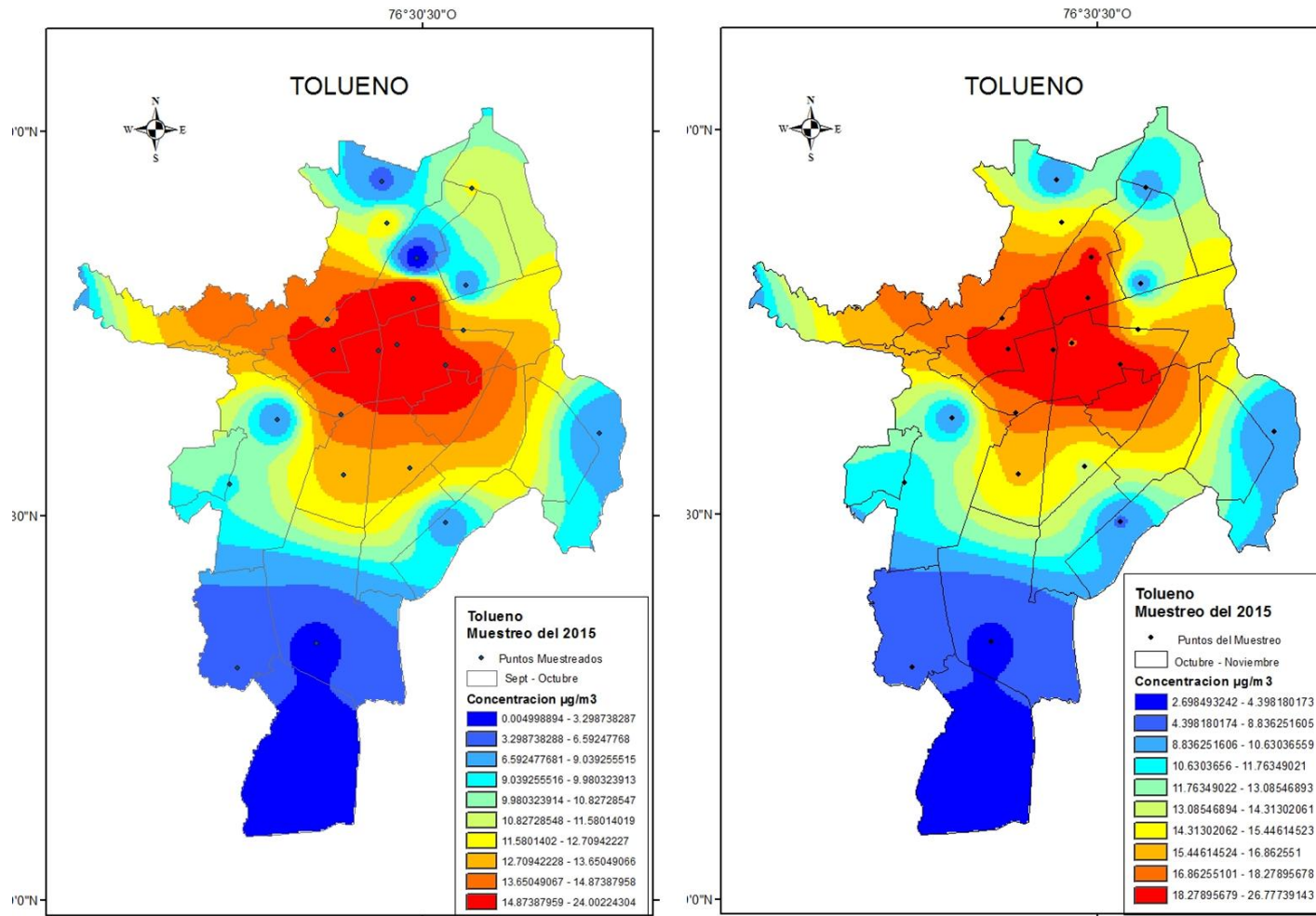


Figura 49. Distribución espacial de tolueno durante el segundo semestre de 2015.

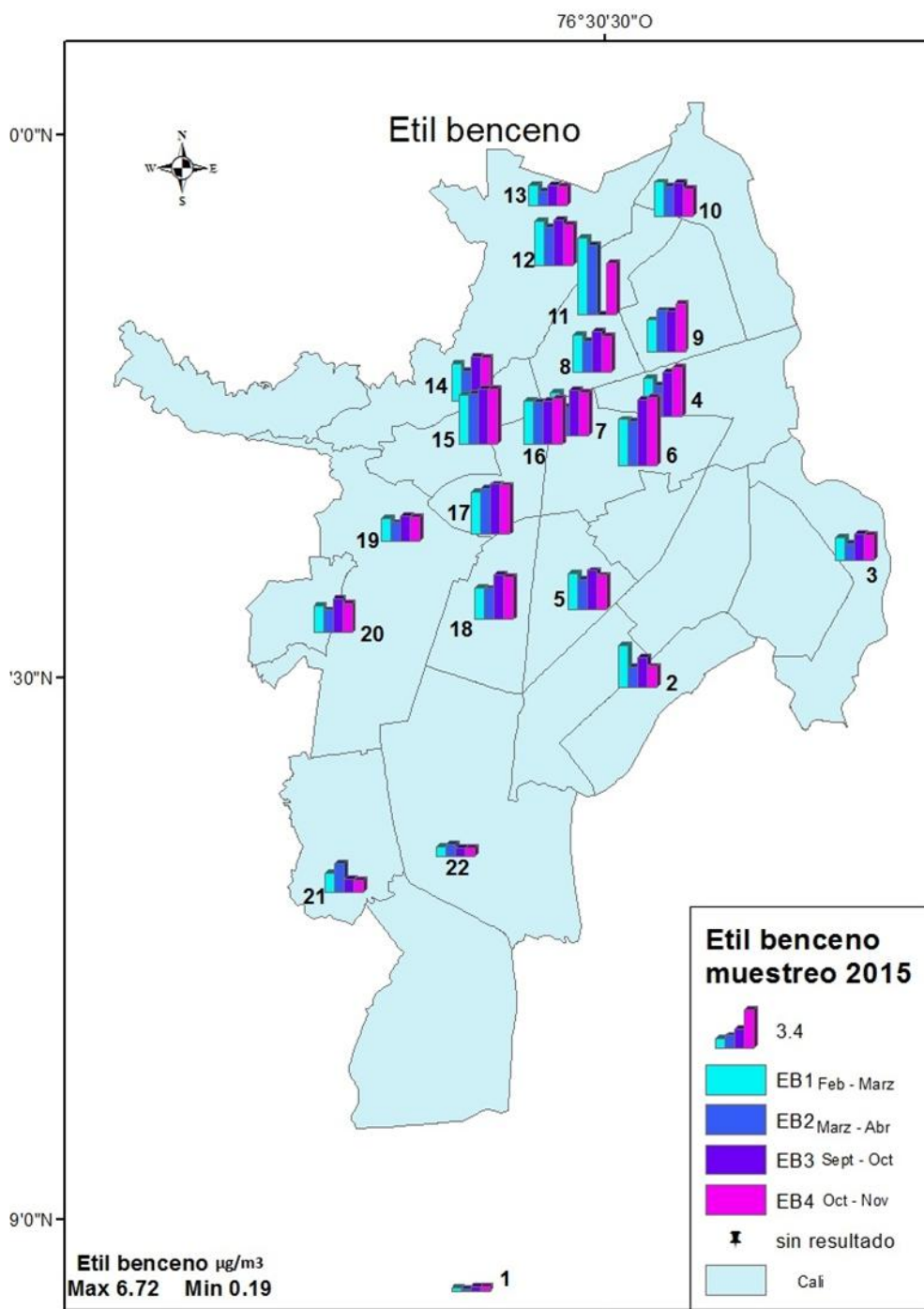


Figura 50. Concentraciones de etilbenceno durante el año 2015.



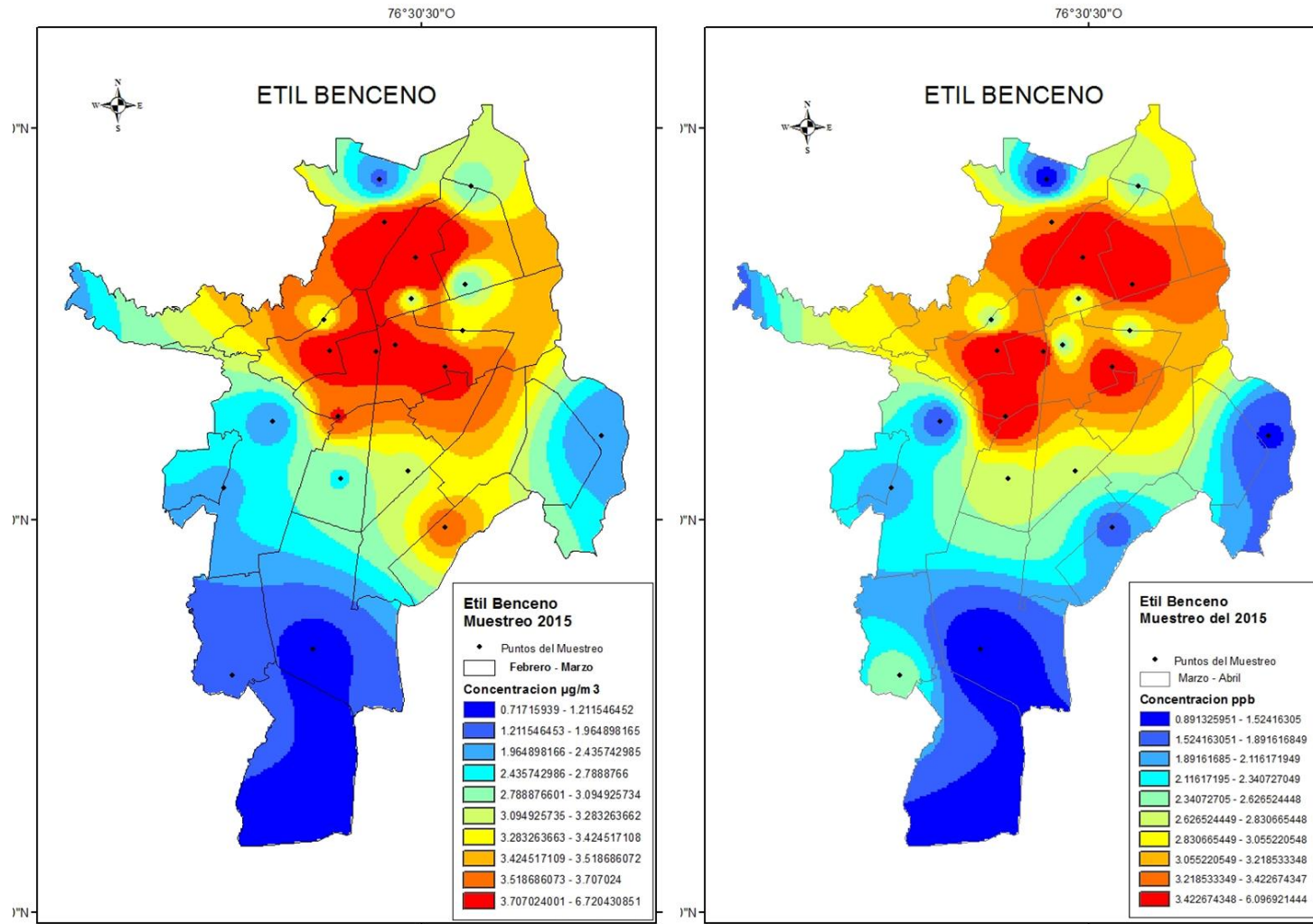


Figura 51. Distribución espacial de etilbenceno durante el primer semestre de 2015.



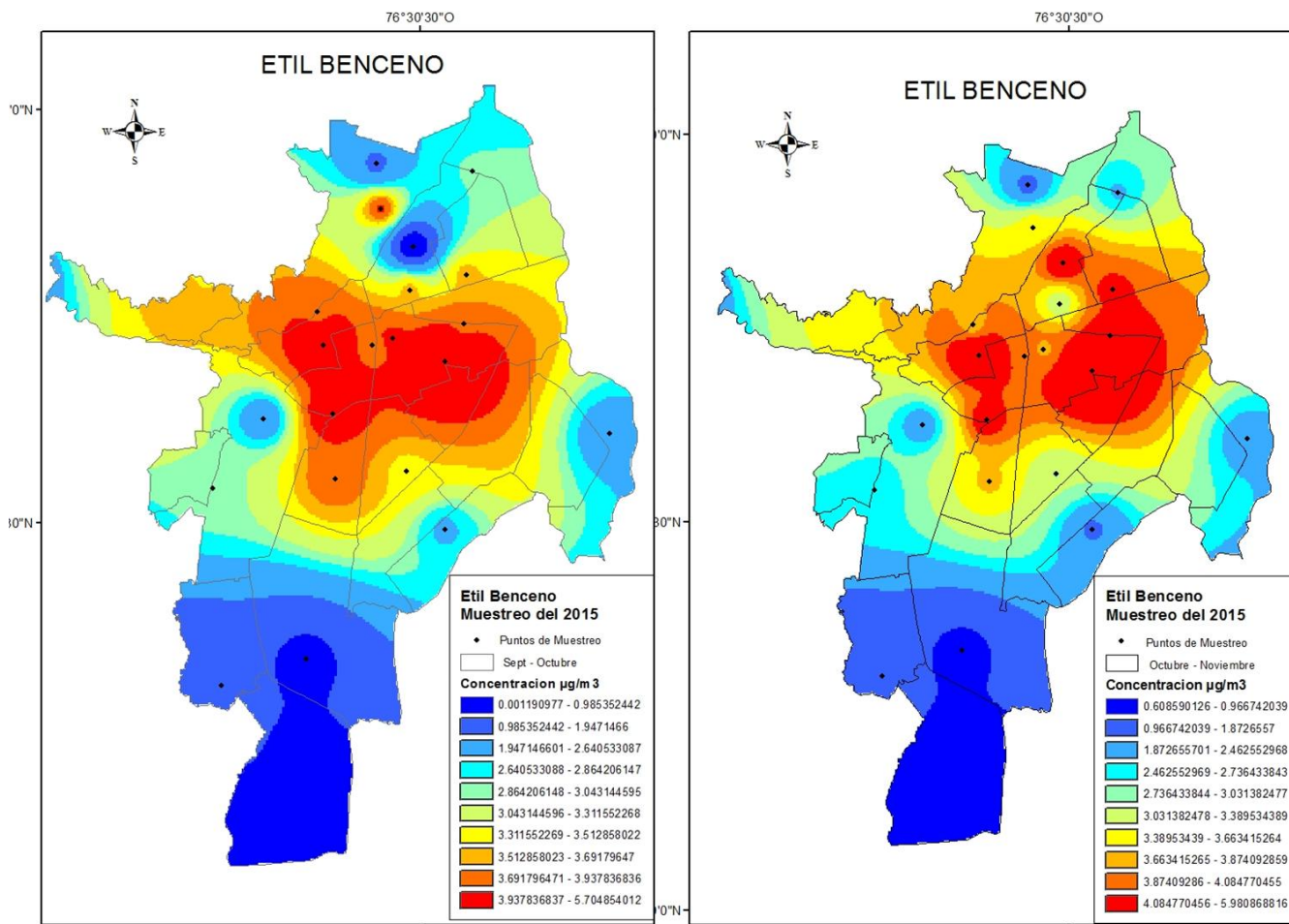


Figura 52. Distribución espacial el segundo de etilbenceno durante semestre de 2015.

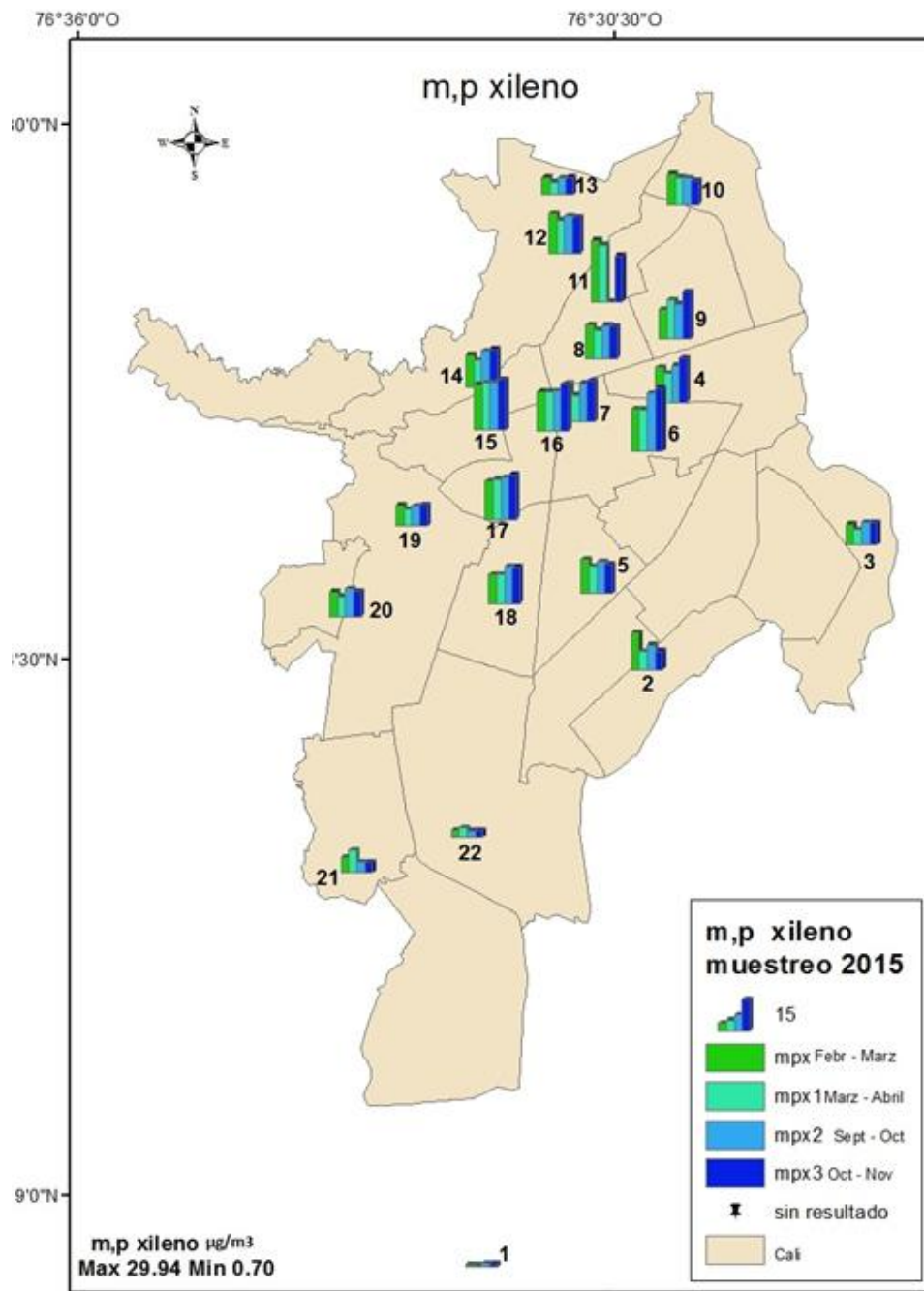


Figura 53. Concentraciones de m,p-xileno durante el año 2015

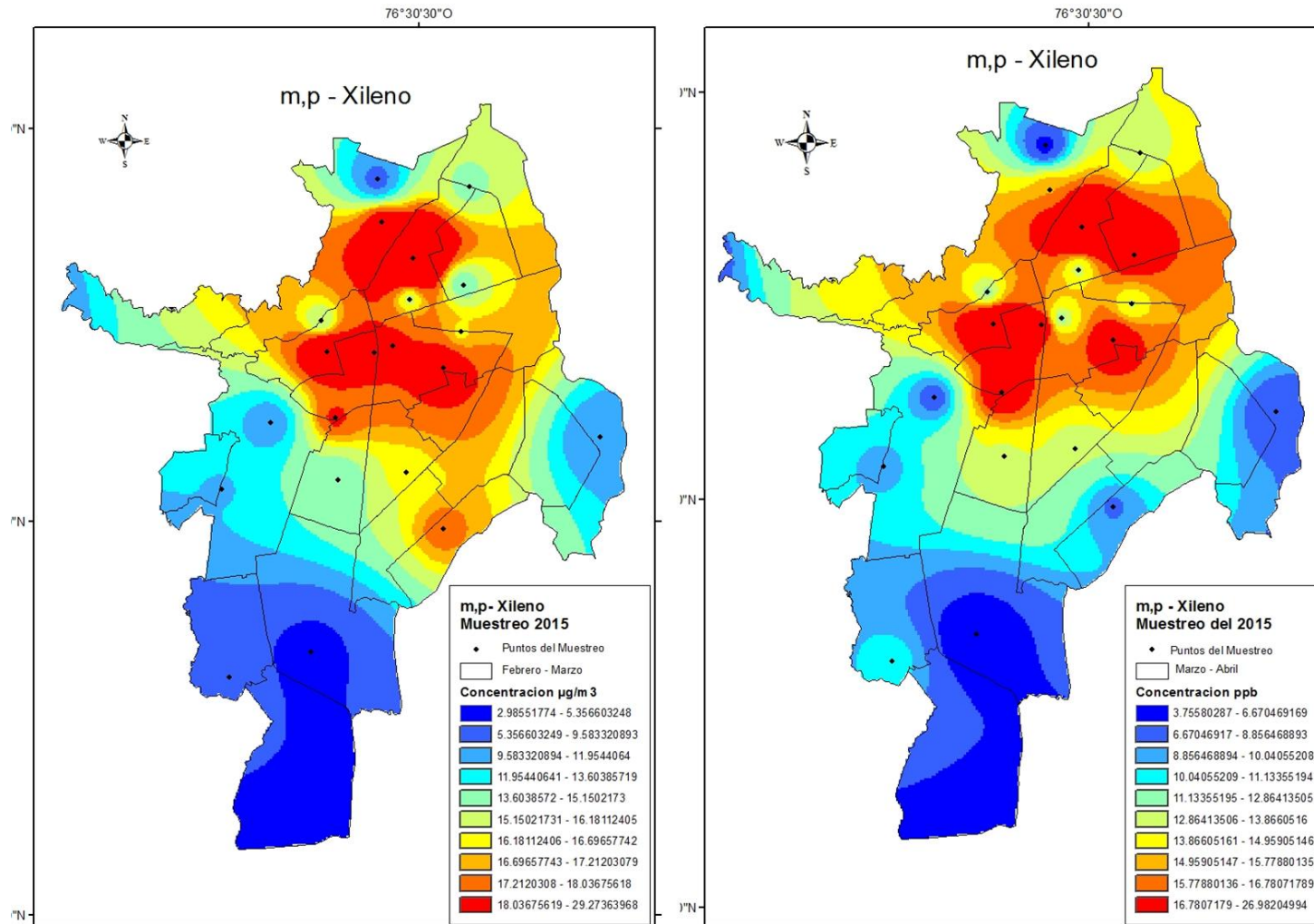


Figura 54. Distribución espacial de m,p-xileno durante el primer semestre de 2015.

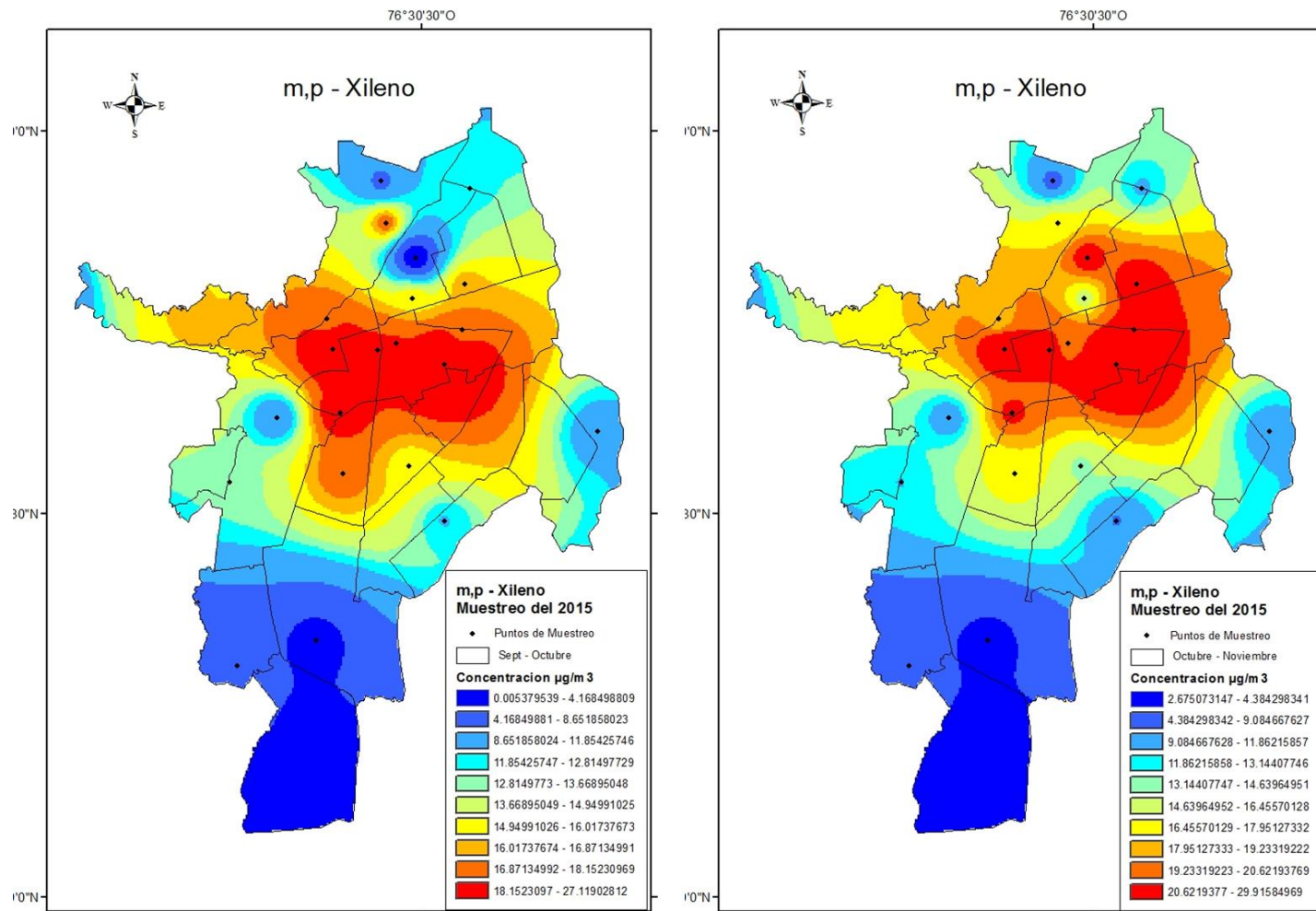


Figura 55. Distribución espacial de m,p-xilenos durante el segundo semestre de 2015.



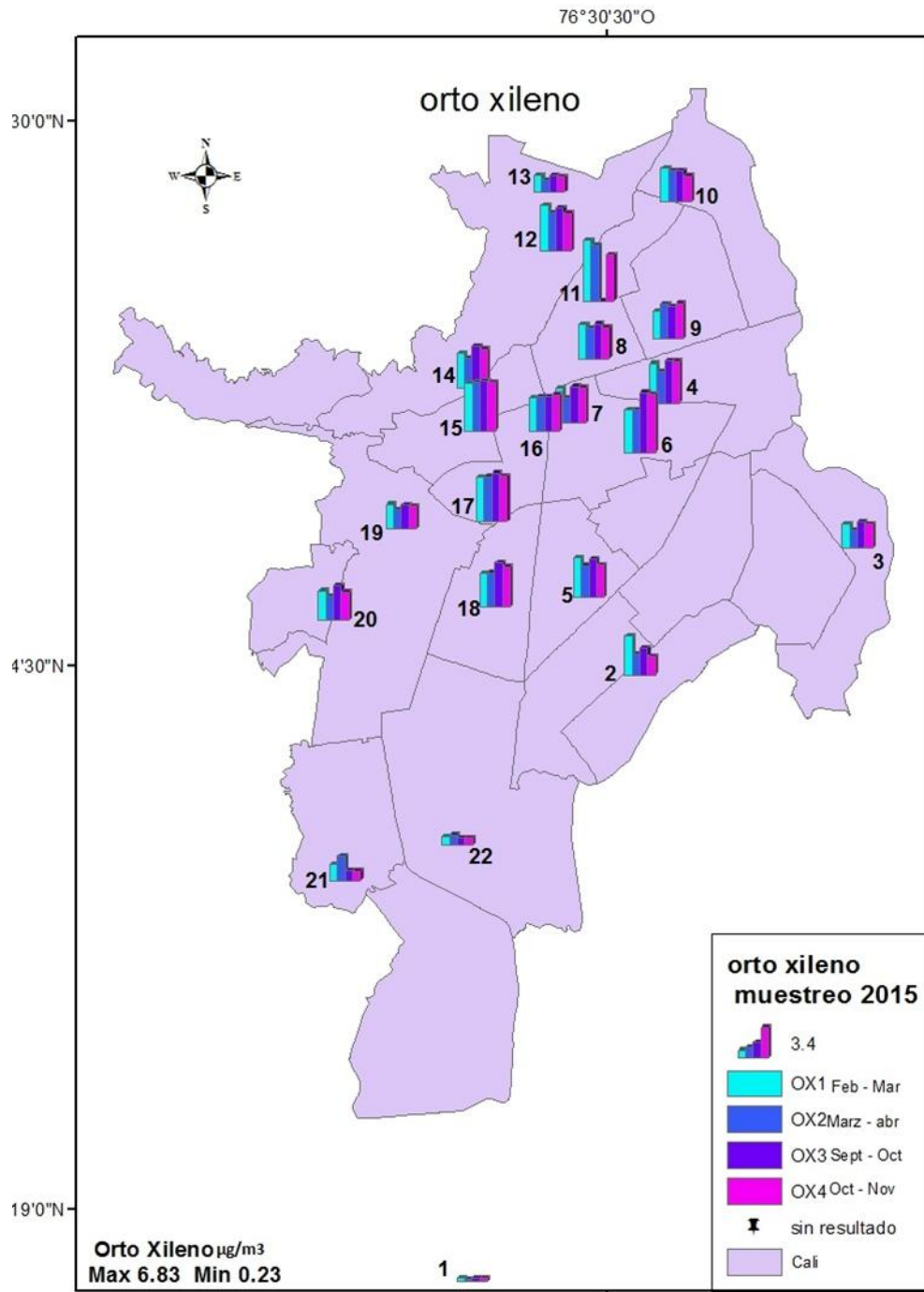


Figura 56. Concentraciones de o-xileno durante el año 2015



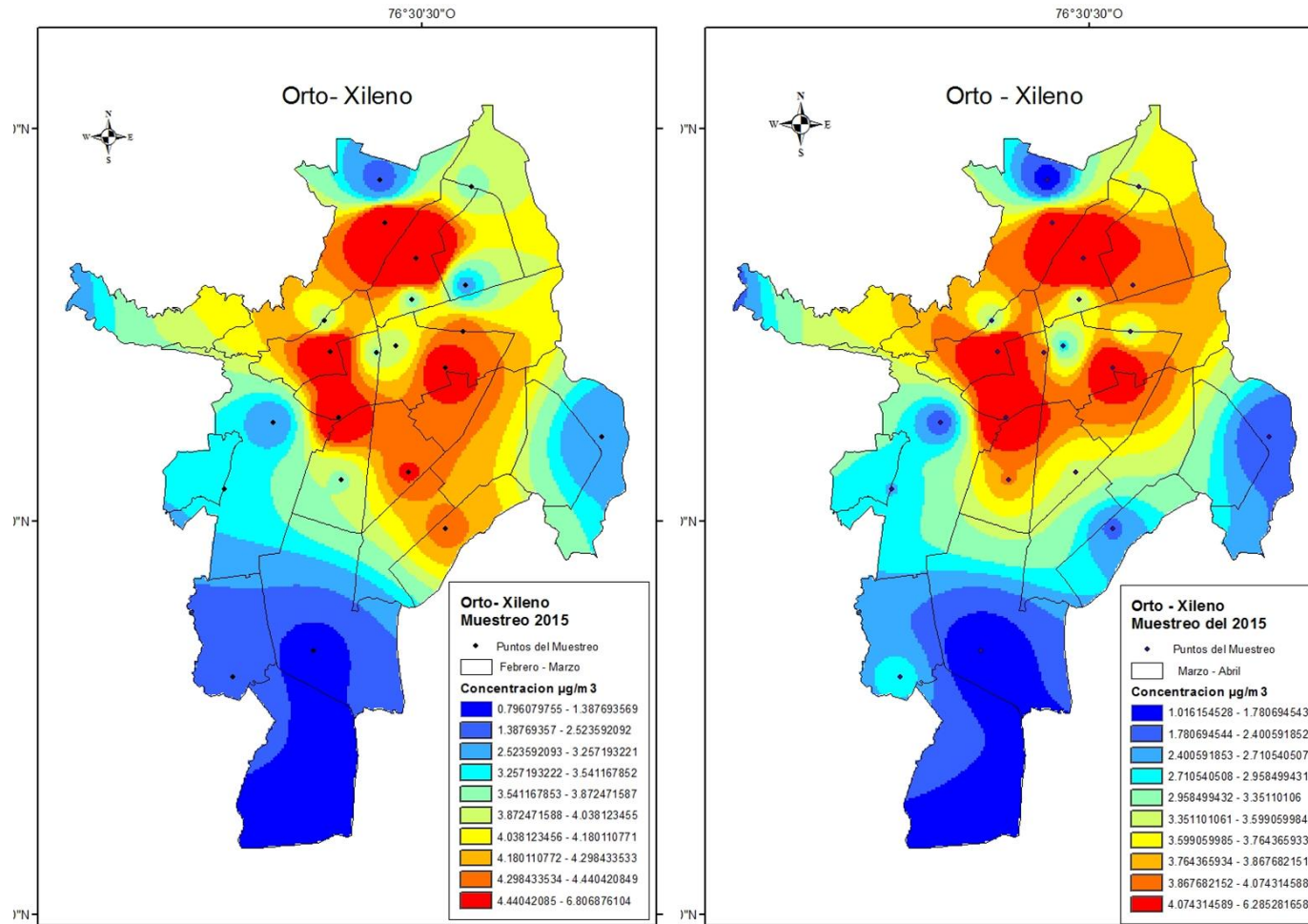


Figura 57. Distribución espacial de o-xileno durante el primer semestre de 2015.

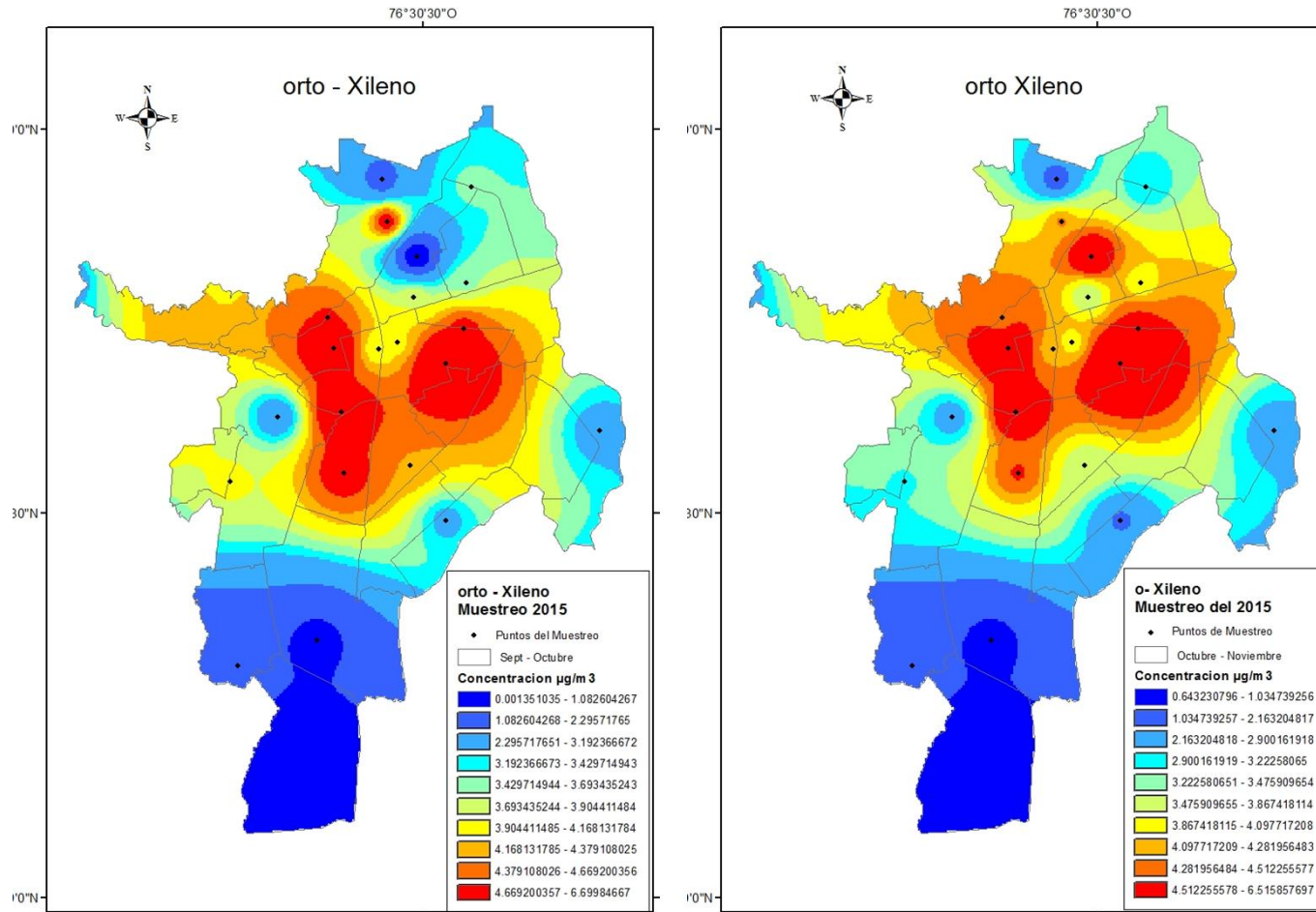


Figura 58. Distribución espacial de o-xileno durante el segundo semestre de 2015.

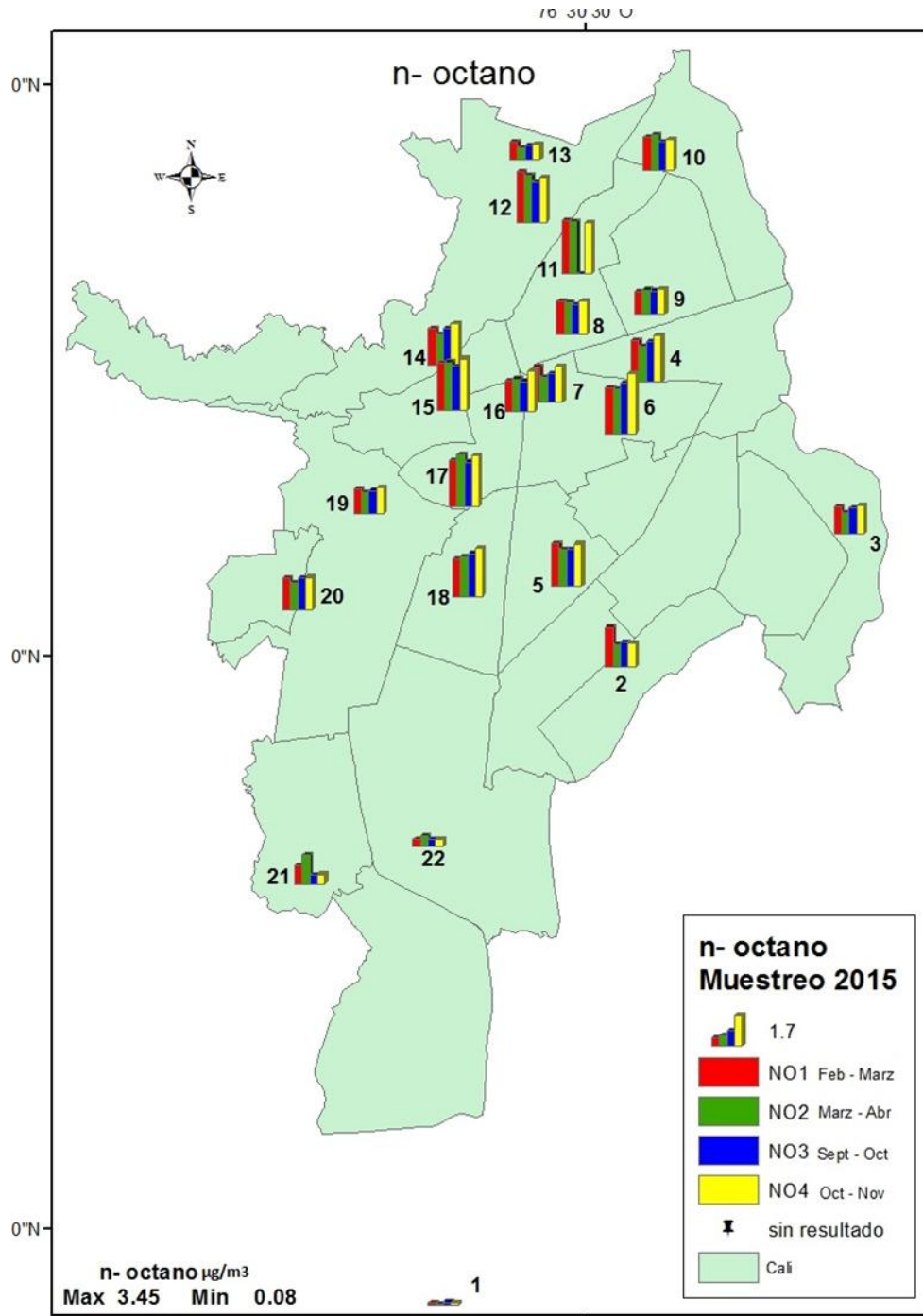


Figura 59. Concentraciones de n-octano durante el año 2015

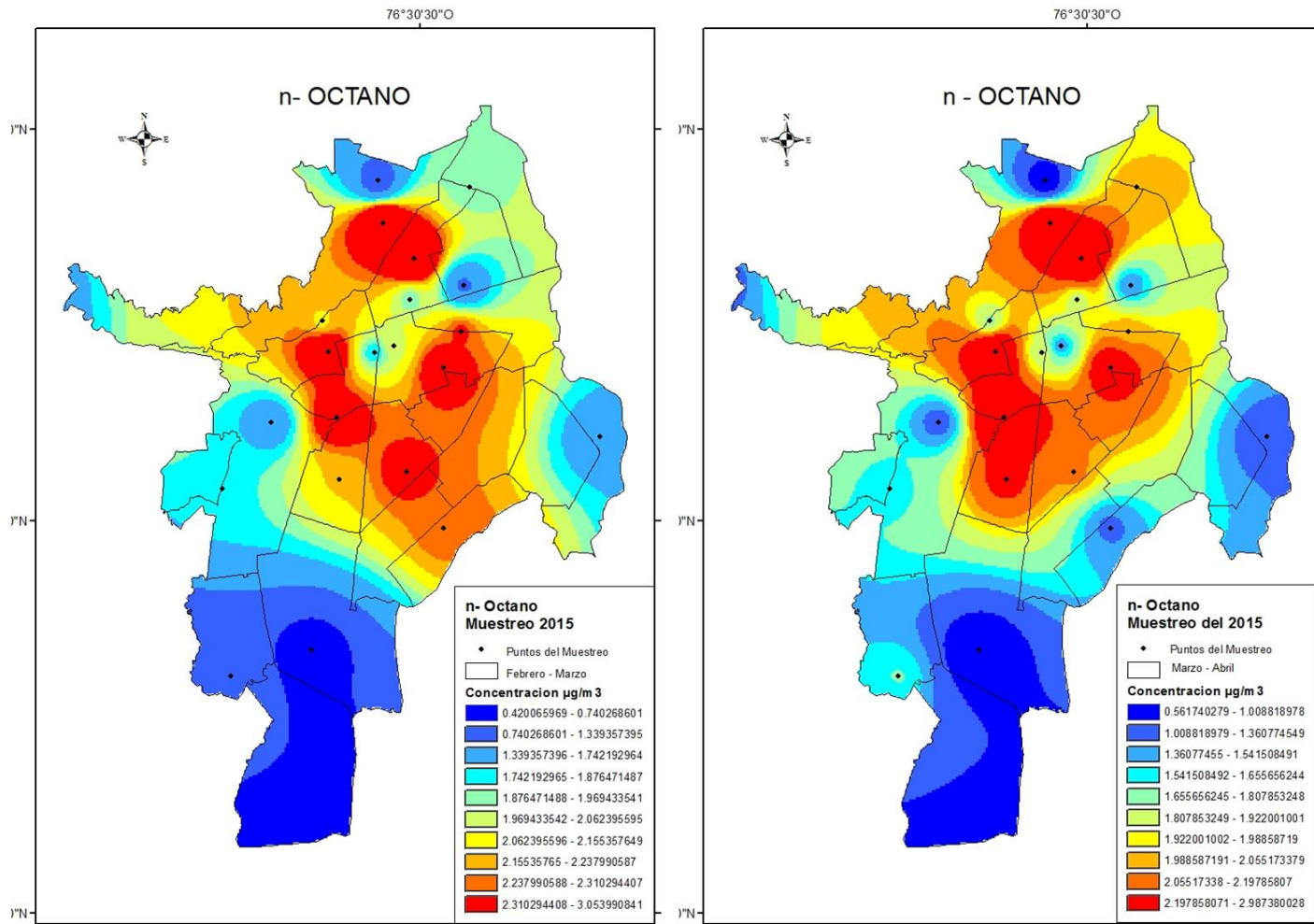


Figura 60. Distribución espacial de n-octano durante el primer semestre de 2015.



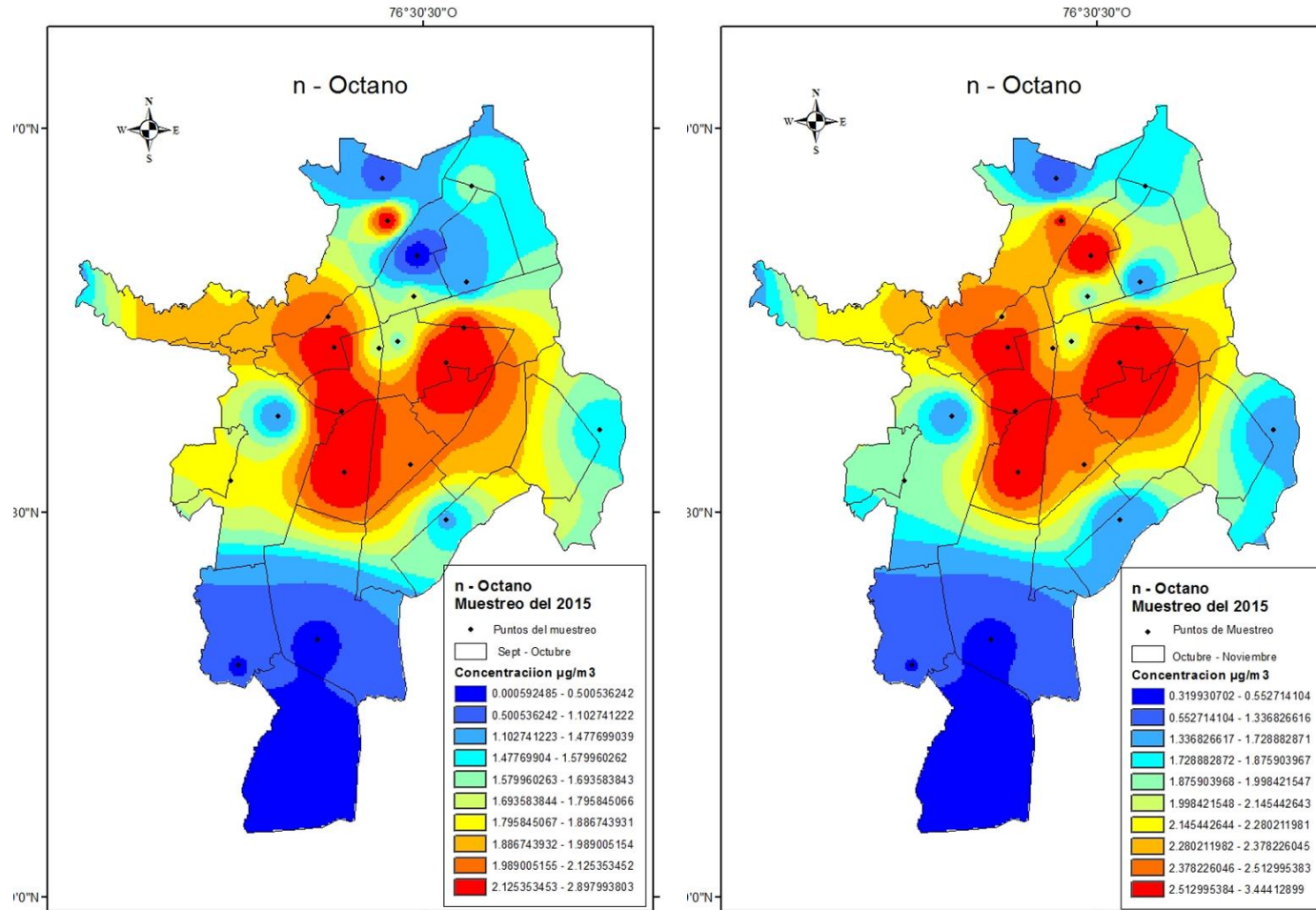


Figura 61. Distribución espacial de n-octano durante el segundo semestre de 2015.



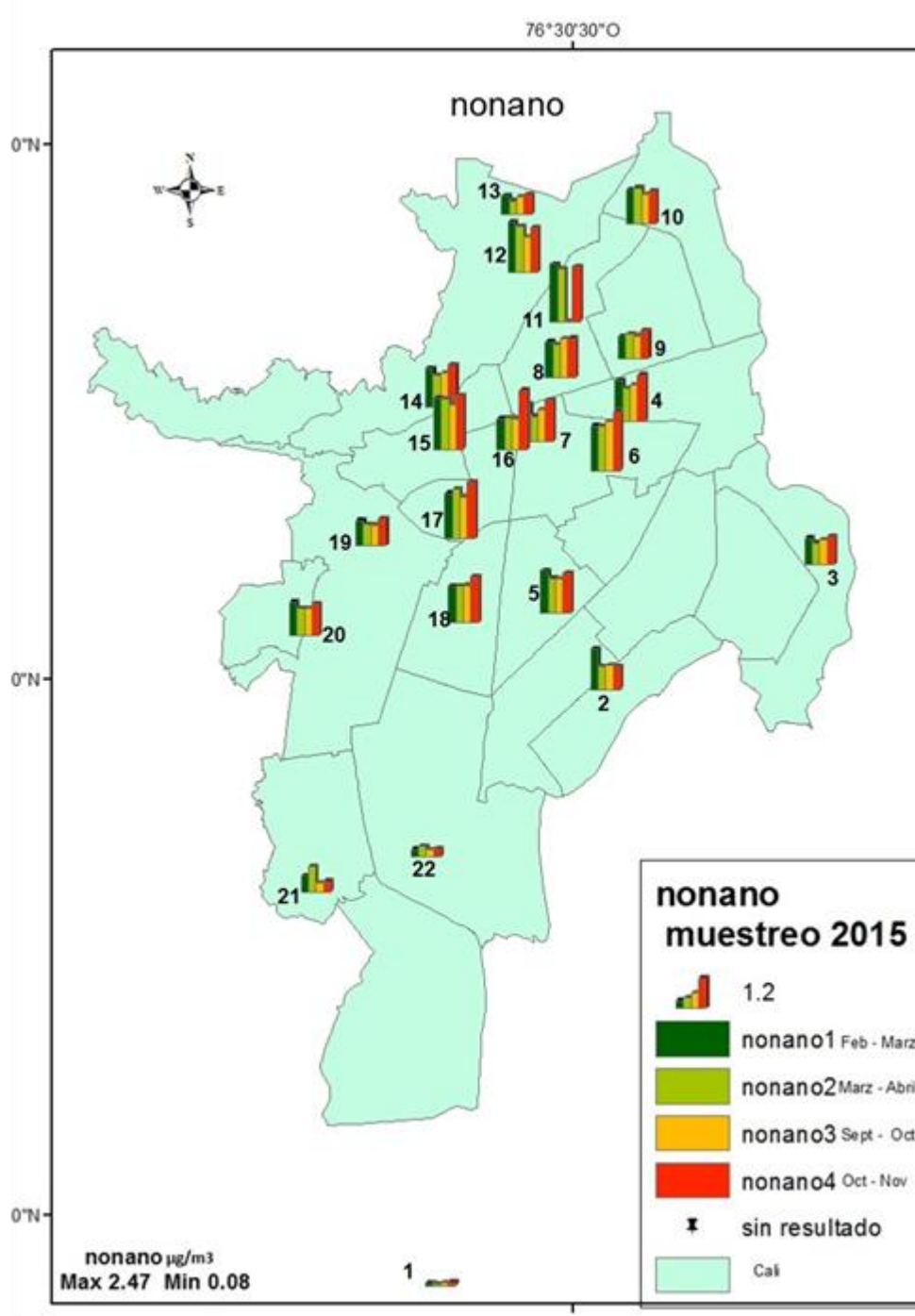


Figura 62. Concentraciones de nonano durante el año 2015.

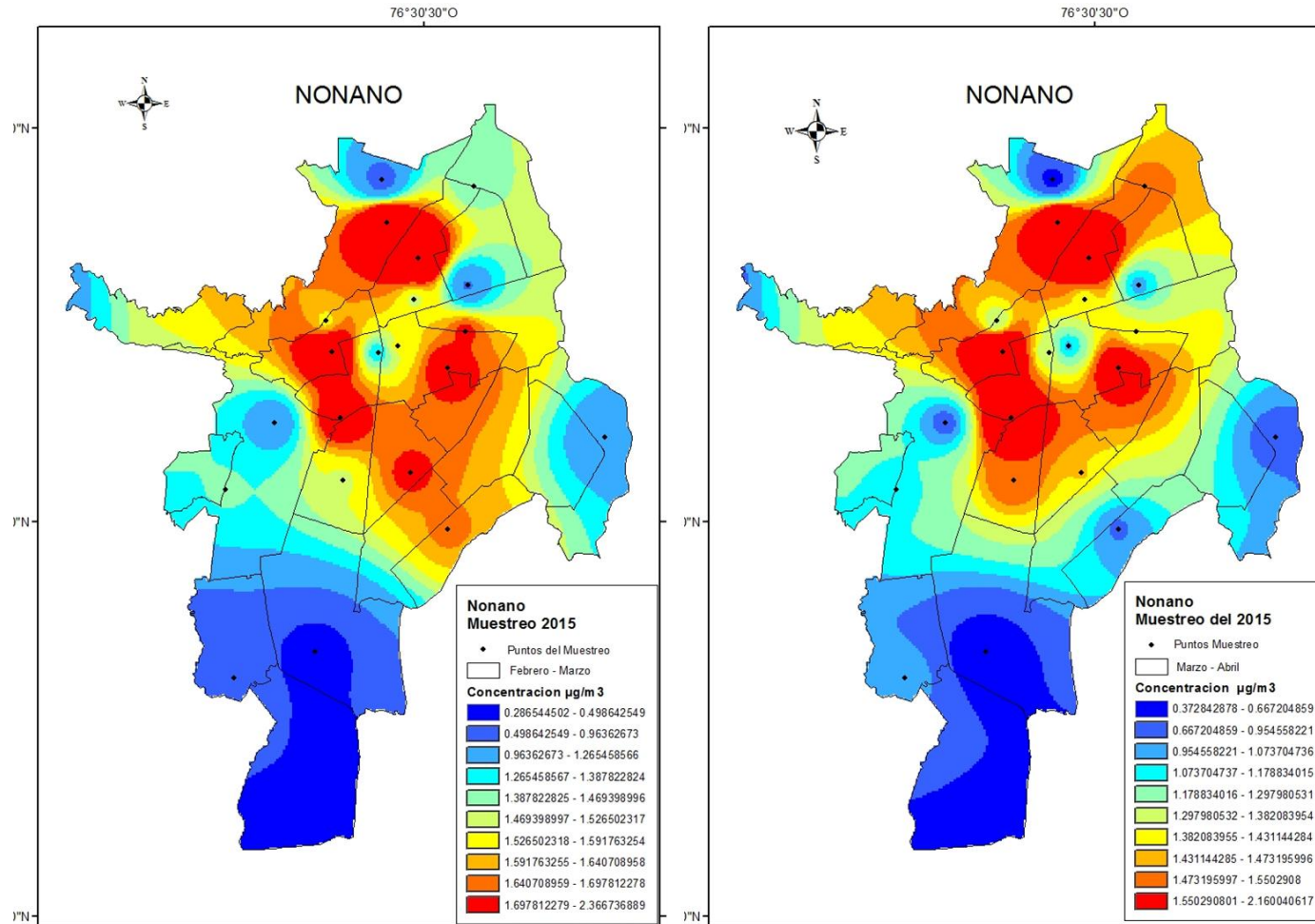


Figura 63. Distribución espacial de nonano durante el primer semestre de 2015.

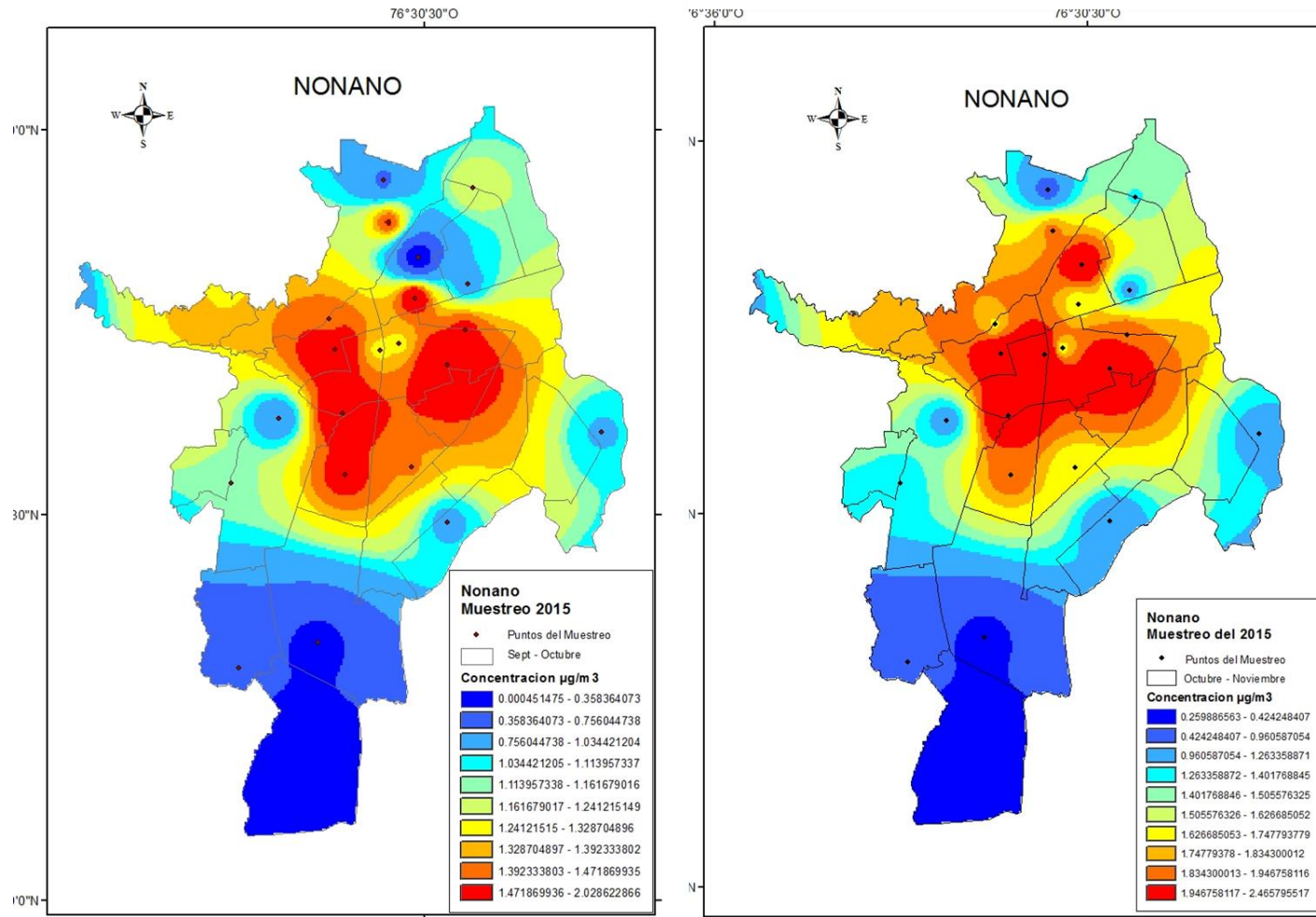


Figura 64. Distribución espacial de nonano durante el segundo semestre de 2015.

Figura 65. Concentraciones de SO<sub>2</sub> durante el año 2015

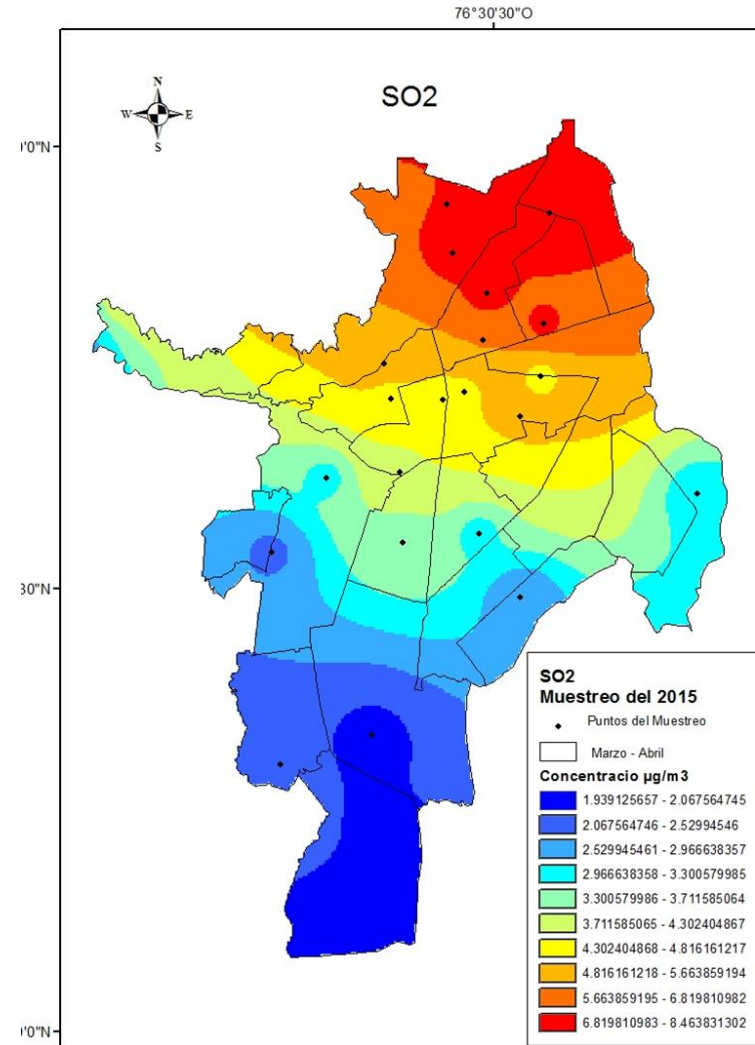
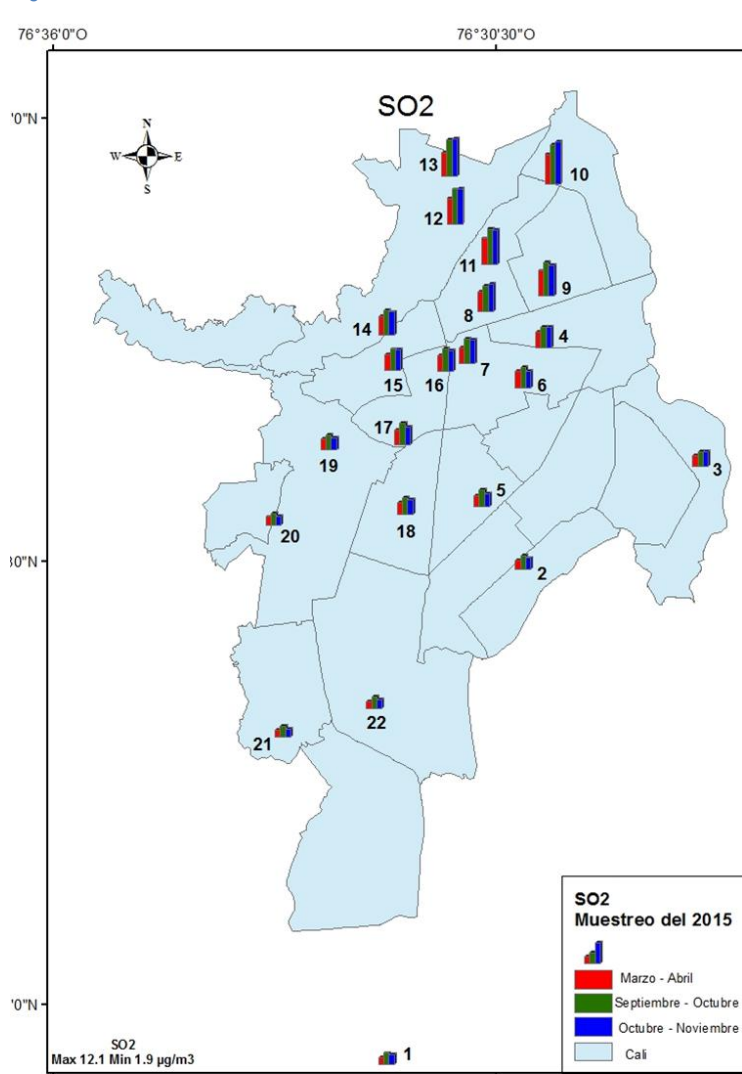


Figura 66. Concentraciones de SO<sub>2</sub> durante el primer muestreo de 2015.



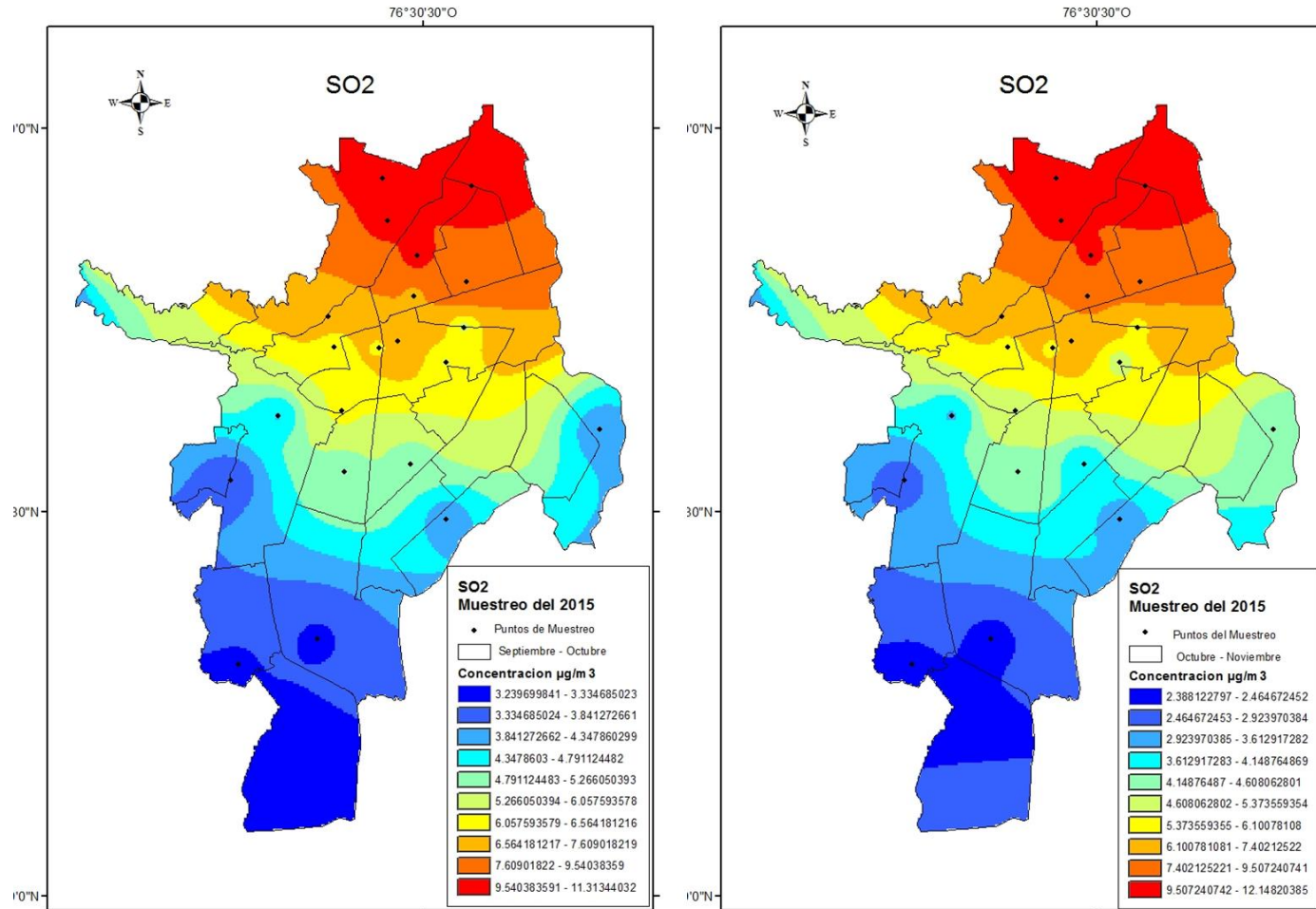


Figura 67. Distribución espacial de SO<sub>2</sub> durante el segundo semestre de 2015.



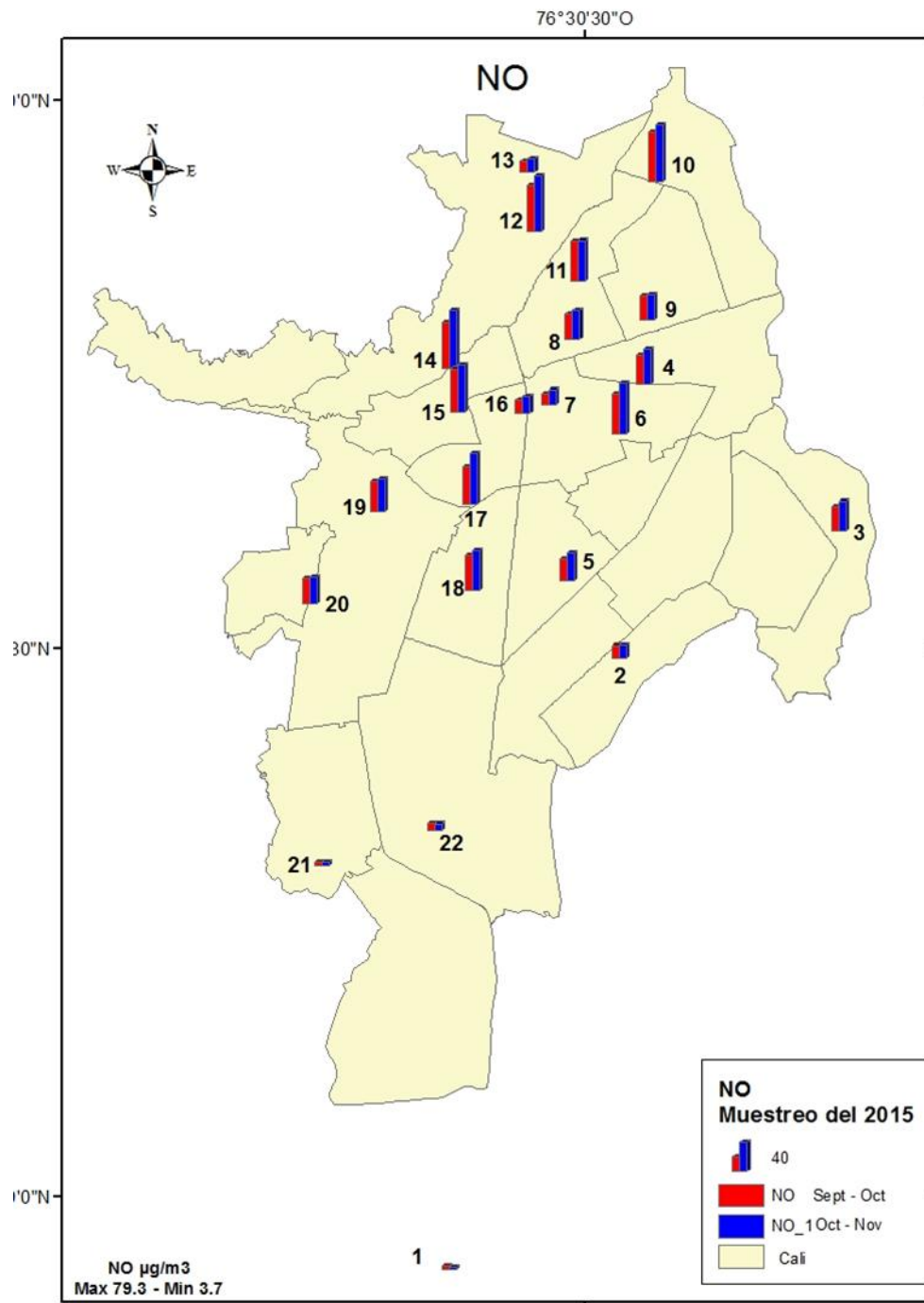


Figura 68. Concentraciones de NO durante el segundo semestre de 2015

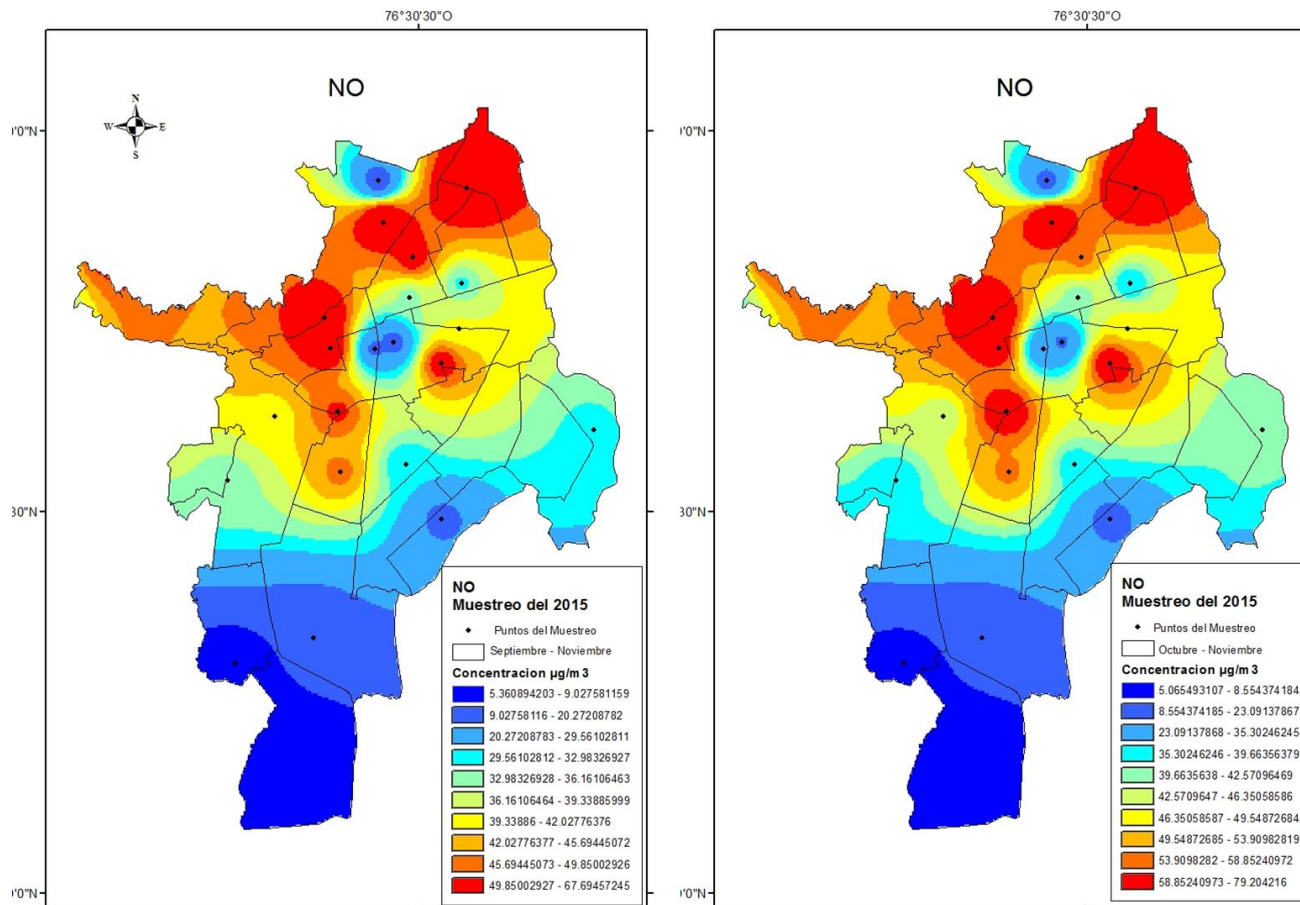


Figura 69. Distribución espacial de NO durante el segundo semestre de 2015.

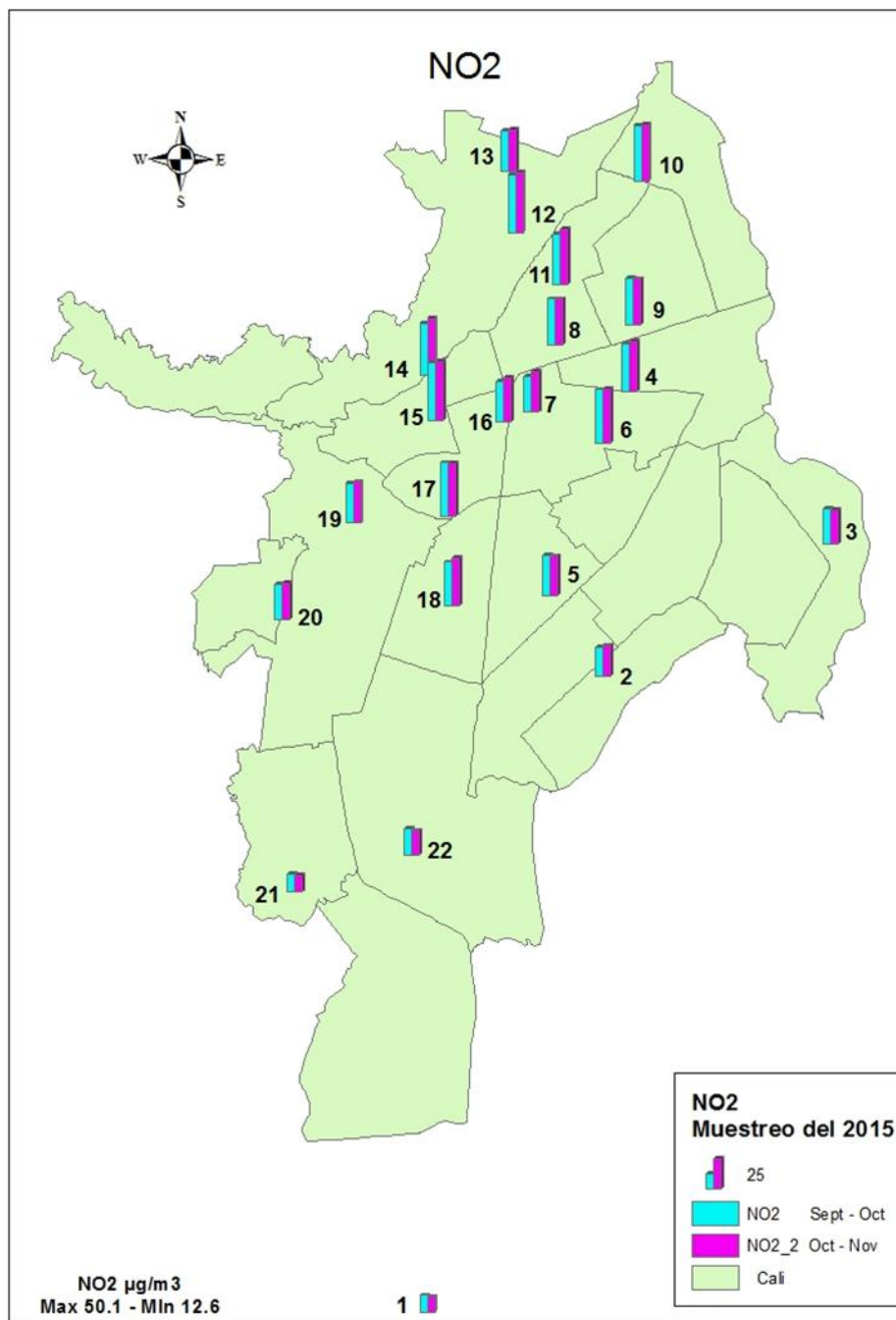


Figura 70. Concentraciones de NO<sub>2</sub> durante el segundo semestre de 2015.

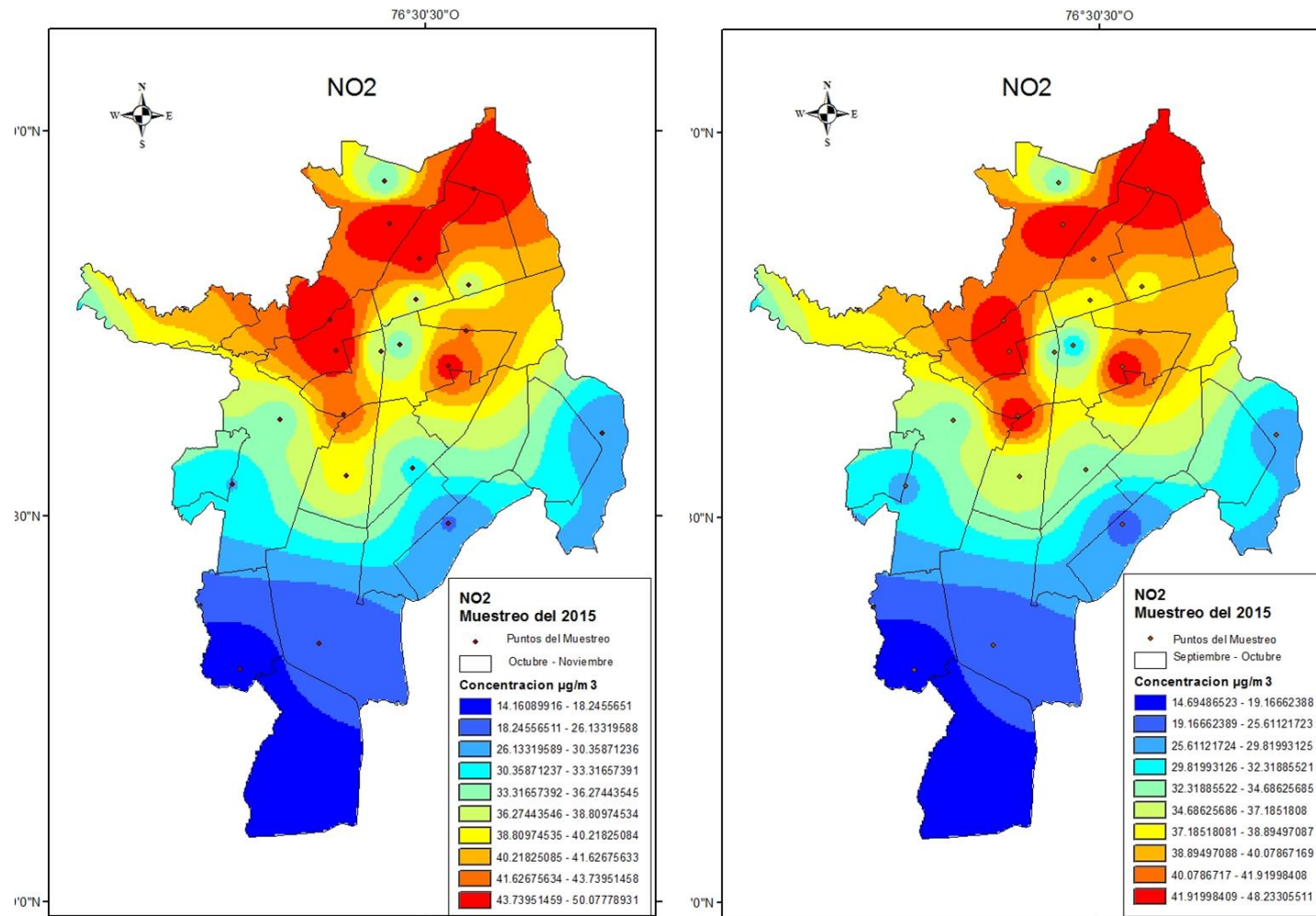


Figura 71. Distribución espacial de NO<sub>2</sub> durante el segundo semestre de 2015.

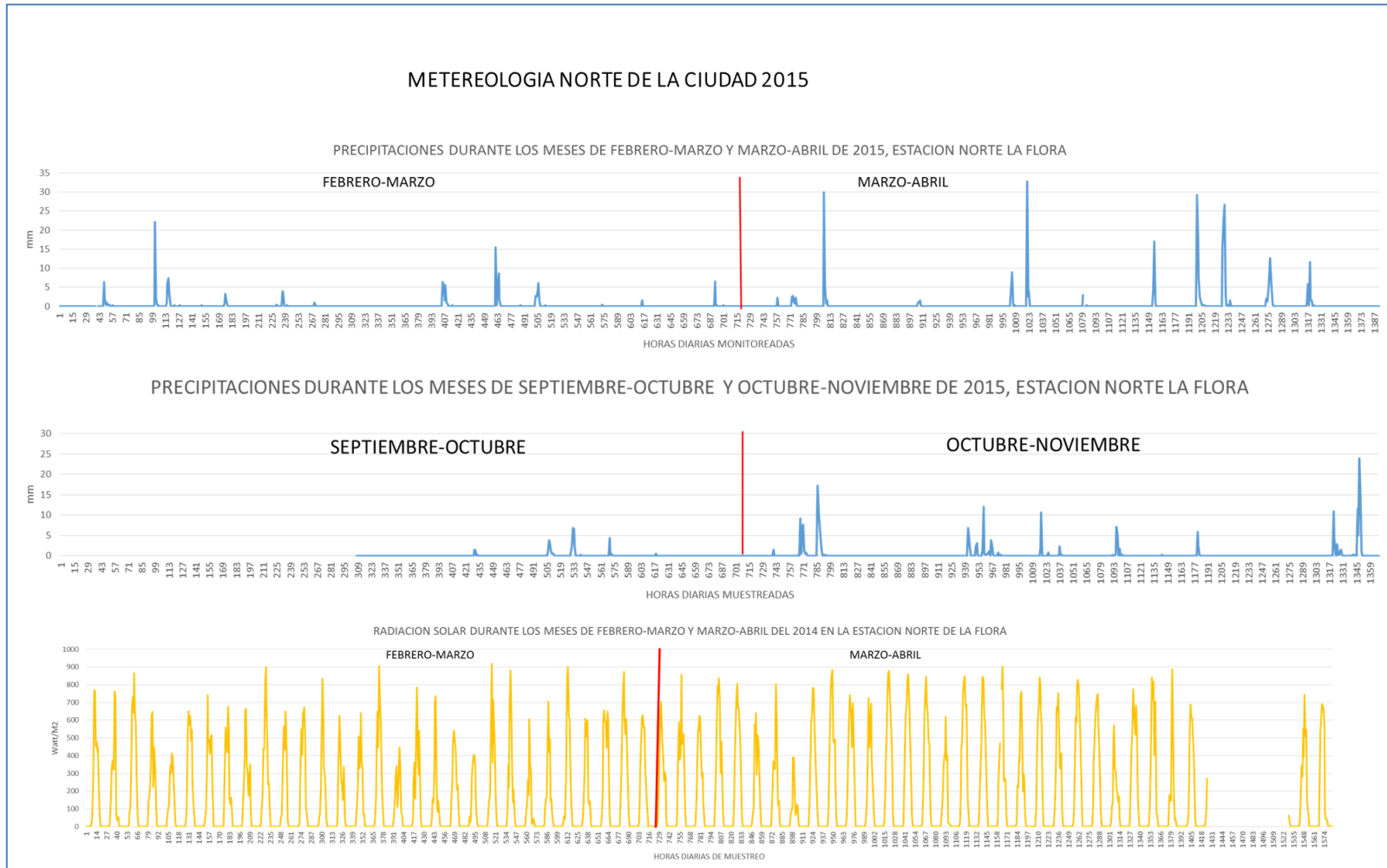


Figura 72. Datos meteorológicos recopilados durante los meses de muestreo en la zona norte de Cali.



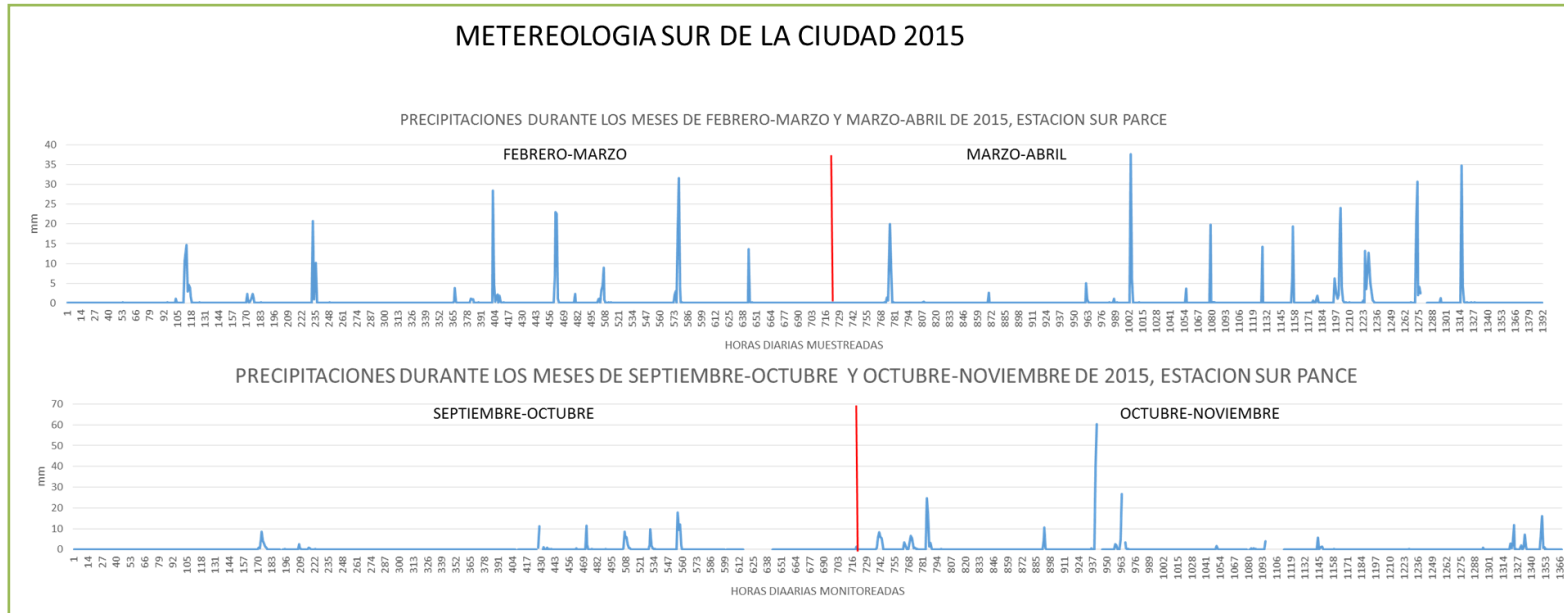


Figura 73. Datos meteorológicos recopilados durante los meses de muestreo en la zona sur de Cali.

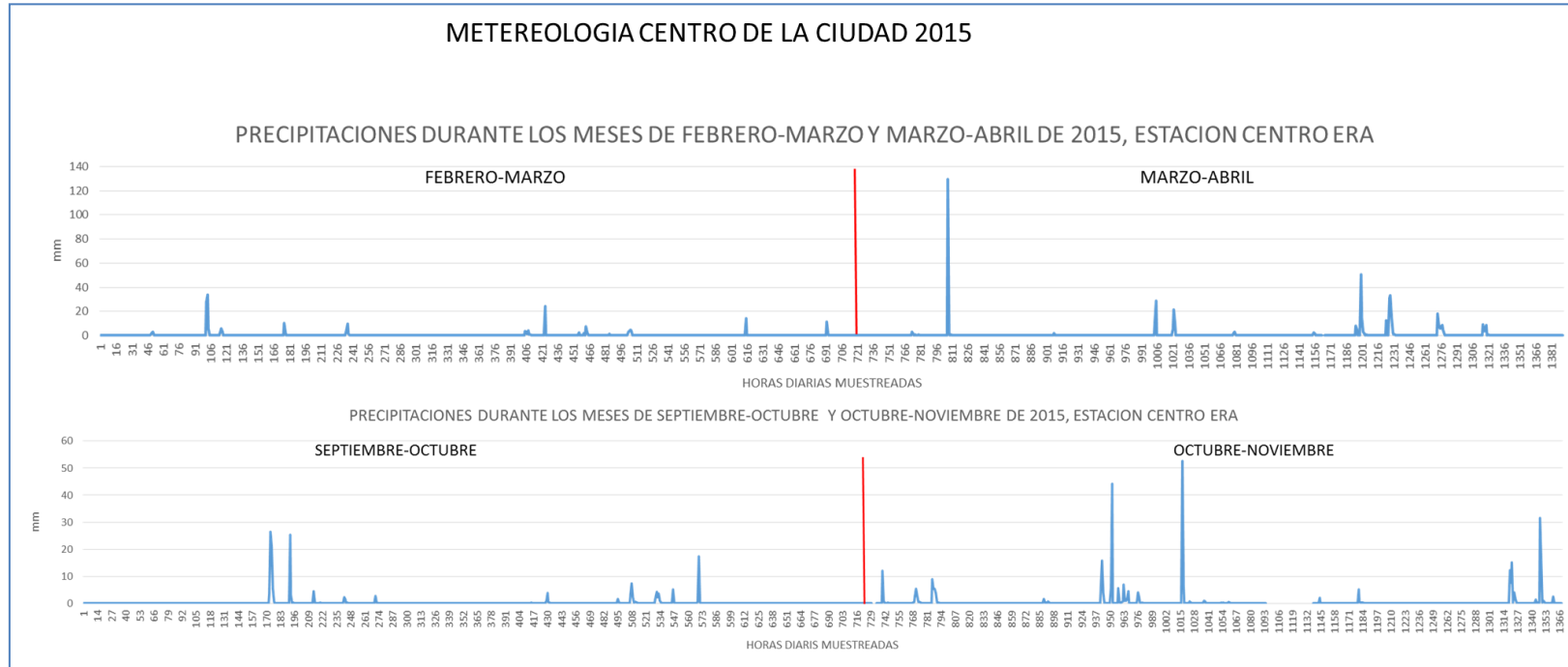


Figura 74. Datos meteorológicos recopilados durante los meses de muestreo en la zona centro de Cali.

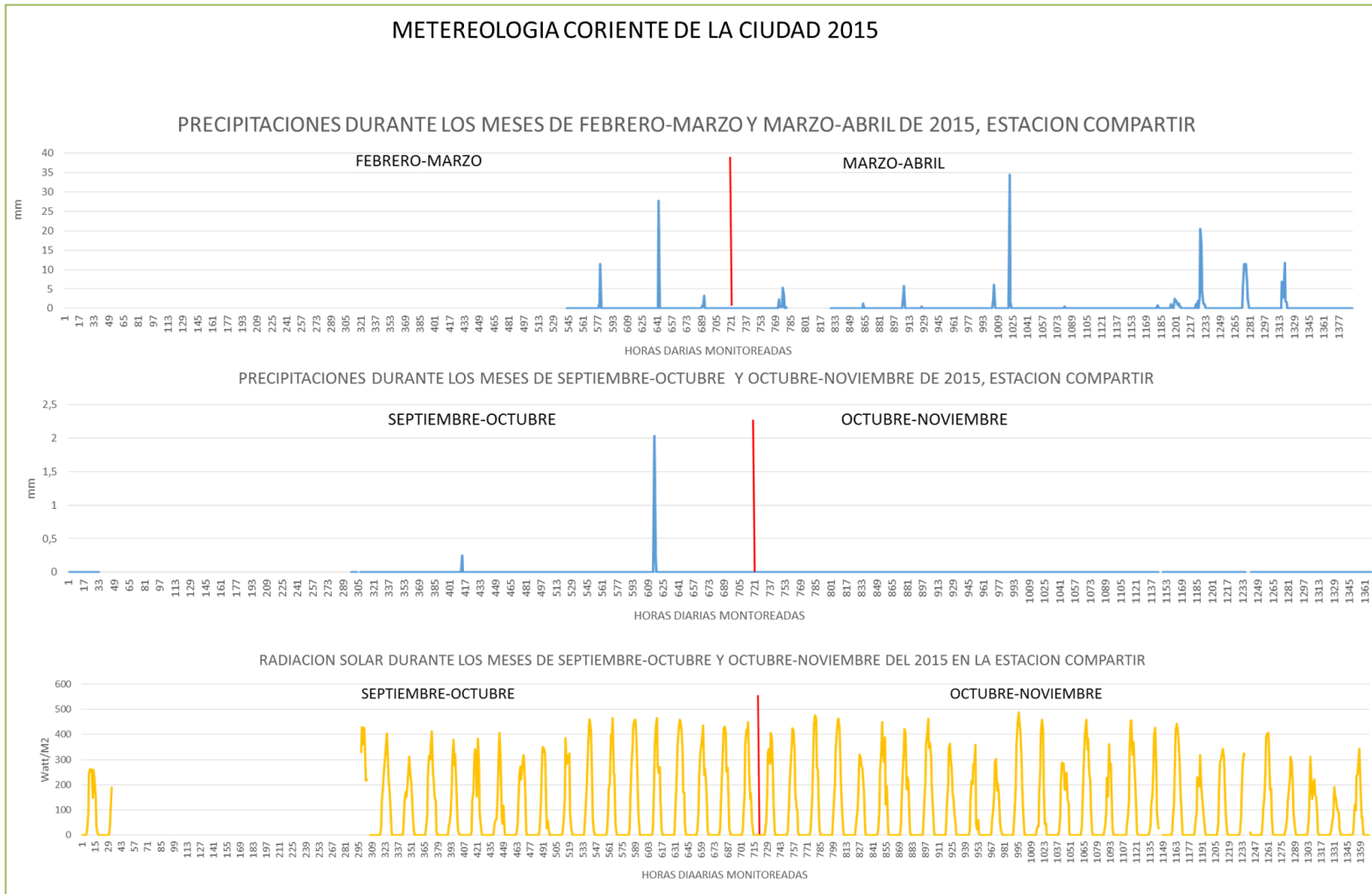


Figura 75. Datos meteorológicos recopilados durante los meses de muestreo en la zona oriente de Cali.

- *Benceno.*

La Figuras 44, 45 y 46 presentan los datos del benceno, su distribución espacial confirma la ubicación de los puntos críticos siendo AV\_3°N\_44> C.C\_CALEÑO> LA LUNA> CHAPINERO> GUABAL> BASE\_AEREA> CALLE 44\_K1> PRIMAVERA, coinciden con las zona de alto tráfico vehicular, las cuales no sobrepasaron el valor máximo de la norma ( $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), cuando se mira el promedio del año. Se observa como comportamiento un aumento a lo largo del año, con una ligera disminución en el periodo marzo-abril, época de mayor lluvia y temperaturas bajas en la zona centro y norte de la ciudad. Las desviaciones estándar por punto de muestreo fueron superiores a 1% solo en las estaciones de CHAPINERO y GUABAL.

- *Tolueno.*

Este compuesto es ampliamente usado como solvente en la industria de polímeros y especialmente en la fabricación de adhesivos, (Volckaert D., 2016). En las Figuras 47, 48 y 49 se presentan las concentraciones y la distribución espacial de este contaminante. El tolueno también es debido al tráfico encontrándose normalmente en proporción aproximada 3:1 con el benceno. El tiempo de vida del benceno en la atmósfera es mayor que el tolueno, por lo que si la relación es menor, podría indicar una masa de aire vieja, que ha sufrido transporte (Gómez M. C., 2005). Fenómeno que fue sutilmente perceptible algunas ocasiones.

El tolueno siempre se ha presentado como un analito donde los valores obtenidos en los monitoreos poseen una mayor dispersión y variabilidad aun en una misma estación. Este comportamiento es posible que se deba a procesos de fotodegradación del tolueno, que ocurre en la atmósfera en fase gaseosa con la presencia de radicales  $\cdot\text{OH}$ , acelerando su proceso de descomposición formando así nuevos compuestos como el benceno, hidroquinona fenólica, benzoquinona, benzaldehído, ácido benzoico, alcohol bencílico, etc., rutas que actualmente se están proponiendo (Dhada I., 2016). Dhada y colaboradores también han reportado la formación del tolueno a través de la adición del radical  $\cdot\text{OH}$  seguido por abstracción del radical  $\cdot\text{H}$  del etilbenceno y de los xilenos. La coexistencia de estos procesos pueden variar las concentraciones de este compuesto.

Durante el 2015 se puede establecer que los valores del primer semestre fueron menores que los obtenidos durante el segundo semestre. Los valores máximos en los muestreos de septiembre-octubre y octubre-noviembre fueron  $24.05$  y  $26.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente y el promedio anual de  $11.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y el promedio anual de  $11.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , el cual no supera una de las normas  $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$  semanal.

Las estaciones que presentan mayores valores en su orden son ERA\_DAGMA>, CONFANDI\_DELICIAS>, CC\_CALEÑO>, CHAPINERO>, BENJAMIN\_HERRERA>, CALLE44\_k1>, AV3°N\_44>, GUABAL>, BASE\_AEREA>, PRIMAVERA. Analizando la distribución espacial podemos asociar que además de estar relacionadas con el tráfico automotriz se debe considerar zonas donde serializan trabajos de talleres de pinturas, reparaciones de muebles tanto

de automóviles como de maderas. Un punto de monitoreo que sigue generando interés por su comportamiento poco claro, debido a que está alejado de las vías de movilidad automotriz, pero se ha asociado a minas de carbón en su historial y los resultados del monitoreo presentan una desviación estándar de 8.6, considerada alta para este estudio. En general las estaciones para este compuesto manejaron desviaciones estándar que variaron entre 1.3 y 4.6 %

- *Etilbenceno, xilenos, n-octano y nonano.*

Durante el 2015 los compuestos etil-benceno, o-xileno y los hidrocarburos alifáticos n-octano y nonano, presentaron promedios anuales muy similares a los promedios mensuales, con desviaciones estándar por debajo de 1%.

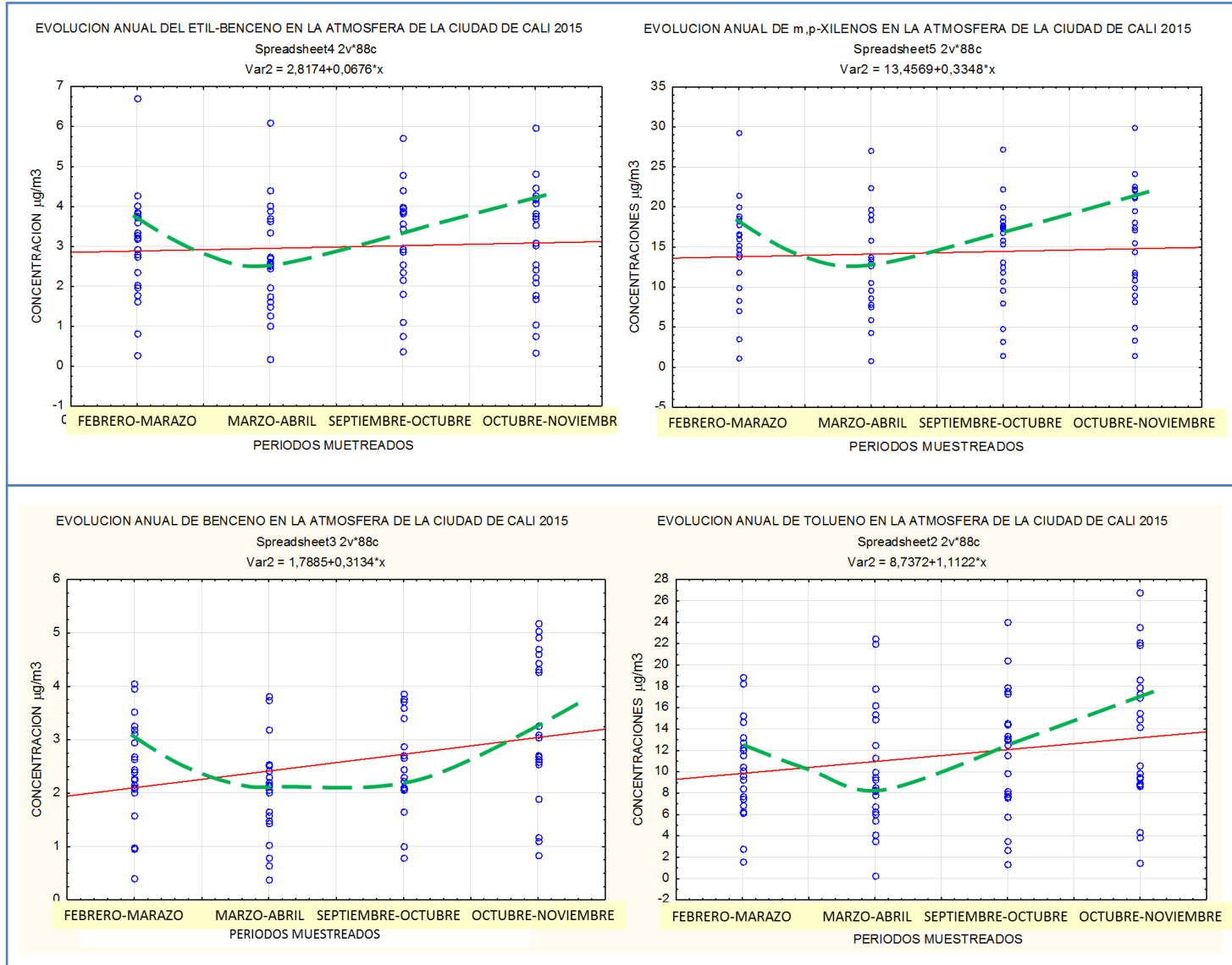
Para los m,p-xilenos, las desviaciones estándar por punto de monitoreo fueron superiores al 1%, alcanzando un máximo de 5%, indicando la alta variabilidad de las concentraciones, siendo esperado para este compuesto por su reactividad atmosférica.

Por otra parte la mediana es siempre cercana a la media, lo cual permite evaluar que los datos aunque posean distribuciones sesgadas se pueden asumir como distribuciones normales atmosféricas a lo largo de varios meses (de tipo logarítmico normal o exponencial).

Esto es de esperar en una atmósfera urbana de fondo. Lo que suele denominarse "huella digital" de COVs, (Gómez M. C., 2005) es decir, la proporción relativa entre las concentraciones de los diferentes compuestos, es bastante característica de una atmósfera urbana con una decisiva influencia del tráfico rodado como principal fuente de emisión.

En la Figura 76, se reporta la primera evolución anual de los compuestos COVs de la atmósfera de la ciudad de Cali. Las gráficas contienen información donde las tendencias se ajustan a una recta simplemente para observar que tan próximas podrían ser a esta función rectilínea y se resalta la tendencia en líneas puntadas que se ajustan más a la variabilidad por temporalidad de lluvia y de sol.





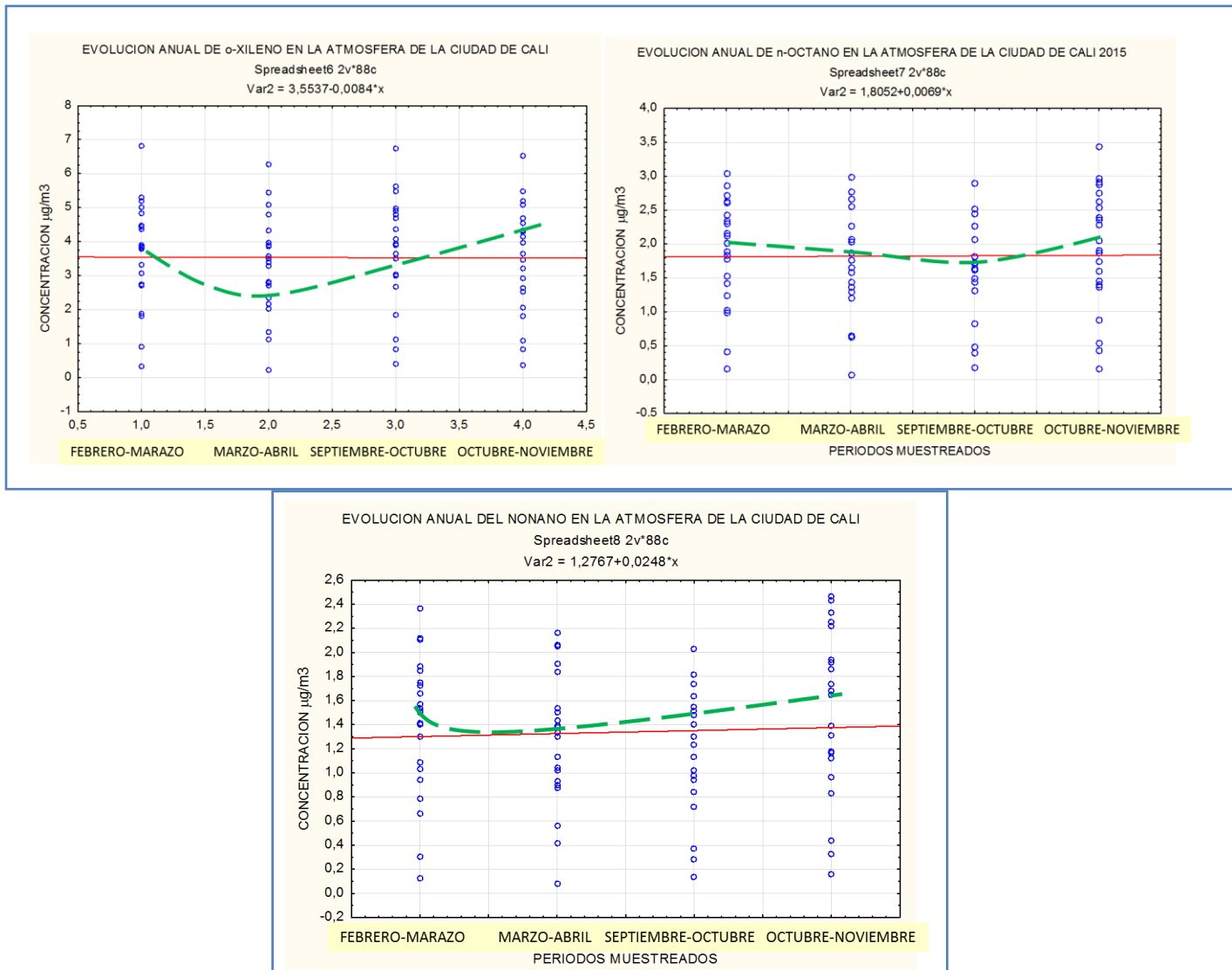


Figura 76. Evolución anual de los COVs en la atmósfera en la ciudad de Cali.

- $SO_2$  y  $NO$ ,  $NO_2$ .

En las Figuras 65 y 66 se presentan los mapas de concentración y los de dispersión del  $SO_2$ . Comparativamente sus concentraciones aumentaron en el segundo semestre en casi todas las estaciones. Cuando se realizaron los mapas de dispersión fue evidente nuevamente que la parte norte de la ciudad es la más afectada. Durante el monitoreo del segundo semestre se puede resaltar que la estación FLORA\_DAGMA, reportó datos del orden de  $10.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , que no superan la norma anual ( $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), ni la generada por la Comunidad Europea para la protección de los ecosistemas de  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , en lo que ellos denominan un año civil (Año civil e invierno del 1 de Octubre al 31 de marzo), pero aclara un poco más la perspectiva del origen de la contaminación ya que se evidencia la influencia de la zona industrial de Yumbo, además de la contribución de la zona nororiental que rodea el casco urbano de Cali. Hay que recordar que el dióxido de azufre es un contaminante que se produce fundamentalmente en grandes instalaciones de combustión que utilizan combustibles fósiles, carbón o fuel-oil.

- $NO_2$  y  $NO$  ( $NO_x$ ).

El  $NO_x$  ( $NO_2+NO$ ), es un contaminante peligroso emitido por la combustión a alta temperatura y por lo tanto, su principal fuente es el transporte automotriz, que a su vez es una consecuencia de un aumento de la población y mejores condiciones económicas. Por lo tanto, la conexión “desarrollo urbano-transporte-contaminación atmosférica” es evidente, de tal manera que para realizar su observación se debe hacer de manera integral con estos factores (Laureti T., 2014).

En la Figura 68 se observa un aumento en los datos tomados de septiembre-octubre a octubre-noviembre para el  $NO$ , comportamiento que también se evidencia para el  $NO_2$ , Figura 69. Pero se puede ver como los valores de  $NO_2$  son ligeramente mayores a los de  $NO$ , debido a la facilidad de conversión de  $NO$  a  $NO_2$  por fotoquímica.

La distribución espacial de los datos de  $NO$  y  $NO_2$ , Figuras 69 y 71, sugieren que las emisiones dependen directamente de la población de Cali, y se adjudica a la compra de automóviles particulares y el uso de las motos. Se reporta que aproximadamente 350.000 personas se movilizan en moto de una población aproximada de 2 millones de habitantes. Para finales de 2015 (ANDEMOS, 2015) se reporta que de los automotores que ruedan en la ciudad hay un 81% de particulares, 18% público y 1% oficial. Cali ocupa el segundo lugar en las ciudades del país en la adquisición de vehículos después de Bogotá (ANDEMOS, 2016).

La presencia de los  $NO_x$ , es importante puesto que son los precursores del ozono troposférico. El ozono se forma en la atmósfera mediante reacciones fotoquímicas en presencia de la luz solar y los contaminantes precursores como lo son los  $NO_x$ . Se destruye en reacciones con el  $NO_2$  y se deposita en el suelo. En varios estudios se ha demostrado que hay una correlación entre las concentraciones de ozono y la de otros oxidantes fotoquímicos tóxicos procedentes de fuentes semejantes, como los nitratos de peroxiacilo, el ácido nítrico y el peróxido de hidrogeno. De tal manera que las mediciones para controlar los niveles de ozono troposférico se concentran en las emisiones de los gases precursores.

## 6.7 Evaluación estadística de los datos de las cuatro campañas de 2015.

- **Benceno.**

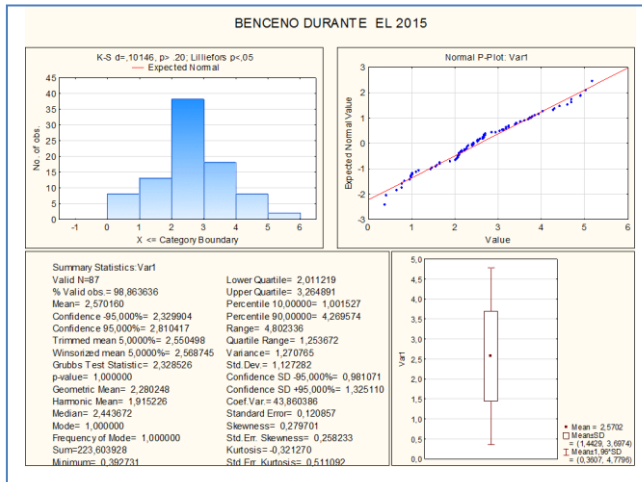


Figura 77. Gráfica del comportamiento estadístico del benceno durante el 2015

Los datos obtenidos durante los muestreos del 2015 fueron analizados estadísticamente para poder visualizar el comportamiento de los contaminantes evaluados a lo largo del año. En la Figura 77 se describe el comportamiento estadístico del benceno durante las cuatro campañas del 2015. Estos datos permiten decir que su distribución no corresponde a una distribución normal, con una asimetría de 0.27, los datos tenidos en cuenta corresponden a las 22 estaciones seleccionadas para el segundo con los datos de los periodos del primer y segundo semestre, para un total de 88 datos se puede observar cuando se normalizaron a una recta, que la dispersión ocurre en los valores más altos y en los valores más bajos, pero que los valores medios tienden a ajustarse a una normal. Los diagramas de bigotes muestran una mediana de 2.44 la cual no está muy alejado de la media 2.57, con un nivel de confianza del 95%, ni con la predicción de intervalo también con el 95% de confianza, de tal manera que las observaciones realizadas tratando de ajustar los datos a un comportamiento normal es correcto a pesar de su asimetría.

- **Tolueno**

Estadísticamente los valores del benceno presentaron una asimetría de 0.37, una mediana de 10.4 y una media de 11.54, y al igual que para el benceno cuando se normalizaron a una recta se puede indicar que la dispersión ocurre en los valores más altos y en los valores más bajos

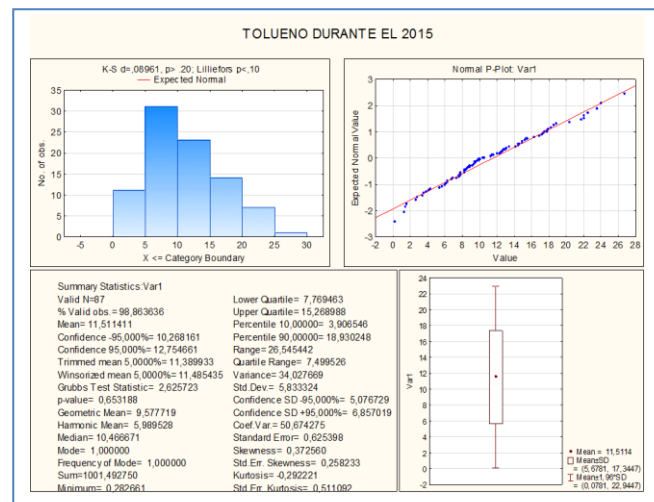


Figura 78. Gráfica del comportamiento estadístico del tolueno durante el 2015

- *m,p-Xilenos, o-xileno, etilbenceno.*

En la Figura 79 se presentan los datos correspondientes a los aromáticos xilenos y etilbenceno. La presencia de los xilenos, y el etilbenceno en las atmósferas urbanas se debe a la combustión incompleta de las gasolinas y en los vehículos dotados de catalizador aparece como consecuencia de daño o destrucción de este, como resultado de su agotamiento o envenenamiento por otros agentes contaminantes. Los xilenos, en particular el m-xileno, es un elemento activo fotoquímicamente en la formación de ozono.

Los xilenos han sido clasificados por la Agencia Ambiental Americana como compuestos NO causantes de carcinogénesis en las personas, aunque si es un compuesto tóxico capaz de dar lugar a otro tipo de afecciones sobre la salud de las personas. La inhalación de la mezcla de xilenos se asocia a la irritación del tracto respiratorio y gastrointestinal y a efectos neurológicos.

En animales estudios toxicológicos los asocian teratogénesis con mal desarrollo fetal, con daños sobre el desarrollo esquelético.

Los xilenos presentan distribución moderadamente asimétrica y negativa con valores de -0.057, y -0.27 y el etil-benceno pequeña pero positiva de 0.074. Todos mostraron valores muy cercanos entre la media y la mediana, presentando dispersión en los valores altos y muy bajos.

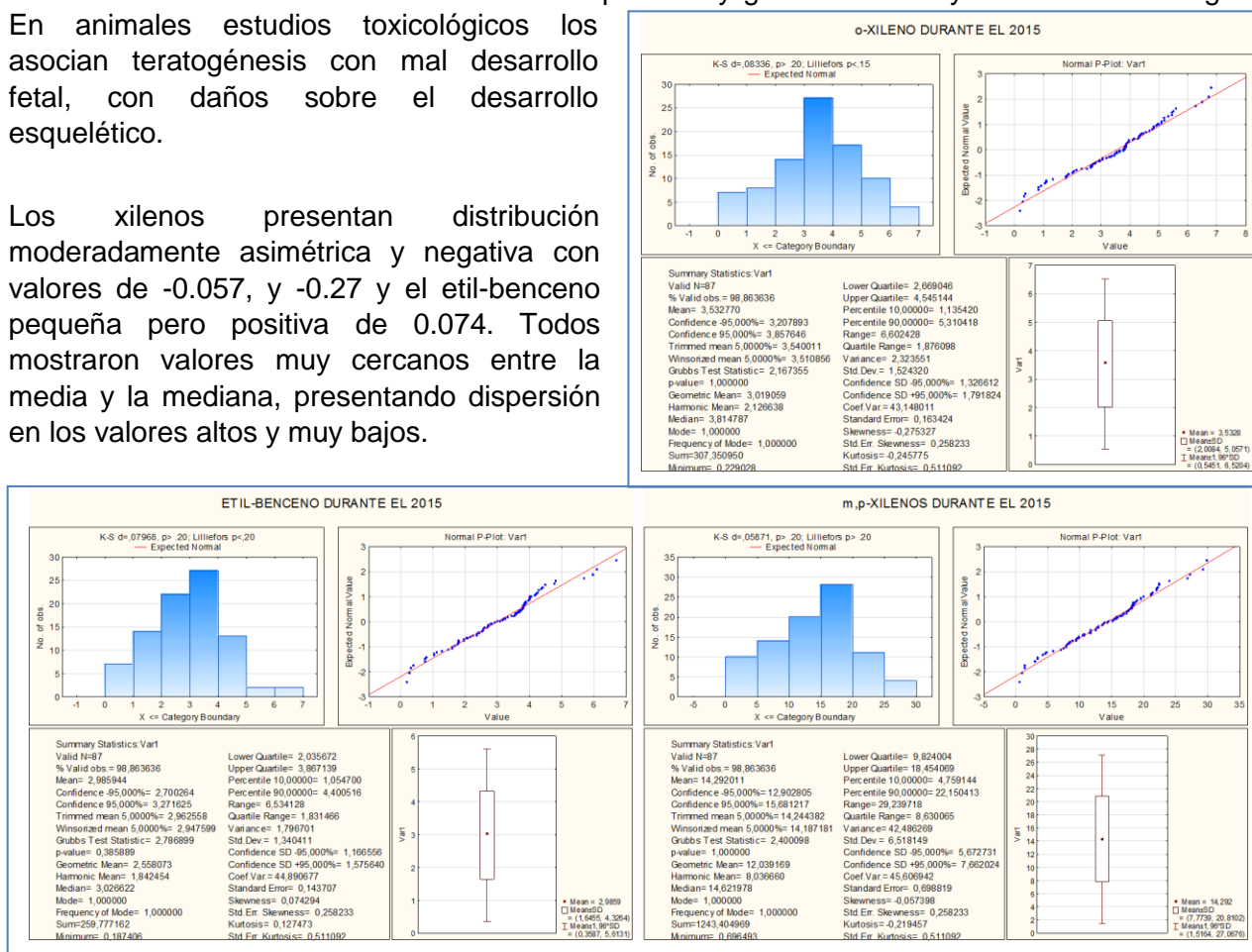


Figura 79. Gráfica del comportamiento estadístico del m,p-xileno, o-xileno y etil-benceno durante el 2015.



- *n*-Octano y nonano.

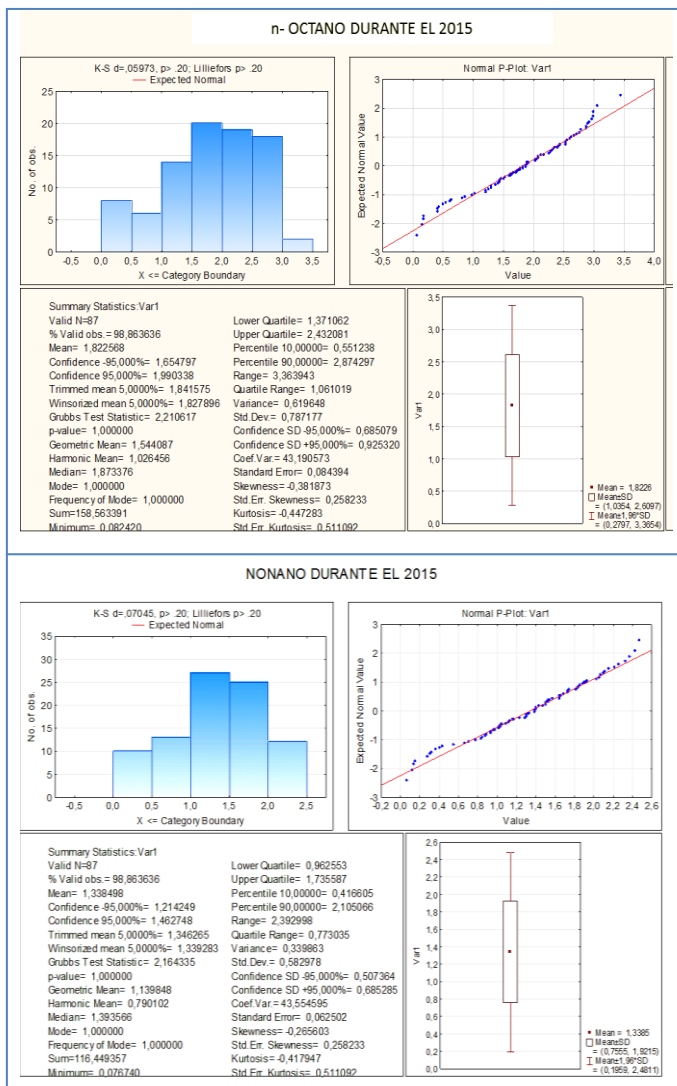


Figura 80. Gráfica del comportamiento estadístico del *n*-octano y nonano durante el 2015.

- SO<sub>2</sub>.

En el caso del SO<sub>2</sub>, como se ha comentado más arriba, no se observa un comportamiento claro con respecto a los periodos de lluvia y baja lluvia pero si respecto a la distribución geográfica donde fue considerable su presencia al norte de la ciudad sin seguir una periodicidad, lo cual se refleja cuando se pretende buscar una correlación estadística, aunque sus valores de mediana y media son muy cercanas (Figura 81), se observaron que sus valores máximos oscilaron entre 8.5 y 12.1 y los mínimos entre 1.9 y 3.2.

Estos datos presentan la menor asimétrica, (ver Figura 80) siendo los que más dejan percibir una distribución normal, además coinciden con los puntos más nombrados en la presencia de contaminantes por hidrocarburos aromáticos, reconfirmando los puntos calientes. Para estos compuestos no existen límites máximos permisibles en el aire.

La forma de exponerse a estos compuestos es respirando el aire que lo contenga o por ingestión accidental. Los hidrocarburos alifáticos son compuestos frecuentemente utilizados en las industrias de obtención y recuperación de aceites, fabricación de pinturas, tintas, colas, adhesivos, así como, materia prima de síntesis orgánica y como disolventes de aceites, grasas, caucho, resinas, etc., su interés facilita disponer de información que se pueda asociar su presencia con la de los otros hidrocarburos solventes en las mismas matrices o por estar asociados a los hidrocarburos de los combustibles principalmente generados en el proceso de combustión de las gasolinas.

En las tres campañas realizadas se observó que las zonas con mayor cantidad corresponden a CALL44\_K1, LA LUNA, AV3°N\_44, C\_C\_CALEÑO, LA LUNA, CHAPINERO.

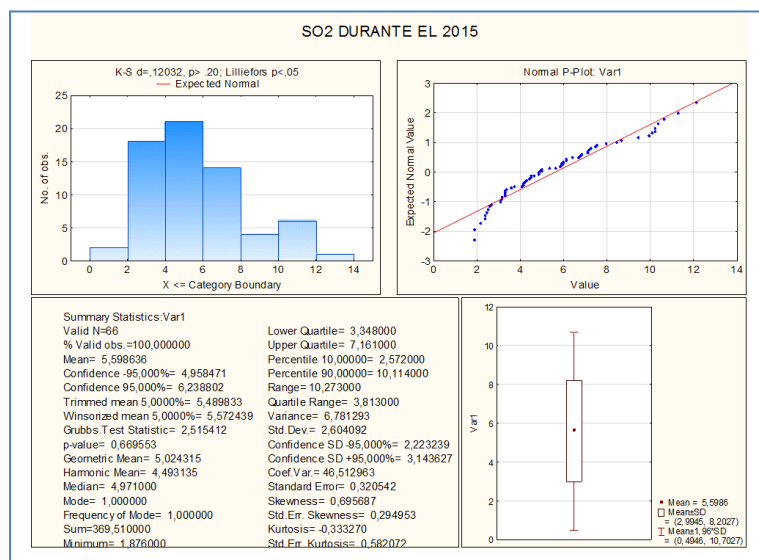


Figura 81. Gráfica del comportamiento estadístico del SO<sub>2</sub> durante el 2015.

- *Correlación estadística entre algunos contaminantes atmosféricos estudiados.*

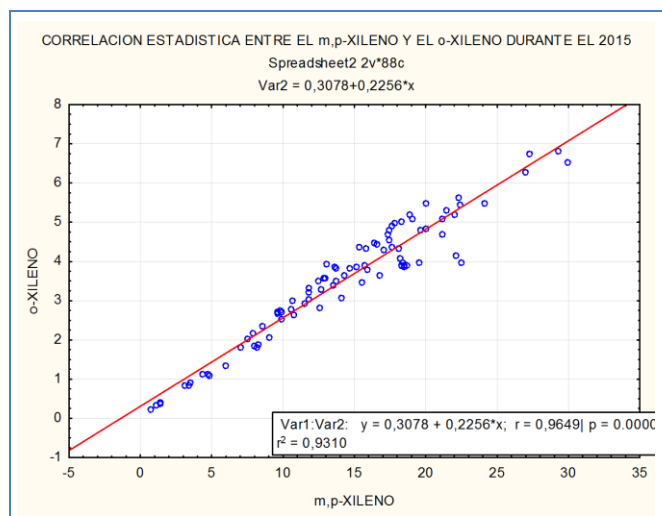


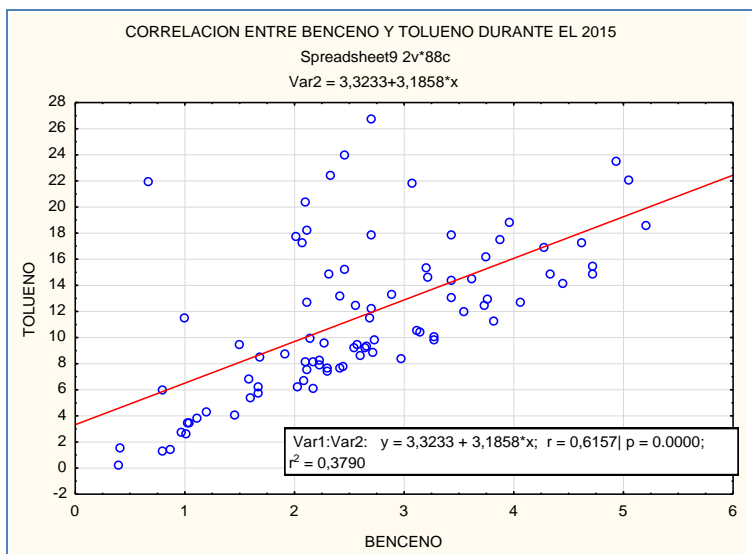
Figura 82. Correlación lineal entre los m,p-xilenos y el o-xileno durante el 2015.

Sabemos que la concentración de los contaminantes en la atmósfera se afecta por variables meteorológicas como la temperatura, la humedad relativa y la radiación solar, que controlan a su vez las reacciones fotoquímicas atmosféricas. La dispersión de los contaminantes se ve afectada por la dirección y velocidad de los vientos y los equilibrios de estabilidad atmosférica. Debido a la naturaleza aleatoria de los niveles atmosféricos de los contaminantes, se ha intentado explicar su comportamiento temporal recurriendo a los modelos de regresión (Ramos–Herrera S., 2010, Ghassoun Y., 2015, Anttila P., 2016) y explicar su relación entre varios contaminantes.

En este trabajo se ha aplicado el uso de las regresiones lineales entre los xilenos para verificar que se hay correlación entre las concentraciones de los dos compuestos en el mismo periodo, lo cual es el comportamiento esperado cuando se monitorea cumpliendo los protocolos de disposición de muestreadores y análisis de los compuestos. Esta hipótesis se ha utilizado partiendo de que la fuente para la mezcla de xilenos es la misma, luego sus concentraciones deben correlacionarse bajo un modelo lineal ( $r^2 = 0,93$ ) aunque las variables atmosféricas pueden influir sobre cada uno de los compuestos. Si se está evaluando correctamente los analitos de

estudio y la metodología aplicada es correcta, la correlación será alta. En la Figura 82, se registra la correlación entre los m,p-xilenos y el o-xileno.

La gráfica corrobora la hipótesis trazada, verificando una alta correlación (0.96) con todos los datos de estos compuestos durante el 2015.



De igual manera se revisó la correlación existente entre el benceno y el tolueno con la hipótesis de que las fuentes no necesariamente son las mismas y que el tolueno se ve inmerso en una serie de reacciones fotoquímicas variando fuertemente su concentración. En la Figura 83 se observa como la correlación es del orden de 0.3.

Figura 83. Correlación lineal entre el benceno y el tolueno durante el 2015.

## 6.8 Análisis comparativo de los muestreos realizados en el primer semestre de 2014 y 2015.

- *Distribución espacial.*

Los datos obtenidos durante las campañas de febrero-marzo, marzo-abril y junio-julio del 2014 y febrero-marzo, marzo-abril del 2015 se han recopilado para observar los comportamientos de dos años diferentes en el primer semestre de cada uno de ellos.

En el 2014 se logró realizar un muestreo en el periodo de sequía (julio), de altas temperaturas, pocas lluvias, mucha radiación solar, el cual fue interesante su comportamiento y concluyente según la influencia del clima de la época. Para este periodo fue evidente la tendencia a la disminución de las concentraciones en casi todos los compuestos COVs como se puede observar en las gráficas de la Figura 84. La misma observación no se realizó durante el 2015

En la Figura 84 se registra el comportamiento en las 44 estaciones de los compuestos orgánicos aromáticos y alifáticos, se puede visualizar fácilmente que durante el periodo de junio-julio, todos los valores descendieron demostrándose que durante la época de mayor radiación solar se facilitan las reacciones de fotodegradación, principalmente en los compuestos aromáticos.

El análisis de los hidrocarburos aromáticos es de gran interés debido a que mundialmente se estiman sus emisiones entre 18.7 a 25 Tg/año<sup>-1</sup>, su origen es de tipo antropogénico y su gran capacidad para originar material particulado durante su degradación atmosférica (Kroll 2008).

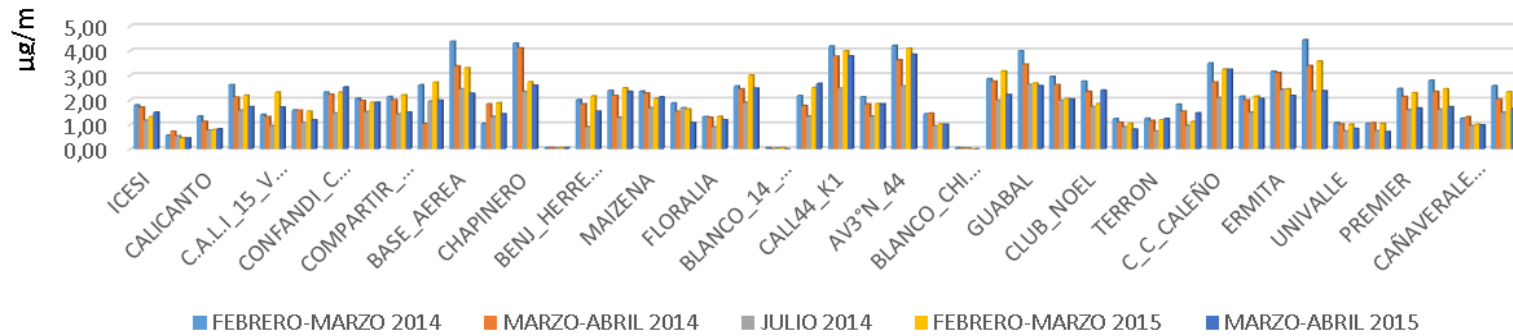
Las reacciones de degradación atmosférica de los COVs son: la fotólisis, la foto-oxidación que ocurre por la reacción del contaminante con el radical hidroxilo OH en presencia o ausencia de óxidos de nitrógeno, la ozonólisis o reacción con el ozono, las reacciones con el radical nitrato (NO<sub>3</sub>), y reacciones con átomos de cloro. Todas estas reacciones son competitivas y dependientes de la estructura de los COVs y de las condiciones ambientales. Actualmente se ha demostrado que el benceno en su degradación forma material condensable que participa en la formación de material particulado, aspecto que se ha venido estudiando para el tolueno y el etilbenceno, (Martin-Reviejo, 2005).

En general se confirman los puntos críticos de mayor concentración de compuestos monitoreados como son CALLE44\_K1, AV3°N, LA LUNA, BASE\_AEREA, C\_C\_CALEÑO, LA\_LUNA, CHAPINERO.

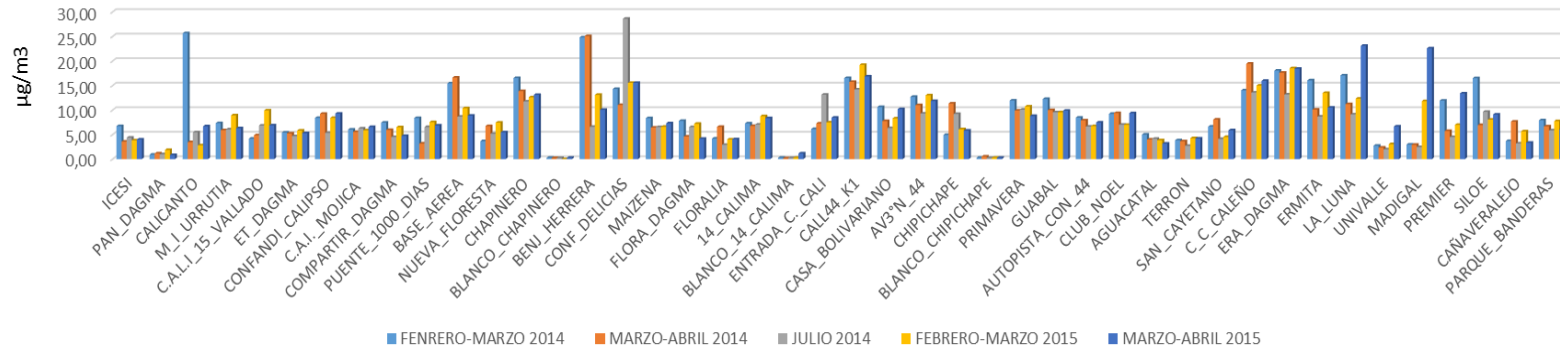
Como era de esperarse el tolueno presenta una gran variabilidad y adiciona dos puntos de monitoreo para tener en cuenta como son BENJAMIN\_HERRERA Y CONFANDI\_DELICIAS, las cuales son estaciones para tener en cuenta dentro de los seguimientos de monitoreo para verificar las posibles fuentes de contaminación.

Las Figuras del 85 a la 91 presentan las distribuciones espaciales de las cinco jornadas de monitoreo. La Figura 85 representa los datos obtenidos para el benceno en las cinco jornadas, se puede observar que los puntos críticos son los mismos durante los cinco muestreos, y que los muestreos de marzo-abril presentan valores menores con respecto a los de febrero-marzo en los dos años.

### PRESENCIA DE BENCENO EN LOS PERIODOS MUESTREADOS DURANTE EL PRIMER SEMESTRE DE 2014 Y 2015

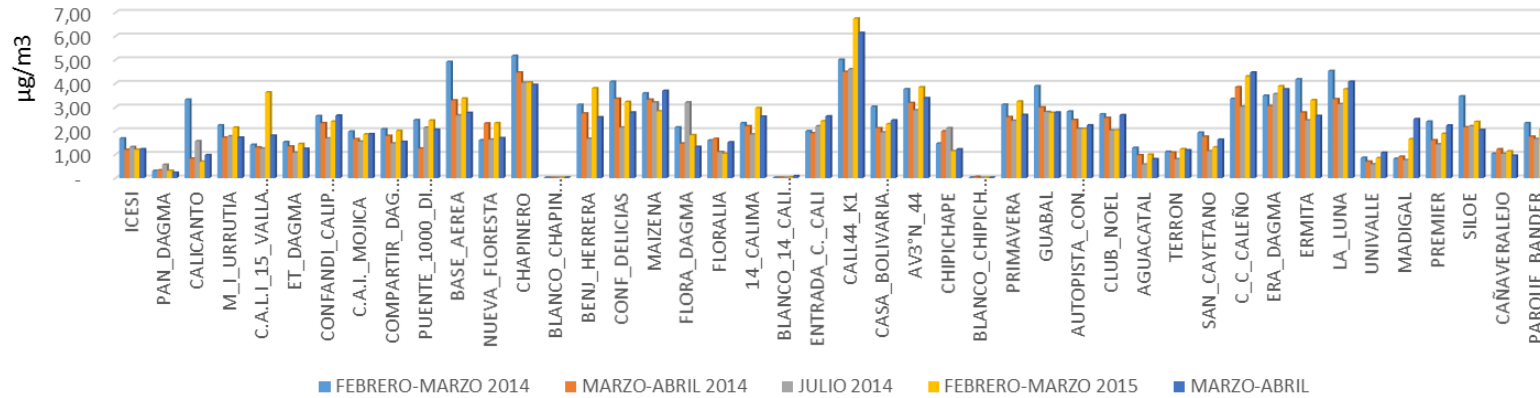


### PRESENCIA DE TOLUENO EN LOS PERIODOS MUESTREADOS DURANTE EL PRIMER SEMESTRE DE 2014 Y 2015

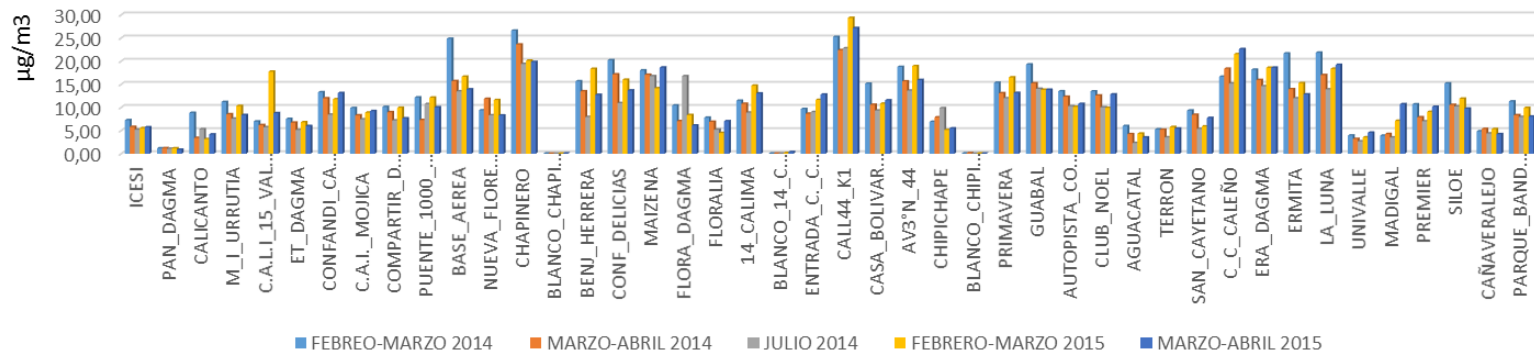




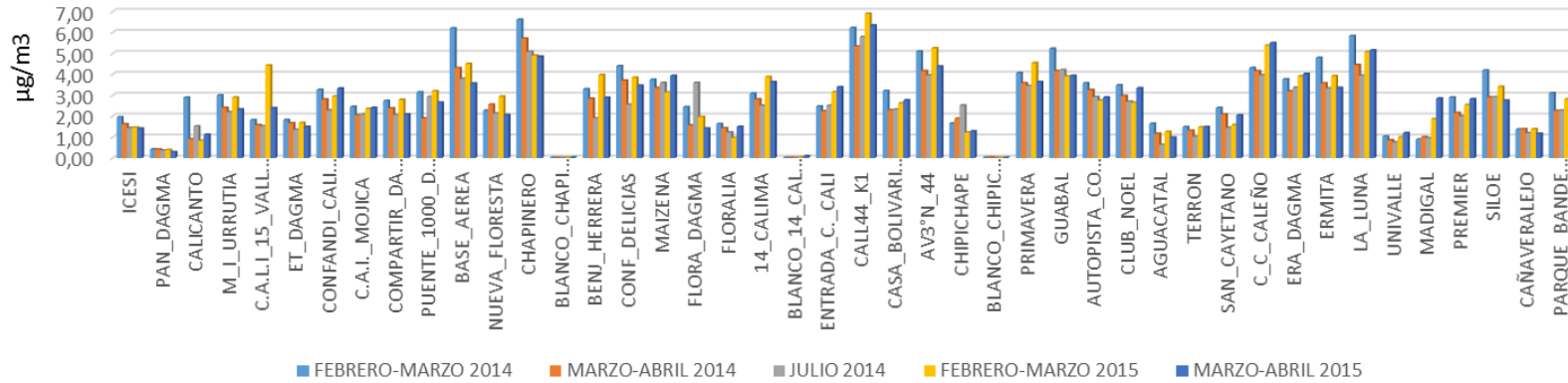
PRESENCIA DE ETIL-BENCENO EN LOS PERIODOS MUESTREADOS DURANTE EL PRIMER SEMESTRE DE 2014 Y 2015



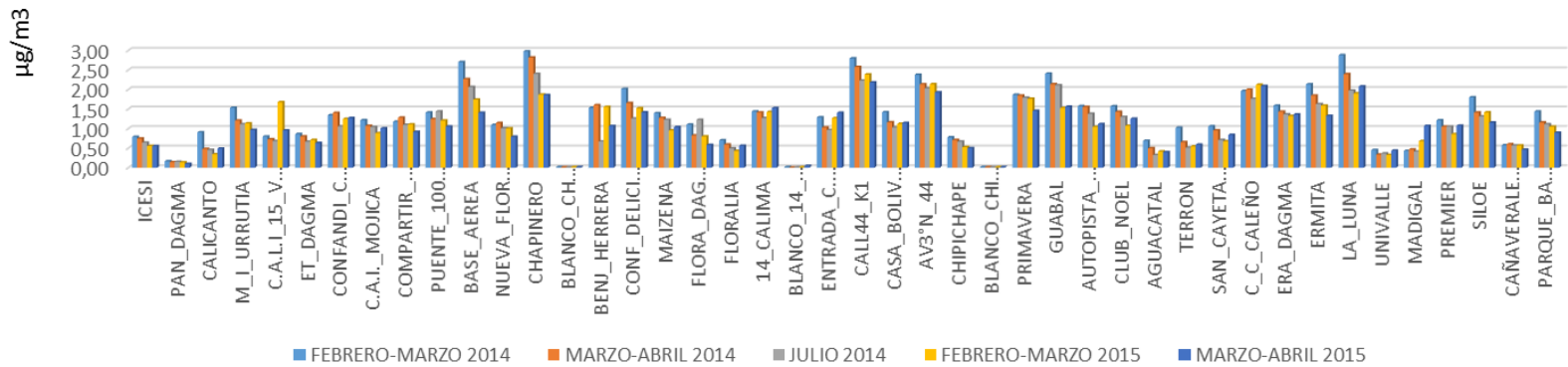
PRESENCIA DE m,p-XILENOS EN LOS PERIODOS MUESTREADOS DURANTE EL PRIMER SEMESTRE DE 2014 Y 2015



### PRESENCIA DE o-XILENO EN LOS PERIODOS MUESTREADOS



### PRESENCIA DE n-NONANO EN LOS PERIODOS MUESTREADOS DURANTE EL PRIMER SEMESTRE DE 2014 Y 2015



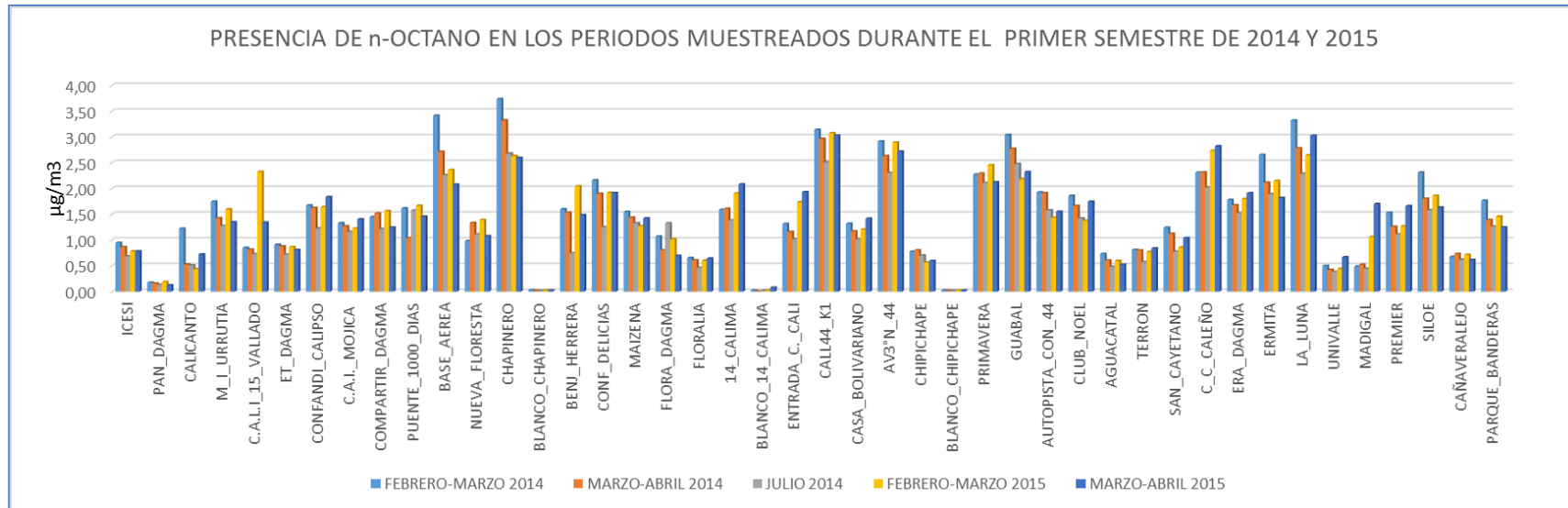


Figura 84. Variabilidad de los COVs monitoreados durante el primer semestre del 2014 y 2015.

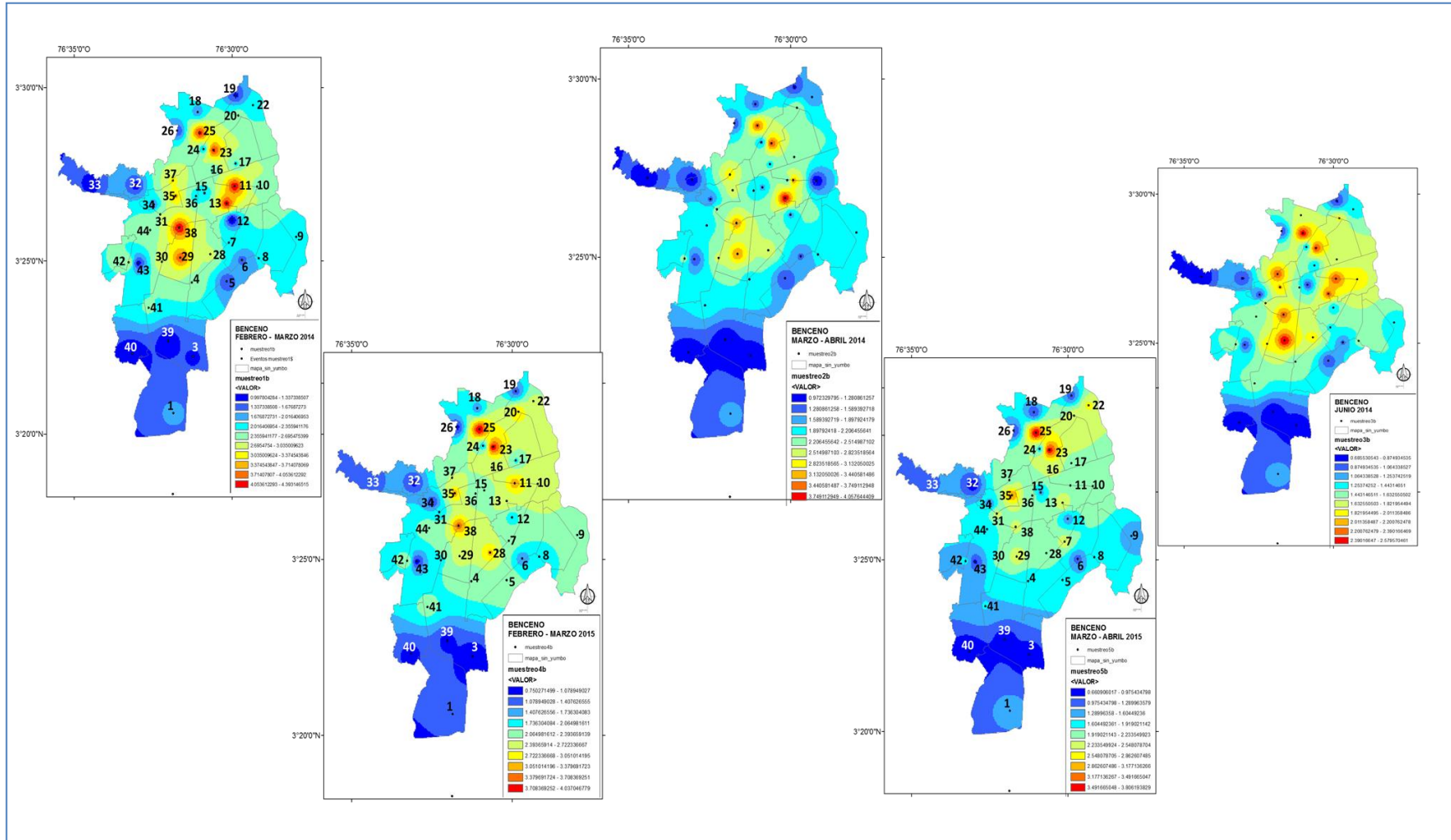


Figura 85. Variabilidad espacial de las cinco campañas realizadas entre 2014 y 2015 para el benceno.

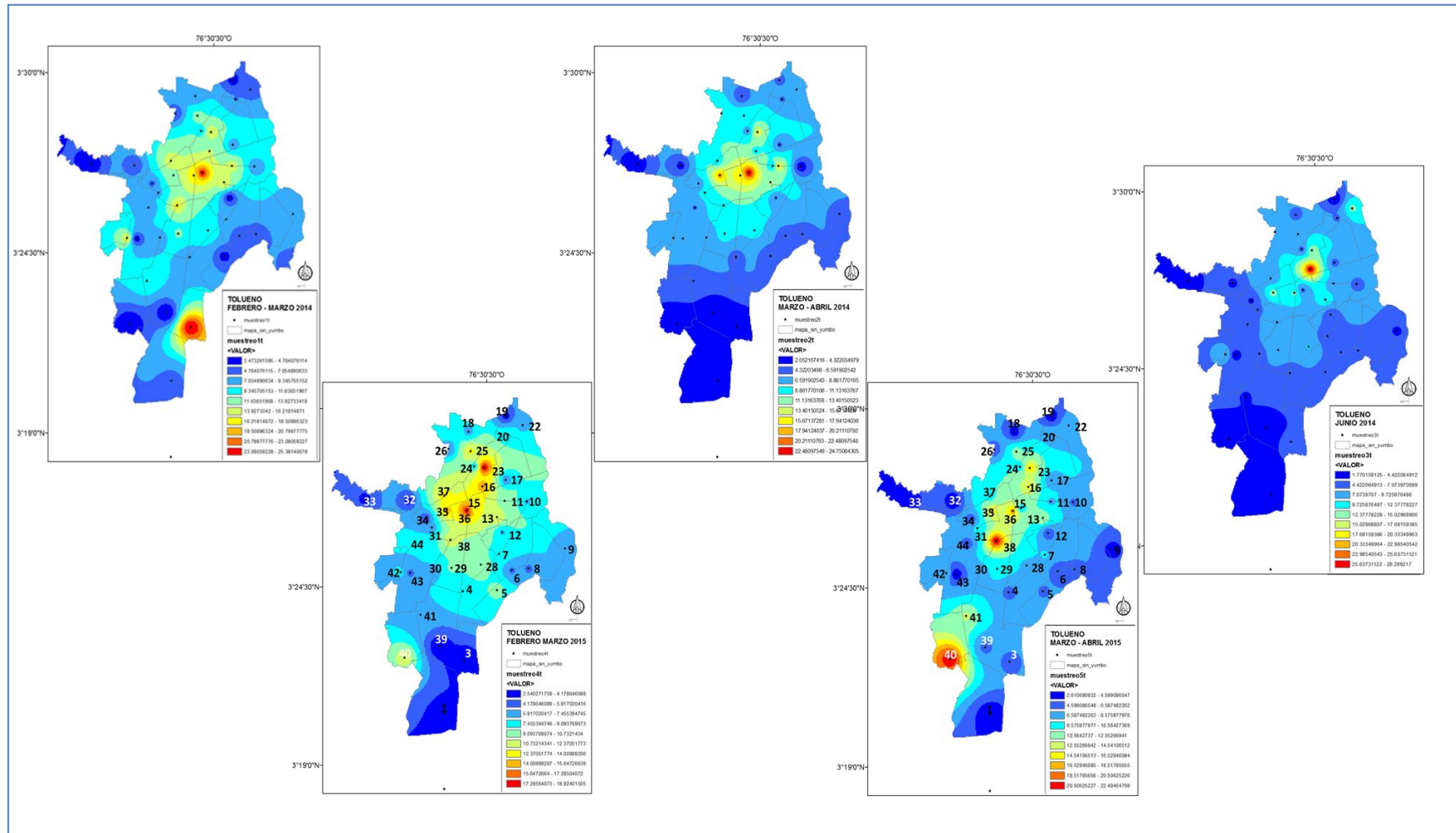


Figura 86. Variabilidad espacial de las cinco campañas realizadas entre 2014 y 2015 para el tolueno.



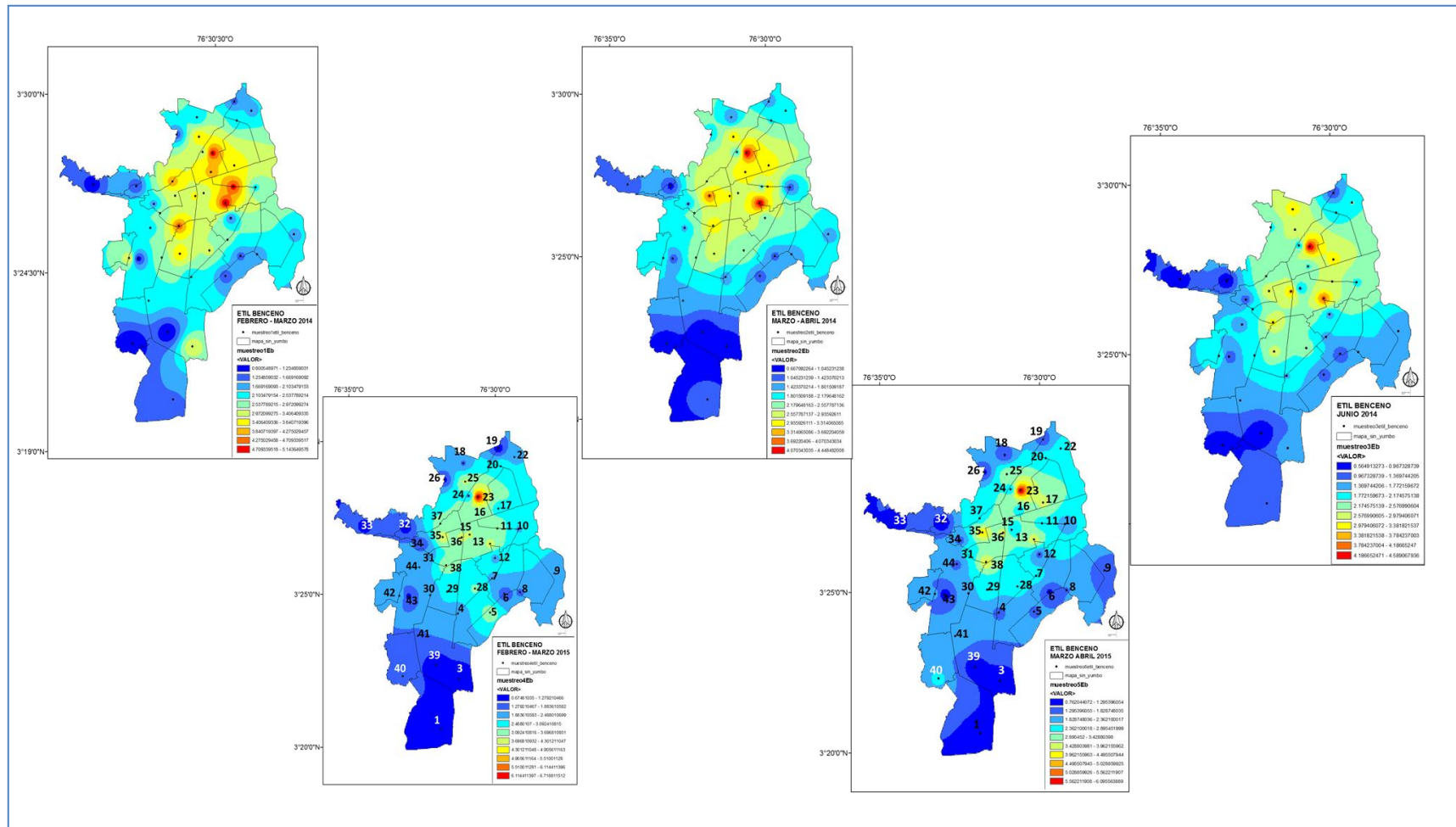


Figura 87. Variabilidad espacial de las cinco campañas realizadas entre 2014 y 2015 para el etilbenceno.

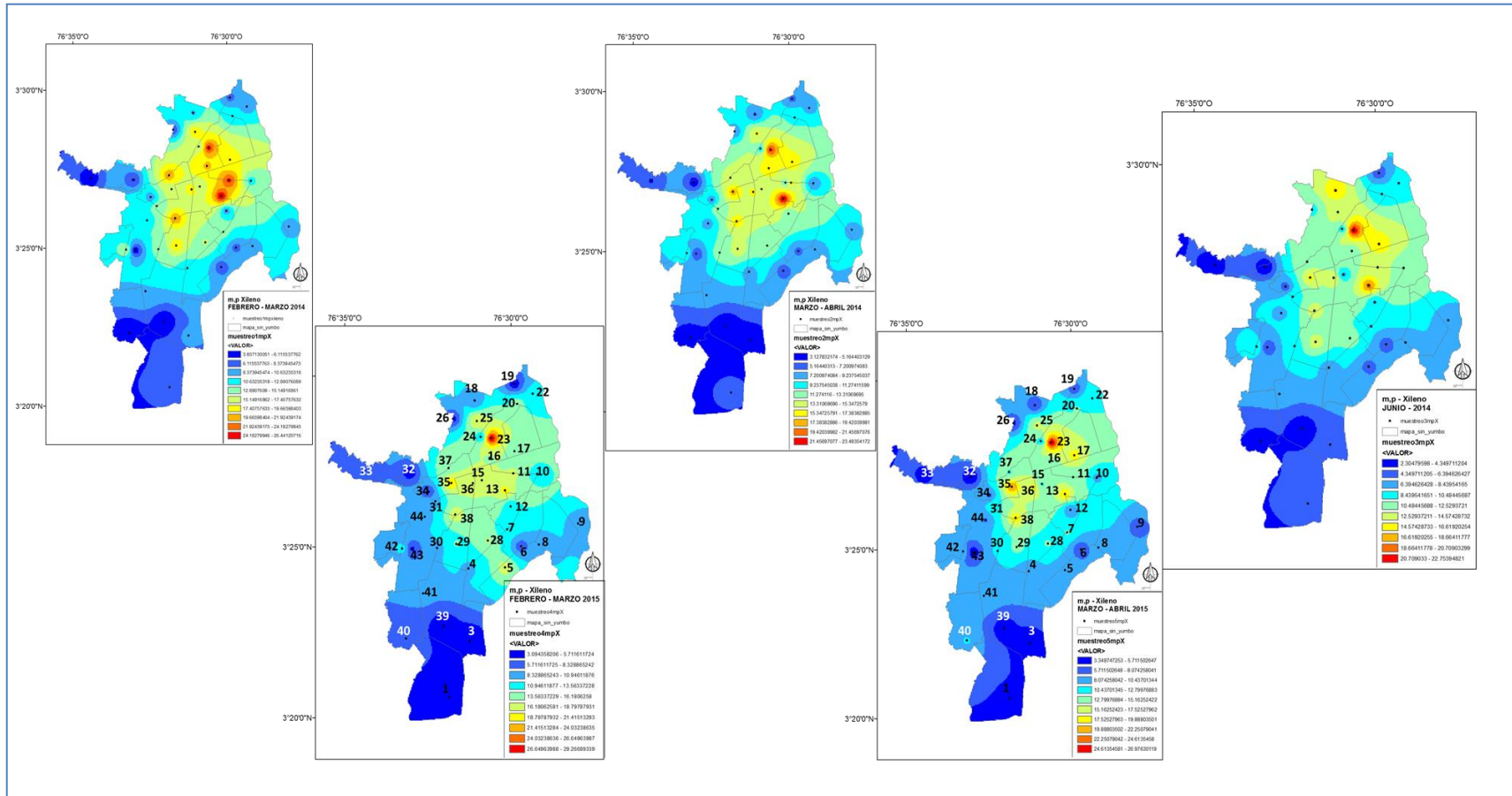


Figura 88. Variabilidad espacial de las cinco campañas realizadas entre 2014 y 2015 para los m,p-xilenos.

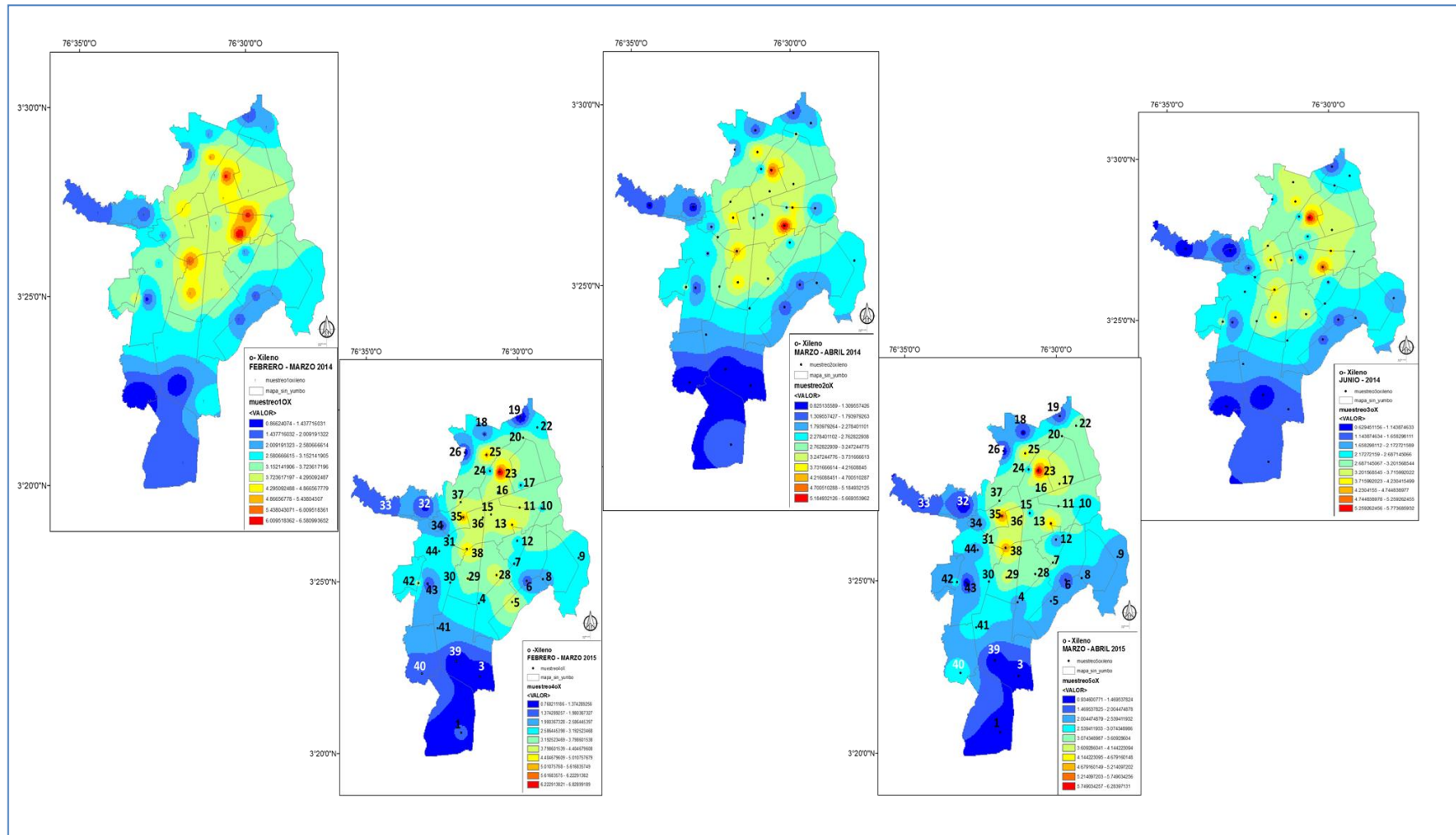


Figura 89. Variabilidad espacial de las cinco campañas realizadas entre 2014 y 2015 para los o-xileno.

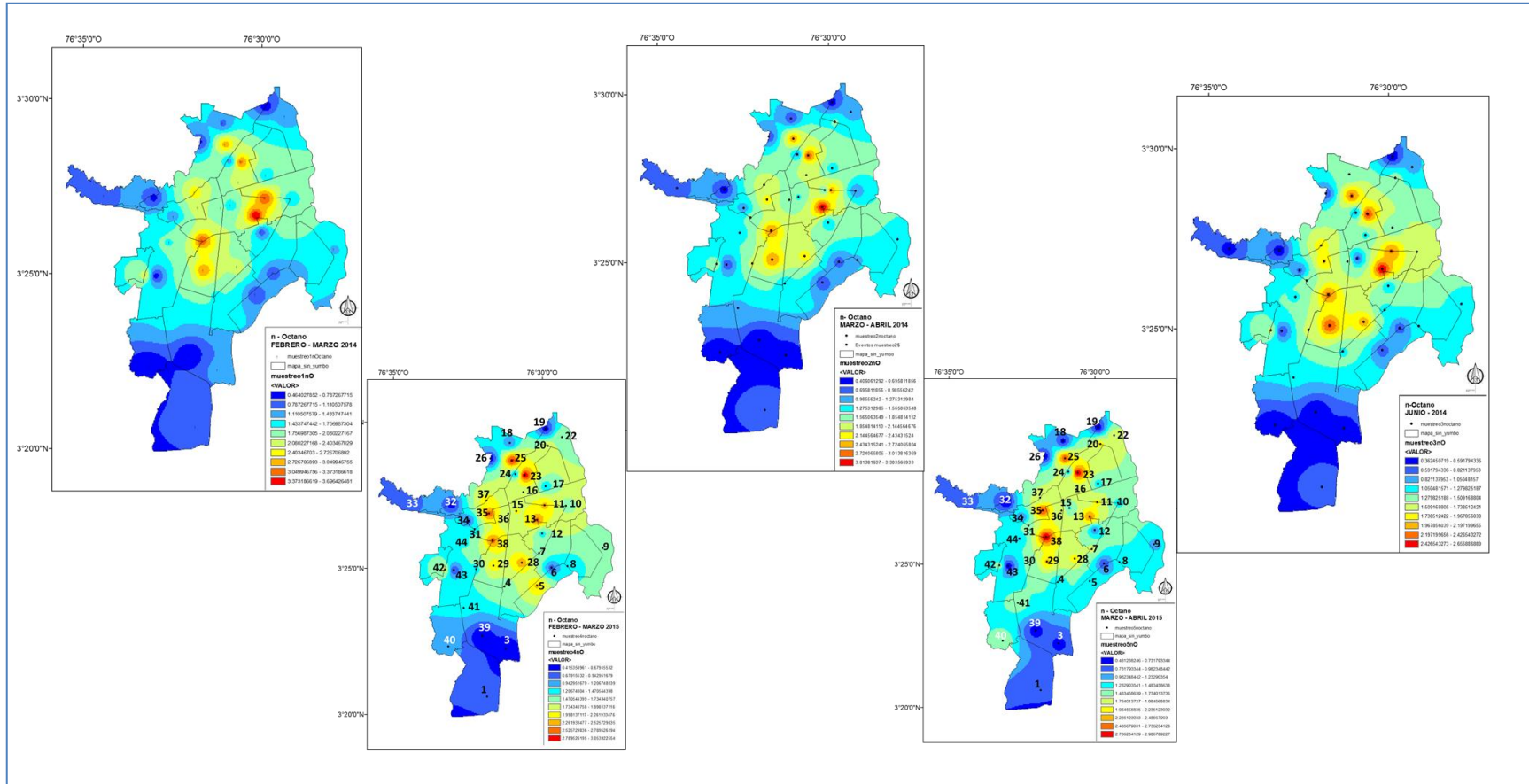


Figura 90. Variabilidad espacial de las cinco campañas realizadas entre 2014 y 2015 para n-octano.



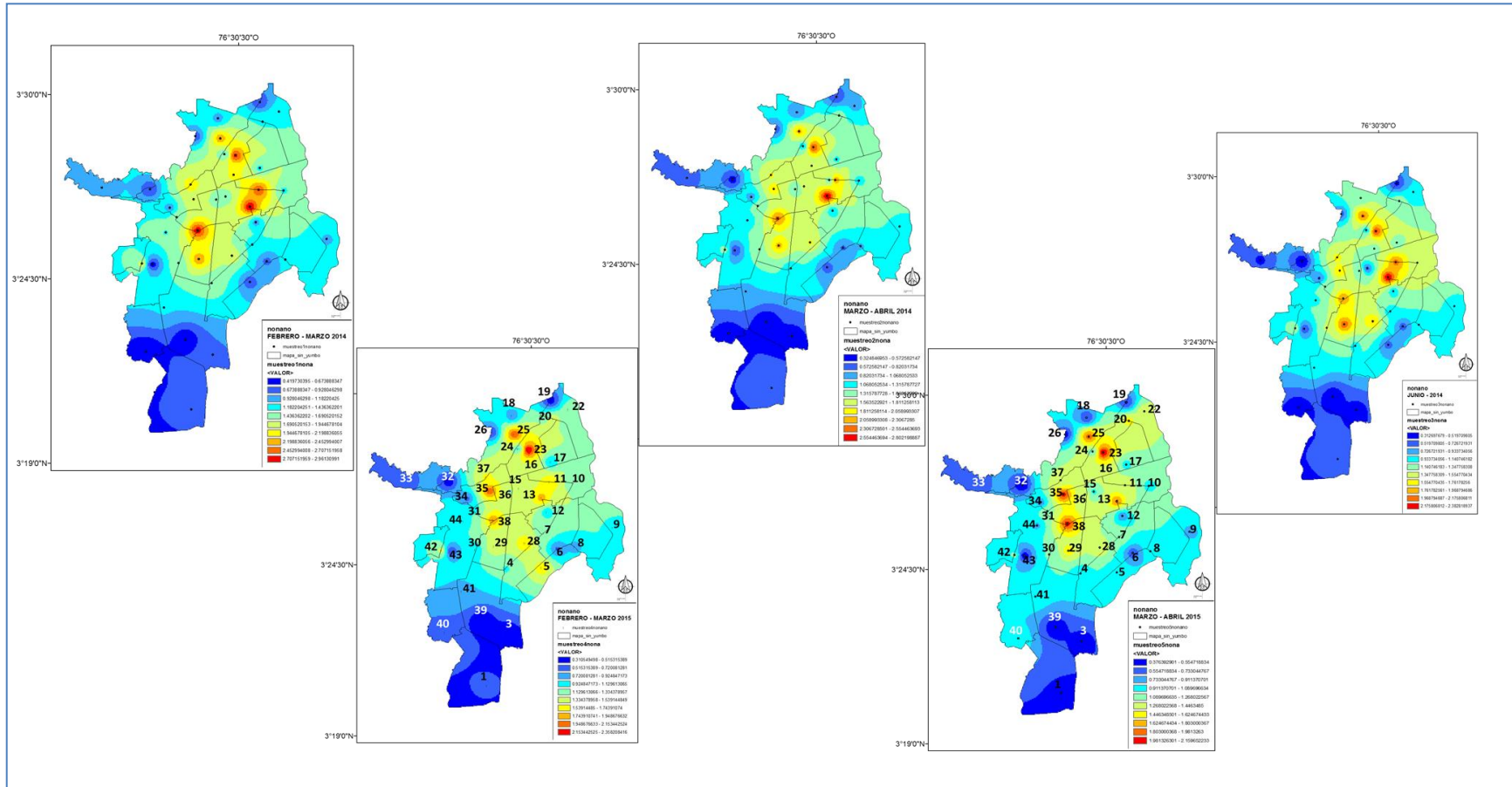


Figura 91. Variabilidad espacial de las cinco campañas realizadas entre 2014 y 2015 para nonano.



La Figura 86 tiene ubicada la espacialidad para el tolueno donde se resaltan puntos como el BENJAMIN\_HERRERA, ERA\_DAGMA, C\_C\_CALEÑO, CHAPINERO, CALL44\_K1, CONF\_DELICIAS y dos puntos atípicos pero interesantes para tener en cuenta como son MADIGAL y CALICANTO, debido a que son dos puntos residenciales donde no es claro el origen de una contaminación tan alta.

De las Figuras 87 a la 91 se observa como los puntos críticos nombrados hasta ahora siguen siendo los mismos para el etilbenceno, los xilenos y los hidrocarburos alifáticos n-octano y nonano.

- *Relaciones estadísticas.*

Utilizando diagrama de cajas y bigotes se presenta el comportamiento de cada COVs durante el primer semestre de los años 2014 y 2015. En las Figuras 92 y 93, se describe con detalle el tratamiento estadístico con el cual se analizó el benceno y este mismo tratamiento se aplicó para los demás compuestos, como se observa en las gráficas de la Figura 94 y en la Tabla 10.

En general se puede concluir que los valores de sus medianas y medias, fueron muy cercanas entre sí. Los datos se trataron a partir de las varianzas las cuales después de aplicarles tanto la prueba F para varianza de dos muestras y la prueba t para dos muestras, se pudo concluir que las dispersiones para cada compuesto en el mismo periodo de diferente año tienden a ser muy similares o sea que varían de una forma muy semejante a pesar de presentar en algunos casos valores atípicos. También se puede indicar que el coeficiente de variación es de igual magnitud o se encuentra en un rango parecido.

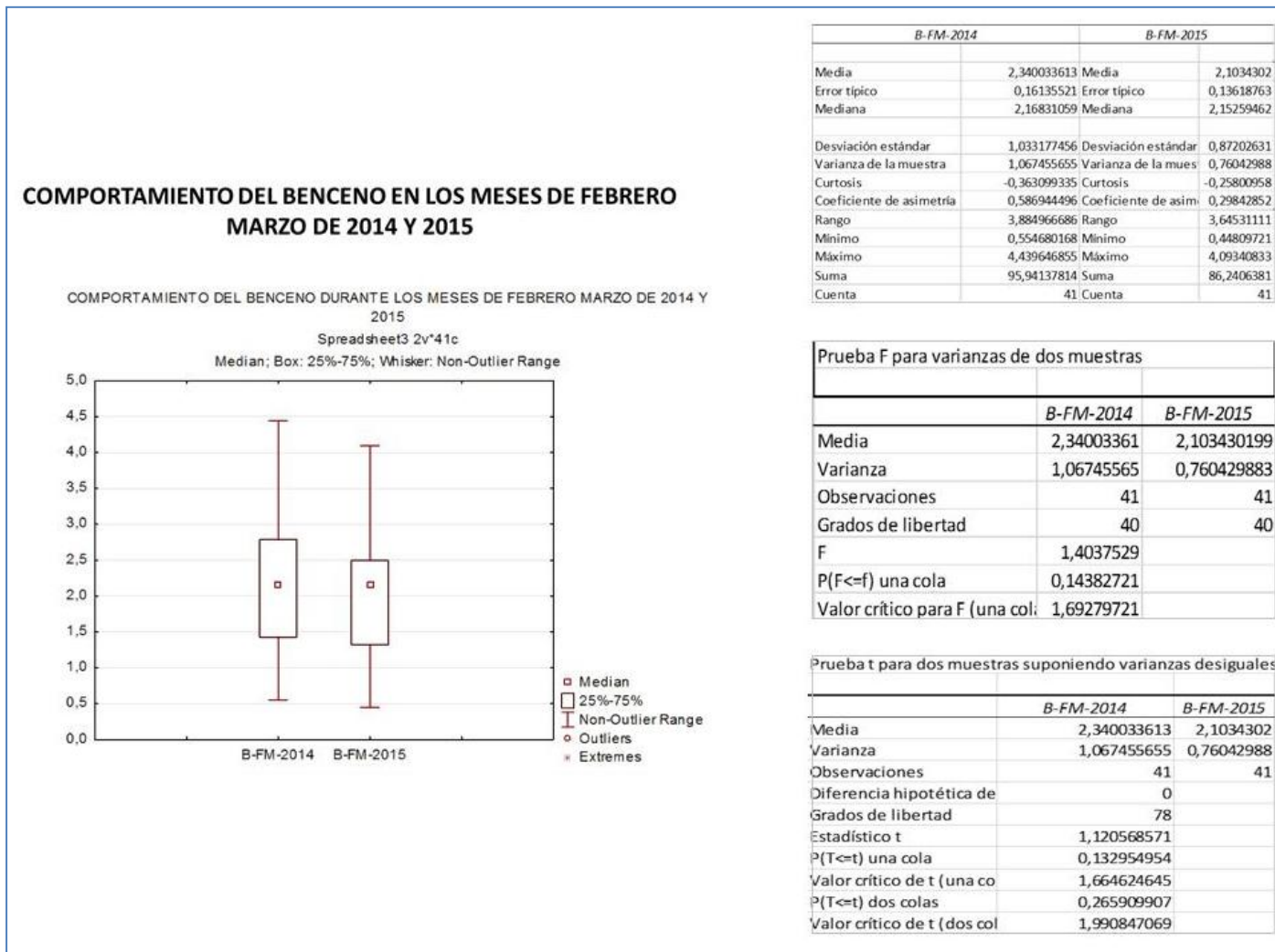


Figura 92. Comportamiento estadístico del benceno durante febrero-marzo de 2014 y 2015.

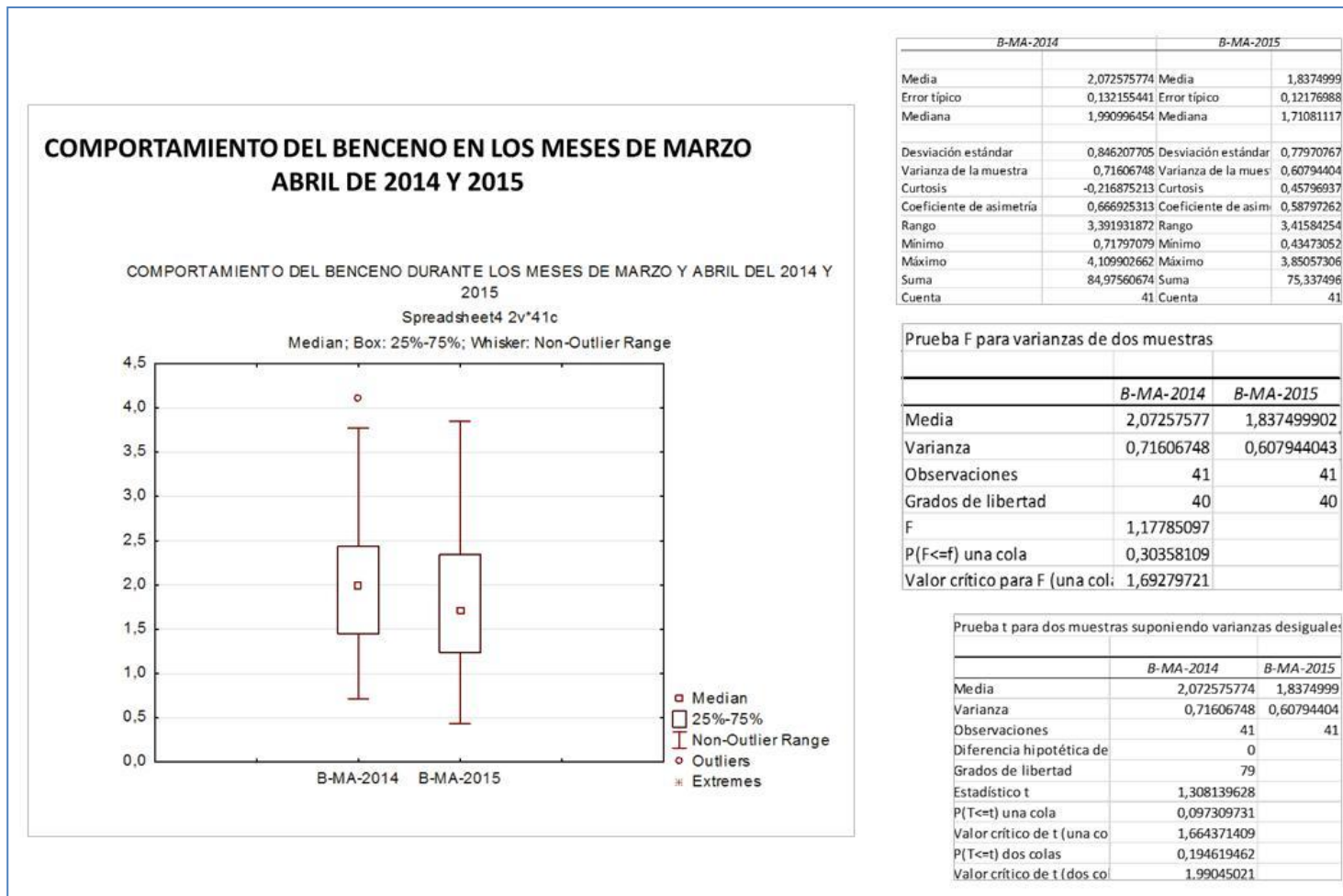
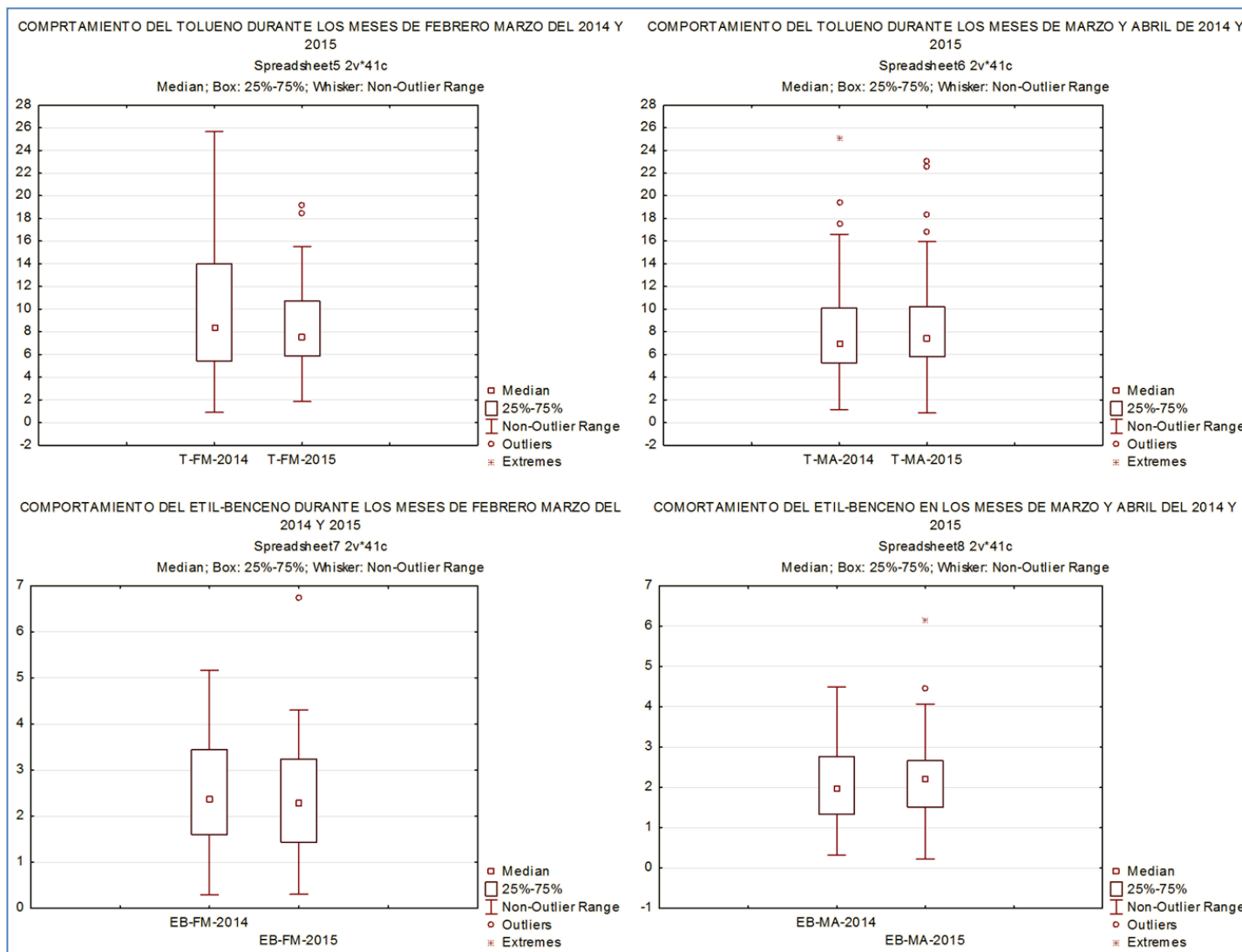
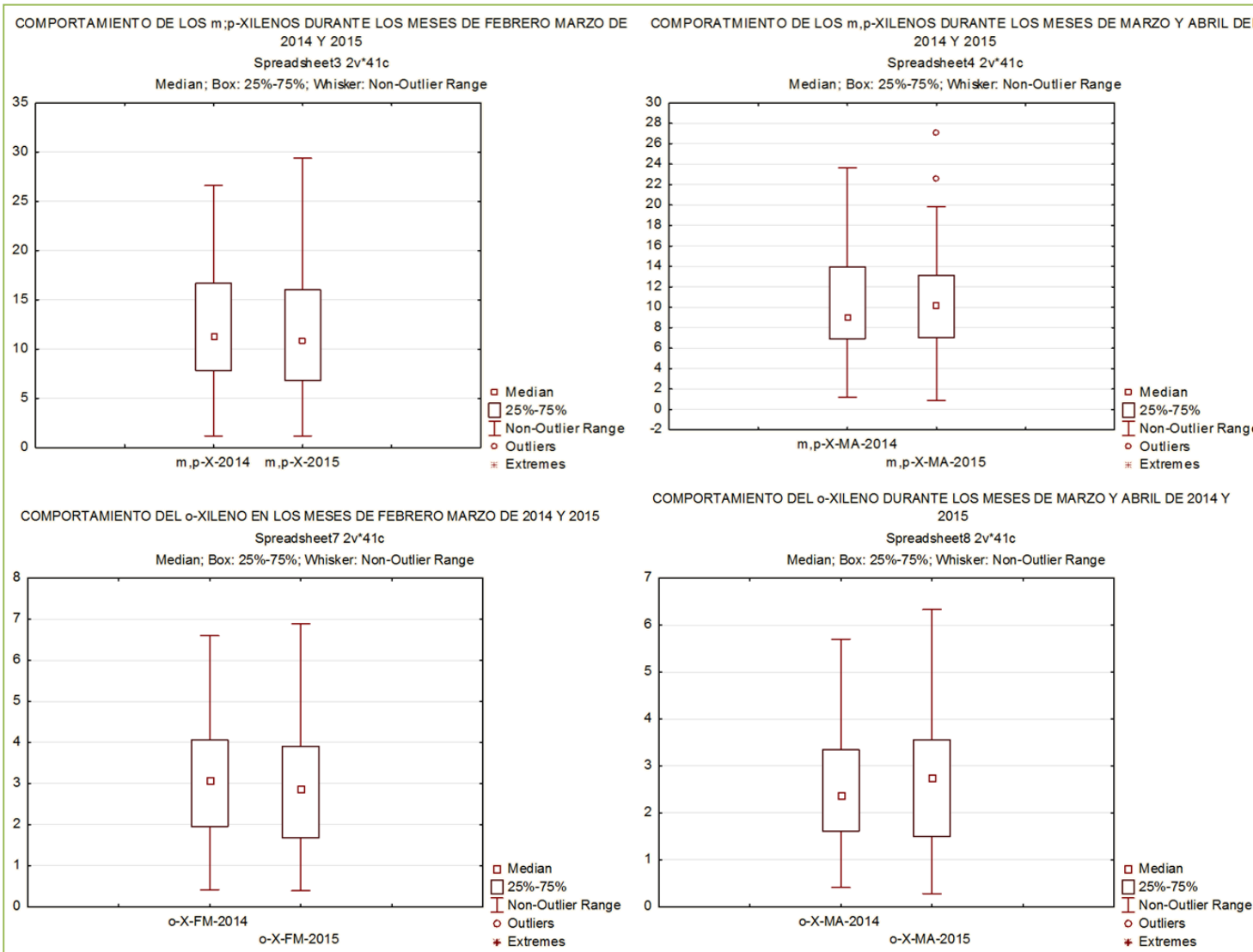


Figura 93. Comportamiento estadístico del benceno durante marzo-abril de 2014 y 2015.







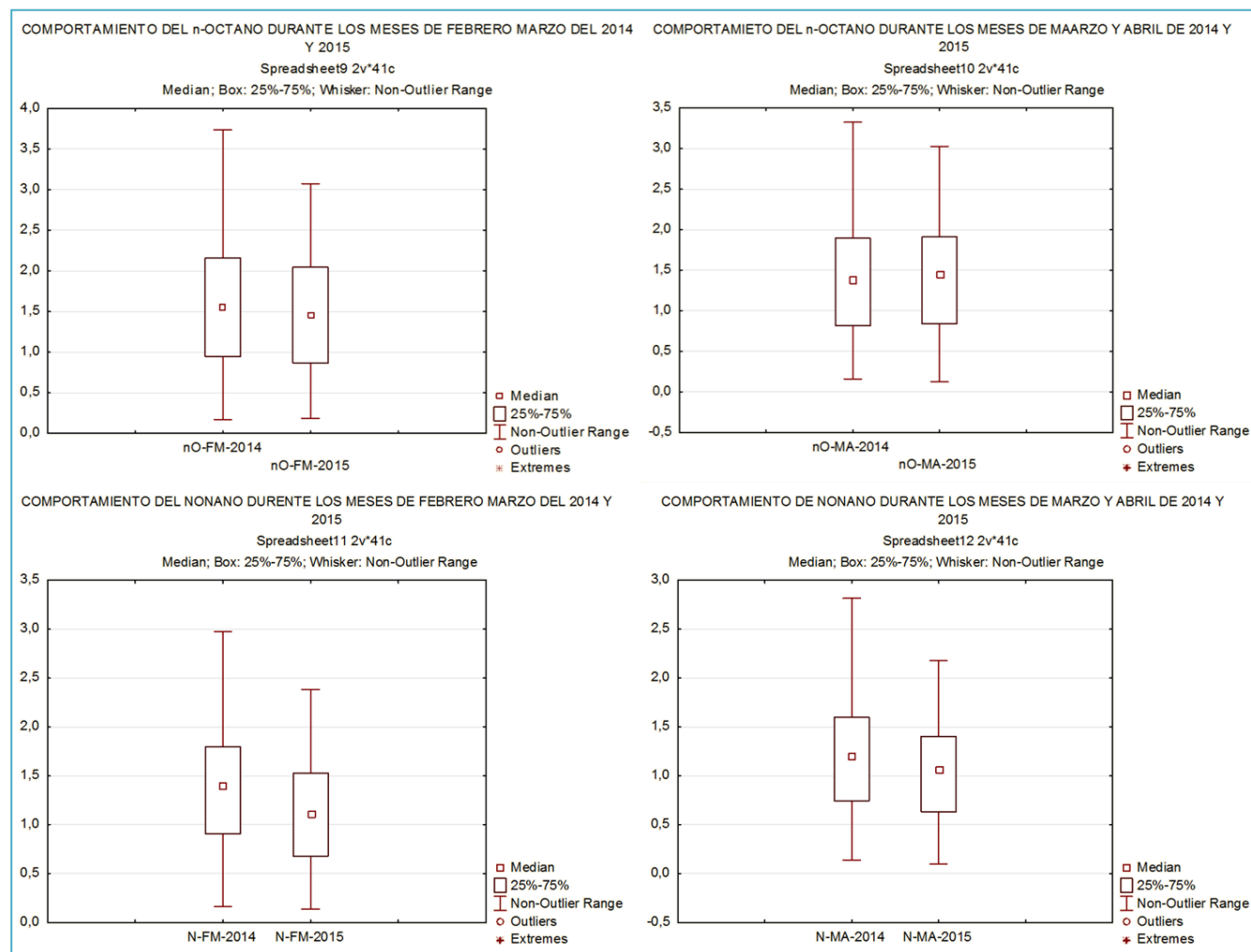


Figura 94. Diagramas de cajas y bigotes para los compuestos monitoreados durante el primer semestre de 2014 y 2015.

Tabla 10. Resumen estadístico de los COVs analizados durante el primer semestre de 2014 y 2015

BENCENO	FECHA	MEDIA	MEDIANA	VARIANZA	MAX mg/m3	MIN mg/m3
	FM-2014	2,34	2,16	1,06	4,43	4,09
	FM-2015	2,10	2,15	0,76	0,55	0,44
	MA-2014	2,07	1,99	0,71	4,10	0,71
	MA-2015	1,83	1,79	0,60	3,85	0,43
<b>TOLUENO</b>						
	FM-2014	9,79	8,34	34,04	25,65	0,89
	FM-2015	8,53	7,53	17,00	19,19	1,85
	MA-2014	8,90	6,93	25,39	25,05	1,14
	MA-2015	8,34	7,45	24,90	23,09	0,83
<b>m,p-XILENO</b>						
	FM-2014	12,65	11,30	39,53	26,61	1,17
	FM-2015	11,58	10,82	35,85	29,36	1,18
	MA-2014	10,56	8,99	27,46	23,61	1,21
	MA-2015	10,92	10,15	30,87	27,16	0,87
<b>o-XILENO</b>						
	FM-2014	3,16	3,07	2,30	6,60	0,41
	FM-2015	2,96	2,89	2,14	6,89	3,38
	MA-2014	2,58	2,37	1,53	5,70	0,40
	MA-2015	2,78	2,75	1,78	6,30	0,27
<b>ETIL-BENCENO</b>						
	FM-2014	2,59	2,38	1,50	5,16	0,30
	FM-2015	2,40	2,27	1,55	6,73	0,31
	MA-2014	2,13	1,97	1,00	4,49	0,32
	MA-2015	2,26	2,21	1,31	6,13	0,22
<b>n-OCTANO</b>						
	FM-2014	1,64	1,54	0,77	3,73	0,17
	FM-2015	1,52	1,45	0,55	3,07	0,18
	MA-2014	1,47	1,39	0,60	0,32	0,15
	MA-2015	1,51	1,45	0,52	3,02	0,12
<b>NONANO</b>						
	FM-2014	1,42	1,39	0,48	2,97	0,16
	FM-2015	1,13	1,10	0,30	2,38	0,13
	MA-2014	1,26	1,20	0,41	2,81	0,13
	MA-2015	1,08	1,06	0,25	2,18	0,09

## 7. CONSIDERACIONES FINALES, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

La evaluación de contaminantes no convencionales presentes en la atmósfera como los denominados compuestos orgánicos volátiles, COVs, definidos así por tener una presión de vapor mayor de 0.01 KPa a temperatura ambiente (25°C), los óxidos de nitrógeno (NOx) debido a que junto con los COVs participan en la formación del ozono troposférico, aerosoles orgánicos secundarios y material particulado y el SO<sub>2</sub> que contribuye a la formación de la lluvia ácida, son de gran interés, puesto que su presencia en la atmósfera los ha convertido en un problema emergente para la salud pública en muchas ciudades del mundo.

La población urbana en general y los trabajadores urbanos (como policías de tráfico, vendedores ambulantes, conductores de taxis y autobuses) los cuales ocupacionalmente están expuestos a dosis bajas de contaminantes atmosféricos, se ven afectados como consecuencia de los gases generados por los motores de combustión, las quemas, la pérdida por evaporación durante la manipulación, distribución y almacenamiento de gasolinas son unas de las principales fuentes de hidrocarburos aromáticos tales como benceno, tolueno y xilenos (o, m, y p-isómeros) (BTXs) en el aire urbano.

El monitoreo y evaluación de la presencia de estos contaminantes en la atmósfera de la ciudad de Cali se enmarca dentro de la preocupación mundial que está dirigida en controlar y reducir su presencia en aras de mejorar la salud de la población de las ciudades. La gestión de la calidad del aire en Colombia incluye estos seguimientos encaminados en la mejora, prevención y control de la contaminación atmosférica

La ubicación de los “hotspot” en la ciudad de Cali permite determinar las posibles fuentes de contaminación que, según se deduce de este trabajo, para los COVs y NOx, corresponde al sector del transporte, incluyendo el transporte público, el transporte masivo, automóviles y motos, es decir todo aquel que utiliza combustibles fósiles. El SO<sub>2</sub> según los resultados obtenidos, aunque es un producto más de estos combustibles, se cree que su impacto se debe al ser transportado hacia la parte nororiental de la ciudad por acción de los vientos de la parte norte de la ciudad que arrastraría la contaminación desde Yumbo, la Dolores y corregimientos cercanos dedicados a la quema de maderas.

Todos los puntos de muestreo se encuentran en vías de flujo de tráfico, donde la topografía se buscó de tal forma que no fuera un interferente, pero la presencia de edificios pudieron influir en los procesos de difusión y dispersión generando efecto túnel. Se notó la influencia de la dirección de los vientos, las épocas con aumento de radiación solar, aumento o disminución de lluvias, de tal manera que las características atmosféricas son importantes a la hora de evaluar estos contaminantes.

El volumen de tráfico sobre la malla vial existente es una de las principales causas, otro aspecto para tener en cuenta es el tipo de combustible, las diferentes clases de automotores, sus pesos, las especificaciones tecnológicas y los vehículos obsoletos todavía en circulación.

La ubicación de los sectores críticos permite plantear estrategias que permitan a mediano y largo plazo la disminución de los rangos de contaminación encontrados. Hasta ahora los resultados indican que para los compuestos cancerígenos y de efectos en el sistema nervioso, la ciudad de Cali no supera la norma del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial Resolución número 601 del 04 de abril de 2006, pero algunos sectores de la ciudad se acercan a los límites.

La información aquí recopilada se ajusta a la Resolución 651 de 2010 del actual Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, donde la información sobre calidad de aire está acorde con los lineamientos establecidos en el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire.

Como conclusiones del trabajo realizado se pueden resaltar:

1. Las concentraciones más elevadas de los COVs evaluados en este estudio durante los periodos de 2014 y 2015 y NOx en el 2015 se encuentran en las estaciones denominadas CALLE 44\_ K1, AV 3N\_CON 44, CC\_CALEÑO, LA BASE AÉREA, CHAPINERO, LA\_ERMITA, LA\_LUNA. Zonas de alto tráfico vehicular del centro norte de la ciudad de Cali.
2. Las concentración de SO<sub>2</sub> durante el periodo evaluado de 2015 corresponden a. ENTRADA\_C\_CALI, 14\_CALIMA, FLORALIA, AV 3N\_CON 44. FLORA\_DAGMA, MAIZENA, CHIPICHAPE. Zonas de alto flujo vehicular y nororiente de la ciudad.
3. A partir de las tres campañas del 2014 y las dos primeras del 2015 con 44 estaciones, se pudo a partir de la aplicación de análisis de conglomerados o clúster seleccionar de manera estadística 22 estaciones representativas de las zonas críticas para la ciudad de Cali.
4. Los puntos seleccionados para realizar los muestreos cumplen con la Norma Europea 13528 de 2013.
5. Se requiere una mayor continuidad en los datos meteorológicos de lluvia, velocidad y dirección de los vientos e intensidad de radiación solar, para ajustar mejor las correlaciones de los eventos meteorológicos con la variación de las concentraciones
6. Con la disponibilidad de los datos recopilados se pudo generar una primera “huella dactilar” de la contaminación atmosférica de la ciudad de Cali.

Como recomendaciones para darle continuidad a este proceso se indica:

1. Generar planes para la variación de los combustibles en el transporte masivo de la ciudad de Cali, con miras en reducir la producción de COVs a mediano plazo con el uso de gas, pero planeando a largo plazo la implementación del uso eléctrico como el principal medio de movilidad.
2. Planear variaciones en la malla vial de la ciudad para descongestionar la zona centro de la ciudad.

3. Habilitar el uso de las vías férreas con transportes eléctricos que atraviesen la ciudad favoreciendo a los habitantes de los extremos norte y sur de la ciudad.
4. Planear medidas de gestión que permitan tener indicadores que se puedan correlacionar con las variaciones de las concentraciones en futuras campañas de monitoreo.
5. Se sugiere dar continuidad a campañas de monitoreo de los COVs, NOx y SO<sub>2</sub>.
6. Dar inicio a las mediciones de ozono en la ciudad de Cali.
7. Se debe indagar sobre las emisiones de las fuentes fijas alrededor de los puntos de monitoreo y tener en cuenta sus datos como un indicador de los programas de gestión que se realizan en la ciudad.
8. Se sugiere realizar un monitoreo en una de las estaciones de abastecimiento de gasolina cercana a uno de los puntos de monitoreo.
9. Se sugiere evaluar la incidencia de los corregimientos cercanos a los cuales se les está atribuyendo el impacto de la contaminación por SO<sub>2</sub>.



## 8. Bibliografía.

Carnicer J. M., Contaminación Atmosférica, Módulo I: Contaminación Ambiental, Master en Ingeniería Medioambiental y Gestión del Agua 2007/2008, pg. 19.

Galán Madruga D., Fernández Patier R. Implicación de los NOx en la Química Atmosférica, M+A Revista Electrónica de Medioambiente. 2006, 2: 90-103

Ferm, M., 2002. The theories behind diffusive sampling. In: R.H. Brown, T.L. Hafkenschield, K.J.

Saunders, A. Borowiak and E. De Saeger (Editors), The proceedings of the International Conference Measuring Air Pollutants by

DahaB., Hastings M. G., Technical considerations for the use of passive samplers to quantify the isotopic composition of NOx and NO2 using the denitrifier method, Atmospheric Environment, In Press, Accepted Manuscript, Available online 3 August 2016.

Ferm, M. and Rodhe, H.: Measurements of air concentrations of SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> and NH<sub>3</sub> at rural and remote sites in Asia, J. Atmos. Chem., 1997,27, 17–29,.

Koutrakis, P., Wolfson, J. M., Bunyaviroch, A., Froehlich, S. E., Hirano, K., and Mulik, J. D.: Measurement of ambient ozone using a nitrite coated filter, Anal. Chem., 65, 209–214, 1993.

Perigo JF, Prado C. Evolution of occupational exposure to environmental levels of aromatic hydrocarbons in service stations. Ann Occup Hyg 2005; 49:233e 40.

Adami G, Larese F, Venier M, Barbieri P, LoCoco F, Reisenhofer E. Penetration of benzene, toluene and xylenes contained in gasoline's through human abdominal skin in vitro. Toxicol In Vitro 2006; 20:1321e30.

Bruckner JV, Warren DA. Toxic effects of solvents and vapors. In: Klaassen CD, editor. Casarett and Doulls toxicology the basic science of poisons. 6th Ed. New York (NY): McGraw-Hill Medical; 2001. p. 869e944.

Benson JM, Gigliotti AP, March TH, Barr EB, Tibbetts BM, Skipper BJ, Clark CR, Twerdok L. Chronic carcinogenicity of gasoline vapour condensate (GVC) and GVC containing methyl tertiary-butyl ether in f344 rats. J Toxicol Environ Health A 2011; 74:638e57.

Patrick-Iwuanyanwa KC, Onyemaenu CC, Wegwa MO, Ayalogu EO. Hepatotoxicity and nephrotoxic effects of kerosene and petrol contaminated diets in Wistar albino rats. Res J Environ Toxicol 2011; 5:49e57.

Uboh FE, Akpanabiatu MI, Ndem JI, Alozie Y, Ebong PE. Comparative nephrotoxic effect associated with exposure to diesel and gasoline vapours in rats. *J Toxicol Environ Health Sci* 2009; 1:68e73.

Lippmann SJ, Richardson DB, Chen JCM. Elevated serum liver enzymes and fatty liver changes associated with long driving among taxi drivers. *Am J Ind Med* 2011; 54:618e27.

Neghab M., Hosseinzadeh K., Hassanzadeh J., Early Liver and Kidney Dysfunction Associated with Occupational Exposure to Sub-Threshold Limit Value Levels of Benzene, Toluene, and Xylenes in Unleaded Petrol, *Safety and Health at Work* 6 (2015) 312e316

Alonso L. [http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/jornada\\_ozono\\_lalonso\\_tcm7-311134.pdf](http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/jornada_ozono_lalonso_tcm7-311134.pdf), revisado Agosto de 2016.

ATSDR agency for toxic substances and disease registry, TOLUENE, División de Toxicología ToxFAQsTM, Febrero 2001.

Lozhkina O.V., Lozhkin V. N. Estimation of nitrogen oxides emissions from petrol and diesel passenger cars by means of on-board monitoring: Effect of vehicle speed, vehicle technology, engine type on emission rates, *Transportation Research Part D* 47 (2016) 251–264,

Hamdi K., Hébrant M., Martinb P., Gallandb B., Etienne M. Mesoporous silica nanoparticle film as sorbent for in situ and real-time monitoring of volatile BTX (benzene, toluene and xylenes), *Sensors and Actuators B* 223 (2016) 904–913.

Parisellia F., Saccoa M.G., Pontib J., Rembgesa D., Effects of toluene and benzene air mixtures on human lung cells (A549), *Experimental and Toxicologic Pathology*, Volume 61, Issue 4, July 2009, Pages 381–386

World Health Organisation (WHO), 2000. Air quality guidelines for Europe. Second Edition. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe Regional Publications, European Series, n. 91.

Behera S. N., Sharma M. , Mishra P.K. , Nayak P., Damez-Fontaine B., Tahon R., Passive measurement of NO<sub>2</sub> and application of GIS to generate spatially-distributed air monitoring network in urban environment, *Urban Climate* 14 (2015) 396–413

Vichi F., Frattoni M., Imperiali A., Balducci C., Cecinato A., Perilli M., Romagnoli P., Civil aviation impacts on local air quality: A survey inside two international airports in central Italy, *atmospheric Environment*, In Press, Accepted Manuscript, Available online 3 August 2016

Freemana A. I., SurrIDGE B. W.J., Matthews M., Stewart M., Haygartha P. M., Understanding and managing de-icer contamination of airport surface waters: A synthesis and future perspectives, *Environmental Technology & Innovation* 3 (2015) 46–62.

The Danish Ecological Council, April 2012, Booklet, 28 pages.

Palmira Avanza, boletín de Prensa, Palmira, lunes 21 de abril de 2014 Número 1144.14.571

Portafolio, Finanzas Julio 22 DE 2008 - 05:00 A.M.

Gómez M. C. Evaluación de Compuestos Orgánicos Volátiles en Emplazamientos Urbanos, de Fondo Urbano e Industriales De La CAPV. Environment and Systems, S.A. para la Dirección de Planificación, Evaluación y Control. Departamentode Medio Ambiente. Gobierno Vasco, 2005.

OMS, Guías Para La Calidad Del Aire De La Organización Mundial De La Salud, Dieter Schwela, Salud Ambiental Urbana, Organización Mundial De La Salud, Ginebra, Suiza, 1999.

OMS, Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre, Actualización mundial 2005.

EPA-456-F-00-002 Noviembre de 1999.

Laureti T., Montero J-M., Fernández-Avilés G., A local scale analysis on influencing factors of NOx emissions: Evidence from the Community of Madrid, Spain. *Energy Policy* 74 (2014) 557–568.

Volckaert D., Enomah D., Ebude L., Van Langenhove H., SIFT-MS analysis of the removal of dimethyl sulphide, n-hexane and toluene from waste air by a two phase partitioning bioreactor, *Chemical Engineering Journal* 290 (2016) 346–352.

Dhada I., Sharma M., Kumar Nagar P. Quantification and human health risk assessment of by-products of photo catalytic oxidation of ethylbenzene, xylene and toluene in indoor air of analytical laboratorios, *Journal of Hazardous Materials* 316 (2016) 1–10.

Laureti T., Montero J-M., Fernández-Avilés G., A local scale analysis on influencing factors of NOx emissions: Evidence from the Community of Madrid, Spain, *Energy Policy* 74(2014)557–568.

ANDEMOS 2016, <http://www.andemos.org/img/193466703.pdf>.

ANDEMOS 2015, <http://www.andemos.org/img/996125498.pdf>.

Ramos–Herrera S., Bautista–Margulis R., Valdez–Manzanilla A., Statistical study of the correlation between atmospheric pollutants and meteorological variables in northern Chiapas, Mexico. *Universidad y ciencia* vol.26 no.1 Villahermosa abr. 2010.

Anttila P., Brorstrom-Lund E., Hansson K., Hakola H., Vestenius M., Assessment of the spatial and temporal distribution of persistent organic pollutants (POPs) in the Nordic atmosphere *Atmospheric Environment* 140 (2016) 22e33.

Ghassoun Y., Ruths M., Löwner M-O., Weber S., Intra-urban variation of ultrafine particles as evaluated by process related land use and pollutant driven regression modelling, *Science of the Total Environment* 536 (2015) 150–160.

AENOR, 2013, NORMA ESPAÑOLA UNE-EN 13528-3, 2013, Calidad del aire ambiente. Captadores difusivos para la determinación de las concentraciones de gases y vapores. Requisitos y métodos de ensayo. Parte 3: guía para la selección, uso y mantenimiento. Documento adquirido por la Universidad del Valle.

Adon M., C. Galy-Lacaux , Yoboue V. ´, Delon C. , Lacaux J. P. , Castera P. , Gardrat E. , Pienaar J. , Al Ourabi H., Laouali D. , Diop B. , Sigha-Nkamdjou L., Akpo A. , Tathy J. P. , Lavenu F., and Mougín E., 2010, Long term measurements of sulfur dioxide, nitrogen dioxide, ammonia, nitric acid and ozone in Africa using passive samplers, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 7467–7487.

Ameur-Bouddabbous I., Kasperek J. , Barbier A., Harel F., Hannover B., 2012, Transverse approach between real world concentrations of SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, BTEX, aldehyde emissions and corrosion in the Grand Mare tunnel, *Journal of Environmental Sciences*, 24(7) 1240–1250.

Arboleda M. A., Parra I. F., Aristizábal I., Sabogal H., (2012) “Estudio dinámico de la movilidad en la ciudad de Santiago de Cali – Colombia”. X Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas, III Congreso Brasileño de Dinámica de Sistemas, I Congreso Argentino de Dinámica de Sistemas.

Begerow, J., Jermann, E., Keles, T., Koch, T., Dunemann, L., Screening method for the determination of 28 volatile organic compounds in indoor and outdoor air at environmental concentrations using dual-column capillary gas chromatography with tandem electron-capture-flame ionization detection. *Journal of Chromatography A* 749, 181–191, 1996.

CALI EN CIFRAS 2013, Publicado y editado por el Departamento Administrativo de Planeación. Edificio CAM Torre Alcaldía Piso 10 PBX 6689100 - FAX 8895630 Santiago de Cali, Colombia <http://planeacion.cali.gov.co> Diciembre de 2013.

CLAYTON, G.D. AND CLAYTON, F.E., 1994. Patty's Industrial Hygiene and Toxicology. (4th edition). New York: John Wiley.

<http://www.istas.net/risctox/index.asp?idpagina=621>, visitado el 22 de Julio de 2014.

Choung J. H. y Lee Y. W. 2001. Adsorption equilibria of toluene on polymeric adsorbents. J. Chem. Eng. Data 46, 954-958.

Ferm, M. and Rodhe, H. 1997, Measurements of air concentrations of SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> and NH<sub>3</sub> at rural and remote sites in Asia, J. Atmos. Chem., 27, 17-29.

Ficha técnica 2013 (<http://www.grupoprevenir.es/fichas-seguridad-sustancias-quimicas/1245.htm>) visitado julio 23 de 2014.

Gennaro G., Demarinis L. A., Fracchiolla R., Palmisani J., Saracino M. R., Tutino M., 2015, Temporal variation of VOC emission from solvent and water based wood stains, Atmospheric Environment 115 (2015) 53e61.

Hernández M. Á., Velasco J A., Rojas F., Campos E., Reales V., Lara H., Torres J., Salg M., Rev. Int. Contam. Ambient. 19 (4) 191-196, 2003

<http://www.calidadaire.df.gob.mx/calidadaire/index.php?opcion=4&opcionrecursostecnicos=34>, visitado julio 24 de 2014

(<http://www.quimica.unam.mx/IMG/pdf/17tolueno.pdf>, visitado julio 24 de 2014

<http://www10.ava.es/rccava/03contaminantes6.html>, visitado julio 24 de 2014

<https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2004/1/IQ588/1/material/> visitado julio 23 de 2015

IARC (1987). Overall evaluations of carcinogenicity: an updating of IARC Monographs volumes 1 to 42. IARC Monogr Eval Carcinog Risks Hum Suppl, 7: 1-440. PMID: 3482203.

Lebret E., Briggs D., Van Reeuwijk H., Fischer P., Smallbone K., Harssema H., et al. (2000) Small area variations in ambient NO concentrations in four European areas. Atmos. Environ; 34:177-85.

OMS, 2004. Guías para la Calidad del Aire. Traducción del Informe de la Reunión de un Grupo de Trabajo de Expertos de la OMS desarrollada en Ginebra, Suiza en diciembre de 1997. Lima.



Sánchez A.S., Cohim E. , Kalid R.A., 2015, A review on physicochemical and microbiological contamination of roof-harvested rainwater in urban areas, Sustainability of Water Quality and Ecology, Available online 16 April 2015, doi:10.1016/j.swaqe.2015.04.002

Schneider, P., Gebefügi, I., Richter, K., Wölke, G., Schnelle, J., Wichmann, H.-E., Heinrich, J., INGA Study Group,. Indoor and outdoor BTX levels in German cities. The Science of the Total Environment 267, 41–51., 2001.

World Bank (2003) World Development Indicators. World Bank Publications, Washington DC.

Zaror Zaror C. A., 2000, Introducción a la Ingeniería Ambiental para la Industria de Procesos, Capitulo 3. Publicador: Universidad de Concepción, Chil

## ANEXOS

## Anexo 1.

### MATRIZ DE DATOS PARA LA SELECCIÓN DE LOS 22 "HOTSPOT".

Matriz de Datos: Escalados al valor mas alto por compuesto por periodo. (Se trabajó con Xilenos totales)

Puntos seleccionados: Valor Superior al percentil 0.66

Nombre	B1	B2	B3	B4	T1	T2	T3	T4
BASE_AEREA	1	0.82926829	0.92307692	0.80487805	0.6	0.68	0.3	0.52631579
CHAPINERO	0.97727273	1	0.88461539	0.65853659	0.68	0.56	0.4137931	0.68421053
BENJ_HERRERA	0.45454546	0.43902439	0.34615385	0.53658537	1	1	0.22758621	0.68421053
CONF_DELICIAS	0.54545455	0.53658537	0.5	0.6097561	0.56	0.44	1	0.84210526
MAIZENA	0.52272727	0.56097561	0.65384615	0.51219512	0.332	0.256	0.22413793	0.34736842
CALL44_K1	0.95454546	0.92682927	0.96153846	0.97560976	0.68	0.64	0.48275862	1
AV3°N_44	0.95454546	0.87804878	1	1	0.52	0.44	0.32068966	0.68421053
PRIMAVERA	0.65909091	0.68292683	0.76923077	0.78048781	0.48	0.396	0.34482759	0.57894737
GUABAL	0.90909091	0.82926829	1	0.65853659	0.48	0.4	0.32758621	0.5
C_C_CALEÑO	0.79545455	0.65853659	0.80769231	0.78048781	0.56	0.76	0.48275862	0.78947368
ERA_DAGMA	0.47727273	0.48780488	0.57692308	0.51219512	0.72	0.72	0.44827586	1
ERMITA	0.72727273	0.75609756	0.92307692	0.58536585	0.64	0.4	0.3	0.68421053
LA_LUNA	1	0.82926829	0.88461539	0.87804878	0.68	0.44	0.3137931	0.63157895
Nombre	E1	E2	E3	E4	Xt1	Xt2	Xt3	Xt4
BASE_AEREA	0.94230769	0.73333333	0.56521739	0.50746269	0.92857143	0.68350168	0.61805556	0.72644377
CHAPINERO	1	1	0.86956522	0.59701493	1	1	0.83680556	0.68693009
BENJ_HERRERA	0.59615385	0.6	0.36956522	0.56716418	0.57440476	0.53198653	0.34027778	0.69604863
CONF_DELICIAS	0.78846154	0.75555556	0.45652174	0.47761194	0.72619048	0.6969697	0.47222222	0.52279635
MAIZENA	0.69230769	0.73333333	0.69565217	0.41791045	0.64583333	0.68350168	0.71527778	0.50455927
CALL44_K1	0.96153846	1	1	1	0.92857143	0.91919192	1	1
AV3°N_44	0.73076923	0.71111111	0.63043478	0.56716418	0.71726191	0.68013468	0.625	0.62917933
PRIMAVERA	0.59615385	0.57777778	0.52173913	0.47761194	0.56845238	0.55892256	0.53472222	0.51550152
GUABAL	0.75	0.66666667	0.60869565	0.41791045	0.7202381	0.64646465	0.63194444	0.48328268
C_C_CALEÑO	0.63461539	0.84444444	0.65217391	0.64179105	0.63392857	0.74410774	0.65972222	0.75683891
ERA_DAGMA	0.67307692	0.66666667	0.76086957	0.58208955	0.64880952	0.64646465	0.63888889	0.5893617
ERMITA	0.80769231	0.62222222	0.52173913	0.49253731	0.79761905	0.59259259	0.53125	0.54103344
LA_LUNA	0.86538462	0.73333333	0.67391304	0.56716418	0.82738095	0.72053872	0.62152778	0.6231003

Para todos los cluster realizados, se aplicó como método de distancia la distancia euclidiana:

$$\|a - b\|_2 = \sqrt{\sum_i (a_i - b_i)^2}$$

Comando R: `> d<-dist(clust,method="euclidean")`

Metodos aplicados:

Promedio: `> fit<-hclust(d,method="average")`  
`> plot(fit,labels=clust$Nombre,hang=-1)`

Centroide: `> fit<-hclust(d,method="centroid")`  
`> plot(fit,labels=clust$Nombre,hang=-1)`

Completo: `> fit<-hclust(d,method="complete")`  
`> plot(fit,labels=clust$Nombre,hang=-1)`

Mediana: `> fit<-hclust(d,method="median")`  
`> plot(fit,labels=clust$Nombre,hang=-1)`

Sencillo: `> fit<-hclust(d,method="single")`  
`> plot(fit,labels=clust$Nombre,hang=-1)`

Ward: `> fit<-hclust(d,method="ward.D2")`  
`> plot(fit,labels=clust$Nombre,hang=-1)`

<p><b>Método promedio:</b> Benjamín Herrera solo, luego se desprende el cluster del resto de puntos: Chapinero, calle 44 k 1 Av 3 44 – Luna &gt; Base aérea Guabal ermita &gt; Primavera Cclaeño – Era dagma Maizena Confandi delicias</p>	<p><b>Método centroide:</b> Benjamin Herra solo AV 3 44 – Luna &gt; Base aérea &gt; Guabal &gt; Ermita Primavera CC Caleño MAizena &gt; Chapinero &gt; Era dagma &gt; Confandi Delicias Calle 44 K1</p>
<p><b>Método Completo:</b> AV3a –Luna &gt; Base Aerea Guabal-Ermita &gt; Primavera &gt; Maizena CC Caleño – ERA Dagma &gt; conf Delicias Benjamín herrera Chapinero – calle 44 K1</p>	<p><b>Método Mediana</b> Ave 3ª – Luna &gt; Base Aerea Guabal &gt; ermita &gt; primavera CC Caleño &gt; Era Dagma Maizena Comdanfi delcias Maizena Chapinero – Calle 44 K1 Benjamín Herrera</p>
<p><b>Método Sencillo</b> Av 3ª – Luna &gt; Base Aerea Guabal – Ermita &gt; Primavera Maizena CCCaleño Chapinero ERA Dagma Calle 44 k1 Confandi delicias Benjamín Herrera</p>	<p><b>Método Ward</b> Av 3ª 44 –Luna &gt; Base aérea Guabal – ermita &gt; Primavera Maizena Chapinero - Calle 44 K1a CC Caleño – Era dagma &gt; Confandi delicias &gt; Benjamín Herrera</p>