



**RED DE CALIDAD DEL AIRE.**

**NEIVA - HUILA**



**FEBRERO DE 2012**



## **ÍNDICE**

1.	INTRODUCCIÓN .....	1
2.	OBJETIVO DEL ESTUDIO .....	1
3.	ANTECEDENTES [1].....	1
4.	METODOLOGÍA.....	2
5.	MÉTODOS DE MEDICIÓN .....	28
6.	MÉTODOS DE INTERPOLACION.....	40
7.	ÍNDICES DE CALIDAD .....	46
8.	NORMATIVIDAD AMBIENTAL .....	48
9.	RESULTADOS .....	49
10.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	51
11.	CONCLUSIONES .....	60
12.	RECOMENDACIONES.....	61
13.	BIBLIOGRAFÍA.....	62



## **1. INTRODUCCIÓN**

La Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena, contrató a Luis Fernando Amaya González para realizar un informe de la información arrojada por la Red de Calidad del Aire del municipio de Neiva, Huila para el año 2011.

El documento contiene la información básica acerca de la metodología con la cual se realizó el estudio, las normas de calidad del aire, el resultado de las evaluaciones y un análisis de las mismas. Los resultados obtenidos se analizaron con base en las Resoluciones 610 de 2011 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

## **2. OBJETIVO DEL ESTUDIO**

Evaluar la Calidad del Aire en el Municipio de Neiva, Departamento del Huila, determinando las concentraciones de contaminantes en el casco urbano, comparando los resultados con las normas de calidad de aire establecidas en la Resolución 610 de 2010 y reconocidas por el Decreto 948 de 1995, expedidas por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

## **3. ANTECEDENTES [1].**

El Municipio de Neiva, capital del departamento del Huila, tiene una extensión de 1.553 Km<sup>2</sup> que abarcan desde la cordillera oriental hasta la cordillera central, pasando por el Valle del Río Magdalena. Limita por el norte con los Municipios de Aipe, Tello y Villavieja, por el sur con el Municipio de Rivera, hacia el oriente con el Departamento del Caquetá y al occidente con el Municipio de Palermo. Su división política y administrativa se ha estructurado a partir de 10 comunas y 250 barrios en la zona urbana y ocho (8) corregimientos con 73 veredas en la zona rural, con un área estimada de 4.594 y 150.706 hectáreas, respectivamente. Cada corregimiento está asociado a un centro poblado rural que se constituye en el epicentro de las actividades económicas, culturales, sociales y políticas de la población circundante.



Su crecimiento urbano fue muy lento con un núcleo inicial de solo 6 hectáreas comprendidas alrededor de la plaza mayor. A fines del siglo XVII contaba con 33 hectáreas desarrolladas sobre la margen derecha del río Magdalena. En 1942 se contaban ya con 230 ha; con tendencia de crecimiento hacia el este, en 1947 eran la 332 ha, en 1960 sumaba su casco urbano 503 ha, en 1967 tenía 790 ha, en 1985 su área desarrollada era de 1794 ha y actualmente su mancha urbana ocupa aproximadamente 2380 ha que representan el 52% del área ubicada dentro del perímetro urbano. Este análisis de crecimiento demuestra su formidable impulso desde el año de 1960, el cual se ha realizado principalmente de una manera espontánea, especialmente hacia el oriente y el norte de la ciudad.

El incremento de los procesos de industrialización y urbanización en las últimas décadas en la ciudad de Neiva, ha conducido a la utilización de la atmósfera, como receptora de sustancias gaseosas y partículas originadas de dichas actividades, que ponen en peligro la condición del aire como recurso libre. Los costos ambientales y sociales de este recurso son cada vez más altos y así lo indican entre otros, la incidencia de enfermedades, y los cambios climáticos que afectan el desarrollo de la agricultura y ganadería.

El Municipio de Neiva realizó el primer monitoreo de la calidad del aire con el Laboratorio ANTEK S.A. en el año 2005, y en el año 2010 realiza la evaluación de la calidad del aire en la zona urbana de la ciudad de Neiva, mediante la implementación y puesta en marcha de la Red de Evaluación y Seguimiento de Calidad del Aire RESCA.

#### **4. METODOLOGÍA**

##### **4.1. ÁREA GEOGRÁFICA DEL ESTUDIO.**

El presente estudio se realizó en el área urbana del municipio de Neiva, departamento del Huila.

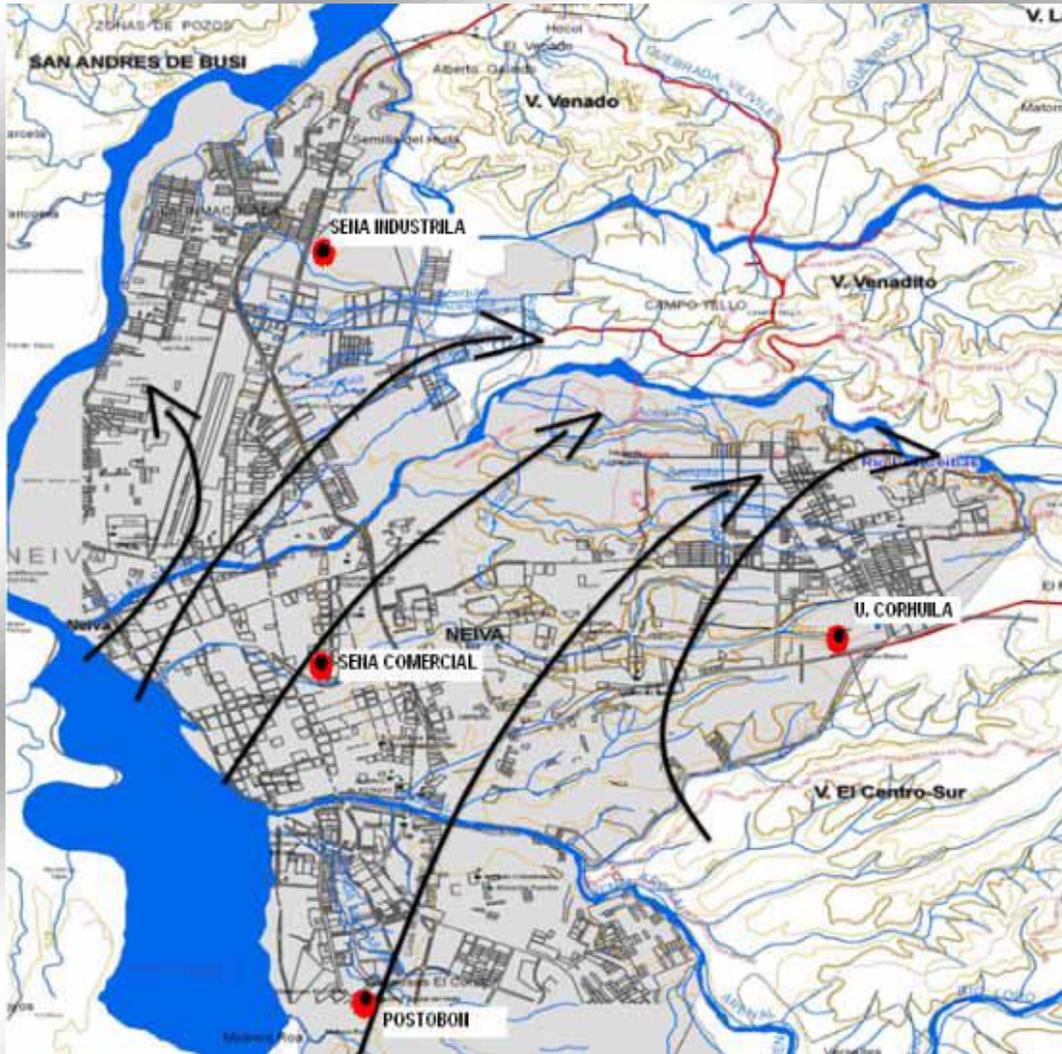
##### **4.2. CONTAMINANTES EVALUADOS**

En el presente estudio se realizó el análisis del material particulado menor a 10 micras PM10 y material particulado menor a 2.5 micras PM2.5

### 4.3. SITIOS DE MEDICIÓN

La localización de las estaciones de muestreo se presenta en la Figura 1:

Figura 1 Localización de las estaciones en el Municipio de Neiva, Huila.



Fuente: Equipo Consultor RED Aire 2010.

La estación Postobón; Se encuentra ubicada en el costado sur de la ciudad de Neiva, exactamente en la Comuna 6, dentro de las instalaciones de la empresa Gaseosas del Huila Postobón, en inmediaciones de la zona



Industrial del Sur, según el Plan de Ordenamiento Territorial POT de Neiva; esta estación se encuentra fuera de servicio para el año 2011.

Coordenadas: Origen Bogotá E: 865950,31 N: 812937,91



Fotografía 1 Estación de monitoreo “Postobón”

La estación Sena Industrial; está ubicada en el costado Norte de la ciudad de Neiva, exactamente en la Comuna 9, dentro de las instalaciones de la Sede Industrial del Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. El uso del suelo corresponde a uso Institucional comercial; esta estación cuenta con un equipo para medir PM2.5.

Coordenadas: Origen Bogotá N: 819953,59 E: 865637



Fotografía 2 Estación de monitoreo “Sena Industrial”

La estación Sena Comercial; se localiza en centro de la ciudad de Neiva, sobre un sector comercial y residencial, localizado en la comuna cinco de la ciudad, un sector transitado por efectos de las condiciones comerciales y culturales del Municipio; esta estación se encuentra fuera de servicio para el año 2011.

Coordenadas: Origen Bogotá N: 816065,92 E: 865615,16



Fotografía 3 Estación de monitoreo “Sena Comercial”

La estación de la Universidad Corhuila; se localiza en la comuna siete del Municipio, el sector corresponde a una zona comercial y residencia, sector que actualmente se desarrollan proyectos urbanísticos de la ciudad; esta estación se encuentra fuera de servicio para el año 2011.

Coordenadas: Origen Bogotá E: 869681,58 N: 816345,21



Fotografía 4 Estación de monitoreo “Universidad Corhuila”

Para el presente estudio, solo se contó con la información de las estaciones de la CAM (para PM10 y del Sena Industrial para PM2.5).

#### 4.4. CONDICIONES METEOROLOGICAS.

A continuación se muestran las diferentes condiciones meteorológicas de la estación meteorológica perteneciente al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, estación: 21115020 ubicada en el aeropuerto Benito Salas de la ciudad de Neiva.

- **Enero de 2011.**

Tabla 1. Temperatura y humedad relativa promedio diario para el mes de Enero de 2011 en la ciudad de Neiva.

DIA	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD (%)	DIA	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD (%)
1	28.2	67	2	27.6	69
			3	28.1	65



DIA	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD (%)
4	25.1	75
5	26.5	76
6	27.1	72
7	25.1	78
8	26.4	75
9	24.7	80
10	26.6	72
11	27.3	74
12	28.5	68
13	28.8	64
14	28.1	65
15	28.4	64
16	26.9	72
17	29.0	69

DIA	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD (%)
18	28.4	68
19	27.4	75
20	28.2	65
21	27.8	70
22	28.1	63
23	28.0	65
24	27.8	62
25	28.1	62
26	28.6	57
27	27.5	64
28	28.6	60
29	28.6	64
30	28.5	57
31	28.1	60

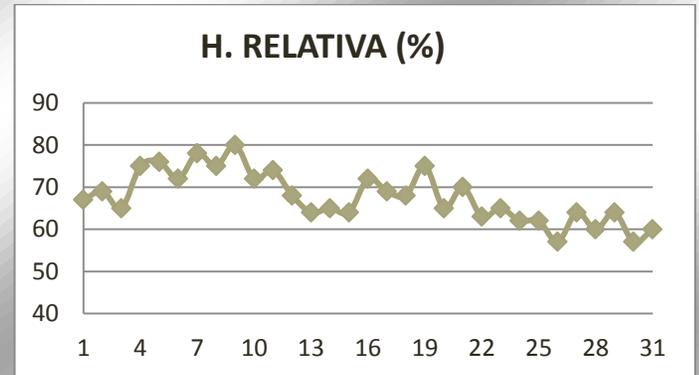
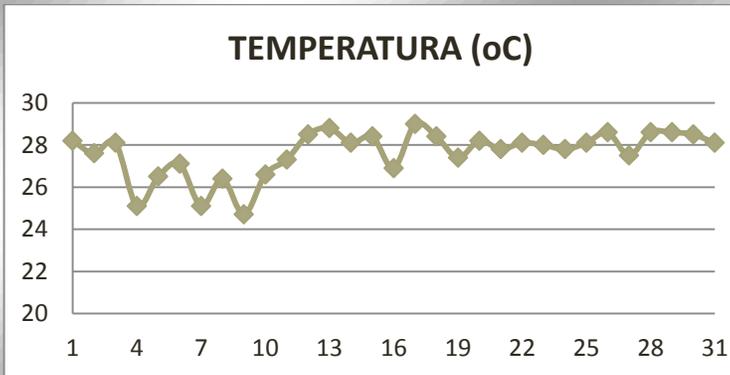
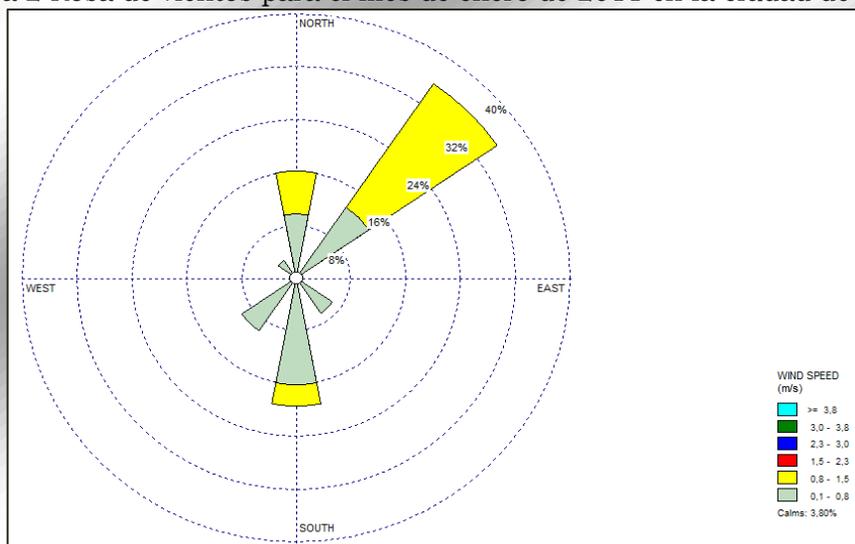


Figura 2 Rosa de vientos para el mes de enero de 2011 en la ciudad de Neiva



- **Febrero de 2011.**

Tabla 2. Temperatura y humedad relativa promedio diario para el mes de Febrero de 2011 en la ciudad de Neiva.

DIA	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD (%)
1	27,4	69
2	29	61
3	28,9	59
4	29,2	59
5	27,3	77
6	27,6	70
7	26,8	75
8	25,2	77
9	26,8	71
10	25,5	80
11	25,4	78
12	27,3	74
13	25,7	84

DIA	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD (%)
14	26,2	76
15	27,6	73
16	24,4	87
17	25,8	82
18	27	75
19	27	74
20	28,2	68
21	28	68
22	26,4	76
23	27,2	70
24	24,3	85
25	25,3	80
26	27	74
27	26,2	76



28	27,4	70
----	------	----

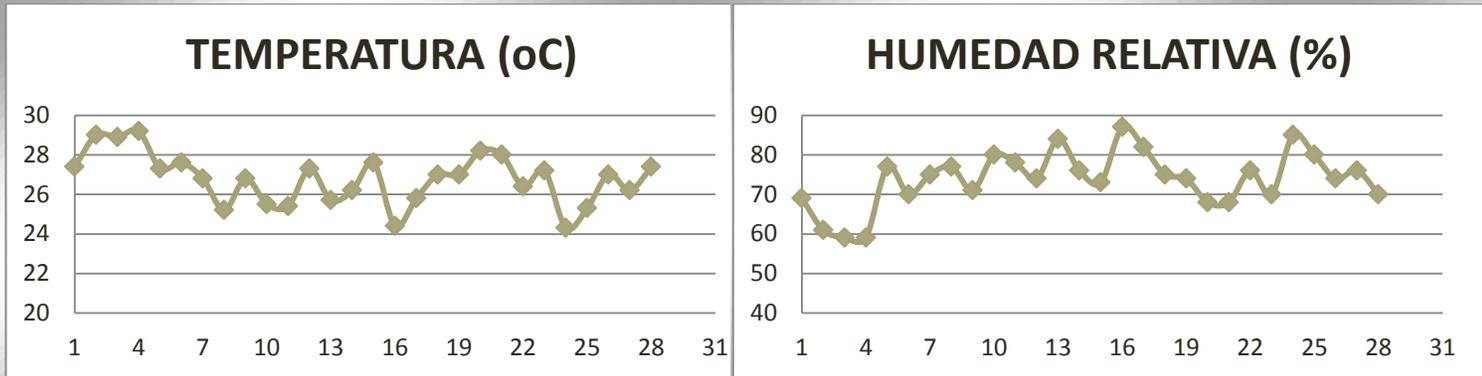
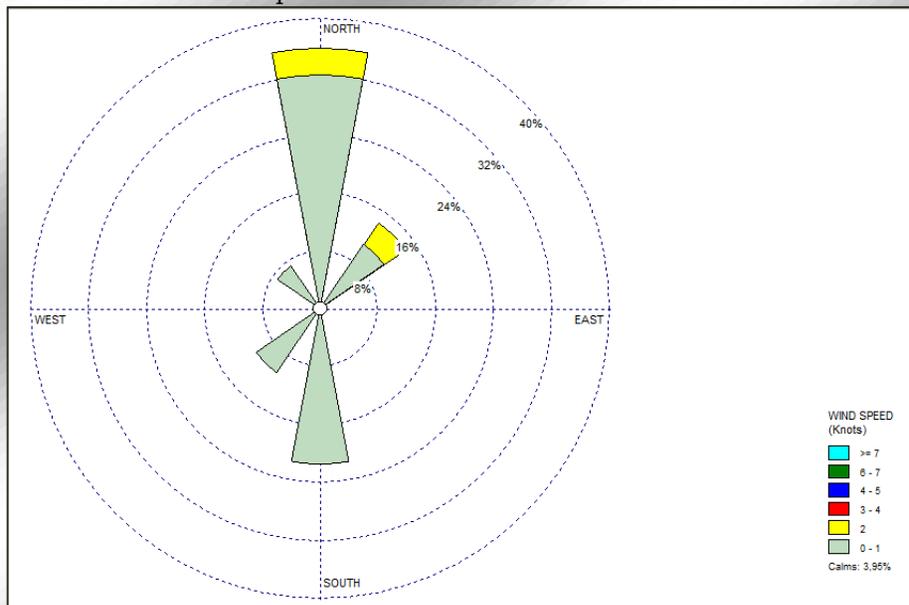


Figura 3 Rosa de vientos para el mes de Febrero de 2011 en la ciudad de Neiva





- **Marzo de 2011.**

Tabla 3. Temperatura y humedad relativa promedio diario para el mes de Marzo de 2011 en la ciudad de Neiva.

DIA	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD (%)
1	24,6	83
2	25,6	79
3	26,3	76
4	26,9	72
5	24,4	82
6	25,1	78
7	25,9	76
8	25,4	83
9	24,7	83
10	24	79
11	25,8	70
12	26,8	68
13	27,4	67
14	27,2	67
15	27,9	63

DIA	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD (%)
16	27,2	68
17	27,3	70
18	25,8	81
19	25,8	81
20	25,4	83
21	24,2	82
22	25,9	79
23	24,5	90
24	28,1	70
25	27,8	71
26	26	76
27	28,1	70
28	28,9	68
29	28,1	64
30	28,5	68
31	28,6	66

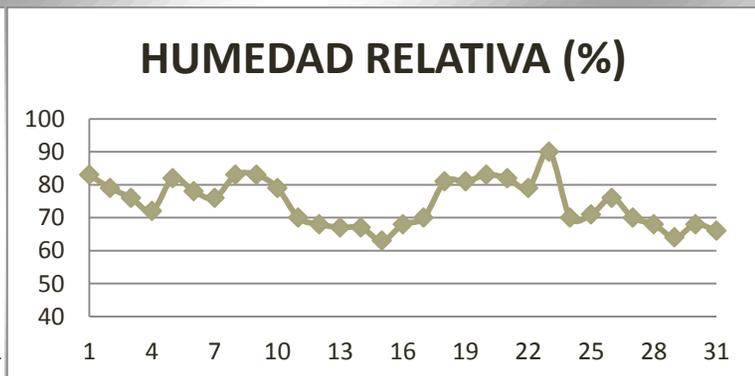
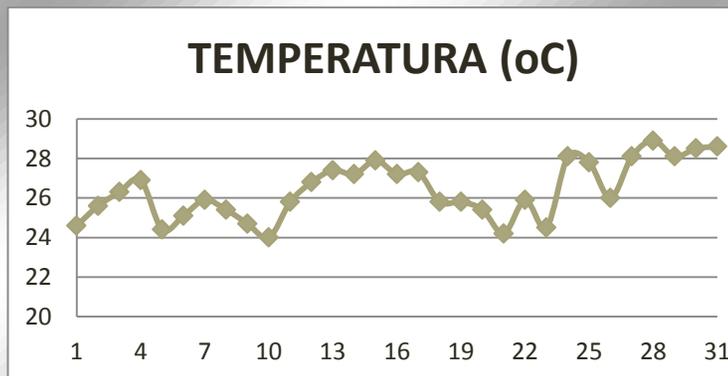
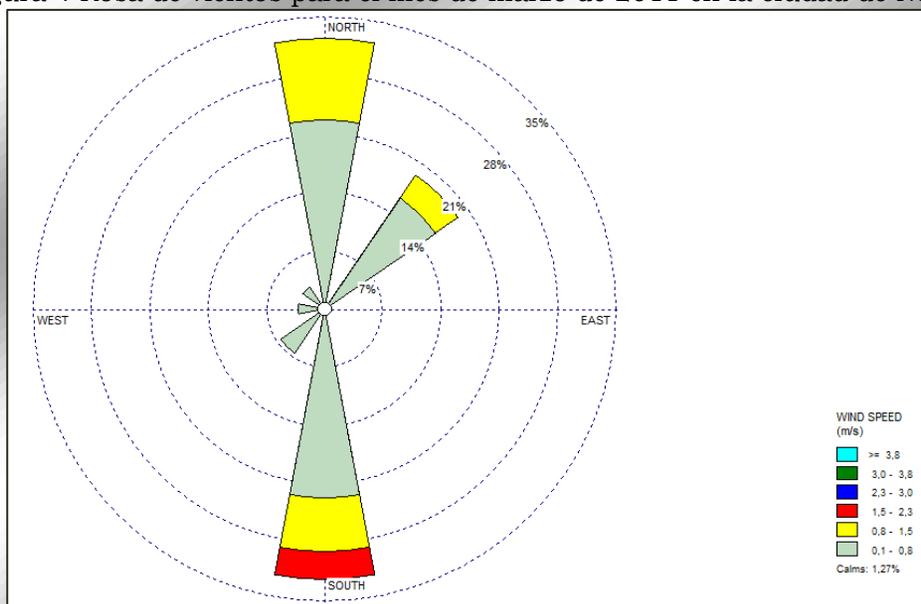


Figura 4 Rosa de vientos para el mes de marzo de 2011 en la ciudad de Neiva



- **Abril de 2011.**

Tabla 4. Temperatura y humedad relativa promedio diario para el mes de Abril de 2011 en la ciudad de Neiva.

DIA	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD (%)
1	29,7	65
2	27,7	74
3	27,5	72
4	25,6	78
5	28,8	65
6	26,3	77
7	26,5	77
8	27,6	69
9	27	75
10	24,3	83
11	25,5	80

DIA	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD (%)
12	23,6	88
13	25,3	76
14	27,1	73
15	23,9	84
16	26,4	73
17	25,3	79
18	26,1	76
19	25,4	79
20	26,1	77
21	24,8	80
22	23,3	92
23	25,1	82



DIA	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD (%)
24	25,8	79
25	25,9	80
26	27,9	68
27	27	72

DIA	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD (%)
28	27	71
29	25,9	69
30	26,4	75

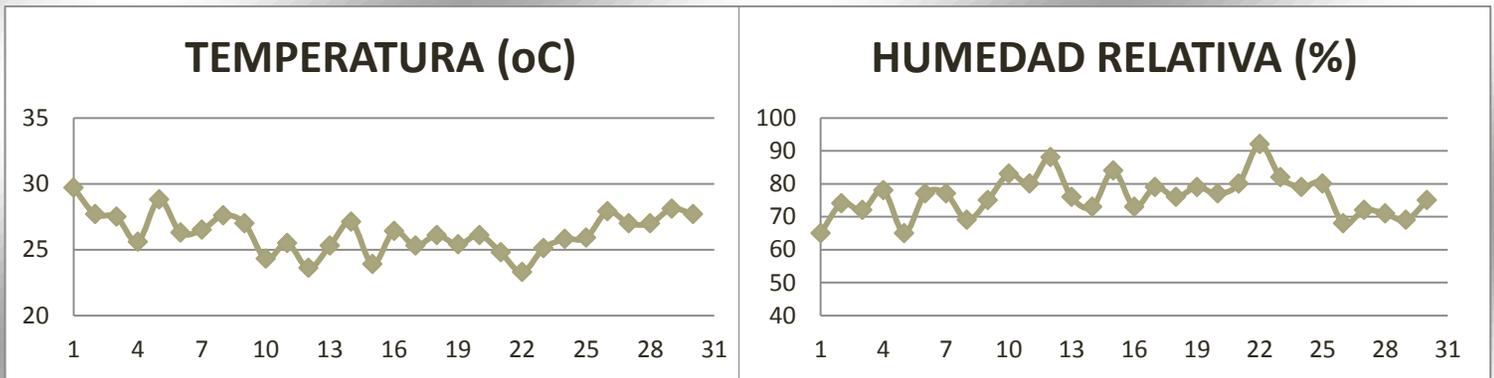
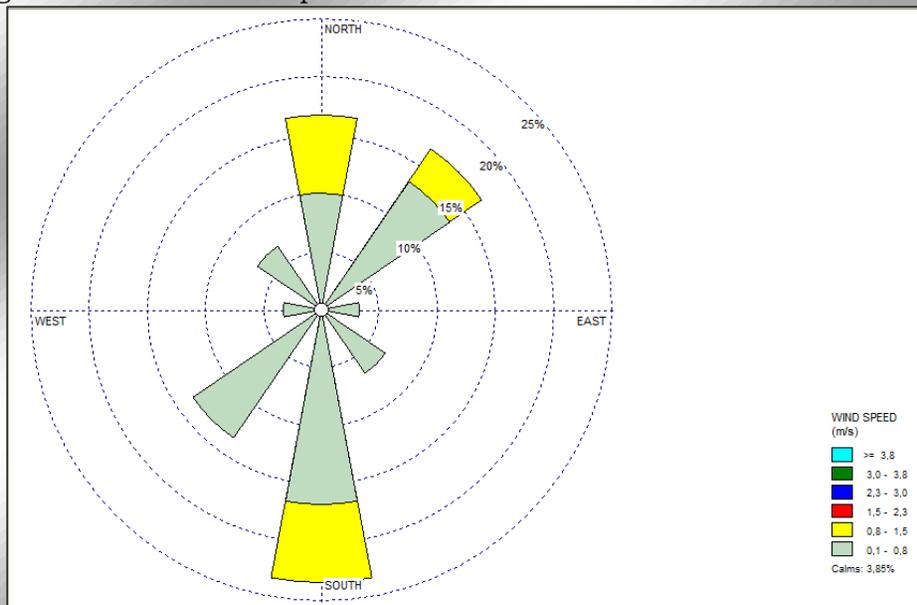


Figura 5 Rosa de vientos para el mes de Abril de 2011 en la ciudad de Neiva



- **Mayo de 2011.**

Tabla 5. Temperatura y humedad relativa promedio diario para el mes de Mayo de 2011 en la ciudad de Neiva.



DIA	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD (%)
1	26	83
2	28,4	71
3	23,7	92
4	27	68
5	28,4	66
6	29,4	57
7	26	73
8	28	62
9	28	66
10	28,6	64
11	29,3	62
12	29	65
13	25,7	85
14	22,9	97
15	25,6	78
16	24,9	83

DIA	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD (%)
17	26,2	79
18	26,9	75
19	25,1	82
20	27,7	68
21	26,6	74
22	25,6	76
23	27,5	71
24	28	64
25	27,3	71
26	25,4	79
27	27,3	72
28	25,8	72
29	25,9	74
30	26,4	69
31	28,1	58

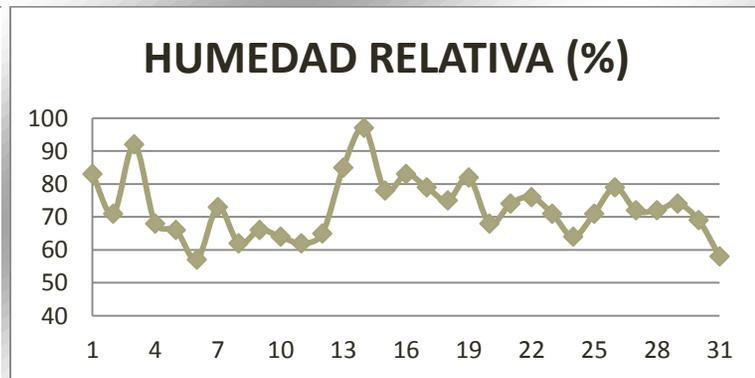
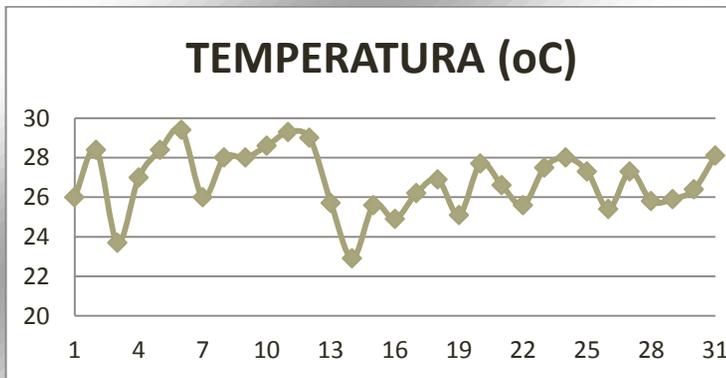
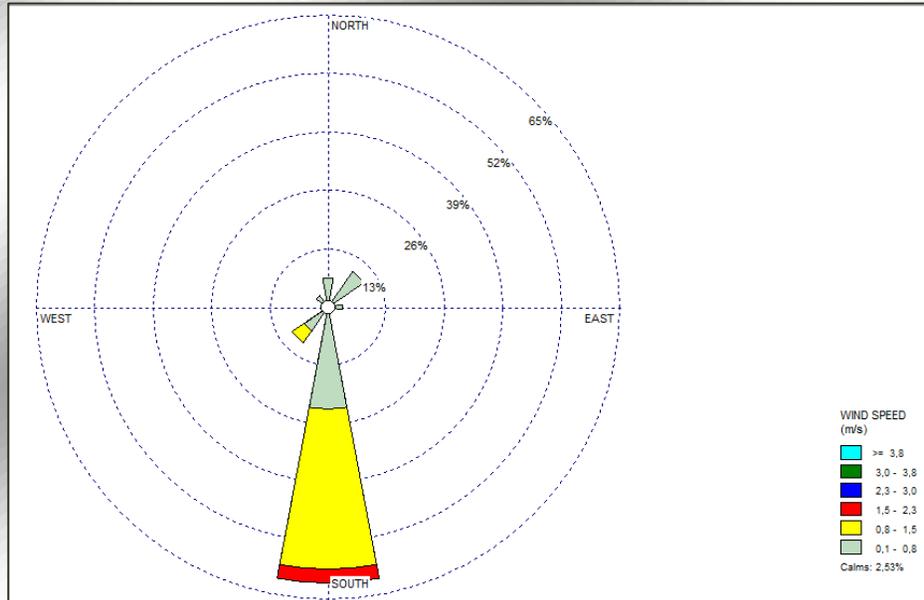


Figura 6 Rosa de vientos para el mes de mayo de 2011 en la ciudad de Neiva



- **Junio de 2011.**

Tabla 6. Temperatura y humedad relativa promedio diario para el mes de Junio de 2011 en la ciudad de Neiva.

DIA	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD (%)
1	27,9	67
2	27,1	70
3	25,7	80
4	23	92
5	26,4	76
6	27,5	68
7	26,8	73
8	26,4	75
9	27,9	68
10	28,4	66
11	27,3	62
12	29,4	56
13	27,1	66
14	27,4	64
15	26,1	72

DIA	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD (%)
16	26,5	65
17	28	62
18	23,7	86
19	27,1	65
20	28,7	62
21	28,2	70
22	28,1	64
23	25,8	71
24	24,5	80
25	27,4	70
26	24,9	78
27	26,7	70
28	28,2	58
29	28,5	62
30	26,1	72

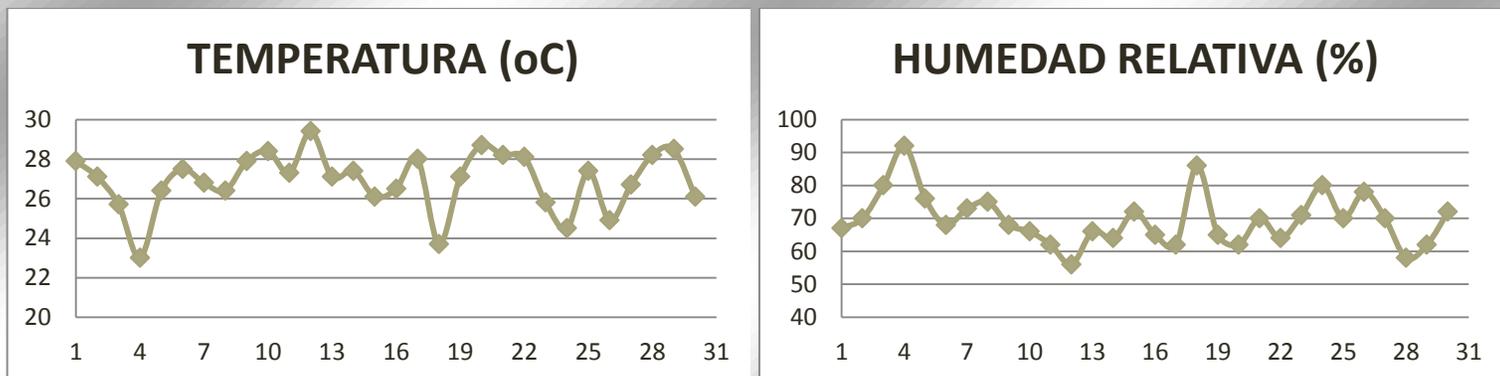
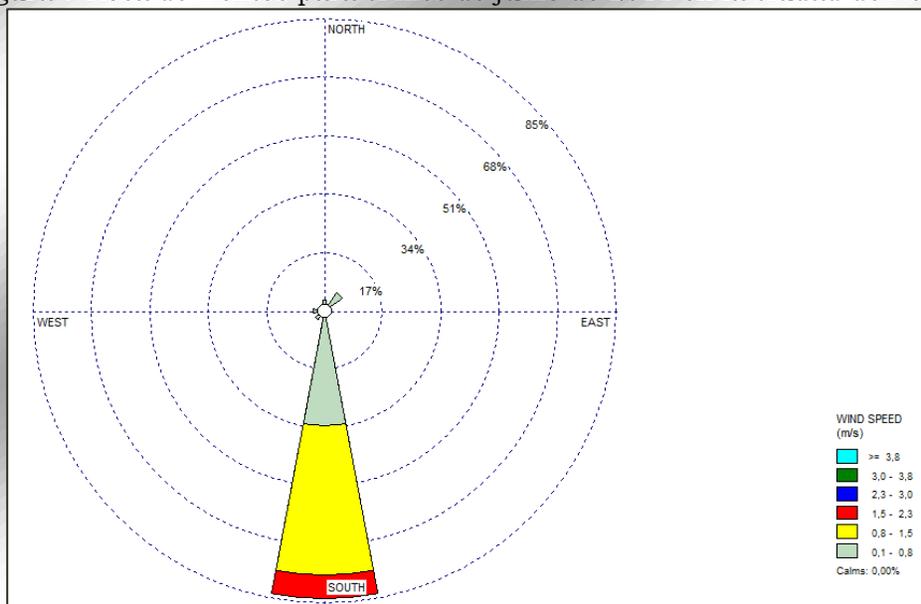


Figura 7 Rosa de vientos para el mes de junio de 2011 en la ciudad de Neiva



• **Julio de 2011.**

Tabla 7. Temperatura y humedad relativa promedio diario para el mes de Julio de 2011 en la ciudad de Neiva.

DIA	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD (%)
1	28,3	63
2	27,8	62

DIA	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD (%)
3	29,2	56
4	26,5	66
5	27,4	65



DIA	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD (%)
6	25,2	75
7	28,2	58
8	27,8	56
9	27,4	62
10	28,4	57
11	27,3	69
12	28,7	54
13	25,5	73
14	27	67
15	26	76
16	25,9	74
17	27,5	70
18	27,5	65

DIA	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD (%)
19	27,8	62
20	28,9	54
21	29,4	52
22	29	53
23	28,8	57
24	28,6	54
25	28,7	54
26	28,5	55
27	28,2	54
28	29	54
29	25,1	72
30	23,8	82
31	27,5	66

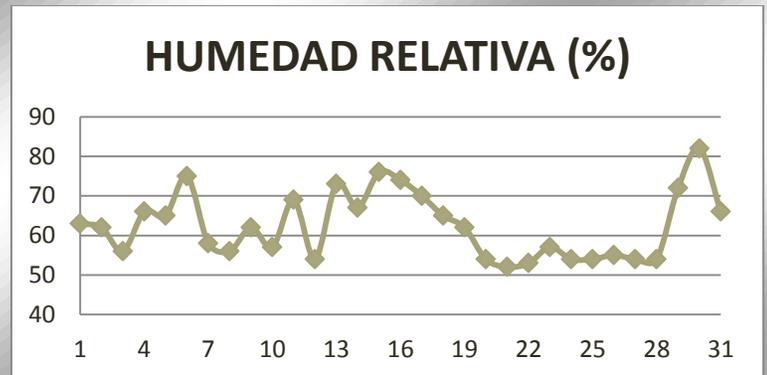
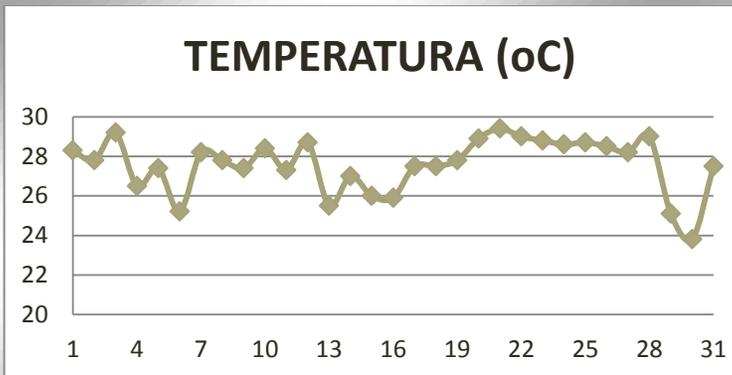
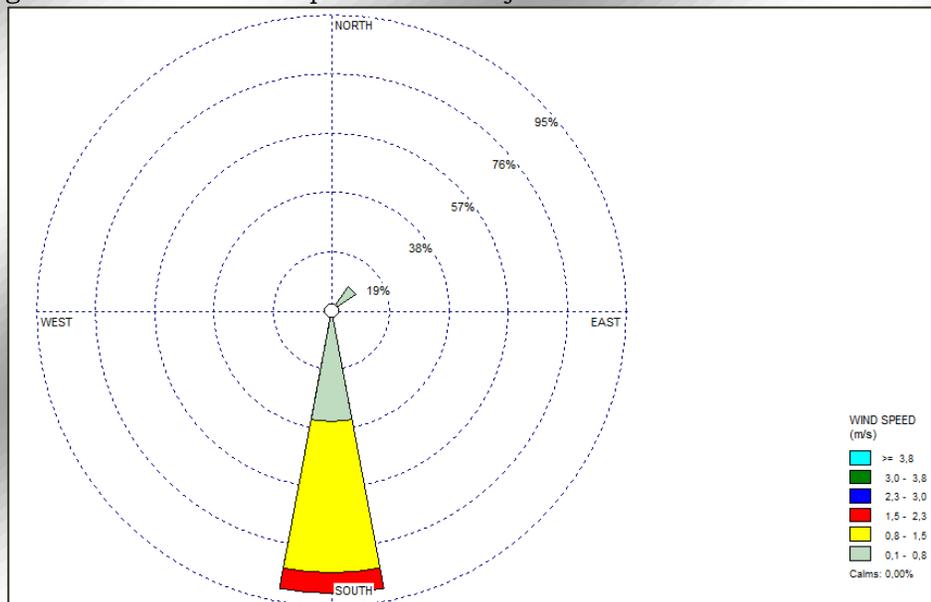


Figura 8 Rosa de vientos para el mes de julio de 2011 en la ciudad de Neiva



- **Agosto de 2011.**

Tabla 8. Temperatura y humedad relativa promedio diario para el mes de Agosto de 2011 en la ciudad de Neiva.

DIA	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD (%)
1	28,1	66
2	30,1	57
3	28,7	64
4	28,4	59
5	30,1	49
6	30,5	42
7	29,1	46
8	30	48
9	29,5	52
10	29	51
11	29,4	46
12	29,1	44
13	29,1	51
14	29,9	44

DIA	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD (%)
15	28,6	51
16	30,3	48
17	29,3	53
18	30,5	52
19	27,9	61
20	26	73
21	28,4	64
22	29,7	54
23	28,3	63
24	29,4	46
25	30	48
26	27,6	55
27	28,9	57
28	29,4	54
29	30,4	48



DIA	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD (%)
30	31	44

DIA	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD (%)
31	27,7	52

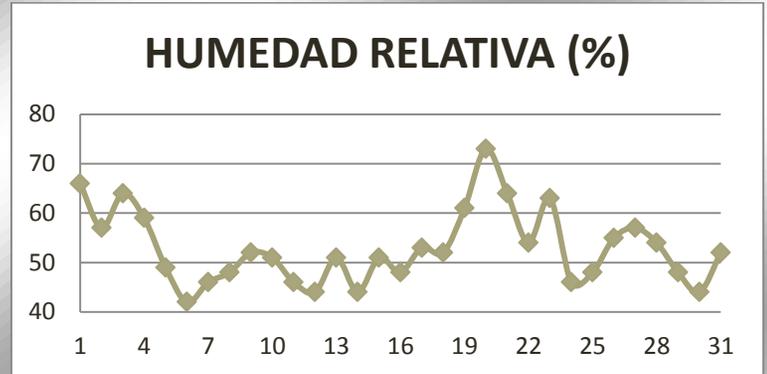
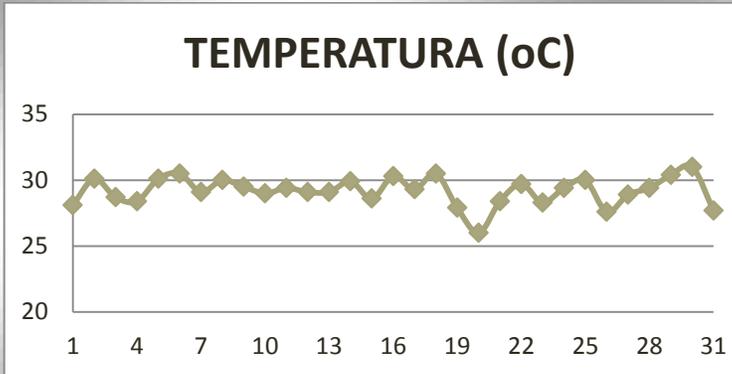
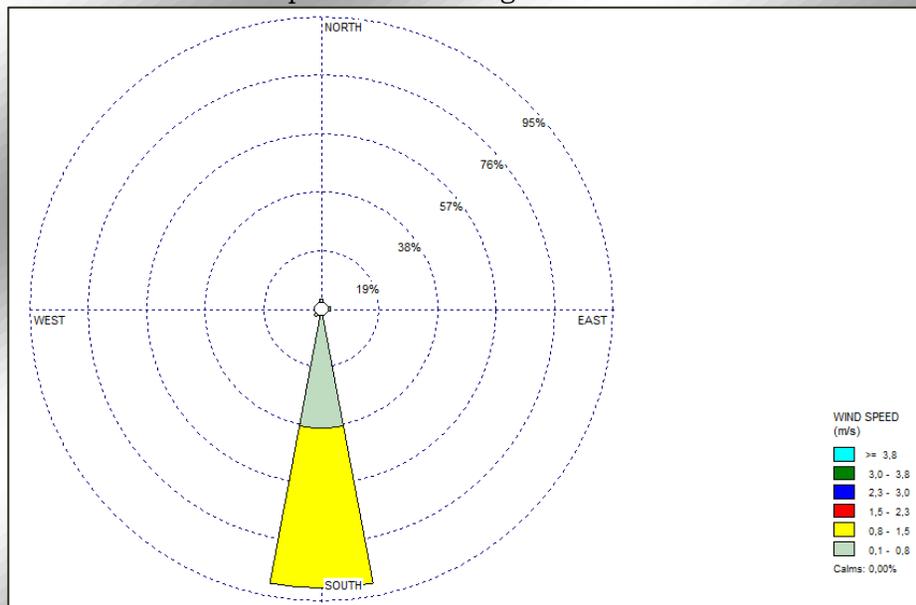


Figura 9 Rosa de vientos para el mes de agosto de 2011 en la ciudad de Neiva





- **Septiembre de 2011.**

Tabla 9. Temperatura y humedad relativa promedio diario para el mes de Septiembre de 2011 en la ciudad de Neiva.

DIA	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD (%)
1	27,4	51
2	28,4	50
3	27,8	49
4	29,4	48
5	30,2	46
6	28,1	54
7	27,6	59
8	30,5	51
9	25,8	71
10	28,9	63
11	27,8	61
12	26,9	70
13	29,3	51
14	29,8	49
15	30,4	45

DIA	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD (%)
16	29,8	49
17	28,5	55
18	26,3	64
19	29,5	58
20	30,5	48
21	26,8	58
22	30,4	50
23	31,2	47
24	30,3	50
25	27,7	63
26	28,9	53
27	30,1	50
28	26,9	59
29	29,3	51
30	30,8	45

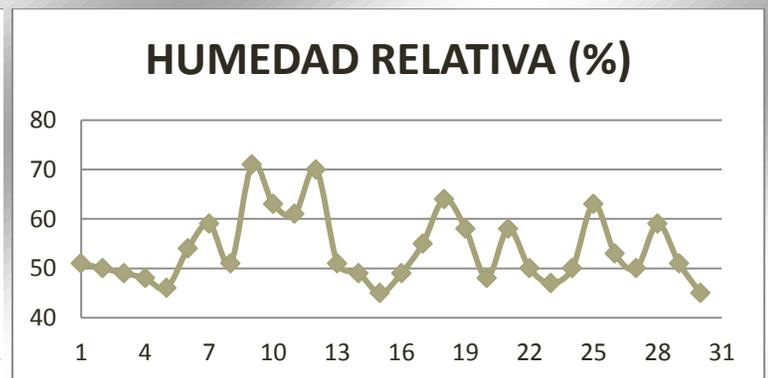
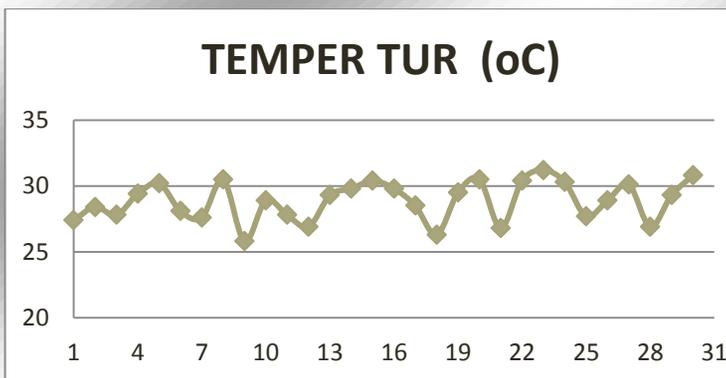
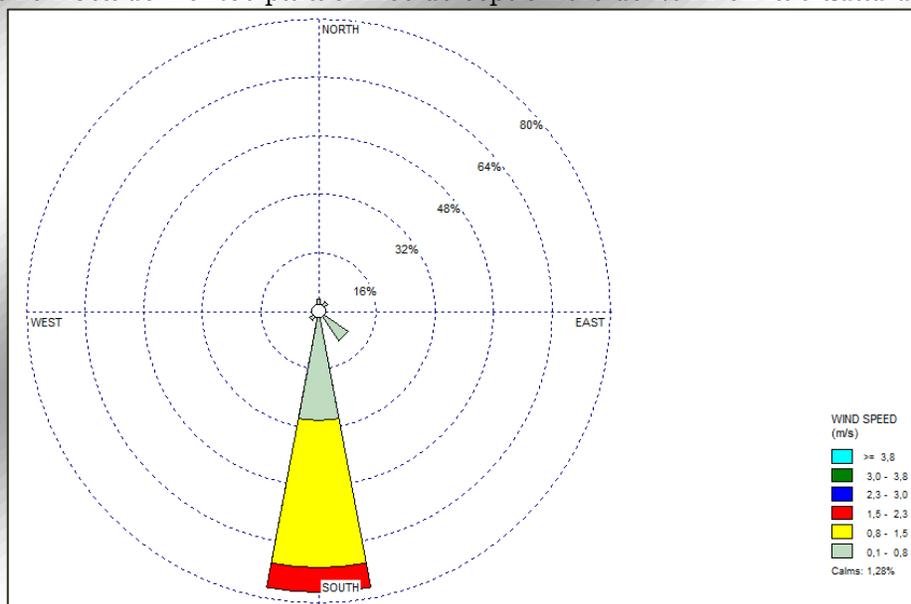


Figura 10 Rosa de vientos para el mes de septiembre de 2011 en la ciudad de Neiva



- **Octubre de 2011.**

Tabla 10. Temperatura y humedad relativa promedio diario para el mes de Octubre de 2011 en la ciudad de Neiva.

DIA	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD (%)
1	30,5	51
2	27,5	69
3	29	62
4	26,3	77
5	28,5	67
6	26,3	79
7	28,5	68
8	27,5	71
9	29,1	62
10	28,3	63
11	27,7	68
12	26,4	76
13	27,5	65
14	28,4	63
15	26,3	73

DIA	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD (%)
16	25,9	76
17	24,8	81
18	24,3	81
19	26,7	71
20	25,5	66
21	26,6	67
22	27,4	65
23	26,2	71
24	27,2	65
25	27,9	63
26	28,6	65
27	28	61
28	27,3	60
29	28,4	61
30	27,4	66
31	28,5	59

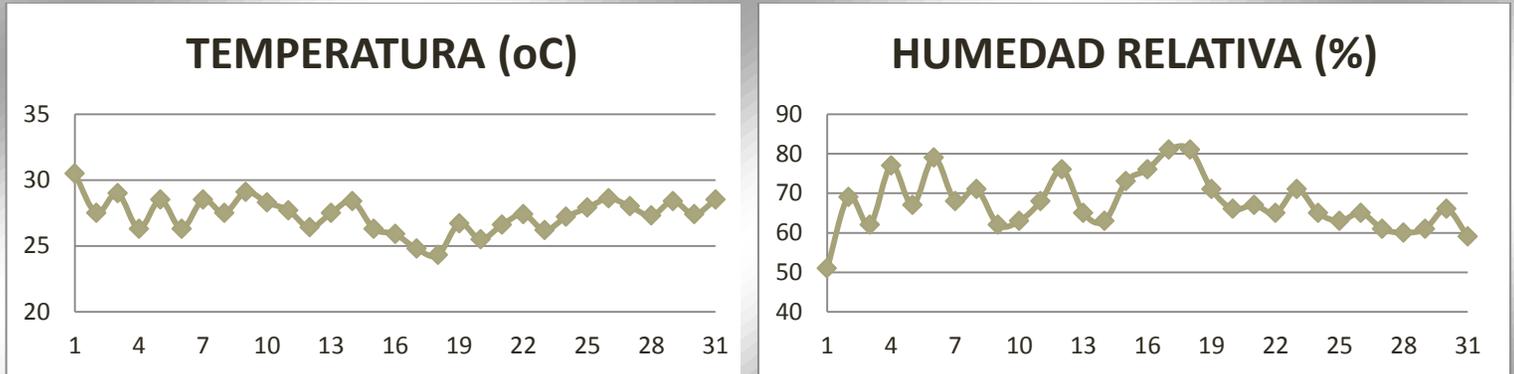
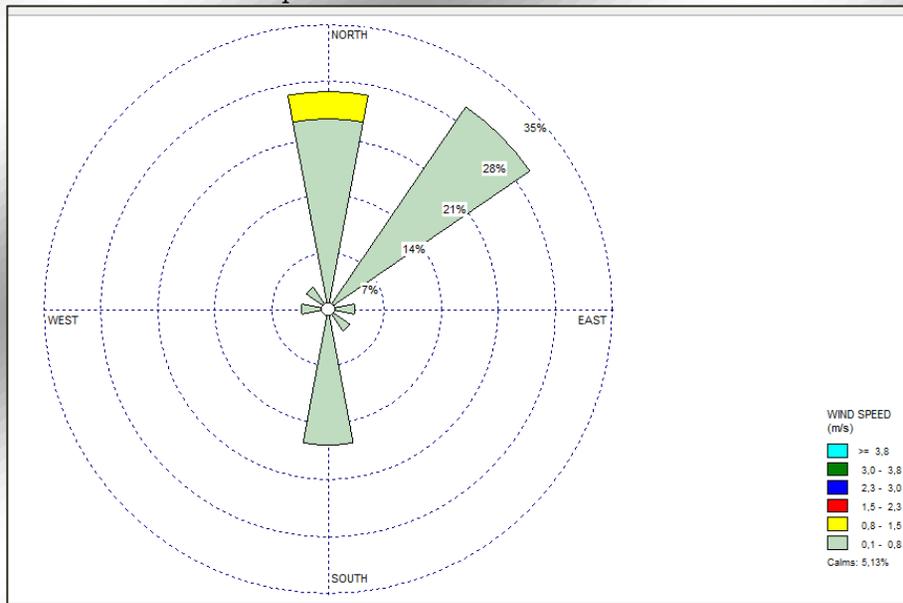


Figura 11 Rosa de vientos para el mes de octubre de 2011 en la ciudad de Neiva



- **Noviembre de 2011.**

Tabla 11. Temperatura y humedad relativa promedio diario para el mes de Noviembre de 2011 en la ciudad de Neiva.

DIA	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD (%)
1	29,1	62

DIA	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD (%)
2	30,7	57
3	28,4	67



DIA	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD (%)
4	27,6	75
5	28	73
6	26,4	78
7	28	70
8	24,9	86
9	26,1	74
10	28,4	69
11	27	76
12	24,1	83
13	24,8	81
14	27,5	71
15	28,4	66
16	27	72
17	26,2	74

DIA	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD (%)
18	25,4	83
19	25,5	76
20	25,8	78
21	26,6	76
22	25,6	78
23	25,8	77
24	24,4	100
25	27,4	72
26	26,9	77
27	25,6	82
28	24,9	84
29	24,9	84
30	25,7	83

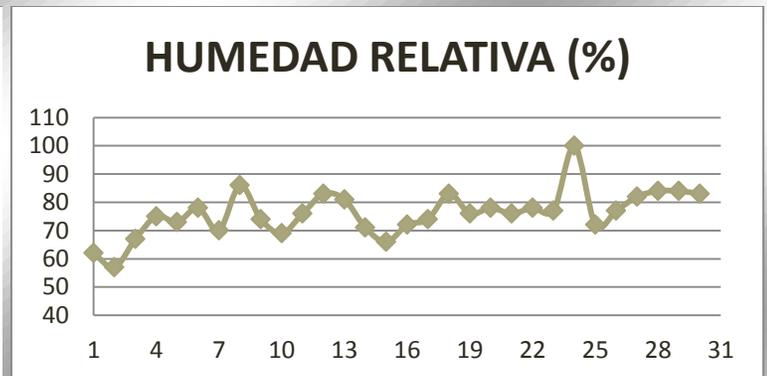
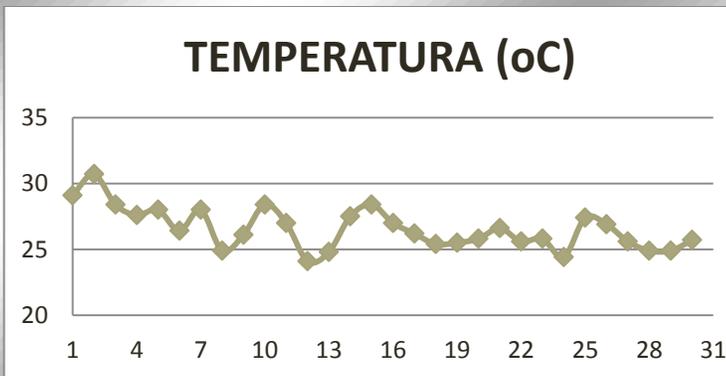
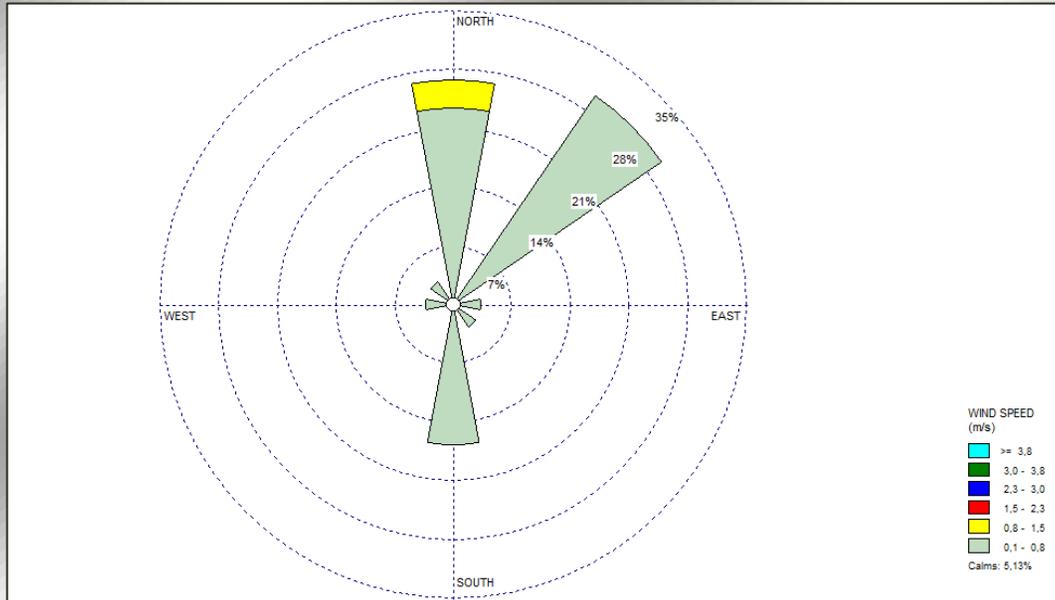


Figura 12 Rosa de vientos para el mes de noviembre de 2011 en la ciudad de Neiva



- **Diciembre de 2011.**

Tabla 12. Temperatura y humedad relativa promedio diario para el mes de Diciembre de 2011 en la ciudad de Neiva.

DIA	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD (%)
1	23,4	91
2	25,6	75
3	26,7	72
4	27,1	73
5	25	86
6	25,4	81
7	24,9	79
8	24,6	85
9	27,1	73
10	27,6	69
11	26	79
12	25	82
13	25,7	81
14	25,8	80
15	26,2	80

DIA	TEMPERATURA (°C)	HUMEDAD (%)
16	25	85
17	25,4	82
18	26,7	78
19	24,4	90
20	26,3	77
21	28,5	68
22	27,7	68
23	27,5	69
24	27,4	73
25	28	69
26	28,8	65
27	28,3	67
28	28,9	67
29	28,4	62
30	28,4	67
31	29	65

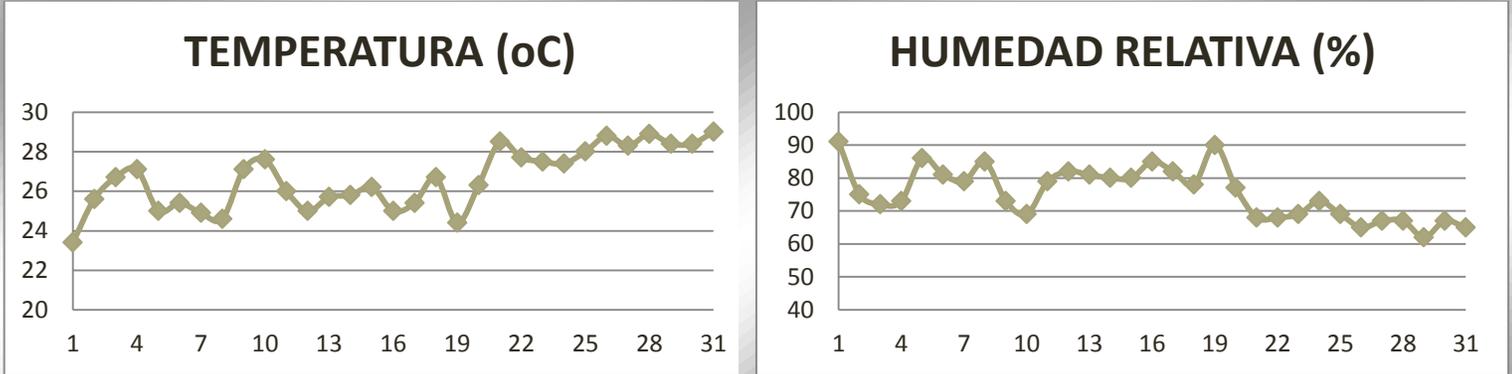


Figura 13 Rosa de vientos para el mes de Diciembre de 2011 en la ciudad de Neiva

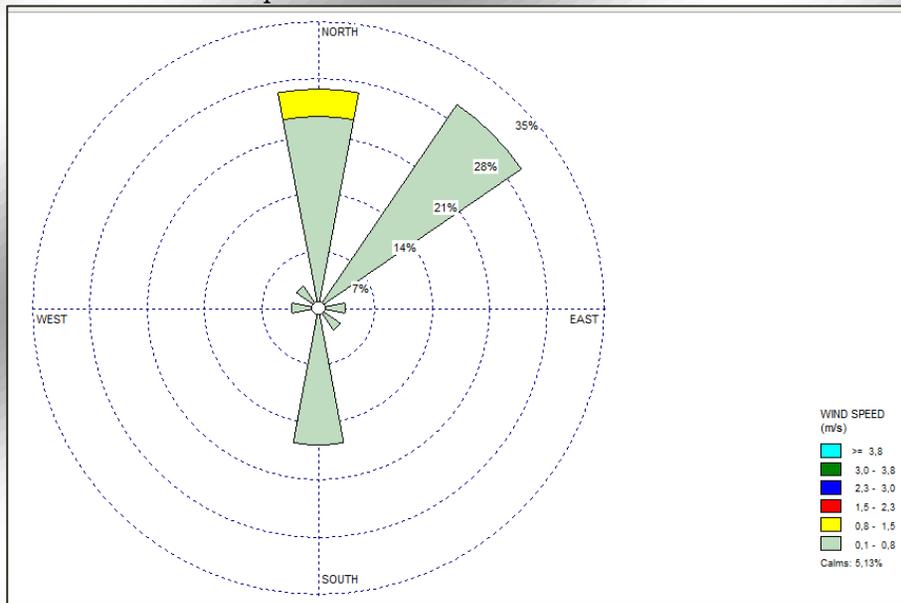
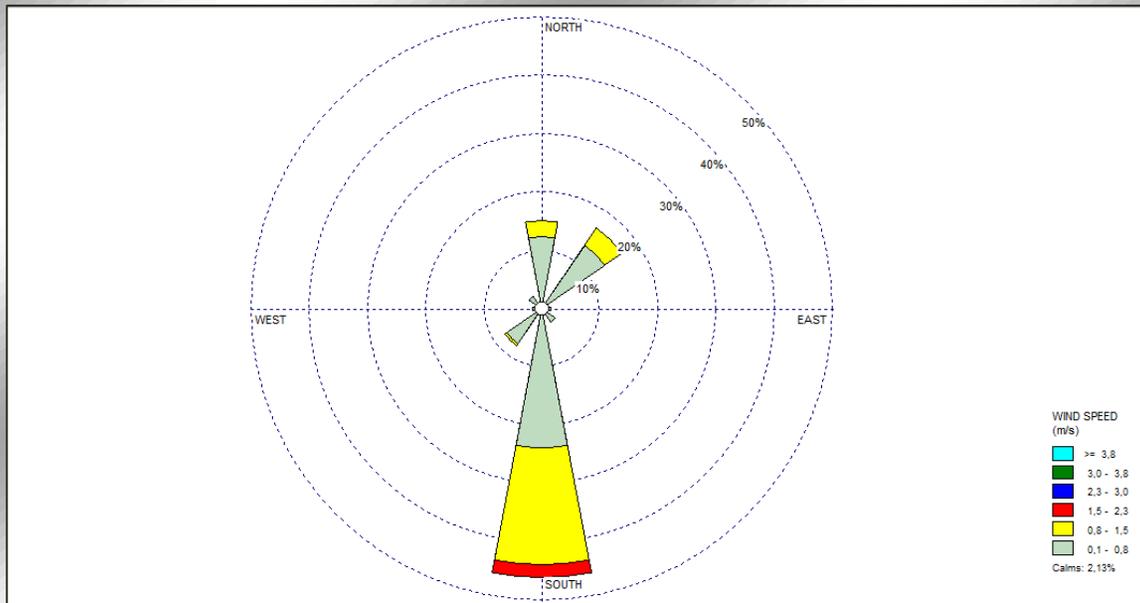


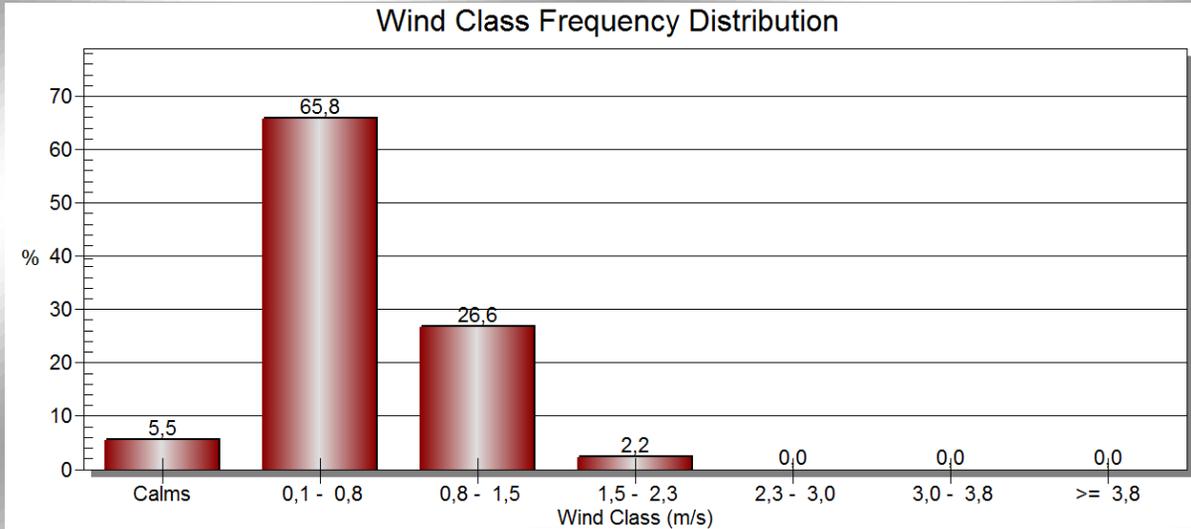
Figura 14 Rosa de vientos para el año 2011 en la ciudad de Neiva



El régimen de vientos para el sitio de medición muestra que el viento dominante con una frecuencia del 45% proviene del sur. Las calmas equivalen a un 5.5% durante el periodo de medición. En cuanto a la velocidad del viento se apreció que el intervalo de intensidad más frecuente en todas las direcciones se encuentra entre 0.1 y 0.8 m/s (figura 14).



Figura 15 Distribucion de frecuencias de las clases de viento para el año 2011 en la ciudad de Neiva





## 5. MÉTODOS DE MEDICIÓN

### 5.1. PARTÍCULAS RESPIRABLES (PM10).

Las partículas respirables (PM10) fueron determinadas utilizando el método gravimétrico (metodología de la Environmental Protection Agency adoptada por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial).

El muestreo de material particulado respirable (PM10) se realiza mediante un equipo denominado muestreador de bajo volumen, el cual se compone esencialmente de un motor de succión, un portafiltros y una caseta, tal como se muestra en la figura 2. La tabla 2 presenta las especificaciones técnicas del equipo muestreador para partículas respirables (PM10).

El método de referencia, permite medir la concentración de partículas menores de 10  $\mu\text{m}$  en el aire por medio de un muestreador de bajo volumen adecuadamente instalado, que succiona a través de un filtro de fibra de cuarzo una cantidad determinada de aire (aproximadamente 1.02 a 1.24  $\text{m}^3/\text{min}$  a condiciones reales al interior de una caseta o coraza de protección, durante un período de muestreo de  $24 \pm 1$  horas).

La velocidad de flujo del aire muestreado y la geometría del muestreador permiten coleccionar partículas menores de 10  $\mu\text{m}$  de diámetro aerodinámico; los filtros utilizados deben tener una eficiencia de recolección mínima del 99% para partículas de 0.30  $\mu\text{m}$ .

En este método, el filtro se pesa en el laboratorio bajo condiciones de humedad y temperatura controladas, antes y después de su utilización, para determinar la ganancia de peso neto (masa). El volumen total de aire muestreado, corregido a condiciones de referencia (101.33 kPa y 25° C), se determina a partir del flujo de aire ambiente medido y del tiempo de muestreo. La concentración de partículas suspendidas totales en el aire ambiente se calcula dividiendo la masa de partículas coleccionadas en el filtro por el volumen de aire muestreado durante  $24 \pm 1$  horas y se expresa en microgramos por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), corregido a condiciones de referencia.

Es necesario el manejo cuidadoso del filtro antes y después del muestreo para evitar errores debido a la pérdida de fibras o partículas del filtro. A continuación se explica el manejo y acondicionamiento del filtro:



- Se numera cada filtro en las orillas opuestas de la cara que no va a ser expuesta.
- Se inspecciona a contra luz cada filtro para detectar posibles orificios o imperfecciones. Los filtros con imperfecciones evidentes fueron descartados.
- Se colocan los filtros en un desecador durante 24 horas para mantenerlos en condiciones ambientales controladas.
- Seguidamente al paso anterior se pesa cada filtro llevando la fracción al miligramo más cercano y registrando el peso neto del filtro junto con el número del filtro.
- Los filtros no se doblan ni se someten a maltrato antes de efectuar el muestreo.
- Después del muestreo, se apaga el equipo y se quita cuidadosamente el filtro, tocando solamente los bordes del mismo.
- Después de retirado el filtro se vuelve a colocar en un desecador por espacio de 24 horas con el fin de mantenerlos en condiciones ambientales controladas.
- Inmediatamente después del acondicionamiento, se pesa el filtro llevando la fracción al miligramo más cercano y registrando el peso neto del filtro junto con el número del filtro.

El cálculo para obtener la concentración de PM10 en cada uno de los sitios de interés, requiere del peso inicial y final de los filtros y el volumen total de aire muestreado. Este último parámetro se calcula como el producto entre el caudal a condiciones de referencia (25°C y 101.33 kPa) para cada día de medición y el tiempo efectivo de muestreo. A continuación se presenta la ecuación empleada para calcular las concentraciones de partículas suspendidas en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

$$PM10(\mu\text{g}/\text{m}^3) = 10^6 \frac{[(W_f - W_i) - (B_f - B_i)]}{Q_{ref} \times t}$$

En la cual:

$W_f$  = Peso final del filtro (g)

$W_i$  = Peso inicial del filtro (g)

$B_f$  = Peso final del filtro usado como blanco o control (g)

$B_i$  = Peso inicial del filtro usado como blanco o control (g)

$Q_{ref}$  = Caudal de muestreo a condiciones de referencia ( $\text{m}^3/\text{min}$ )

$t$  = Tiempo de muestreo (min.)

10-6 = Factor de conversión de gramos (g) a microgramos ( $\mu\text{g}$ )



## **5.2 DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE PARTÍCULAS FINAS (PM2.5) EN EL AIRE AMBIENTE.**

5.2.1 **Aplicabilidad.** Este método permite medir la concentración másica de las partículas con un diámetro aerodinámico menor o igual a la 2.5 micrómetros ( $\mu\text{m}$ ) nominales en el aire ambiente durante un periodo de 24 horas.

El proceso de medición es no destructivo y la muestra obtenida de PM2.5 puede ser objeto de análisis físicos o químicos posteriores.

5.2.2 **Principio.** Un equipo de muestreo succiona aire ambiente con un caudal de aire constante a través de un separador de partículas (impactador), el cual tiene un diseño especial, donde las partículas son separadas por inercia en dos intervalos de tamaño. La fracción dentro del intervalo de tamaño menor o igual a 2.5 micrómetros (PM2.5) se recolecta en un filtro de politetrafluoroetileno (PTFE) en un periodo de muestreo específico.



Figura 16. Equipo de muestreo de bajo volumen para PM2.5.

Cada filtro es pesado (después del acondicionamiento de la humedad y la temperatura), antes y después de recolectar la muestra, para determinar el peso neto (masa) ganado debido a las partículas finas PM2.5 colectadas. El volumen total de la muestra de aire, corregido a las condiciones de referencia (25 °C y 760 mm Hg), se determina a partir del sistema de medición de caudal, la temperatura ambiente, la presión barométrica y el



tiempo de muestreo. La concentración máscica de las partículas PM<sub>2.5</sub> en el aire ambiente se calcula como la masa total de las partículas recolectadas en el intervalo de tamaño menor o igual a 10 micrómetros dividido por el volumen de aire muestreado y se expresa en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a condiciones de referencia.

### 5.2.3 Intervalo de medición.

5.2.3.1 Límite mínimo de concentración. El límite mínimo de detección de la concentración máscica se estima que es aproximadamente  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a condiciones reales, sobre la base de los cambios observados en campo en la masa en los filtros blancos, en relación con el volumen total de la muestra de aire de  $24 \text{ m}^3$  nominales especificado para 24 horas de muestreo.

5.2.3.2 Límite máximo de concentración. El límite superior del intervalo de la concentración máscica es determinado por la masa acumulada en el filtro más allá en el cual el equipo de muestreo no puede mantener el caudal de aire dentro de los límites especificados, debido al incremento en la caída de presión a través del filtro. Este límite superior no se puede especificar con precisión porque es una función compleja de la distribución del tamaño y tipo de las partículas en el ambiente, la humedad, el tipo filtro utilizado, la capacidad del sistema de control de caudal del equipo de muestreo y tal vez, otros factores.

No obstante, se estima que todos los equipos de muestreo son capaces de medir concentraciones máscicas de PM<sub>2.5</sub> durante 24 horas de por lo menos  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  mientras que el caudal de operación se encuentre dentro de los límites especificados.

5.2.4 **Período de muestreo.** El período de muestreo requerido para las mediciones de la concentración de PM 2.5 por éste método es de 1,380 a 1,500 minutos (23 a 25 horas). Sin embargo, cuando un período de muestreo es inferior a 1,380 minutos, la concentración medida (determinada como la masa de PM<sub>2.5</sub> colectada dividida por el volumen de aire muestreado a condiciones reales), multiplicada por el número real de minutos en el período de muestreo y dividida por 1,440, puede ser usada como si se tratara de una medición válida de la concentración para el propósito específico de determinar a violación de las normas de calidad del aire. Este valor asume que la concentración de PM 2.5 es cero para el resto del período de muestreo y por lo tanto representa la concentración mínima que podría haber sido medida para el periodo completo de muestreo de 24



horas. En consecuencia, si el valor así calculado es lo suficientemente alto como para superar la norma, esta sería una excedencia de la norma válida para el período de muestreo. Cuando se reporte al SISAIRE, este dato debe recibir un código especial para identificarlo, para que no sea combinado con mediciones normales de concentración o utilizado para otros fines.

**5.2.5 Exactitud.** Debido al tamaño y la volatilidad de las partículas que constituyen el material particulado del aire varían en un amplio intervalo y la concentración másica de las partículas varía con el tamaño de las partículas, es difícil definir la exactitud de las mediciones de partículas PM<sub>2.5</sub> en un sentido absoluto. La exactitud de las mediciones de partículas PM<sub>2.5</sub> se define por lo tanto en un sentido relativo, haciendo referencia a las mediciones proporcionadas por este método de referencia.

**5.2.6 Precisión.** Un coeficiente de variación del 10% o mejor ha sido establecido para los datos de monitoreo de PM 2.5.

#### **5.2.7 Aparatos.**

5.2.7.1 Equipo de muestreo PM<sub>2.5</sub>.

5.2.7.1.1 Configuración. El equipo de muestreo debe tener una entrada para la muestra de aire, de modo que la muestra de aire sea succionada en forma descendente, un separador de partículas por tamaño (impactador), un portafiltros, una bomba de succión y sistema de control de caudal, un dispositivo para medir el caudal, un sistema para medir la temperatura del ambiente y del filtro, un sistema para medir la presión barométrica, un temporizador, un encerramiento de protección de las condiciones ambientales externas, y controles mecánicos, eléctricos o electrónicos adecuados capaces de cumplir o superar las especificaciones de diseño y funcionamiento. Las especificaciones de funcionamiento requieren que el equipo de muestreo:

- Proporcionar el control automático del caudal de muestreo y otros parámetros de operación.
- Monitorear estos parámetros de operación, tales como temperatura ambiente y presión.
- Suministrar esta información al operador del equipo de muestreo al final de cada período de muestreo en forma digital.

5.2.7.1.2 Altura de muestreo. El equipo de muestreo debe estar equipado con una base para mantener el equipo de muestreo estable, en posición vertical, de manera que el centro de la entrada de la muestra de



aire se mantenga en un plano horizontal y este a  $2.0 \pm 0.2$  metros sobre el nivel del piso.

5.2.7.1.3 Caudal de muestreo. La operación apropiada del impactador requiere que las velocidades específicas del aire se mantengan a través del dispositivo. Por lo tanto, el caudal de diseño para la muestra de aire a través de la entrada será de 16.67 L/min ( $1.0 \text{ m}^3/\text{h}$ ) a condiciones reales a la temperatura y la presión de la muestra de aire a la entrada. El caudal, medido o promediado sobre intervalos de no más de 5 minutos en un periodo de 24 horas, no deberá variar en más de  $\pm 5\%$  del caudal especificado (16.67 L/min) durante todo el período de muestreo.

5.2.7.1.4 Medición de caudal. El equipo de muestreo deberá contar con un mecanismo para medir e indicar el caudal de muestreo instantáneo a condiciones reales a la temperatura y la presión de la muestra de aire a la entrada, con una precisión de  $\pm 2\%$ . El caudal medido deberá estar disponible para ser mostrado al operador del equipo de muestreo en cualquier momento, ya sea en el modo de muestreo o de espera, y la medición se debe actualizar por lo menos cada 30 segundos.

5.2.7.1.5 Condiciones de operación. El equipo de muestreo requiere funcionar adecuadamente y cumplir con todos los requisitos especificados en los siguientes intervalos de operación:

- Temperatura ambiente: entre  $-30$  a  $+45$  °C (Aunque por razones prácticas, el intervalo de temperatura sobre el cual los equipos de muestreo requieren ser ensayados es de  $-20$  a  $+40$  °C, el equipo de muestreo deberá estar diseñado para funcionar adecuadamente en este intervalo amplio de temperaturas).
- Humedad relativa del ambiente: entre 0 y 100%.
- Presión barométrica: entre 600 y 800 mm Hg.

5.2.7.2 Filtro para la recolección de las muestras de PM 2.5. Las siguientes son las especificaciones de diseño y rendimiento:

- Tamaño: circular, con un diámetro de  $46.2 \pm 0.25$  mm.
- Medio: politetrafluoroetileno (teflón PTFE) con anillo de soporte integral.
- Anillo de soporte: polimetilpenteno (PMP) o cualquier material inerte equivalente de  $0.38 \pm 0.04$  mm de espesor, diámetro exterior de  $46.2 \pm 0.25$  mm y un ancho de 3.68 mm ( $\pm 0.00$ ,  $-0.51$  mm).
- Tamaño del poro: 2  $\mu\text{m}$  medido por el método ASTM F 316-94.
- Espesor del filtro: de 30 a 50  $\mu\text{m}$ .



- Caída de presión máxima (filtro limpio): 300 mm de H<sub>2</sub>O para un caudal de aire limpio de 16.67 L/min.
- Máxima recolección de humedad: no más de 10 µg de aumento de peso después de 24 horas de exposición a una atmósfera con 40% de humedad relativa, en relación con el peso después de 24 horas de exposición a la atmósfera con un 35% de humedad relativa.
- Eficiencia de colección: superior a 99.7%, medida por el método ASTM D 2986-91 con partículas de 0.3 µm a la velocidad superficial del equipo de muestreo.
- Estabilidad del peso del filtro: La pérdida de peso del filtro debe ser inferior a 20 µg.
- Alcalinidad: < 25 µeq /g de filtro.

#### 5.2.8 **Pesaje del filtro.**

5.2.8.1 Balanza analítica. La balanza analítica utilizada para pesar los filtros deberá ser la adecuada para pesar el tipo y tamaño de los filtros especificados y debe tener una resolución de  $\pm 1$  µg. La balanza deberá ser calibrada, según lo especificado por el fabricante, inmediatamente antes de cada período de sesiones de pesaje.

5.2.8.2 Acondicionamiento del filtro. Todos los filtros de muestreo que se utilicen, deberán ser acondicionados inmediatamente antes de pesarlos antes y después del muestreo, como se especifica a continuación:

- La temperatura media deberá estar entre 20 y 23 °C.
- El control de temperatura deberá ser de  $\pm 2$  °C durante 24 horas.
- La humedad relativa media generalmente deberá estar entre 30 y 40%, pero donde se observa que la humedad relativa media durante el muestreo es inferior a 30%, se permite el acondicionamiento es admisible a una humedad relativa media de  $\pm 5\%$  por ciento de la humedad relativa media del ambiente durante el muestreo, pero no menor del 20%.
- El control de la humedad deberá estar  $\pm 5\%$  de humedad relativa durante 24 horas.
- El tiempo de acondicionamiento no deberá ser menor de 24 horas.

5.2.8.3 Procedimiento de pesaje.

5.2.8.3.1 Los filtros nuevos deben ser colocados en la cámara de acondicionamiento inmediatamente después de su llegada y almacenados allí hasta el pesaje antes del muestreo.

5.2.8.3.2 La balanza analítica debe estar en el mismo ambiente controlado en el que son acondicionados los filtros. Los filtros deben ser



pesados inmediatamente después del período de acondicionamiento, sin exposición intermedia o transitoria a otras condiciones o ambientes.

5.2.8.3.3 Los filtros deben ser acondicionados en las mismas condiciones (humedad dentro de  $\pm 5\%$  de humedad relativa) antes de pesarlos antes y después del muestreo.

5.2.8.3.4 El pesaje antes y después del muestreo debe ser llevado a cabo en la misma balanza analítica.

5.2.8.3.5 El pesaje antes del muestreo (tara) se realizara dentro de los 30 días antes del período de muestreo.

5.2.8.3.6 El acondicionamiento y pesaje del filtro después del muestreo se realizara dentro de los 10 días después del final del periodo de muestreo, a menos que el filtro de la muestra se mantenga a 4 °C o menos durante todo el tiempo entre el retiro del equipo de muestreo y el comienzo del acondicionamiento, en cuyo caso el periodo no debe exceder los 30 días.

5.2.8.3.7 Filtros blancos.

– Los filtros blancos nuevos de campo deben pesarse junto con el pesaje antes del muestreo (tara) de cada lote de filtros de PM 2.5. Estos filtros blancos deben transportarse al sitio de muestreo, instalarse en el equipo de muestreo, retirarse del equipo de muestreo sin la muestra, y volverse a pesar para verificar el control de calidad.

– Los filtros blancos nuevos de laboratorio deben pesarse junto con el pesaje antes del muestreo (tara) de cada lote de filtros de PM 2.5. Estos filtros blancos de laboratorio deben permanecer en el laboratorio en contenedores de protección durante el muestreo en campo y volverse a pesar para verificar el control de calidad.

### 5.2.9 **Calibración.**

5.2.9.1 Requisitos generales. Debe realizarse periódicamente la verificación del sistema de medición de caudal del equipo de muestreo para establecer y mantener la trazabilidad de las mediciones de caudal subsiguientes.

5.2.9.2 Se utilizará para la calibración o la verificación del sistema de medición de caudal del equipo de muestreo un dispositivo estándar de transferencia de caudal con una precisión de  $\pm 2\%$ .

5.2.9.3 Los equipos de muestreo de PM2.5 pueden emplear varios tipos de dispositivos de control y de medición de caudal. El procedimiento especificado para la calibración o verificación del dispositivo de medición de caudal puede variar según el tipo de controlador de caudal y dispositivo de medición de caudal empleado. La calibración deberá ser en términos de



caudal a condiciones reales ( $Q_a$ ), medido a la entrada del equipo de muestreo.

5.2.9.4 Debe establecerse una relación de calibración entre el dispositivo estándar de transferencia de caudal y la lectura del indicador de caudal (una ecuación, curva o familia de curvas de caudal a condiciones reales) con una precisión de 2% sobre el intervalo esperado de temperaturas ambiente y presiones en el cual dispositivo estándar de transferencia de caudal puede ser utilizado. El dispositivo estándar de transferencia de caudal debe calibrarse o verificarse por lo menos cada año.

5.2.9.5 La calibración del dispositivo de medición de caudal del equipo de muestreo estará compuesto por lo menos de tres mediciones separadas de caudal (calibración multipunto) espaciadas uniformemente dentro del intervalo de -10% a 10% del caudal de operación del equipo de muestreo. La verificación del caudal de muestreo consistirá de una medición de caudal en el caudal de operación del equipo de muestreo.

5.2.9.6 Si durante la verificación del caudal, la lectura del indicador de caudal del equipo de muestreo difiere en un  $\pm 2\%$  o más del caudal medido por el dispositivo estándar de transferencia de caudal, debe realizarse una nueva calibración multipunto se realizará y una nueva verificación.

5.2.9.7 Después de la calibración o la verificación, el dispositivo estándar de transferencia de caudal suprimirán debe ser removido del equipo de muestreo y la entrada del equipo de muestreo debe ser reinstalada. Entonces, el caudal normal de operación del equipo de muestreo (en L/min) debe ser determinado con un filtro limpio en campo. Si el caudal indicado por el equipo de muestre difiere  $\pm 2\%$  del caudal del muestreador requerido (16.67 L/min a condiciones reales), el caudal del equipo de muestreo debe ajustarse.

#### **8.2.10 Procedimiento de medición de PM<sub>2.5</sub>.**

5.2.10.1 El equipo de muestreo debe ser calibrado y operado de acuerdo con las orientaciones específicas y detalladas proporcionadas en el manual de operación del equipo de muestreo y de acuerdo con el programa de aseguramiento de la calidad desarrollado y establecido por el usuario.

5.2.10.2 Cada filtro de muestreo nuevo deberán ser inspeccionados para corregir el tipo y tamaño del filtro, y por agujeros, partículas, u otras imperfecciones. Filtros no aceptados deberán desecharse. Debe asignarse un número de identificación único a cada filtro y establecerse un registro de información para cada filtro. Si el número de identificación del filtro no puede marcarse directamente sobre el filtro, se deben utilizar medios



alternativos, tales como un número de identificación de los contenedores de almacenamiento.

5.2.10.3 Instalar un filtro previamente pesado y numerado en el equipo de muestreo siguiendo las instrucciones suministradas en el manual de operación del equipo de muestreo.

5.2.10.4 El equipo de muestreo deberá ser revisado y preparado para la recolección de la muestra de acuerdo con las instrucciones que se proporcionan en el manual de operación del equipo de muestreo y con el programa de aseguramiento de la calidad establecido por el usuario.

5.2.10.5 El temporizador del equipo de muestreo debe quedar programado para iniciar la colección de la muestra a la hora deseada y detener la colección de la muestra 24 horas después.

5.2.10.6 Se registra la información relacionada con la recolección de la muestra (ubicación o número de identificación, fecha de muestreo, número de identificación del filtro, y número de serie y modelo del equipo de muestreo).

5.2.10.7 El equipo debe coleccionar la muestra de partículas PM<sub>2.5</sub> durante un periodo de tiempo establecido de  $24 \pm 1$  hora.

5.2.10.8 Dentro de las 96 horas después de finalizado el periodo de recolección de la muestra, el filtro, mientras aún se encuentre en el equipo de muestreo, se retira cuidadosamente del equipo de muestreo, siguiendo las instrucciones que se proporcionan en el manual de operación del equipo de muestreo y el programa de aseguramiento de la calidad establecido por el usuario, y se coloca en contenedor de protección. Este protector deberá ser hecho de metal y no contener material suelto que pueda ser transferido al filtro. El protector debe mantener el casete del filtro de una forma segura, de tal manera que la cubierta no entre en contacto con la superficie del filtro.

5.2.10.9 El volumen total de la muestra (en m<sup>3</sup> a condiciones reales) para el período de muestreo y el tiempo transcurrido deberá obtenerse del equipo de muestreo y se registrará de acuerdo a las instrucciones que se proporcionan en el manual de operación del equipo de muestreo. También se registran todas las indicaciones de advertencia del equipo de muestreo y cualquier otra información requerida por el programa de aseguramiento de la calidad.

5.2.10.10 Deben registrarse todos los factores relacionados con la validez o representatividad de la muestra, tales como la manipulación o mal funcionamiento del equipo de muestreo, condiciones meteorológicas inusuales, incendios o tormentas de polvo, construcciones, etc. como lo exige el programa de aseguramiento de la calidad. La aparición de una bandera de advertencia durante un período de muestreo no



necesariamente indica una muestra no válida, sino que puede indicar la necesidad de revisar el control de calidad de los datos por un encargado del aseguramiento de la calidad para determinar la validez de la muestra.

5.2.10.11 Después de retirado del equipo de muestreo, el filtro expuesto que contiene la muestra de PM2.5 debe ser transportado a un ambiente adecuado, idealmente tan pronto como sea posible, antes de 24 horas para su acondicionamiento. Durante el período comprendido entre el retiro del filtro del equipo de muestreo y el inicio del acondicionamiento del filtro, el filtro debe mantenerse tan frío como sea factible y protegido de la exposición a temperaturas superiores a 25 °C.

5.2.10.12 El filtro expuesto que contiene la muestra de partículas PM2.5 debe volverse a pesar inmediatamente después del acondicionamiento.

5.2.11 **Cálculos.** La concentración de PM 2.5 se calcula como:

5.2.11.1 Se calcula el caudal promedio a condiciones de referencia en el periodo de muestreo ( $Q_{ref}$ ). Cuando el indicador de caudal del equipo de muestreo es calibrado a condiciones reales ( $Q_a$ ), el caudal a condiciones de referencia se calcula como:

$$Q_{ref} = Q_a \left[ \frac{P_a}{T_a} \right] \left[ \frac{T_{ref}}{P_{ref}} \right]$$

En la cual:

$Q_{ref}$  = Caudal de aire muestreado a condiciones de referencia, m<sup>3</sup>/min.

$Q_a$  = Caudal de aire muestreado a condiciones reales, m<sup>3</sup>/min.

$P_a$  = Presión barométrica, kPa (o mm Hg).

$T_a$  = Temperatura ambiente, K.

$T_{ref}$  = Temperatura de referencia (298 K).

$P_{ref}$  = Presión de referencia (101,3 kPa o 760 mm Hg).

8.1.11.2. Se calcula la concentración de PM2.5 como:

En la cual:

$PM_{2.5}$  = Concentración másica de partículas PM2.5 a condiciones de referencia, µg/m<sup>3</sup>.

$W_f$  = Peso final del filtro recolector de partículas PM2.5, g.

$W_i$  = Peso inicial del filtro recolector de partículas PM2.5, g.

$B_f$  = Peso final del filtro blanco, g.

$B_i$  = Peso inicial del filtro blanco, g.

$Q_{ref}$  = Caudal de aire muestreado a condiciones de referencia, m<sup>3</sup>/min.

106 = Conversión de g a µg.

$t$  = Tiempo de muestreo, min.



## 6. METODOS DE INTERPOLACION.

El kriging puede ser entendido como una *predicción lineal* o una forma de inferencia bayesiana. Parte del principio: *puntos próximos en el espacio tienden a tener valores más parecidos que los puntos más distantes*. La técnica de kriging asume que los datos recogidos de una determinada población se encuentran correlacionados en el espacio. Esto es, si en un vertedero de residuos tóxicos y peligrosos la concentración de zinc en un punto  $p$  es  $x$ , será muy probable que se encuentren resultados muy próximos a  $x$  cuanto más próximos se esté del punto  $p$  (principio de geoestadística). Sin embargo, desde una cierta distancia de  $p$ , ciertamente no se encontrarán valores próximos a  $x$  porque la correlación espacial puede dejar de existir.

Se considera al método de kriging del tipo MELI (Mejor Estimador Lineal Insesgado) o ELIO (Estimador Lineal Insesgado Óptimo): es lineal porque sus estimaciones son combinaciones lineales ponderadas de los datos existentes; y es insesgado porque procura que la media de los errores (desviaciones entre el valor real y el valor estimado) sea nula; es el mejor (óptimo) porque los errores de estimación tienen una variancia (variancia de estimación) mínima. El término kriging abarca una serie de métodos, el más común es el siguiente:

### Tipos de Kriging

#### Kriging simples

Asume que las medias locales son relativamente constantes y de valor muy semejante a la media de la población que es conocida. La media de la población es utilizada para cada estimación local, en conjunto con los puntos vecinos establecidos como necesarios para la estimación

#### Kriging ordinario

Las medias locales no son necesariamente próximas de la media de la población, usándose apenas los puntos vecinos para la estimación. Es el método más ampliamente utilizado en los problemas ambientales.

#### Cokriging

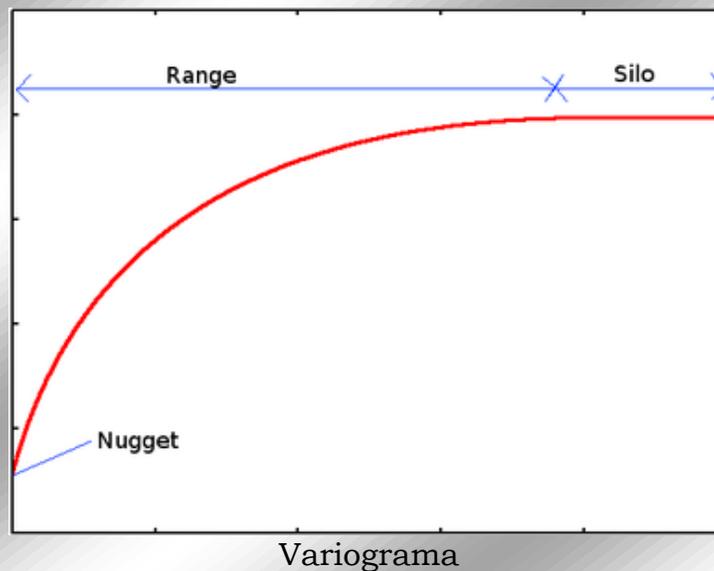
Es una extensión de las situaciones anteriores en las que dos o más variables tienen una dependencia espacial y esa variable se estima que no

se muestra con la intensidad con la que otros son variables dependientes, con estos valores y sus dependencias para estimar la variable requiere

### Conceptos matemáticos

El método de Kriging utiliza diversas teorías exployadas en la estadística. En tanto, para que esta teoría estadística se vea más clara en el ámbito de aplicación; se explican algunos conceptos

### Semivariancia y semivariograma



Una semivariancia es la medida del grado de dependencia espacial entre dos muestras. La magnitud de la semivariancia entre dos puntos depende de la distancia entre ellos, implicando en semivariancias menores para distancias menores y semivariancias mayores para distancias mayores. El gráfico de las semivariancias en función de la distancia a un punto es llamado de semivariograma. A partir de una cierta distancia, la semivariancia no más aumentará con la distancia y se estabilizará en un valor igual a la *variancia media*, dando a esa región el nombre de silo o patamar (*sill*). La distancia entre el inicio del semivariograma al comienzo del silo recibe el nombre de *rango*. Al extrapolar la curva del semivariograma para la distancia cero, podemos llegar a un valor no-nulo de semivariancia. Ese valor recibe el nombre de efecto pepita (*Nugget Effect*).



## Modelos de Variograma

En el Método de Kriging normalmente son usados cuatro tipos de variogramas: usadas las siguientes variables:

$v$ : variancia

$c_0$ : *nugget*

$a$ : silo

$c_0 + c$ : variancia asintótica

$h$ : distancia de separación

### Linear

Este modelo no presenta **silo** y es muy simple. Su curva puede ser representada por:

$$v = c_0 + ch$$

### Esférico

Una forma esférica es la más utilizada en el silo. Su forma es definida por:

$$v = \begin{cases} c_0 + c[1.5(\frac{h}{a}) - 0.5(\frac{h}{a})^3], & \text{se } h < a \\ c_0 + c, & \text{se } h > a \end{cases}$$

### Exponencial

La curva de variograma exponencial respeta la siguiente ecuación:

$$v = c_0 + c(1 - e^{-\frac{h}{b}})$$

### Gaussiano

Una forma gaussiana es dada por:

$$v = \begin{cases} c_0 + c(1 - e^{-\frac{h^2}{a^2}}), & \text{se } h < a \\ c_0 + c, & \text{se } h > a \end{cases}$$



## Método de Kriging

### Determinación del semivariograma

Tomando como base una simulación de un sistema de dos dimensiones (2 D) que contienen un número finito de puntos donde es posible una medición de cualquier tamaño. Luego de la adquisición de estos datos, se iniciará la interpolación Kriging buscando alcanzar una mayor resolución. El primer paso es construir un semivariograma experimental. Para tal, se calcula la semivariancia de cada punto en relación a los demás y se ve en un gráfico de la semivariancia por la distancia

$$v(h = d_{ip}) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (f_i - f_p)^2$$

A partir de ese gráfico se estima el modelo de variograma que mejor se aproxima a la curva obtenida. El efecto pepita puede estar presente en el semivariograma experimental y debe ser considerado. Determinado el modelo de semivariograma a ser usado, se inicia la fase de cálculos. Siendo el semivariograma una función que depende de la dirección, es natural que presente valores diferentes conforme la dirección, recibiendo este fenómeno el nombre de anisotropía. Un caso de semivariograma presente una forma semejante en todas las direcciones del espacio, va a depender de  $h$ , diciéndose que es una estructura isotrópica, *i. e.*, sin direcciones privilegiadas de variabilidad

### Cálculo de los Pesos

Considere, para el cálculo del kriging, la siguiente fórmula:

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i f_i$$

donde  $n$  es el número de muestras obtenidas,  $f_i$  es el valor obtenido en el punto  $i$  y  $w_i$  es el peso designado al punto  $i$ . A fin de obtener los pesos de cada uno de los  $n$  puntos, para cada uno de ellos se realiza un cálculo de  $w_1, w_2, \dots, w_n$ . Tal procedimiento depende del tipo de kriging que está siendo utilizado. Hacemos hincapié en la siguiente notación

$w_j$ : peso del  $j$ -ésimo punto



$S(d_{ij})$ : valor de la semivariancia de  $d_{ij}$   
 $\lambda$ : variable temporaria

### Kriging ordinario

En ese caso es utilizada la media local de los puntos mostrados. Por consiguiente, debe normalizarse la media de los pesos. Consecuentemente, se tiene un resultado más preciso del Kriging Simple. El uso será de las siguientes ecuaciones para determinar los valores de los pesos en el  $p$ -ésimo punto:

$$\left\{ \begin{array}{l} w_1 S(d_{11}) + w_2 S(d_{12}) + \dots + w_n S(d_{1n}) + \lambda = S(d_{1p}) \\ w_1 S(d_{21}) + w_2 S(d_{22}) + \dots + w_n S(d_{2n}) + \lambda = S(d_{2p}) \\ \vdots \\ w_n S(d_{n1}) + w_2 S(d_{n2}) + \dots + w_n S(d_{nn}) + \lambda = S(d_{np}) \\ w_1 + w_2 + \dots + w_n = 1 \end{array} \right.$$

### Kriging Simple

Para este caso, utilizar la media de todos los dados. Implicando, por tanto, que no se normalice en la ubicación promedio de los pesos, como en el anterior. Así, tenemos casi la misma ecuación, excepto por la exclusión de  $\lambda$  y por la última ecuación. La característica principal de este método es la generación de gráficos más lisos y más estéticamente suaves. Cabe señalar que este caso es menos exacto que el caso anterior. Los valores de los pesos para el  $p$ -ésimo punto serán dados por:

$$\left\{ \begin{array}{l} w_1 S(d_{11}) + w_2 S(d_{12}) + \dots + w_n S(d_{1n}) = S(d_{1p}) \\ w_1 S(d_{21}) + w_2 S(d_{22}) + \dots + w_n S(d_{2n}) = S(d_{2p}) \\ \vdots \\ w_n S(d_{n1}) + w_2 S(d_{n2}) + \dots + w_n S(d_{nn}) = S(d_{np}) \end{array} \right.$$

### Obtención de Punto Interpolado

Cuando llegamos a los valores de  $w_1, w_2, \dots, w_n$ , se calculan los valores de  $f_p$ :



$$f_p = w_1 f_1 + w_2 f_2 + \dots + w_n f_n$$

De esa manera, se calcula el valor interpolado para todos los puntos deseados. Se resalta que solamente deben ser utilizados los valores adquiridos arriba

#### Interpolando Otros Puntos

La obtención del valor interpolado en otro punto requiere la repetición de todos los cálculos realizados a partir de la obtención del modelo de variograma. De esa forma, para aumentar la resolución que se pretendía, se debe recurrir a métodos matemáticos para la resolución computacional. Diversos códigos se han desarrollados para esa resolución, más uno de los mejores algoritmos puede ser obtenido del link de abajo. Fue inicialmente hecho para lenguaje Fortran, y puede ser recodificado para C con la ayuda de la biblioteca `fortran2c`, presentándose totalmente en C



---

## 7. ÍNDICES DE CALIDAD

### 7.1. INDICE DE CALIDAD DEL AIRE

Con el propósito de que las mediciones de la calidad del aire y sus resultados sean entendidos por el público en general con facilidad, se han desarrollado diferentes índices de calidad del aire. En un sentido más amplio un índice ambiental es un número o una clasificación descriptiva de una gran cantidad de datos o información ambiental cuyo propósito principal es simplificar la información para que pueda ser útil a las autoridades ambientales y al público en general.

Los índices ambientales pueden ser útiles cuando cumplen uno o más de los siguientes objetivos:

- Resumir los datos ambientales existentes.
- Comunicar información sobre la calidad del medio afectado.
- Evaluar la vulnerabilidad o susceptibilidad a contaminación de una determinada categoría ambiental.
- Centrarse selectivamente en los factores ambientales claves.
- Servir como base para la expresión del impacto al predecir las diferencias entre el valor del índice con proyecto y el valor del mismo índice sin proyecto.

La Agencia de Protección Ambiental (EPA) realizó una revisión al PSI (2000-2002) con el fin de desarrollar algunas modificaciones teniendo en cuenta la nueva información existente acerca de los contaminantes considerados en su elaboración, y de proporcionar al ciudadano información más clara sobre la contaminación del aire.

En primer lugar, el nombre de “Pollutant Standards Index” (PSI), se sustituyó por el de “Air Quality Index” (AQI). La EPA también decidió añadir una categoría adicional de calidad del aire: “no saludable para grupos sensibles”, justo por encima del nivel estándar (entre 101 y 150). Esto supone cambios en los puntos de corte. Además, a la hora de informar al público se indica, en caso de llegar a este nivel, cuales son los grupos de población con más riesgo

El índice revisado introduce modificaciones en los puntos de corte para el ozono, debidas principalmente a nueva información existente sobre sus



efectos, y se incluyen en el mismo las partículas finas (PM2.5). Asimismo, para informar a la población de una forma más clara, se utilizan colores a la hora de mostrar la calidad del aire

El AQI considera ocho (8) criterios:

- 1) Ser entendido por el público con facilidad,
- 2) Incluir los principales contaminantes y ser capaz de incluir contaminantes nuevos,
- 3) Estar relacionado con normas de calidad del aire,
- 4) Estar basado en hipótesis científicas razonables,
- 5) Ser consistente con los niveles perceptibles de contaminación del aire,
- 6) Representar las variaciones espaciales,
- 7) Mostrar las variaciones diarias y,
- 8) Debe permitir predecir con anticipación de un día.

A partir de estos criterios se desarrollaron la tabla 1 para presentar la información que directamente determinará el AQI.

Tabla 13. Comparación de las concentraciones de los contaminantes con los subíndices de calidad del aire.

PM10	PM2.5	
0 - 54	0 - 15,4	VERDE
55 - 154	15,5 - 40,4	AMARILLO
155 - 254	40,5 - 65,4	NARANJA
255 - 354	65,5 - 150,4	ROJO
355 - 424	150,5 - 250,4	PURPURA
425 - 504	250,5 - 350,4	MARRON
505 - 604	350,5 - 500,4	MARRON

Fuente: IDEAM, 2002



## 8. NORMATIVIDAD AMBIENTAL

### 8.1. CALIDAD DEL AIRE.

Las normas de calidad del aire para cada tipo de contaminante están consignadas en la Resolución 610 del de 2010 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

La Resolución establece:

*Artículo 4. Niveles Máximos Permisibles para Contaminantes Criterio. En la Tabla 14 se establecen los niveles máximos permisibles a condiciones de referencia para contaminantes criterio, los cuales se calculan con el promedio geométrico para PST y promedio aritmético para los demás contaminantes:*

Tabla 14. Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio.

Contaminante	Nivel Máximo Permisible ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Tiempo de Exposición
PST	100	Anual
	300	24 horas
PM10	50	Anual
	100	24 horas
PM2.5	25	Anual
	50	24 horas
SO <sub>2</sub>	80	Anual
	250	24 horas
	750	3 horas
NO <sub>2</sub>	100	Anual
	150	24 horas
	200	1 hora
O <sub>3</sub>	80	8 horas
	120	1 hora
CO	10.000	8 horas
	40.000	1 hora



## 9. RESULTADOS

### 9.1. PARTÍCULAS RESPIRABLES.

Los resultados de las mediciones de partículas respirables en los diferentes puntos se presentan en la tabla 15.

Tabla 15 Concentración de PM10 y PM2.5 a condiciones locales.

Fecha	PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
01/01/2012	51,54	
03/01/2012	36,12	
05/01/2012	29,07	
07/01/2012	2,64	
08/01/2012	13,66	
09/01/2012	17,62	
10/01/2012	23,35	
11/01/2012	22,03	
12/01/2012	37,00	
13/01/2012	39,65	
14/01/2012	29,96	
15/01/2012	32,16	
04/05/2011	9,2	
08/05/2011	15,8	
13/05/2011	27	
16/05/2011	17,3	
18/05/2011	20,2	
20/05/2011	34,6	
24/05/2011	31,7	
26/05/2011	13,5	
28/05/2011	16,1	
30/05/2011	8,3	
01/06/2011	37,8	
03/06/2011	8,3	
05/06/2011	33,6	
07/06/2011	18,8	
09/06/2011	42	
11/06/2011	10	
13/06/2011	11,8	
15/06/2011	18,9	
17/06/2011	47,5	
19/06/2011	23,4	
21/06/2011	30,7	

Fecha	PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
23/06/2011	22,7	
25/06/2011	21,9	
27/06/2011	10	
29/06/2011	42,7	
01/07/2011	32,89	
03/07/2011	28,51	
05/07/2011	22,81	
07/07/2011	27,63	
09/07/2011	41,41	
11/07/2011	14,91	
13/07/2011	21,83	
15/07/2011	12,72	
17/07/2011	23,68	
19/07/2011	18,06	
21/07/2011	28,19	
23/07/2011	18,86	
25/07/2011	19,38	
27/07/2011	26,43	
29/07/2011	31,44	
31/07/2011	17,47	
02/08/2011	45,13	
04/08/2011	46,93	
06/08/2011	22,77	
08/08/2011	28,19	
10/08/2011	27,75	
12/08/2011	48,02	
14/08/2011	24,34	
16/08/2011	33,04	
18/08/2011	48,67	
20/08/2011	17,62	
22/08/2011	26,87	
24/08/2011	20,70	
26/08/2011	23,68	



Fecha	PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
28/08/2011	22,91	
30/08/2011	30,53	
01/09/2011	28,82	
03/09/2011	31,58	
05/09/2011	35,40	
07/09/2011	44,74	
09/09/2011	29,69	
11/09/2011	18,42	
13/09/2011	21,24	
15/09/2011	32,30	
17/09/2011	24,67	
19/09/2011	19,47	
21/09/2011	31,14	8,75
23/09/2011	44,44	14,58
25/09/2011	15,35	6,25
27/09/2011	43,17	11,67
29/09/2011	22,12	20,00
01/10/2011	33,33	10,42
03/10/2011	21,59	7,08
05/10/2011	20,70	6,25
07/10/2011	32,16	10,42
09/10/2011	24,78	7,08
11/10/2011	40,18	8,75
13/10/2011		7,08
15/10/2011	10,57	
17/10/2011	11,84	5,83
19/10/2011	13,10	6,67
21/10/2011	40,17	11,67
23/10/2011	32,46	9,17
25/10/2011	22,47	13,33
27/10/2011	31,42	11,67
29/10/2011	30,40	19,17

Fecha	PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
31/10/2011	42,92	14,58
02/11/2011	38,67	13,75
04/11/2011	24,67	9,17
06/11/2011	11,40	4,17
08/11/2011	15,22	7,08
10/11/2011	25,11	8,33
12/11/2011	11,45	2,08
14/11/2011	19,82	5,00
16/11/2011	22,91	6,25
18/11/2011	10,57	5,83
20/11/2011	13,22	6,25
22/11/2011	15,86	7,08
24/11/2011	11,01	7,08
26/11/2011	24,67	7,92
28/11/2011	20,70	7,50
30/11/2011	18,06	7,08
02/12/2011	17,78	1,67
04/12/2011	16,74	3,75
06/12/2011	5,29	8,75
08/12/2011	7,93	10,83
10/12/2011	19,47	7,92
12/12/2011	13,84	5,83
14/12/2011	19,86	5,83
16/12/2011	11,45	
18/12/2011	15,79	
27/12/2011	45,41	
28/12/2011	44,98	
29/12/2011	44,74	
30/12/2011	69,16	

Nota: Medición de PM10 en el CAM  
Medición de PM2.5 en Sena Industrial



## 10. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 10.1. PARTÍCULAS RESPIRABLES PM10 Y PM2.5.

Tabla 16. Categoría de la calidad del aire según las PM10 y PM2.5.

Fecha	Categoría Ambiental		Fecha	Categoría Ambiental	
	PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
01/01/2012	51,54		25/06/2011	21,9	
03/01/2012	36,12		27/06/2011	10	
05/01/2012	29,07		29/06/2011	42,7	
07/01/2012	2,64		01/07/2011	32,89	
08/01/2012	13,66		03/07/2011	28,51	
09/01/2012	17,62		05/07/2011	22,81	
10/01/2012	23,35		07/07/2011	27,63	
11/01/2012	22,03		09/07/2011	41,41	
12/01/2012	37,00		11/07/2011	14,91	
13/01/2012	39,65		13/07/2011	21,83	
14/01/2012	29,96		15/07/2011	12,72	
15/01/2012	32,16		17/07/2011	23,68	
04/05/2011	9,2		19/07/2011	18,06	
08/05/2011	15,8		21/07/2011	28,19	
13/05/2011	27		23/07/2011	18,86	
16/05/2011	17,3		25/07/2011	19,38	
18/05/2011	20,2		27/07/2011	26,43	
20/05/2011	34,6		29/07/2011	31,44	
24/05/2011	31,7		31/07/2011	17,47	
26/05/2011	13,5		02/08/2011	45,13	
28/05/2011	16,1		04/08/2011	46,93	
30/05/2011	8,3		06/08/2011	22,77	
01/06/2011	37,8		08/08/2011	28,19	
03/06/2011	8,3		10/08/2011	27,75	
05/06/2011	33,6		12/08/2011	48,02	
07/06/2011	18,8		14/08/2011	24,34	
09/06/2011	42		16/08/2011	33,04	
11/06/2011	10		18/08/2011	48,67	
13/06/2011	11,8		20/08/2011	17,62	
15/06/2011	18,9		22/08/2011	26,87	
17/06/2011	47,5		24/08/2011	20,70	
19/06/2011	23,4		26/08/2011	23,68	
21/06/2011	30,7		28/08/2011	22,91	
23/06/2011	22,7		30/08/2011	30,53	



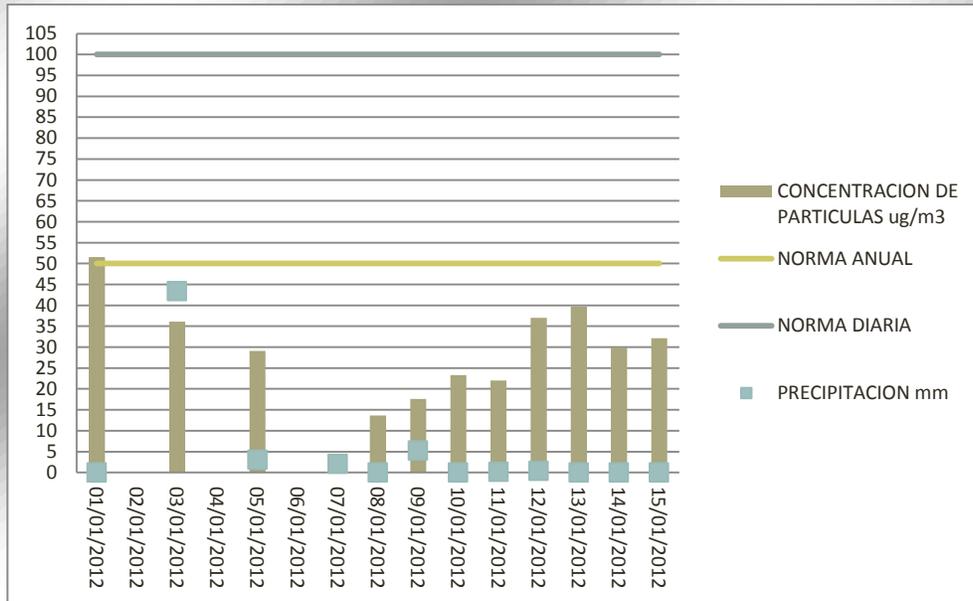
Fecha	Categoría Ambiental	
	PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
01/09/2011	28,82	
03/09/2011	31,58	
05/09/2011	35,40	
07/09/2011	44,74	
09/09/2011	29,69	
11/09/2011	18,42	
13/09/2011	21,24	
15/09/2011	32,30	
17/09/2011	24,67	
19/09/2011	19,47	
21/09/2011	31,14	8,75
23/09/2011	44,44	14,58
25/09/2011	15,35	6,25
27/09/2011	43,17	11,67
29/09/2011	22,12	20,00
01/10/2011	33,33	10,42
03/10/2011	21,59	7,08
05/10/2011	20,70	6,25
07/10/2011	32,16	10,42
09/10/2011	24,78	7,08
11/10/2011	40,18	8,75
13/10/2011		7,08
15/10/2011	10,57	
17/10/2011	11,84	5,83
19/10/2011	13,10	6,67
21/10/2011	40,17	11,67
23/10/2011	32,46	9,17
25/10/2011	22,47	13,33
27/10/2011	31,42	11,67
29/10/2011	30,40	19,17
31/10/2011	42,92	14,58

Fecha	Categoría Ambiental	
	PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
02/11/2011	38,67	13,75
04/11/2011	24,67	9,17
06/11/2011	11,40	4,17
08/11/2011	15,22	7,08
10/11/2011	25,11	8,33
12/11/2011	11,45	2,08
14/11/2011	19,82	5,00
16/11/2011	22,91	6,25
18/11/2011	10,57	5,83
20/11/2011	13,22	6,25
22/11/2011	15,86	7,08
24/11/2011	11,01	7,08
26/11/2011	24,67	7,92
28/11/2011	20,70	7,50
30/11/2011	18,06	7,08
02/12/2011	17,78	1,67
04/12/2011	16,74	3,75
06/12/2011	5,29	8,75
08/12/2011	7,93	10,83
10/12/2011	19,47	7,92
12/12/2011	13,84	5,83
14/12/2011	19,86	5,83
16/12/2011	11,45	
18/12/2011	15,79	
27/12/2011	45,41	
28/12/2011	44,98	
29/12/2011	44,74	
30/12/2011	69,16	

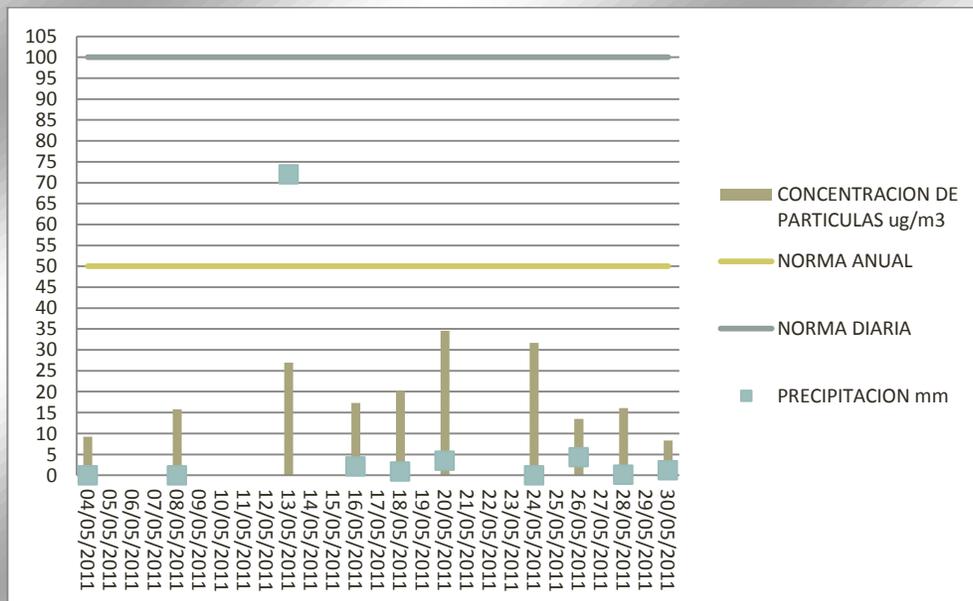
A continuación se muestra gráficamente las concentraciones a condiciones locales de cada mes reportadas tanto para partículas menores de 10 micras PM10 como para partículas menores de 2.5 micras PM2.5.



Gráfica 1 Concentración de partículas menores a 10 micras PM10 del mes de Enero de 2011

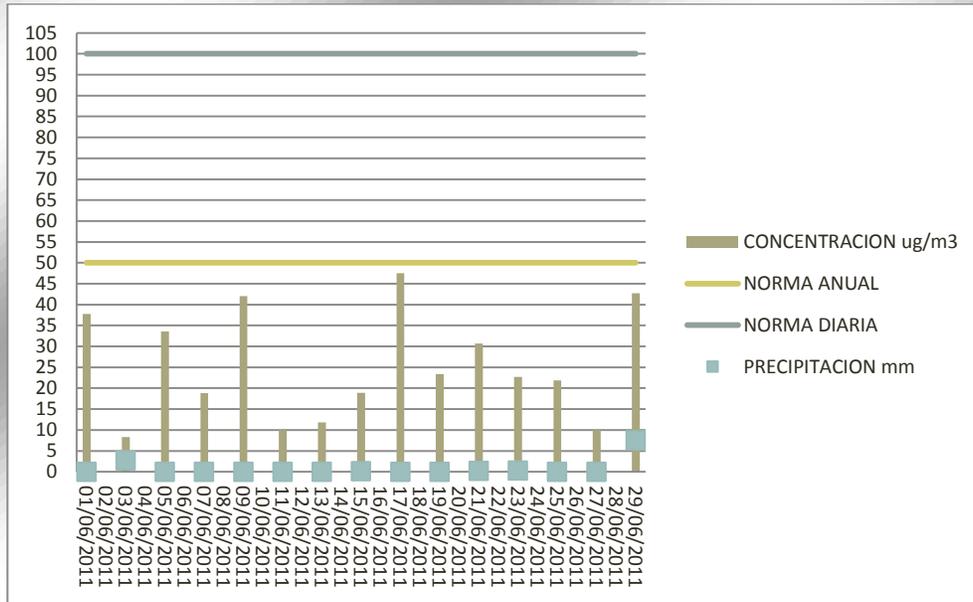


Gráfica 2 Concentración de partículas menores a 10 micras PM10 del mes de Febrero de 2011

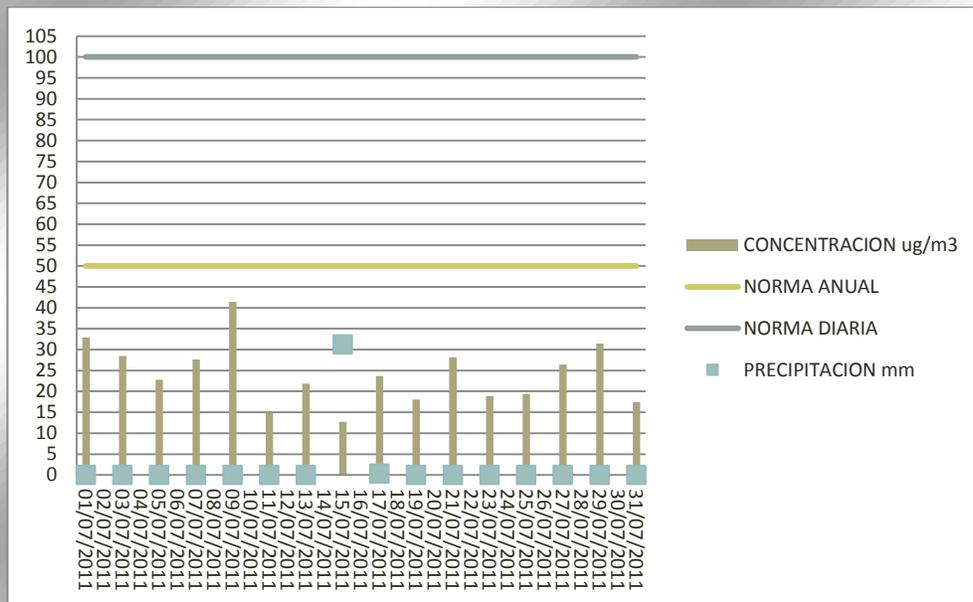




Gráfica 3 Concentración de partículas menores a 10 micras PM10 del mes de Junio de 2011

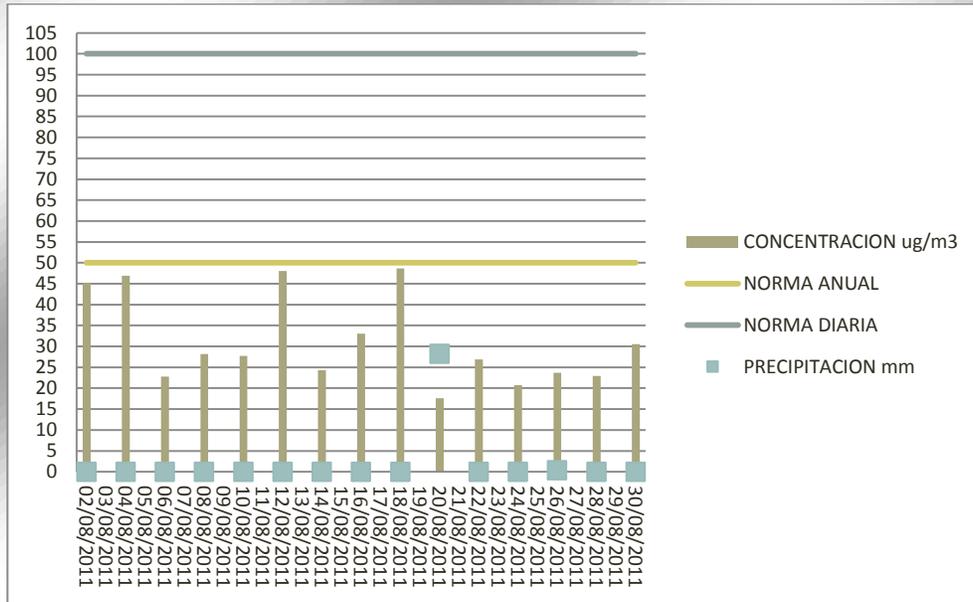


Gráfica 4 Concentración de partículas menores a 10 micras PM10 del mes de Julio de 2011

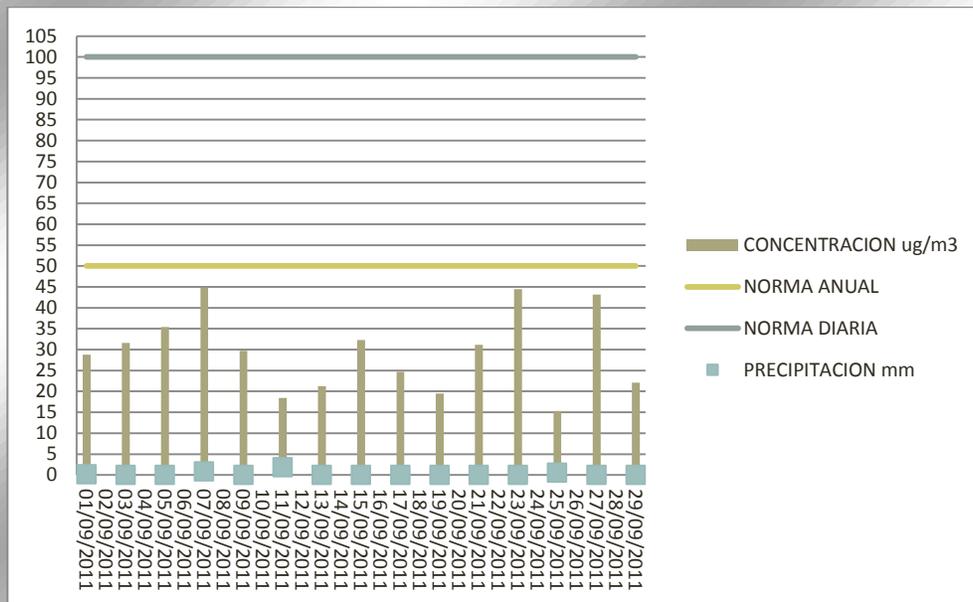




Gráfica 5 Concentración de partículas menores a 10 micras PM10 del mes de Agosto de 2011

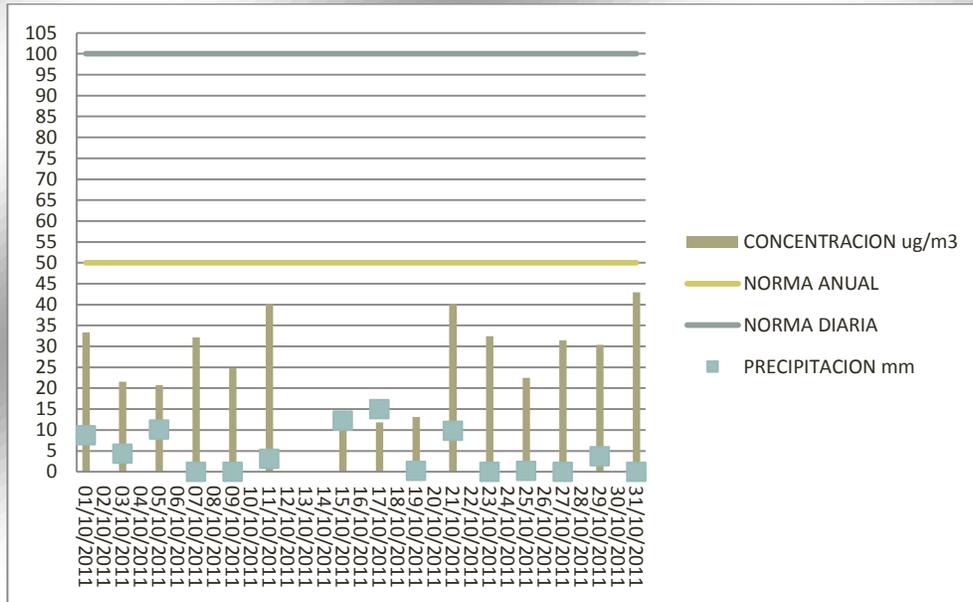


Gráfica 6 Concentración de partículas menores a 10 micras PM10 del mes de Septiembre de 2011

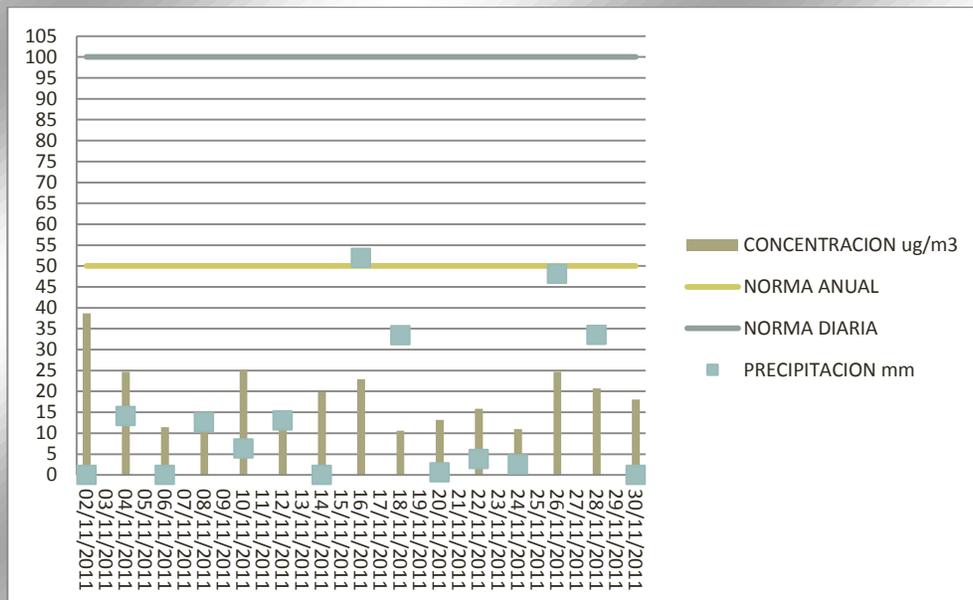




Gráfica 7 Concentración de partículas menores a 10 micras PM10 del mes de Octubre de 2011

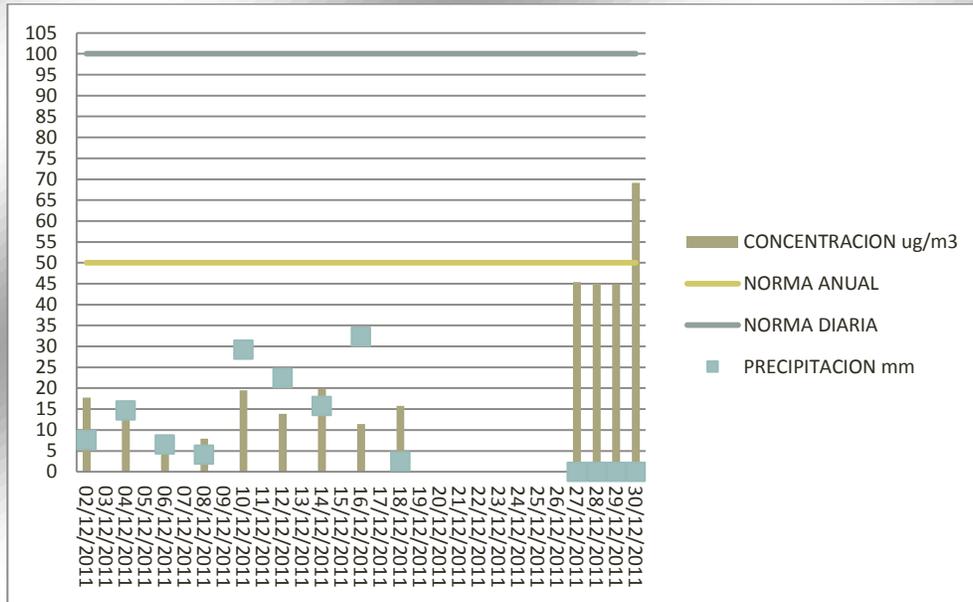


Gráfica 8 Concentración de partículas menores a 10 micras PM10 del mes de Noviembre de 2011

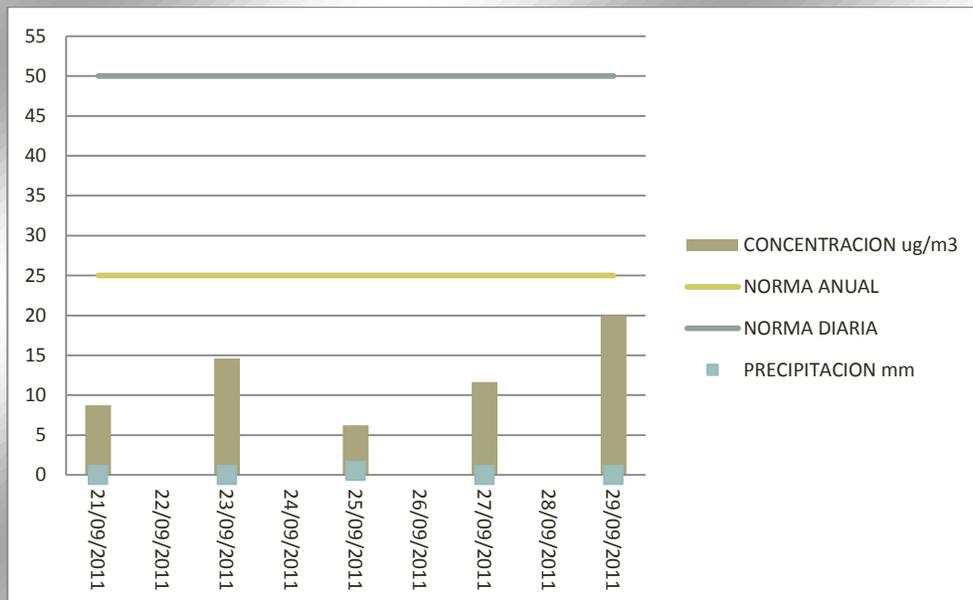




Gráfica 9 Concentración de partículas menores a 10 micras PM10 del mes de Diciembre de 2011

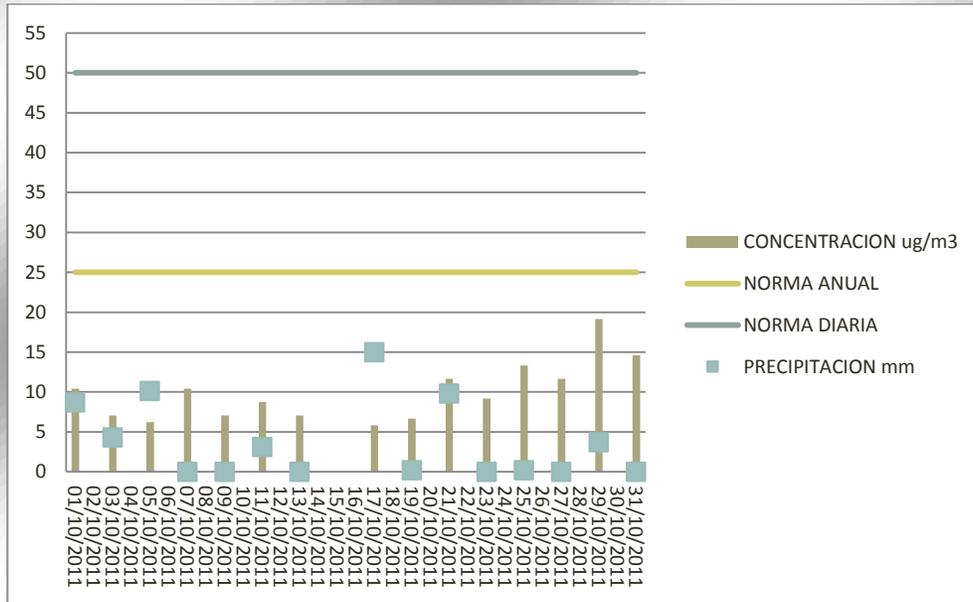


Gráfica 10 Concentración de partículas menores a 2.5 micras PM2.5 del mes de Septiembre de 2011

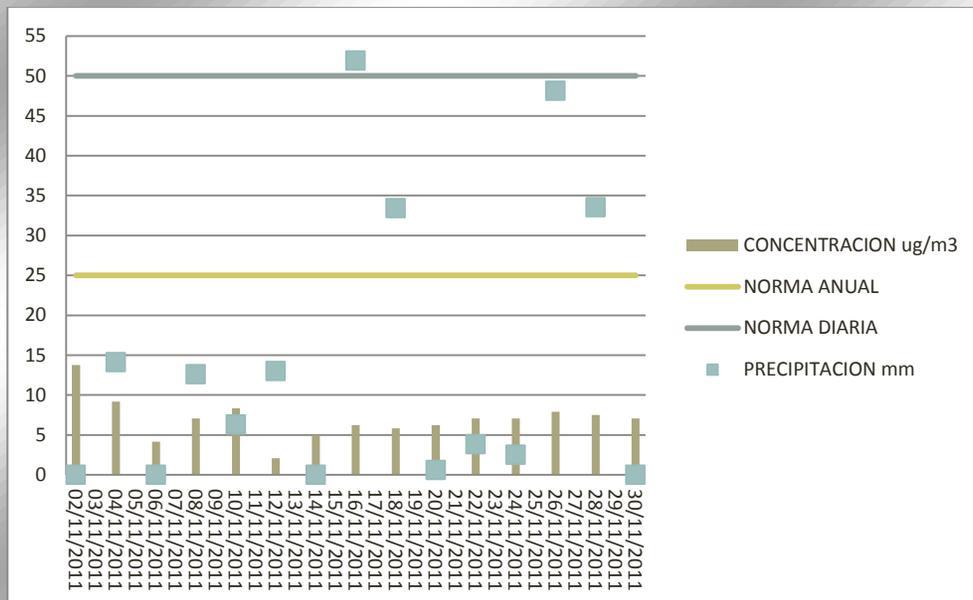




Gráfica 11 Concentración de partículas menores a 2.5 micras PM2.5 del mes de Octubre de 2011

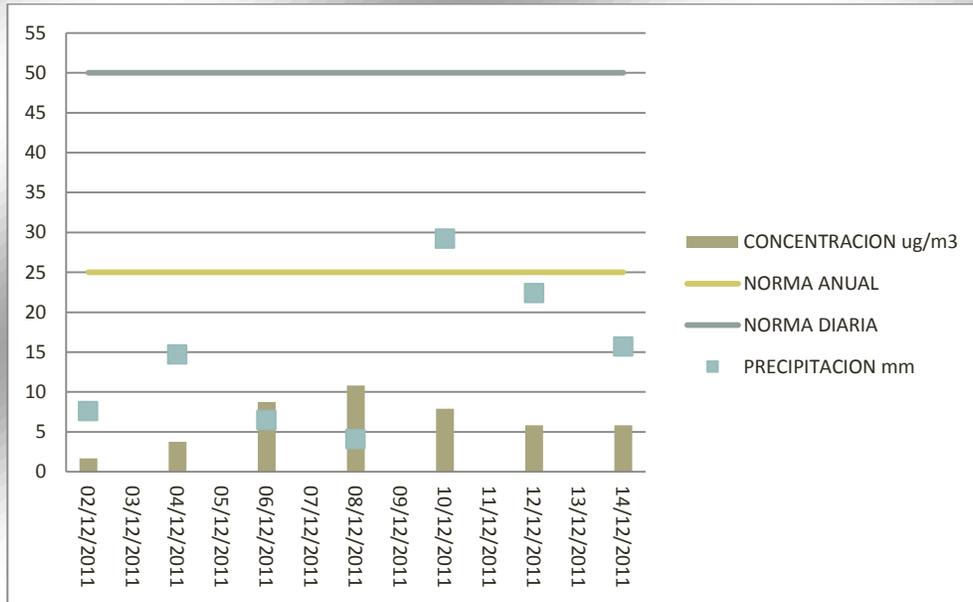


Gráfica 12 Concentración de partículas menores a 2.5 micras PM2.5 del mes de Noviembre de 2011





Gráfica 13 Concentración de partículas menores a 2.5 micras PM2.5 del mes de Diciembre de 2011





## **11. CONCLUSIONES**

Las concentraciones de material particulado respirable PM10 en la estación CAM se encuentran por debajo de lo establecido en la resolución 610 del de 2010 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Las concentraciones de material particulado respirable PM2.5 en la estación Sena Industrial se encuentran por debajo de lo establecido en la resolución 610 del de 2010 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

No se observa una relación directa entre la precipitación y las concentraciones de material particulado halladas.

Según el índice de calidad del aire “Air Quality Index” (AQI), la mayor parte de las concentraciones se presentan en una categoría buena, concluyendo que no hay ninguna afectación a la salud de la población; solo en dos eventos los días 29/09/2011 y 29/10/2011 para PM2.5 y uno el día 30/12/2011 para PM10 llegaron a un grado moderado donde las personas extremadamente sensibles debe considerar reducir la actividad física prolongada y pesada que esté haciendo en el aire libre. Por ejemplo niños con síntomas compatibles con Asma y adultos con enfermedades cardio-cerebro-vasculares como hipertensión arterial, enfermedad isquémica del miocardio o pulmonar como Asma, enfisema y bronquitis crónica deben de reducir la actividad física fuerte o prolongada.



## **12. RECOMENDACIONES.**

Se recomienda realizar un inventario de emisiones para la ciudad de Neiva como primera medida a implementar para identificar actividades y actores responsables de las emisiones: determinar las fuentes, niveles generales de emisión y variación de éstos en el tiempo, para determinar el aporte de contaminantes por tipo de fuente, por sector económico o zonas geográficas, para identificar prioridades, para diseñar estrategias de control y nuevas regulaciones entre otros.

Se recomienda realizar un estudio de barrido con muestreadores pasivos para identificar zonas de alta contaminación y redefinir la red de calidad del aire de acuerdo al Manual de diseño de sistemas de vigilancia de la calidad del aire, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.



### **13. BIBLIOGRAFÍA**

- Implementación red de calidad del aire, Municipio de Neiva, 2009-2010, Orlando Repizo Salazar, Alexander Carvajal Pinilla, German José Mendez Motta.
- Documento soporte norma de calidad del aire, subdirección de estudios ambientales IDEAM, 2005.
- Resolución 601 del 4 de abril de 2006 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- NOEL DE NEVERS. Ingeniería de la contaminación del aire. McGraw Hill. México, 1997.
- CONESA, FDZ.-VITORA, VICENTE. Guía Metodológica para la Evaluación del Impacto Ambiental. 2ª edición. España, Ediciones Mundi-Prensa, 1995.
- Manual de fundamentos y planeación de inventarios de emisiones, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Manual de diseño de sistemas de vigilancia de la calidad del aire, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial
- Índices de Calidad de Aire, Guía para la Calidad del Aire y la Salud.