

**Determinación del coeficiente de turbiedad atmosférica ( $\beta$ ) en todo el ancho de banda del espectro solar para la localidad de Chapinero, Bogotá, Colombia.**

**Ninoshka Torres Ramírez**

Tesis presentada como requisito para optar al título de:

**Magíster en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente.**

Asesor:

**Esp. Ph.D.Jhon Fredy Betancur P.**

Co-Asesor:

**Esp. Ing. Ovidio Simbaqueva Fonseca**

Universidad de Manizales

Facultad de Ingenierías

Bogotá, D.C., Colombia

2013

## RESUMEN

La temática de la contaminación atmosférica, resultado de la creciente industrialización en todas las esferas de la actividad humana, ha sido abordada fuertemente con gran preocupación en los últimos años, debido principalmente a los riesgos sobre la salud humana y las alteraciones medioambientales que ello conlleva.

El presente trabajo tiene como intención dar a conocer como calculando el coeficiente de turbiedad atmosférica por el modelo de Ångström podemos valorar la calidad de la atmosfera de la localidad de Chapinero en la ciudad de Bogotá sin acudir a equipos tan costosos como es el Solfotómetro con el que no contamos hasta el momento. Con los datos obtenidos se establece una comparación de dicha localidad con la zona de Nemocón, la cual es considerada con atmósfera limpia, para los años 2011 y 2012. Dicho balance es realizado mediante prueba estadística de Mann-Whitney-Wilcoxon (5%). Los resultados mostrados en Chapinero ( $\beta= 0.22$  y  $\beta= 0.26$ ) para los años 2011 y 2012 reflejaron ser significativamente superior respecto a los de Nemocón ( $\beta= 0.12$  y  $0.13$ ), para el mismo período.

La determinación del comportamiento de la turbiedad atmosférica para los años 2007 y 2012, arrojó que si bien los resultados no son diferentes para prueba de Kolmogórov-Smirnov (5%) cabe destacar que si existe una ligera tendencia al incremento de la turbiedad atmosférica para el año 2012 en la localidad de Chapinero.

Por último se obtuvo que el nivel promedio de material particulado ( $PM_{10}$ ) resultó ser de  $37.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , lo cual permite ubicar a la atmósfera de la localidad de Chapinero dentro de la primera categoría de riesgo para la salud, de acuerdo a la concentración de este contaminante criterio.

Unido a lo planteado anteriormente se encontraron otros dos resultados: el primero mostró la alta correlación significativa ( $r=0.9295$ ) entre los niveles de material particulado inhalable ( $PM_{10}$ ) y el número de pacientes con enfermedad respiratoria en el Hospital de Chapinero E.S.E; mientras que el segundo arrojó como la población más vulnerable a la contaminación atmosférica fueron los niños en edad pre-escolar, con una cifra significativamente superior al resto de las edades analizadas (45.2 %) de todos los pacientes con enfermedad respiratoria atendidos en el Hospital de Chapinero E.S.E

Palabras claves: Turbidez atmosférica, coeficiente  $\beta$ , contaminación atmosférica, aerosoles, enfermedades respiratorias

**ABSTRACT**

The thematic of atmospheric pollution, result of the increasing industrialization in all areas of human activity, has been highly addressed with great concern in recent years, mainly due to the risks for human health and environmental disturbances that entails.

This paper is intended to provide by first time the level of atmospheric turbidity in the locality of Chapinero, Bogota, Colombia. For this purpose a comparison of this locality with the locality of Nemocón (it is considered as clean atmosphere zone) was done for years 2011 and 2012. The comparison was performed using statistical test of Mann-Whitney-Wilcoxon (5%). The results showed in Chapinero an atmospheric turbidity ( $\beta$ ) of 0.22 and 0.26 for the years 2011 and 2012, respectively. These records were significantly higher than those of Nemocón (0.12 and 0.13) for the same period of evaluation.

The determination of atmospheric turbidity behavior between the years 2007 and 2012 showed that both behaviors are not different for Kolmogorov-Smirnov test (5%). Although a slight trend of increasing atmospheric turbidity in the locality of Chapinero for 2012 is showed.

It was found too that the average level of particulate matter (PM10) was 37.5 ug/m<sup>3</sup>, this result located the atmosphere of the town of Chapinero within the first category of health risk, according to the concentration of this contaminant criteria.

Beside the above proposed another two results were found: the first one showed high significant correlation ( $r = 0.9295$ ) between the levels of inhalable particulate matter (PM10) and the number of patients with respiratory disease in Chapinero Hospital, while the second one showed as the most vulnerable to atmospheric pollution were preschoolers children, whose level was significantly higher than all other ages examined (45.2%) of all patients with respiratory disease treated at the Chapinero Hospital

Key words: Turbidity atmospheric, aerosols, coefficient  $\beta$ , atmospheric pollution, respiratory disease.

## **TABLA DE CONTENIDO**

RESUMEN	2
ABSTRACT	4

TABLA DE CONTENIDO	5
ÍNDICE DE ANEXOS	6
INTRODUCCIÓN	7
1 Problema de investigación	11
1.2 Objetivo general	11
1.2.1 Objetivos específicos	11
1.3 Justificación	11
1.4 Hipótesis	12
2. MARCO CONCEPTUAL	13
2.1 MARCO CONCEPTUAL ESTADÍSTICO	16
3. MARCO TEORICO	17
3.1 ASPECTOS BÁSICOS SOBRE LA RADIACIÓN SOLAR	17
3.1.1 Radiación solar	17
3.1.2 La radiación solar y su paso a través de la atmósfera. Su atenuación.	18
3.1.3 Medidas de la radiación solar	19
3.2 INSTRUMENTOS DE MEDIDAS RADIOMÉTRICAS.	20
3.2.1 Pirheliómetro	20
3.2.2 Calibración del Pirheliómetro Eppley modelo NIP.	22
3.3 DISPERSIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR	23
3.3.1 Dispersión de RAYLEIGH	24
3.3.2 Dispersión de MIE	25
3.4 LA ATMÓSFERA	25
3.4.1 Composición y estructura vertical de la atmósfera.	25
3. 5 MODELOS FÍSICOS DE IRRADIANCIA SOLAR DE TODA LA BANDA	28
3.5.1 Modelo de MOON	28
3.5.2 Modelo de ATWATER y BALL	28
3.5.3 Modelo de DAVIES y HAY	29

3.5.4 Modelo de WATT	29
3.5.5 Modelo de HOYT	29
3.5.6 Modelo de LACIS y HANSEN	30
3.5.7 Modelo ASHRAE	30
3.5.8 Modelo de BIRD Y HULSTROM	30
3.5.9 Modelo de MÄCHLER	31
3.5.10 Modelo de MAC	32
3.5.11 Modelo de JOSEFSSON	33
3.5.12 Modelos de IQBAL (A,B Y C)	33
3.6 TURBIEDAD ATMOSFÉRICA.	34
3.6.1 Factor de LINKE	35
3.6.2 Coeficiente de turbiedad de ÅNGSTRÖM	35
3.7 AEROSOLES	36
3.7.1 Fuentes de emisión	37
3.8 LA ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL (OMM).	38
3.8.1 Programas científicos y técnicos de la OMM	39
3.8.2 Vigilancia Atmosférica Global (VAG)	43
3.8.3 Vigilancia Atmosférica Global, área –Aerosoles-	43
3.9 COLOMBIA	44
3.9.1 Red de Monitoreo de Calidad del Aire Bogotá (RMCAB)	45
3.9.1.1 Estación Usaquén (Bosque)	46
3.9.1.2 Sagrado Corazón	46
3.9.1.3 Estación Carvajal (SONY)	47
3.9.1.4 Estación Tunal	47
3.9.1.5 Estación Parque Simón Bolívar (IDRD)	48
3.9.1.6 Estación Las Ferias (Carrefour)	48
3.9.1.7 Estación San Cristóbal	49

3.9.1.8 Estación Guaymaral (Escuela)	49
3.9.1.9 Estación Kennedy	50
3.9.2.10 Estación Suba (Corpas)	50
3.9.2.11 Estación móvil (Actual ubicación)	51
3.9.2.12 Estación Puente Aranda	51
3.9.2.13 Estación Fontibón	52
3.9.2.14 Estación Usme	52
3.9.2.15 Estación Vitelma	53
3.9.2 Contaminación atmosférica y su impacto sobre la salud.	53
4. MATERIALES Y MÉTODOS	55
4.1 ÁREA DE UBICACIÓN	55
4.2 Determinación del Coeficiente de Turbiedad Atmosférica ( $\beta$ ).	55
4.2.1 Método de cálculo del coeficiente de turbiedad ( $\beta$ )	55
4.2.2 Instrumentos de medición	58
4.3 COEFICIENTE DE TURBIEDAD ATMOSFÉRICA ( $\beta$ ) PARA LAS LOCALIDADES DE NEMOCÓN Y CHAPINERO LOS AÑOS 2011 Y 2012.	58
4.4 DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE TURBIDEZ ATMOSFÉRICA (B) EN LA LOCALIDAD DE CHAPINERO ENTRE LOS AÑOS 2007 Y 2012.	59
4.5 ASOCIACIÓN ENTRE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA ( $PM_{10}$ ) Y LA MORBILIDAD POR ENFERMEDADES RESPIRATORIAS, HOSPITAL DE CHAPINERO E.S.E., 2011.	59
4.5.1 Determinación del valor anual de $PM_{10}$ y su comportamiento en el año 2011	59
4.5.2 Determinar la relación entre $PM_{10}$ y aparición de enfermedades respiratorias 2011.	64
4.5.3 Determinación de la población más vulnerable ante los niveles de contaminación atmosférica.	64
5. RESULTADOS	65
5.1 COMPARACIÓN DEL COEFICIENTE DE TURBIDEZ ATMOSFÉRICA ENTRE LAS LOCALIDADES DE NEMOCÓN Y CHAPINERO (2011-2012)	65

5.2 DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA TURBIDEZ ATMOSFÉRICA (B) ENTRE LOS AÑOS 2007 Y 2012 EN LA LOCALIDAD DE CHAPINERO.	69
5.3 ASOCIACIÓN ENTRE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA (PM <sub>10</sub> ) Y LA MORBILIDAD POR ENFERMEDADES RESPIRATORIAS, HOSPITAL DE CHAPINERO E.S.E, 2011.	71
5.3.1 Determinación del valor anual de PM <sub>10</sub> y su comportamiento en el año 2011.	71
5.3.2 Determinar la relación entre PM <sub>10</sub> y aparición de enfermedades respiratorias 2011.	72
5.3.3 Determinación de la población más vulnerable ante los niveles de contaminación atmosférica.	73
6. ANALISIS Y DISCUSIÓN	74
6.1 Comparación del coeficiente de turbidez atmosférica ( $\beta$ ) entre las localidades de Nemocón y Chapinero (2011 y 2012).	74
6.2 Determinación del comportamiento de Turbidez Atmosférica ( $\beta$ ) en la localidad de chapinero entre los años 2007 y 2012.	75
6.3 Asociación entre la contaminación atmosférica (pm <sub>10</sub> ) y la morbilidad por enfermedades respiratorias, hospital de chapinero E.S.E, 2011.	75
7. CONCLUSIONES	77
8. RECOMENDACIONES	78
9. REFERENCIAS	79
ANEXOS	85

## ÍNDICE DE ANEXOS

**ANEXO A**, Medidas Simultáneas de Radiación entre el Radiómetro a calibrar y el de Referencia Mundial en el Centro Regional de Radiación solar Universidad Autónoma de México

**ANEXO B**, Documentación de certificación de calibración de Pirheliómetro marca Eppley.

**ANEXO C**, Datos obtenidos en Chapinero, febrero 2007



**ANEXO D**, Datos obtenidos en Nemocón, febrero 2007

**ANEXO E**, Diagrama esquemático que muestra los diversos mecanismos radiativos asociados con efectos de las nubes que han sido identificados como importantes en relación a los aerosoles.

**ANEXO F**, Miembros de la OMM, Asociación Regional III (América del Sur)

**ANEXO G**, Ubicación geográfica de las estaciones de la RMCAB y analizadores de contaminantes.

**ANEXO H**, Material Particulado Inferior a 10 Micras ( $\mu$ ) Promedio Anual - PM<sub>10</sub>

**ANEXO I**, Datos resumen obtenidos para Chapinero y Nemocón, año 2011.

## **INTRODUCCION**

Desde que el hombre desplegó su capacidad para cambiar el contexto natural ha concebido cambios en la naturaleza en mayor o menor cuantía, siendo la contaminación un producto de su pretensión por “mejorar” su calidad de vida.

Como resultado del desarrollo industrial y tecnológico de la actividad humana en todos los ámbitos de la vida se ha desatado una gran alteración del equilibrio natural. Dentro de estos cambios se encuentra la contaminación atmosférica. Hasta el momento no existe un consenso que pretenda, al menos de forma seria, erradicar dicha alteración.

Todo esto conlleva a un aumento progresivo de esta vorágine y las consecuencias que la misma implica.

La contaminación atmosférica es el resultado de la dispersión de contaminantes por toda la atmósfera, particularmente en la Troposfera. Así se conoce que partículas y compuestos químicos causantes de enfermedades respiratorias son trasladados hasta zonas muy remotas del lugar de emisión, o sea, lejos de las fuentes contaminantes.

Primariamente, la contaminación atmosférica está ligada a las enfermedades respiratorias que desencadena (asma, irritación de las mucosas). Las partículas y los óxidos de azufre dan lugar a un aumento de las enfermedades respiratorias. El monóxido de carbono tiene un efecto de envenenamiento al reducir la capacidad de la sangre para transportar oxígeno. Sin embargo, el efecto de calentamiento del planeta, la lluvia ácida y la disminución de la visibilidad por niebla, son otras de las secuelas acarreadas por tal problema. No debemos olvidarnos de los devastadores efectos que la contaminación puede causar; ensuciando, corroyendo y deteriorando materiales y estructuras.

Por lo anteriormente planteado, el presente trabajo pretende mostrar la turbidez atmosférica de la localidad de Chapinero, Ciudad de Bogotá, así como la evolución de la misma en los últimos cinco años y su relación con las enfermedades respiratorias.

Resulta necesario plantear que la novedad científica de dicha investigación se enmarca en el hecho de que los reportes de coeficiente de turbidez atmosférica por este modelo son los primeros provenientes de la localidad de Chapinero medidos con un Pirheliómetro.

### **1 Problema de investigación**

Colombia no cuenta con medidas rutinarias de contenido total de aerosoles de la atmósfera, lo cual dificulta el suministro de información y datos fiables sobre la composición química de la atmósfera a la Organización Mundial de Meteorología (OMM), de la cual Colombia forma parte desde 1962; por tanto es necesario realizar la siguiente interrogante: ¿Cómo determinar el coeficiente de turbiedad atmosférica ( $\beta$ )

como indicador de carga de aerosoles, así como su relación con el deterioro de la salud en la localidad de Chapinero, ciudad de Bogotá?

## **1.2 Objetivo general**

Determinar mediante el modelo matemático de Lambert-Beer el coeficiente de turbiedad atmosférica ( $\beta$ ) como indicador de la carga de aerosoles en columna vertical atmosférica para la localidad de Chapinero.

### **1.2.1 Objetivos específicos**

1. Comparar el coeficiente de turbidez atmosférica entre las localidades de Nemocón y Chapinero durante los años 2011 y 2012.
2. Determinar el comportamiento de la turbidez atmosférica  $\beta$  entre los años 2007 y 2012 en la localidad de Chapinero.
3. Determinar el grado de asociación entre la contaminación atmosférica ( $PM_{10}$ ) y la morbilidad por enfermedad respiratoria en el Hospital de Chapinero E.S.E., año 2011.

## **1.3 Justificación**

El presente trabajo busca establecer una metodología que permita entablar reportes de la composición atmosférica utilizando modelos matemáticos (Lamber-Beer). Dicha metodología es útil para la adquisición de datos que indiquen el nivel de contaminación atmosférica nacional desde cada una de sus regiones.

Con los reportes obtenidos a través de esta metodología Colombia, podrá cumplir con los deberes establecidos como miembro activo del programa de vigilancia atmosférica, (VAG) determinando las zonas de contaminación atmosférica y estableciendo planes de mitigación en cuanto a la calidad del aire, de manera que se prevenga la aparición de enfermedades respiratorias en la población, fundamentalmente en los niños menores de 5 años (población más vulnerable).

## 1.4 Hipótesis

La amplia circulación vial en la localidad de Chapinero trae aparejado el incremento de la contaminación atmosférica, así como un aumento en la aparición de enfermedades respiratorias, donde la población infantil será la de mayor vulnerabilidad.

## 2. MARCO CONCEPTUAL

**Aerosoles:** Constituyen una amplia gama de contaminantes formados por polvo grueso (mayor de 100  $\mu\text{m}$ ), polvo fino (menor de 100  $\mu\text{m}$  de diámetro), vapores (0,001-1  $\mu\text{m}$ ) y neblinas (0,1-10  $\mu\text{m}$ ).

**$\alpha$  (alfa):** Coeficiente relacionado con la distribución de tamaños de los aerosoles.

**Atmósfera:** Componente vital del ambiente humano, que transmite y altera la energía solar que controla el clima; actúa como escudo protector contra los impactos de meteoritos y la radiación penetrante sustenta las diversas actividades bióticas.

**Albedo:** Significa blancura. Designa el poder que tiene un cuerpo para reflejar la radiación que recibe. El albedo alcanza 1 cuando toda la radiación se refleja, ó 0 cuando toda la radiación se absorbe. En la superficie de un glaciar, el albedo se sitúa entre 0.8 (nieve fresca) y 0.4 (hielo que no ha sido cubierto de detritos minerales u orgánicos). Juega un papel primordial en el balance de energía de un glaciar.

**Balance de energía:** Consiste en cuantificar todos los aportes y la pérdida de energía. Pueden ser de origen radiativo (de ondas cortas y de ondas largas), de origen turbulente (ligada al movimiento de la atmósfera y del cambio de fase del agua) o de origen conductivo (condición del calor en el suelo). El balance de energía en la superficie incluye la fusión de la nieve o del hielo.

**$\beta$  (Beta):** Coeficiente de turbidez de Ångström, que representa la cantidad de aerosoles presente en la atmósfera en la dirección vertical.

**Coeficiente:** Expresión numérica que mediante alguna fórmula determina las características o propiedades de un cuerpo.

**Compuestos Orgánicos Volátiles (COV):** Emitidos como consecuencia de la combustión incompleta de combustibles líquidos (transporte), incineración de residuos y procesos industriales. Poseen una toxicidad variable y están implicados en la formación de la neblina de contaminación (aerosoles y smog fotoquímico).

**Condiciones Normales para normas de calidad del aire y fuentes fijas:** Las normas de emisión previstas en la presente Resolución están establecidas teniendo en cuenta las condiciones Normales a 298.15 K y 101.325 kPa.

**Contaminación atmosférica:** Es el fenómeno de acumulación de concentración de contaminantes en el aire.

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

**Contaminantes criterios:** Gases que empleados para establecer niveles permisibles que protegieran la salud, el medio ambiente y el bienestar de la población, se han identificado como perjudiciales para la salud y el bienestar de los seres humanos.

**E.S.E:** Empresa Social del Estado

**Estaciones Meteorológicas (Redes):** Se entiende como Estación Meteorológica el sitio donde se hacen observaciones y mediciones puntuales de los diferentes parámetros meteorológicos usando instrumentos apropiados, con el fin de establecer el comportamiento atmosférico en las diferentes zonas de un territorio.

**IDEAM:** Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

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

**MAVDT:** Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

**NASA:** National Aeronautics and Space Administration

**Ozono (lluvia ácida):** Se refiere para el caso de la lluvia ácida, al ozono troposférico generado en las capas bajas de la atmósfera y que forma parte de las neblinas de contaminación. Es irritante y tóxico para el ser humano, también afecta de manera importante a materiales poliméricos al ser un fuerte oxidante.

**OAB:** Observatorio Ambiental de Bogotá.

**OMM-WMO:** Organización Meteorológica Mundial.

**Partículas:** Especies sólidas o líquidas en suspensión en el aire; su origen es muy diverso, originan efectos dañinos según su tamaño y naturaleza, tanto sobre las personas y seres vivos, como sobre los materiales (por ejemplo, el plomo procedente de las gasolinas).

**pH:** Medida de la acidez o basicidad de una solución. Se indica con una escala logarítmica cuyos valores usuales van de 0 a 14. El valor 7 corresponde al agua pura y las soluciones neutras.

**Precipitación o deposición ácida:** Incluye tipos húmedos y secos, y es analizada como química de la precipitación. Procedimientos Estandarizados de Operación: grupo de procedimientos escritos para la implementación de métodos de operación, análisis, o cualquier actividad cuya técnica y procedimiento se realiza a través de un método prescrito y aceptado para realizar cierto tipo de funciones de rutina.

**Red automática de monitoreo de calidad del aire:** Es el conjunto de instrumentos automáticos fijos de medición, utilizados para medir los contaminantes en el aire en

forma simultánea y sistemática, con el fin de verificar la calidad del aire en una zona específica.

**RM CAB:** Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá.

**Visibilidad:** La visibilidad meteorológica en una dirección dada, se entiende como distancia máxima a la cual un objeto negro de tamaño especificado puede ser visto y reconocido contra el horizonte por un observador. La visibilidad nocturna es la diurna equivalente, esto es, la visibilidad que notificaría el observador si fuera el día bajo las mismas condiciones de turbiedad atmosférica.

**WRC:** Observatorio Físico-Meteorológico / Centro Internacional de Radiación (PMOD/WRC), Davos, Suiza

**WRR:** Referencia Radiométrica Mundial, Davos Suiza

## ***2.1 MARCO CONCEPTUAL ESTADÍSTICO***

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

**Correlación de rango de Spearman:** Es una medida de la correlación (la asociación o interdependencia) entre dos variables aleatorias continuas.

**Diferencia significativa:** Una "diferencia estadísticamente significativa" solamente significa que hay evidencias estadísticas de que hay una diferencia; no significa que la diferencia sea grande, importante, o significativa en el sentido estricto de la palabra.

**Nivel de significación:** En estadística, un resultado es estadísticamente significativo cuando no es probable que haya sido debido al azar.

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

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

**Prueba de ANOVA:** Comparación de las medias de tres o más grupos.

**Prueba de Comparación de Medias de Duncan:** Se utiliza para comparar todos los pares de medias.

**Prueba de Kolmogorov Smirnov:** Es una prueba no paramétrica que se utiliza para determinar la bondad de ajuste de dos distribuciones de probabilidad entre sí.

**Prueba de Mann Whitney Wilcoxon:** Es una prueba no paramétrica aplicada a dos muestras independientes. Es, de hecho, la versión no paramétrica de la habitual prueba t de Student.

### **3. MARCO TEORICO**

#### **3.1 ASPECTOS BÁSICOS SOBRE LA RADIACIÓN SOLAR**

##### **3.1.1 Radiación solar**

El flujo de energía radiante que el Sol emite en todas las direcciones llega al límite superior de la atmósfera terrestre con un valor prácticamente constante. También se define como la energía que pone en funcionamiento los procesos atmosféricos y mantiene la vida” (Garabatos, 1991).

Atendiendo al primer concepto se define la constante solar,  $I_{sc}$ , como la potencia recibida por unidad de superficie normal a la dirección de propagación de la radiación



a la distancia media del Sol a la Tierra. En realidad esta distancia no es constante y su valor presenta un intervalo de variación anual próximo al 3%.

La determinación experimental de la constante solar se hizo, en un principio, midiendo la radiación que llega a la superficie terrestre después de atravesar la atmósfera, tras ser parcialmente absorbida y dispersada por los constituyentes atmosféricos. Las extrapolaciones a partir de las medidas terrestres realizadas en alta montaña tenían que basarse en cálculos aproximados de la transmisión atmosférica según las longitudes de onda del espectro solar. En este sentido los primeros estudios se deben a Johnson (1954) que proponía un valor de 1395 W/m<sup>2</sup>. Posteriormente, medidas realizadas por Abbot condujeron al valor de 1322 W/m<sup>2</sup>.

Actualmente las dos medidas consideradas más precisas de la constante solar han sido realizadas por la NASA, obtenidas en el periodo 1968-1971 desde un avión volando a gran altitud para minimizar los efectos atmosféricos, y por el World Radiation Center (WRC) en Davos (Suiza). Las dos medidas dieron resultados ligeramente diferentes; el valor obtenido por la NASA fue 1353 W/m<sup>2</sup>, frente al de 1367 W/m<sup>2</sup> obtenido por el WRC, siendo éste segundo valor el más aceptado actualmente.

### **3.1.2 La radiación solar y su paso a través de la atmósfera. Su atenuación.**

La Tierra posee una envoltura gaseosa, la atmósfera (Garabato, 1991), que produce diversos efectos sobre la radiación solar extraterrestre antes de que esta incida sobre la superficie.

Entre las causas que modifican la radiación solar en el sistema Tierra-Atmósfera las más importantes son: las variaciones en los parámetros orbitales de la Tierra; los cambios en la irradiancia solar total debido a variaciones internas de la actividad solar (Balairón, 1998; Linés, 1990 y Font, 1988) y la modificación de la composición de la atmósfera, al aumentar las concentraciones de gases de efecto invernadero o por la emisión de otros componentes como cenizas o partículas sólidas.

De esta forma, antes de alcanzar cualquier punto de la Tierra, la radiación solar ha de atravesar la atmósfera terrestre, en la que se ve sometida a un proceso de atenuación dependiente de la longitud del camino recorrido y, consecuentemente, de la altura y posición del sol. También con notable influencia de las variaciones de la composición atmosférica, o lo que es lo mismo a un determinado lugar de la superficie terrestre. La radiación solar llega tanto en forma de radiación directa, que no ha sufrido modificación en su dirección desde el Sol, como de radiación difusa, procedente de todas las direcciones de la semiesfera celeste por encima del plano horizontal, así como de la reflexión de la radiación por el suelo.

La radiación solar que llega a la superficie, en sus componentes directa y difusa y, consecuentemente, la proporción entre las mismas, no se mantienen constante sino que varía según las condiciones geográficas y climáticas. En particular las nubes, que en días nublados pueden llegar a anular la radiación directa.

Desde muchos puntos de vista es importante predecir en función del tiempo, la cantidad global de radiación solar, descompuesta en sus componentes directa y difusa, que alcanza un lugar de la superficie terrestre. Este cálculo, que resultaría fácil de realizar si no existiese atmósfera, resulta prácticamente imposible debido en gran parte a la variabilidad en la composición de la atmósfera terrestre.

### **3.1.3 Medidas de la radiación solar**

Es muy grande la cantidad de energía solar que fluye hacia y desde la tierra y la atmósfera. Una comparación que permite apreciar la cantidad de energía solar que cada año incide sobre la tierra equivale a cerca de 160 veces la energía de las reservas mundiales de energía fósil o lo que es similar a más de 15000 veces la energía anual usada de los combustibles fósiles, nucleares y de las plantas hidráulicas (IDEAM, 2005).

Una cantidad aproximada de la energía incidente sobre la tierra y de cómo se transforma en la atmósfera y la superficie terrestre se puede establecer de la siguiente manera: La radiación total incidente es de 173000 Terawatios, el 30 % es reflejado al espacio exterior, el 47 % calienta la superficie terrestre, la atmósfera y los océanos y el otro

23% se absorbe en la evaporación de agua. Relativamente poca energía es usada y dirigida al viento o para ser absorbida por las plantas para su fotosíntesis. En realidad, prácticamente toda la energía es radiada al espacio exterior en forma de radiación infrarroja (IDEAM, 2005).

Las redes de monitoreo que forman parte de las estaciones meteorológicas son las encargadas de hacer las correspondientes medidas rutinarias de este concepto para la cual tienen en cuenta sus componentes:

***Radiación Solar Directa (In).*** Radiación solar que alcanza la superficie de la tierra sin haber cambiado el ángulo de dirección en su paso por la atmósfera y se recibe sobre una superficie normal a la propagación del rayo solar. Esta radiación solar es medida con un instrumento llamado piranómetro espectral, la medición de este tipo de radiación solar nos permite saber la cantidad máxima de energía solar que puede llegar a la superficie terrestre en días despejados.

***Radiación Solar Difusa.*** Radiación solar que llega a la superficie terrestre procedente de toda la bóveda celeste después de haber cambiado su ángulo de dirección por la interacción física de la energía del sol con las sustancias constituyentes de la atmósfera dada por los procesos físicos de dispersión y absorción. Esta energía solar se mide con un piranómetro que lleva una banda especial que hace sombra a la entrada del transductor de este instrumento.

***Radiación Solar Global.*** Toda la radiación solar que llega a la superficie de la tierra de la bóveda celeste y la constituye la radiación solar directa y la difusa. Esta radiación solar es medida con un piranómetro a cielo despejado en cualquier condición climática y nos indica la cantidad de energía solar que está llegando, ya sea de forma directa o indirecta a la superficie terrestre. La radiación que este instrumento está midiendo es apropiada para conocer el recurso energético disponible para su transformación a energía eléctrica.

### **3.2 INSTRUMENTOS DE MEDIDAS RADIOMÉTRICAS.**

Los radiómetros solares son los instrumentos utilizados para medir la radiación solar, y tienen como objetivo medir la energía asociada a la radiación incidente sobre un plano con una orientación dada, así como dar información acerca de la distribución espectral y espacial de dicha energía. Estos instrumentos suelen convertir la energía de la radiación incidente en otra forma de energía que se pueda medir convenientemente mediante el empleo de sensores.

Un sensor es un dispositivo capaz de transformar una magnitud física en una señal eléctrica o digital, de más fácil lectura y almacenamiento. Los sensores más utilizados en los instrumentos de medida de la radiación solar son los termoeléctricos y los fotoeléctricos.

Los radiómetros se pueden clasificar en función del tipo de radiación a medir. Los dos tipos fundamentales de radiómetros usados en el espectro solar son los pirheliómetros y los piranómetros. La adquisición de datos de las medidas radiométricas a partir de un pirheliómetro únicamente se hará en condiciones de cielo despejado.

#### **3.2.1 Pirheliómetro**

Los pirheliómetros son dispositivos de tipo telescópico con una apertura de pequeño diámetro que miden la radiación solar directa en incidencia normal. La superficie receptora debe mantenerse en todo momento perpendicular a la dirección de la radiación solar, ya que para realizar una medida correcta debe estar orientado hacia el Sol. Por tanto, es ineludible que el pirheliómetro esté acoplado sobre una montura ecuatorial y provisto de un mecanismo de seguimiento del disco solar. Las aperturas de este dispositivo están dispuestas de forma que solo la radiación procedente del disco solar y de una estrecha franja anular en torno al mismo alcanza el receptor, por lo que el dispositivo ha de tener un ángulo de apertura muy pequeño (Figura 1 ). El diseño más general consiste en un tubo cilíndrico pintado interiormente de negro con el sensor colocado en uno de sus extremos, mientras que el otro extremo está protegido por un cristal de cuarzo.

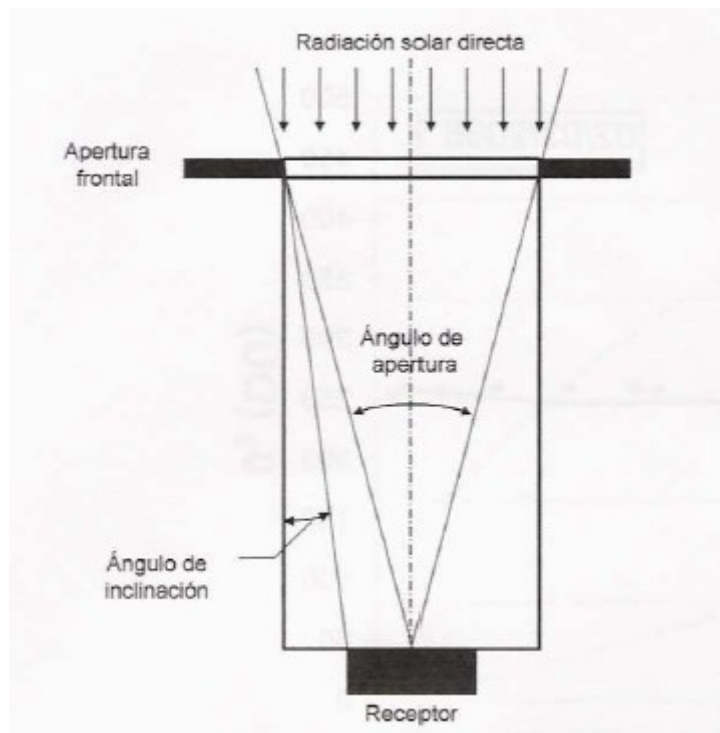


Figura 1. Geometría básica de un pirheliómetro

La Organización Meteorológica Mundial (OMM), clasifica los distintos tipos de pirheliómetros en pirheliómetro patrón primario, pirheliómetro patrón secundario y pirheliómetro de campo, atendiendo tanto a su precisión como a la del equipo auxiliar (WMO, 1996). Concretamente, los factores considerados para evaluar la precisión son: sensibilidad, estabilidad del factor de calibración, error máximo debido a las variaciones de temperatura ambiente, errores debidos a la respuesta espectral del receptor, no-linealidad de la respuesta, ángulo de apertura, constante de tiempo del sistema y efectos del equipo auxiliar.

Los pirheliómetros de uso más frecuente, como el NIP (Normal Incidence Pyrheliometer) de Eppley, incorporan una termopila en la base de un tubo cuya relación entre diámetro de apertura y longitud es aproximadamente 1:10, siendo el ángulo subtendido de  $5^\circ$  a  $11^\circ$  ( $5^\circ 43' 30''$  en el caso del NIP). A mayor ángulo, mayor será la cantidad de radiación solar procedente de la aureola solar (radiación circunsolar) captada por el detector, pero menores serán las exigencias de precisión en el seguimiento de la trayectoria solar. Gracias al desarrollo de seguidores solares más precisos, este último factor ha perdido peso en el diseño de pirheliómetros.

En cualquier caso, debe tenerse en cuenta que la medida de la radiación solar directa es una tarea delicada que debe realizarse mediante instrumentos adecuados al uso que se dará a los datos obtenidos y, preferentemente, bajo la supervisión de personal experimentado. En la Tabla 1 se resumen las características que deben reunir los pirheliómetros operativos (no aplicables a un pirheliómetro patrón primario).

Sensibilidad	8 $\mu$ V/Wm <sup>-2</sup> .
Impedancia	aprox. 200 ohmios
Dependencia de la Temperatura	$\pm$ 1% a lo largo rango de temperatura ambiente -20 a +40 ° C.
Lineabilidad	$\pm$ 0,5% de 0 a 1400 Wm <sup>-2</sup> .
Tiempo de Respuesta	1 segundo (1 / e señal).
Vibraciones Mecánicas	A prueba de hasta 20 g's sin daños
Tamaño	11 pulgadas de largo
Peso	5 libras.

Tabla 1. Características generales del pirheliómetro

### 3.2.2 Calibración del Pirheliómetro Eppley modelo NIP.

De acuerdo con las normas establecidas por la Organización Mundial de Meteorología (OMM), que todos los instrumentos que midan radiación solar deben ser calibrados con la Referencia Mundial de Radicación Solar ( WRR por su sigla en inglés), que se obtiene en el centro mundial de Radiación Solar en Davoz, Suiza mediante intercomparación de radiómetros de cavidad absoluta de la referencia mundial con los radiómetros patrones regionales y nacionales. Estas graduaciones se deben hacer máximo en cinco años de vigencia de cada calibración.



Figura 2. Pirheliómetro Eppley modelo NIP. Fuente. Autor

En los anexos A y B se muestran las medidas simultáneas de radiación entre el radiómetro a calibrar y el de Referencia Mundial en el Centro Regional de Radiación solar Universidad Autónoma de México, diciembre 2006, para validez y confiabilidad de las medidas.

### **3.3 DISPERSIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR**

La radiación solar viaja en línea recta, pero los gases y partículas en la atmósfera pueden desviar esta energía, dando lugar al fenómeno comúnmente conocido como dispersión. La dispersión es el proceso por el cual una partícula interpuesta en el camino de una onda electromagnética sustrae energía de la dirección incidente y la reemite en todas las direcciones. El campo eléctrico de la onda incidente produce la oscilación de las cargas eléctricas de la partícula, las cuales constituyen uno o más dipolos eléctricos que irradian ondas esféricas. Desde este momento, las cargas de la partícula oscilan simultáneamente con la misma frecuencia y, en consecuencia, con la misma longitud de onda que la onda incidente. Esto explica, por ejemplo, como un área con sombra, esto es, sin luz solar directa, puede estar iluminada.

En términos generales, el proceso de dispersión es mucho más complicado de evaluar que el de absorción (De Luisi, 1997), ya que, mientras que en la absorción una fracción

de la energía es sustraída de la radiación directa incidente, la dispersión redirige la radiación incidente en otras direcciones del espacio.

A nivel microscópico se puede explicar el fenómeno de la dispersión como el resultado de la colisión de los fotones que componen la radiación con las partículas que se encuentran en su recorrido por la atmósfera (moléculas, átomos, aerosoles, vapor de agua, etc.). Según sea el tamaño del objeto dispersante, mucho menor que la longitud de onda o de un orden similar, la dispersión predomina en unas direcciones u otras. Si bien, si su tamaño es mucho mayor, llega un punto en que la onda no se dispersa sino que se refleja en el objeto.

### **3.3.1 Dispersión de RAYLEIGH**

La radiación solar puede sufrir dispersión por moléculas y por partículas. La primera de ellas viene dada por la ley obtenida por Lord Rayleigh poco después de 1870, según la cual la dispersión por moléculas de gases es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda. Por tanto, será dominante para las longitudes de onda más cortas. Ésta tendencia justifica también el hecho de que la composición espectral de la componente difusa esté desplazada hacia longitudes de onda más cortas comparada con el espectro solar directo, siendo esta menos dependiente del ángulo cenital del Sol (Robinson, 1996). Rayleigh encuentra que la dispersión es máxima en la dirección de propagación de la onda incidente y mínima en la dirección perpendicular.

Sin embargo, la teoría de Rayleigh sólo es válida para partículas dispersantes esféricas y cuando el tamaño de estas es mucho menor que la longitud de onda de la radiación incidente, concretamente, con radio inferior a  $0.33 \lambda$ , como pueden ser las moléculas de aire.

### **3.3.2 Dispersión de MIE**

La teoría aceptada en la actualidad (De Luisi, 1997) para explicar la dispersión de partículas de gran tamaño, se basa en las investigaciones de Mie, que en 1908 desarrolló una teoría para estudiar la dispersión en disoluciones coloidales y que se aplicó a la óptica de la atmósfera alrededor de los años 30 del siglo XX.



Esta teoría, basada en series matemáticas que contienen todos los tamaños de las partículas, siendo el primer término de la serie el equivalente a la dispersión de Rayleigh, permite explicar la dispersión causada por partículas de polvo, aerosoles, gotas de agua y otras partículas de diámetro comparable a la longitud de onda de la radiación.

Como hemos dicho anteriormente, a pesar de que la dispersión de Mie, presenta una dependencia menor con la longitud de onda de la radiación incidente, el aspecto fundamental de la dispersión de Rayleigh es la dependencia del coeficiente de atenuación monocromático con la longitud de onda de la radiación incidente.

### **3.4 LA ATMÓSFERA**

#### **3.4.1 Composición y estructura vertical de la atmósfera.**

La composición de la atmósfera es causa de la manera en que el planeta se formó hace 4600 millones de años y aunque los procesos exactos de formación de la atmósfera no son totalmente entendidos, se ha determinado que la atmósfera como la conocemos ha evolucionado de una atmósfera primaria formada principalmente de gases nobles seguido de una condensación de estos y de su escape de la Tierra (Reyes Coca, 2001). Posteriormente, se formó una atmósfera secundaria proveniente de gases escapando del interior de la Tierra, pasando de una atmósfera sin oxígeno a una atmósfera con oxígeno. En el presente, la atmósfera está compuesta principalmente por tres tipos de constituyentes gaseosos:

1. Gases permanentes: nitrógeno (78.1 %), oxígeno (20.9 %) y gases nobles (0.9 %), que en conjunto forman el 99.9 % del volumen de la atmósfera.
2. Gases variables: son todos los demás gases presentes en la atmósfera, incluyendo los gases traza (CO, N<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub>, CH<sub>4</sub>, etc.) y los que tienen gran importancia en los distintos procesos meteorológicos como: el vapor de agua, el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el ozono (O<sub>3</sub>).

3. Constituyentes no gaseosos: formados por aerosoles, tales como partículas volcánicas, polvos, humos, sales, etc.

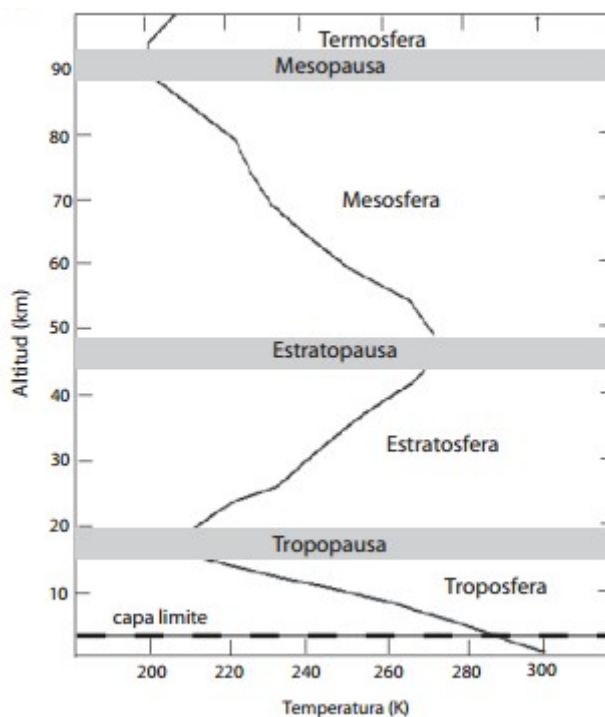


Figura 3: Capas de la atmósfera terrestre determinadas por un perfil de temperatura, tomada de un promedio en los trópicos. La línea discontinua tiene la intención de mostrar que la capa límite se encuentra entre la superficie y los primeros kilómetros de la troposfera (Velazco, 2006).

A pesar de su despreciable cantidad, los gases traza y aerosoles son muy importantes en la química y física de la atmósfera. Ambos constituyen filtros para la radiación solar, impidiendo su arribo a la superficie de la tierra por absorción. Los gases traza indican la calidad del aire, regulan el tiempo de vida del radical hidroxilo ( $\text{OH}^\cdot$ ) modificando la capacidad oxidante presente en la atmósfera (Finlayson-Pitts y Pitts, 2000).

La composición de la atmósfera terrestre y algunas de sus características tienen una variación con la altura. Se han identificado y caracterizado cinco capas de la atmósfera de acuerdo al perfil vertical de temperatura y en cada una existen moléculas con una composición química, una densidad y una dinámica diferentes. Cada una de las capas está limitada por “pausas” cuando ocurre el máximo cambio (Figura 3).

A continuación se resumen los principales aspectos de las cinco capas:

1. Troposfera. El término troposfera viene del griego tropos que significa girar, ya que esta capa se caracteriza por los movimientos convectivos y de mezcla. Esta es la capa más cercana a la superficie y el límite superior varía en tiempo y espacio, dependiendo de la altitud y latitud, por ejemplo, llega a 7 km en los polos y hasta 17 km en el ecuador. En la parte baja de esta capa se localiza la capa límite planetaria que recibe las emisiones de la superficie terrestre (Figura 3). El límite superior se denomina tropopausa y puede presentarse como una inversión o una capa isotérmica. En esta capa la temperatura decrece con la altura y contiene el 75 % de la masa total de la atmósfera. Aquí se presentan los fenómenos meteorológicos de mayor importancia.

2. Estratosfera. La palabra estratosfera proviene del vocablo latín stratum que significa capa estratificada. Esta capa comienza desde la tropopausa hasta cerca de 50 km, contiene el 19 % de los gases atmosféricos, pero contiene 1000 veces menor cantidad de agua que la troposfera. La temperatura se incrementa con la altura, debido a la presencia de la capa de ozono que absorbe radiación ultravioleta transformándola posteriormente en emisión térmica. Aquí no se presentan procesos convectivos ya que es altamente estable a consecuencia de la estratificación vertical de las capas calientes arriba y capas frías abajo. El tope de la estratosfera (estratopausa) tiene una temperatura aproximada de 270 K, que es casi la misma que en la superficie de la tierra.

3. Mesosfera. El término mesosfera se deriva de la palabra griega mesos que significa media. Esta capa comienza arriba de la estratosfera y termina a una altura de 80-85 km. El perfil de temperatura disminuye con la altura hasta un mínimo del orden de 180 K en la mesopausa.

4. Termosfera. Esta capa se extiende de los 80-85 km hasta aproximadamente 640 km. La temperatura se incrementa desde 180 K hasta los 1473 K debido a la capacidad del oxígeno atómico para absorber la radiación solar de alta energía. La densidad del aire es muy baja y está compuesta principalmente por moléculas de nitrógeno y oxígeno. En la capa baja de la termosfera, el CO<sub>2</sub> es fotolizado y se produce CO, resultando en concentraciones de más de 60 ppm, que es 1000 veces mayor que los valores en la troposfera.

### **3.5 MODELOS FÍSICOS DE IRRADIANCIA SOLAR DE TODA LA BANDA**

#### **3.5.1 Modelo de MOON**

Parry Moon, del Instituto de Tecnológico de Massachussets, elaboró en 1940 un modelo para obtener la irradiancia directa y propuso unas curvas de radiación estándar para uso en ingenierías (Moon, 1940). Para ello compuso el espectro de la radiación extraterrestre usando medidas realizadas en la superficie, entre los años 1920 y 1934, por la Smithsonian Institution y utilizando para algunos intervalos el modelo del cuerpo negro a 6000K.

El modelo de Moon adolecía de la limitación de haber supuesto ciertos valores de concentración de ozono, agua precipitable y turbidez relativos a Washington D.C, por lo que era necesario adaptarlo a la variabilidad de estos valores en otros lugares. Continuando con su tarea Threkeld y Jordan utilizaron su modelo para elaborar el modelo ASHRAE que se describe más adelante.

#### **3.5.2 Modelo de ATWATER y BALL**

Este modelo fue publicado conjuntamente por M.A. Atwater y J.T. Ball en los trabajos realizados en 1978 (Atwater, 1978) y 1979 (Atwater, 1979). Constituye una propuesta completa de interpretación de las diferentes irradiancias sobre una superficie horizontal.

En este modelo para el cielo despejado se requieren los siguientes parámetros: constante solar, ángulo cenital, presión en la superficie, albedo del suelo, vapor de agua precipitable, concentración de ozono y turbiedad.

Este método es muy sencillo, exceptuando la expresión de la transmitancia de los aerosoles que puede resultar excesivamente rigurosa, pero que fallaba ya que sólo es aplicable para cielos de extrema claridad como comprobó Bird al comparar los resultados de este modelo con los obtenidos en códigos espectrales rigurosos.

#### **3.5.3 Modelo de DAVIES y HAY**

Los resultados de este modelo de radiación directa y difusa fueron fruto de comparar los modelos existentes hasta entonces. Los parámetros de entrada que utilizaban fueron: la constante solar, el ángulo cenital, la presión atmosférica en la superficie, el albedo del suelo, el vapor de agua precipitable, el ozono total, el single scattering albedo de aerosoles para el que se sugería el valor de 0.98 al que llamamos  $w_0$ , el “aerosol

forward scattering ratio” representado por  $F_c$  para el que sugiere el valor de 0.85 y la transmitancia de los aerosoles (Davies, 1979).

Podríamos decir que este modelo fue el primero en proponer un cálculo para la irradiancia difusa, pero carecía de un método para tratar la transmitancia de aerosoles y necesitaba una tabla para la estimación de la dispersión molecular (dispersión de Rayleigh).

#### **3.5.4 Modelo de WATT**

El modelo de insolación directa y difusa desarrollado por Watt en 1978 (Watt, 1978) está basado en parte en el ya mencionado modelo de Moon. Se mejoraron algunas de las expresiones utilizadas por Moon e introdujo los “modificadores de la longitud del camino” que juegan un papel similar a la masa de aire de otros modelos. En su estudio Watt incluyó el efecto de la mezcla de gases más comunes en la absorción de vapor de agua, hecho que puede ocasionar distorsiones en los resultados. Por otro lado entre sus parámetros utilizó el coeficiente de turbiedad de capas altas de la atmósfera, pero este resulta ambiguo y difícilmente obtenible por lo que acaba siendo un parámetro que se ha de preestablecer.

#### **3.5.5 Modelo de HOYT**

Publicado en 1978 (Hoyt, 1978) sirve para estimar la irradiancia solar global horizontal e incluye un modelo para la componente directa. Las variables de entrada en este modelo son: la constante solar, el ángulo cenital, presión atmosférica en la superficie, albedo del suelo, vapor de agua precipitable, ozono total y la turbiedad a una determinada longitud de onda.

El procedimiento que se debe seguir para obtener ciertas funciones de este modelo (por ejemplo las relativas a la transmitancia de los aerosoles) es tedioso y poco flexible ya que están en forma tabulada y no son expresiones empíricas. Además el uso de tablas a menudo requiere interpolaciones entre puntos y el rango de masas de aire, y coeficientes de turbiedad listados es pequeño.

No obstante constituye un modelo completo y de cuyas tablas y metodología se obtienen expresiones que utilizan modelos posteriores más perfeccionados.

### **3.5.6 Modelo de LACIS y HANSEN**

El modelo de Lacis y Hansen (Lacis, 1974) fue concebido solamente para estimar irradiancia global, sin embargo las expresiones que aporta tienen interés por su gran aproximación a los datos que generan algunos códigos espectrales rigurosos usados de referencia.

Este método es extraordinariamente simple, lo que lo hace interesante, pero no aporta una solución para el cálculo de la irradiancia directa.

### **3.5.7 Modelo ASHRAE**

El modelo ASHRAE es el publicado por la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE, 1974) para estimar la irradiancia solar en lugares del hemisferio norte. Este modelo para la irradiación en cielos despejados es el resultado del trabajo de Threlkeld y Jordan que utilizaron la técnica desarrollada por Moon para calcular la radiación directa normal de toda la banda. Propusieron una atmósfera denominada “básica”, suponiendo que tenía 200 partículas de polvo por  $\text{cm}^3$ , una concentración de ozono de  $0.25 \text{ cm}^{-2}$  en condiciones normales de presión y temperatura y una cantidad de vapor de agua precipitable variable con los meses del año.

Este modelo recibió varias críticas apuntando a que sólo era válido en ciertas condiciones climáticas y además de ser un método muy poco flexible.

### **3.5.8 Modelo de BIRD Y HULSTROM**

Bird y Hulstrom analizaron los modelos de irradiancia directa de Atwater y Ball, de Hoyt, de Lacis y Hansen, de ASHRAE y de Watt. Por otro lado estudiaron los modelos de irradiancia difusa de Atwater y Ball, de Davies y Hay, de Watt, de Hoyt y el de Lacis y Hansen.

Como resultado de comparar los modelos precedentes Bird y Hulstrom formularon un modelo adicional, que elaboraron adoptando donde fue posible los formalismos de los modelos analizados. La comparación, se hizo de los modelos mencionados entre sí y a su vez con los programas SOLTRAN y BRITTE.

En alguna ocasión cuando la comparación de variables no fue viable éstas se eliminaron y se substituyeron expresiones más sencillas y prácticas de otros modelos. Es el caso del cálculo de transmitancia molecular (dispersión Rayleigh) propuesta en el modelo de Davies y Hay y la masa de aire del modelo de Hoyt, que para evitar trabajar de forma tabulada, se substituyeron por la expresión del modelo de Bird para la primera y la expresión que obtuvo Kasten en 1966 (Kasten, 1966). Por lo tanto el modelo de Bird y Hulstrom recoge los aportes de todos los anteriormente citados. Para determinar este modelo se realizaron comparaciones de las transmitancias y de las irradiancias que resultan de los diferentes modelos con las que aportan unos códigos espectrales rigurosos construidos para generar resultados de irradiancias de banda ancha después de un proceso de integración a lo largo de todo el espectro.

Estos códigos o programas utilizados para el cálculo riguroso de la transferencia de radiación solar fueron los programas SOLTRAN3 y SOLTRAN4 construidos para generar resultados de irradiancia directa y de las diferentes transmitancias en todo el espectro a partir del programa LOWTRAN que se describe posteriormente. Para comparar las irradiancias global y difusa de cada modelo se usaron de referencia los cálculos de otros dos códigos rigurosos, el programa BRITE (Bird, 1979). Con estos códigos rigurosos se simula una atmósfera detallada que describe muy bien una atmósfera real en un determinado lugar e instante. Cada uno de los programas utiliza su propia técnica para resolver los problemas de transferencia radiactiva.

### **3.5.9 Modelo de MÄCHLER**

Mächler critica el modelo de ASHRAE por tener una limitación “nacional” muy por debajo de lo extendidas que están las publicaciones de la Sociedad de Ingenieros, si bien alababa la simplificación que establece el modelo, especialmente por el tratamiento de la irradiancia difusa, de la que se supone un comportamiento isotrópico. En un artículo publicado en 1985 en ASHRAE Trans. (Mächler, 1985), propone unas mejoras del modelo que hagan que la estimación de irradiancias se puedan realizar en condiciones diferentes a las estándar y en lugares fuera de EUA, ya que el modelo ASHRAE adolece de no considerar desviaciones respecto de una atmósfera estándar y de no considerar cambios de turbiedad.

Por otra parte, comparándolo con el modelo de Bird, concluye que la difusa está modelizada muy pobre, por debajo de la realidad, especialmente en los meses de invierno.

Para mejorar estos aspectos propone una serie de cambios consistentes en revisar las constantes propias del modelo cambiando el valor de la constante solar de  $1322 \text{ W/m}^2$  a  $1367 \text{ W/m}^2$  y utilizando la masa de aire relativo  $m_a$ , además de que introduce en la expresión de la directa normal expresiones de la transmitancia debida a aerosoles y a la absorción de vapor de agua.

### 3.5.10 Modelo de MAC

Este modelo es citado así en la literatura científica porque es el resultado de un esfuerzo continuado de un grupo de investigadores de la Universidad de McMaster (EUA) y se puede considerar una prolongación mejorada del modelo de Davies y Hay. Las últimas versiones del mismo fueron publicadas por Davies y col. en 1988 (Davies, 1988) y por Davies y McKay en 1989 (Davies, 1989).

Este modelo es un ejemplo de modelo físico, pues las transmitancias para la banda ancha se obtienen a partir del análisis de cada proceso individual de extinción en la atmósfera.

La transmitancia de aerosoles que se usa es diferente a otros modelos, pues se establece

$$\tau_a = K_a^m$$

donde  $K$  es coeficiente de transparencia, pero no índice de turbiedad al estilo del  $\beta$  de Ångström o el B de Schuepp, que pueda ser relacionado con el espesor óptico de aerosoles.

Gueymard en 1993 demuestra que  $K$  para condiciones fijas de aerosol, varia con la masa de aire. En este modelo  $K$  se utiliza como coeficiente propio de la estación y han sido catalogadas muchas estaciones con valores que van desde 0.87 para la estación de Kew cerca de Londres hasta valores de 1 para estaciones australianas. Nótese que esto convella a un alto grado de inexactitud pues 1 correspondería a la atenuación por aerosoles nula, lo que parece imposible.



### 3.5.11 Modelo de JOSEFSSON

Este modelo es una variante del MAC. Fue presentado por su autor así como sus ecuaciones en el IEA Task IX Final Report (Davies, 1988). En este encuentro se verificó que dicho modelo se ajusta mejor que el MAC cuando se compara con medidas de irradiación horaria en que hay nubes, pero para el caso de cielo despejado y en comparaciones realizadas por Gueymard con los códigos rigurosos SOLTRAN y BRITE, con el MAC obtiene menores desviaciones media y cuadrática media (MBE y RMSE), que con el modelo de Josefsson.

### 3.5.12 Modelos de IQBAL (A,B Y C)

Estos tres modelos están bien descritos por M. Iqbal (Iqbal, 1983) y sus predicciones han sido comparadas con medidas realizadas en Francia (Louche, 1988), además de que los modelos originales de los que derivan fueron verificados por J.D.Karalis et al.; usando datos de Grecia (Karalis, 1982).

El modelo de Iqbal A, está basado en una de la primeras versiones del MAC, o sea en un denominado aquí modelos de Davies y Hay. Sin embargo se introduce una interesante parametrización de la transmitancia de aerosoles debida a Mächler (Mächler, 1983), en que se hace depender a esta del coeficiente de turbiedad  $\beta$  y del exponente  $\alpha$  de turbiedad de Ångström, así como de la masa del aire.

Hay también otras divergencias de menor importancia respecto al MAC, al igual que en los modelos B y C, en esta la cantidad de agua precipitable está corregida con la presión y la temperatura. La dispersión hacia delante de aerosoles  $F_c$  se da aquí de forma tabulada.

El modelo de Iqbal B, ofrece una mejora del modelo de D.V. Hoyt (Hoyt, 1978), que lo hace más práctico, y es que las tablas de referencia de aquel, ahora han sido reemplazadas por ajustes exponenciales que por lo tanto simplifican los cálculos.

El modelo Iqbal C, es esencialmente idéntico al de Bird y Hulstrom, pero incorporando ciertos cambios. La constante solar que utiliza es la revisada y aceptada por el WRC de  $1367 \text{ W/m}^2$ , en lugar de la antigua usada por aquel modelo de  $1353 \text{ W/m}^2$ . Por otra

parte, la única diferencia entre el modelo C y el modelo de Bird se produce en el tratamiento de los caminos ópticos de aerosol y vapor de agua.

### **3.6 TURBIEDAD ATMOSFÉRICA.**

Los aerosoles se encuentran en la troposfera, y su concentración disminuye con la altura y con el alejamiento de las zonas pobladas. Su distribución por tamaños tiene una gran similitud en todas las zonas exceptuando áreas próximas a industrias y otras fuentes de partículas, de forma que observando su densidad numérica, o número de partículas por  $\text{cm}^3$ , predominan los de tipo Aitken, siendo también abundantes los “grandes” y escaseando los “gigantes”, (Junge 1959).

No obstante si se observa la distribución de volumen de aerosol por volumen de aire la distribución es más uniforme. Resulta más uniforme aún esta distribución si se expresa como masa de aerosol por volumen de aire, de forma que predominan los de tamaño medio o “grandes”, pero sin acusadas desviaciones respecto a las otras categorías. Esta distribución característica se podría explicar a partir de los procesos de creación, de agrupamiento y de desaparición de las diferentes partículas que se encuentran en un permanente movimiento Browniano (Fleagle 1963).

La atmósfera se limpia de aerosoles principalmente mediante las precipitaciones y la condensación. La lluvia reduce la densidad numérica. La presencia abundante de vapor de agua aumenta el tamaño de las partículas presentes y eleva la turbiedad en el sentido óptico de la misma.

Por todo lo anterior una atmósfera que contenga aerosoles es calificada de turbia y a los efectos que estos producen sobre la luz visible y la radiación solar en general se le llama “turbiedad”.

Con base a los efectos radiativos de los aerosoles, varios métodos se han desarrollado para usar la atenuación de la radiación solar por los aerosoles como un índice de turbiedad atmosférica. Los dos principales que caracterizan acertadamente la turbiedad y que fueron desarrollados en los años 20, son el Factor de Linke y el coeficiente de Ångström.

### 3.6.1 Factor de LINKE

El primero de los métodos estándar para determinar la turbiedad por métodos ópticos fue desarrollado por Linke en 1929 (Linke, 1922) (Linke 1929). El factor de Linke hace referencia a todo el espectro, es decir a la atenuación integrada para todo el espectro que los aerosoles producen sobre los rayos solares. Esto lo diferencia de los coeficientes de turbiedad de Ångström y el de Schuepp que se obtiene espectralmente.

Linke estableció como unidad de atenuación la que se produce en una atmósfera ideal denominada de Rayleigh, es decir aquella que contuviera materia absorbente y donde solamente se atenuará la radiación solar debido a dispersión por partículas de tamaño inferior a la longitud de onda de la radiación. Con esta premisa, el Factor T de Linke de la turbiedad existente en un momento dado se definió como el número de atmósfera de Rayleigh requerido para producir la misma atenuación de dicho instante.

Finalmente el Factor de Linke como coeficiente o índice de turbiedad parte de un error (Coulson, 1975) en su propia definición ya que se observa que experimenta una ligera variación de su valor con la masa de aire para condiciones ambientales estables.

### 3.6.2 Coeficiente de turbiedad de ÅNGSTRÖM

Inicialmente se suponía que la única atenuación que producían los aerosoles se debía al efecto de la dispersión. El análisis de la dispersión producida se hace más complejo cuando el tamaño de las partículas dispersantes se hace mayor que el de las moléculas del aire. Este es el caso de varias moléculas de vapor de agua coagulados o bien el de partículas de polvo en suspensión, cuyo tamaño a su vez es susceptible de crecer en función de la humedad debido a la condensación de vapor sobre ellas.

Matemáticamente este análisis se ha abordado desde la perspectiva de la teoría de Mie tal como describe Van de Hulst (Van de Hulst, 1957), pero este tratamiento exige el conocimiento de ciertos datos cuyas medidas no son tan exactas como son la forma, el tamaño, la distribución y la naturaleza de las partículas en suspensión.

Moon trató de cuantificar el efecto atenuador de la radiación de los aerosoles en función de la densidad de las partículas presentes pero observó que el tamaño de estas, dependía de la humedad y esto alteraba la atenuación.

Por otra parte los aerosoles también producen atenuación selectiva de la radiación solar debido a la absorción y a la extinción por dispersión. De la suma de ambos factores resulta la atenuación de aerosoles y por tanto la turbiedad. Separar ambos efectos constituye un serio problema. La propuesta por Anders Ångström (Ångström, 1929) de un coeficiente caracterizador de la turbiedad que incluyera ambos efectos y fuera característico de toda la banda fue su gran reconocimiento para la determinación de la turbiedad atmosférica, proponiendo lo que se conoce como la Fórmula de la turbiedad de Ångström, que expresa el Coeficiente de Turbiedad de Ångström  $k_a \lambda = \beta \lambda^{-\alpha}$ , donde  $\lambda$  es la longitud de onda que llega a la superficie y  $\alpha$  es el coeficiente del exponente o exponente de la longitud de onda. el cual toma valores máximos ligeramente superior a 2.0 en los meses de junio y julio y un valor mínimo ligeramente superior a 1.0 en Enero (Ångström, 1930), manteniéndose un pico en el diagrama de frecuencias (tanto en Postdam como en Davos) de todo el año, para el valor de  $\alpha$  igual a 1.3 para una atmósfera natural (valor estándar).

### 3.7 AEROSOLES

Los aerosoles atmosféricos son partículas sólidas o líquidas suspendidas en la atmósfera cuyos tamaños pueden oscilar entre 0.001 – 100  $\mu\text{m}$ . La mayor parte de los mismos en la atmósfera poseen un origen natural; los ejemplos más notorios pueden ser las partículas de sal del rocío marino o el polvo de los desiertos, que con frecuencia son transportados a enormes distancias. La cantidad total de aerosoles que se encuentran en suspensión en el aire varía desde menos de 1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , valor que se observa sobre los casquetes polares o en la troposfera oceánica libre, hasta 1000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en las tormentas de arena o en los humos cargados de ceniza de los incendios forestales (Díaz, 2005).

La composición química de los aerosoles afecta directamente a la forma en que interactúa la atmósfera con la radiación solar. Los componentes químicos de los aerosoles alteran el índice de refracción global de la atmósfera. El índice de refracción determina la cantidad de luz que es dispersada y la que es absorbida (Díaz, 2005).

#### 3.7.1 Fuentes de emisión

Los aerosoles atmosféricos pueden ser originados de forma natural o antropogénica. Algunas de estas partículas son emitidas directamente a la atmósfera (emisiones

primarias) y otras son emitidas como gases que al reaccionar forman partículas en la atmósfera (emisiones secundarias). La composición de las partículas de un aerosol depende de la fuente donde son generadas.

Las mayores fuentes naturales son los volcanes, las tormentas de polvo y los incendios forestales y de pastizales. La pulverización de agua marina también es una gran fuente de aerosoles aunque la mayoría de estos caen al mar cerca de donde fueron emitidos.

La mayor fuente de aerosoles se debe a la actividad humana por la quema de combustibles en motores térmicos para el transporte y en centrales termoeléctricas para la generación de energía eléctrica, así como el polvo generado en las obras de construcción y otras zonas de tierra donde el agua o la vegetación ha sido removida (Directiva CE, 1999).

Los polvos minerales son aerosoles atmosféricos originados como consecuencia de la erosión de la corteza terrestre principalmente de óxidos ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ , y otros) y carbonatos ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ ) que constituyen la corteza terrestre. Estos aerosoles absorben la luz solar.

Las emisiones de polvos minerales a nivel mundial se estiman entre 1000-5000 millones de toneladas por año (IPCC, 2001), de las cuales la mayor parte se atribuye a los desiertos. El desierto del Sáhara es la principal fuente de polvo mineral, que es dispersado en el mar Mediterráneo y el Caribe hacia el norte de América del Sur, América Central, América del Norte y Europa. El desierto de Gobi es otra gran fuente de polvo mineral, que afecta a Asia oriental y al oeste de América del Norte.

Los aerosoles, naturales y antropogénicos, pueden afectar al clima cambiando el modo en el que la radiación electromagnética se transmite a la atmósfera. Las observaciones directas de los efectos de los aerosoles son bastante limitadas, por lo que cualquier intento por estimar su efecto global implica necesariamente el uso de modelos computarizados.

Existe un estrecho vínculo entre los aerosoles, su tamaño y las enfermedades de tipo respiratorias. La relación entre un mayor número de muertes y de enfermedades con la polución por partículas fue demostrada por primera vez a principios de los años 1970 (Lave, 1973). Se estima que la polución por partículas ha causado 22.000 y 52.000 muertes anuales en Estados Unidos desde el año 2000 (Mokdad, 2004).

### **3.8 LA ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL (OMM).**

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) es un organismo especializado de las Naciones Unidas quien es vocero del estado y el comportamiento de la atmósfera terrestre, su interacción con los océanos, el clima que produce y la distribución resultante de los recursos hídricos.

La OMM cuenta con 185 estados miembros y se creó en 1950. En el marco de los programas de la OMM contribuye sustancialmente a la protección de la vida humana y los bienes frente a los desastres naturales, a la salvaguardia del medio ambiente y a la mejora del bienestar económico y social de todos los sectores de la sociedad en esferas como la seguridad alimentaria, los recursos hídricos y el transporte.

La OMM promueve la cooperación para la creación de redes de observaciones meteorológicas, climatológicas, hidrológicas y geofísicas y para el intercambio, proceso y normalización de los datos afines, y contribuye a la transferencia de tecnología, la formación y la investigación.

La organización facilita el intercambio gratuito y sin restricciones, en tiempo real o casi real, de datos, información, productos y servicios afines que guardan relación con la seguridad y la protección de la sociedad, el bienestar económico y la protección del medio ambiente. Asimismo, contribuye a la formulación de políticas en esas esferas a escala nacional e internacional.

A través de sus programas, la OMM desempeña una función destacada en las actividades internacionales destinadas a vigilar y proteger el medio ambiente. En colaboración con otros organismos de las Naciones Unidas y los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales, la OMM apoya la aplicación de varios convenios y convenciones medioambientales, y ayuda a proporcionar asesoramiento y evaluaciones a los gobiernos sobre cuestiones relativas a los mismos. Estas actividades contribuyen a lograr el desarrollo sostenible y el bienestar de las naciones.

### **3.8.1 Programas científicos y técnicos de la OMM**

La labor de la OMM se realiza a través de diez programas científicos y técnicos principales. Estos programas están concebidos, por un lado, para contribuir a que todos los miembros puedan ofrecer una gran diversidad de servicios meteorológicos e hidrológicos, y beneficiarse de los mismos y, por otro lado, para abordar los problemas presentes y futuros. Los programas se basan en el concepto y la experiencia de que una utilización cooperativa del acervo de conocimientos que siempre ha proporcionado el intercambio mundial de información meteorológica, hidrológica y similar entre los Miembros redundan en beneficio de todos. Los programas de la OMM hacen posible que se presten servicios meteorológicos y similares en todos los países a unos costos muy inferiores a los que incurrirían los Miembros si actuaran cada uno por su cuenta.

1. La Vigilancia Meteorológica Mundial (VMM) es uno de los principales programas de la OMM. Gracias a la combinación de sistemas de observación, sistemas de información e instalaciones de telecomunicación, así como de centros de predicción y procesamiento de datos -dirigidos por los Miembros- es la piedra angular de unos Servicios Meteorológicos e Hidrológicos eficaces en todo el mundo. La VMM consta también de un Programa de ciclones tropicales (PCT), un programa de Actividades en la Antártida y otro de Actividades de Respuesta de Emergencia para los casos de emergencias ambientales debidos a accidentes nucleares, erupciones volcánicas y demás peligros medioambientales similares. Además, la VMM cuenta con un Programa de Instrumentos y Métodos de Observación para velar por la calidad de las observaciones, que son vitales para la predicción del tiempo y la vigilancia del clima.

2. El Programa Mundial sobre el Clima (PMC) promueve un mejor conocimiento de los procesos climáticos mediante investigaciones coordinadas internacionalmente y una vigilancia de las variaciones o los cambios del clima. Fomenta también la aplicación de la información y los servicios climáticos para contribuir a la planificación y el desarrollo en los ámbitos económico y social. El componente de investigación de este Programa es responsabilidad conjunta de la OMM, del Consejo Internacional para la Ciencia (CIUC) y de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI) de la UNESCO. El componente de Evaluación del Impacto del Clima y Estrategias de Respuesta está coordinado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).

3. El Programa de Investigación de la Atmósfera y el Medio Ambiente (PIAMA) presta apoyo a las iniciativas mundiales de investigación. La Vigilancia de la Atmósfera Global (VAG) se centra en la coordinación y aplicación de las observaciones de los gases de efecto invernadero en la atmósfera, el ozono, la radiación ultravioleta, los aerosoles, ciertos gases reactivos y la química de las precipitaciones en todo el mundo. Apoya las convenciones internacionales sobre el agotamiento de la capa de ozono, el clima y el transporte a larga distancia de la contaminación atmosférica. El Programa Mundial de Investigación Meteorológica (PMIM) fomenta las labores de investigación destinadas a desarrollar técnicas de predicción perfeccionadas y económicas, así como su aplicación en favor del desarrollo socioeconómico y en la toma de decisiones. Las actividades llevadas a cabo en el marco de este Programa aportan valor a las labores de investigación que realizan los miembros en materia de predictibilidad sinóptica de la meteorología tropical, de predicción del tiempo a todas las escalas y de verificación de las predicciones, y vincula los productos de predicción a áreas que redunden en un beneficio social. El PIAMA dirige el sistema de alerta temprana de tormentas de arena y polvo de la OMM y favorece las prácticas científicas racionales en la investigación de la modificación artificial del tiempo.

4. El Programa de Aplicaciones de la Meteorología (PAM) consta de cuatro áreas esenciales: los servicios meteorológicos para el público, la meteorología agrícola, la meteorología aeronáutica, y la meteorología marina y la oceanografía, y promueve el desarrollo de las infraestructuras, los conocimientos técnicos y los servicios en esas áreas en beneficio de los países Miembros.

5. El Programa de Hidrología y Recursos Hídricos (PHRH) se ocupa de la evaluación de la cantidad y calidad de los recursos hídricos a fin de responder a las necesidades de la sociedad, contribuir a la atenuación de los riesgos relacionados con el agua y mantener o mejorar el estado del medio ambiente mundial. Se ocupa también de la normalización de las observaciones hidrológicas en todos sus aspectos y de la transferencia organizada de técnicas y métodos hidrológicos. El programa mantiene una estrecha coordinación con el Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO.

6. El Programa de Enseñanza y Formación Profesional (PEFP) tiene por objetivo ayudar a los países Miembros a obtener el personal cualificado adecuado para sus Servicios



Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales (SMHN) de forma que puedan asumir las responsabilidades que de ellos se espera de forma eficiente y económica, y responder a los retos de las nuevas tecnologías. La principal estrategia para lograr este objetivo es colaborar con los asociados internacionales, las universidades, las instituciones de formación pertinentes, las escuelas y los medios de comunicación. El PEFP trabaja estrechamente con todos los programas técnicos y científicos de la OMM para organizar una formación especializada en los campos del tiempo, el clima y el agua.

7. El Programa de Cooperación Técnica (PCOT) se encarga de coordinar las actividades de movilización de recursos que propician el desarrollo de los SMHN en todo el mundo y de facilitar la transferencia organizada de los conocimientos meteorológicos e hidrológicos y las metodologías aprobadas entre los Miembros de la Organización. El PCOT hace énfasis en prestar una amplia gama de servicios meteorológicos, climáticos e hidrológicos, en reforzar y dirigir las principales infraestructuras de la Vigilancia Meteorológica Mundial, en prestar apoyo al Programa de Enseñanza y Formación Profesional, y en aplicar el Programa de la OMM a favor de los países menos adelantados. El PCOT se financia principalmente con fondos procedentes del Programa de Cooperación Voluntaria de la OMM, del PNUD, de diversos fondos fiduciarios y del presupuesto ordinario de la OMM.

8. El Programa Regional (PR) es un programa transversal a todos los otros programas principales de la OMM que revisten importancia para las diferentes Regiones y aborda cuestiones de meteorología, hidrología y otros temas medioambientales que, por sus características y por su interés común, son específicos de una Región o grupo de Regiones. Este Programa proporciona un marco para la formulación de la mayoría de los programas mundiales de la OMM y sirve de mecanismo para su aplicación a nivel nacional, subregional y regional. El Programa Regional promueve el desarrollo y aplicación de iniciativas regionales y subregionales en materia de meteorología e hidrología entre los miembros y la cooperación con comunidades económicas regionales.

9. El Programa espacial de la OMM (PEOMM) se basa en tres elementos principales: un componente espacial que responde a las necesidades de la OMM y de los programas que reciben su apoyo; un sistema de distribución y acceso de datos que es un elemento esencial del Sistema de Información de la OMM; y un componente de creación de

capacidad para mejorar la eficacia de los datos y productos satelitales gracias a una mejor utilización de los mismos. El PEOMM proporciona a todos los programas de la OMM observaciones satelitales, productos y servicios derivados relacionados con el clima, los océanos, la agricultura, la aviación, la química atmosférica, el ciclo hidrológico y los peligros naturales.

10. El Programa de reducción de riesgos de desastre (PRRD) es un programa transectorial que respalda la misión de la OMM de proteger las vidas humanas, los modos de vida y los bienes materiales. Este Programa vela por la integración de las actividades que desarrollan los diferentes programas de la OMM en materia de reducción de los riesgos de desastre y la aplicación del Marco de Acción de Hyogo para 2005-2015. Se encarga asimismo de coordinar eficazmente las actividades de la OMM con las actividades que realizan las organizaciones internacionales, regionales y nacionales, incluidas las organizaciones de desarrollo, humanitarias y de protección civil, especialmente en apoyo de la evaluación de los riesgos, los sistemas de alerta temprana, y la creación de capacidad. El Programa proporciona asimismo un apoyo técnico y científico a las medidas adoptadas por la OMM para responder a situaciones de desastre.

### **3.8.2 Vigilancia Atmosférica Global (VAG)**

La Vigilancia Atmosférica Global (VAG) de la OMM es un programa de colaboración entre 80 países, que proporciona datos científicos fiables e información sobre la composición química de la atmósfera, su cambio natural y antropogénico, y ayuda a mejorar la comprensión de las interacciones entre la atmósfera, los océanos y la biosfera (OMM, 2013).

La VAG centra su atención en áreas focales como son: gases de efecto invernadero, ozono, UV, aerosoles, determinados gases reactivos y química de la precipitación.

El programa de la VAG apoya a las redes globales que proporcionan observaciones que son utilizadas para llegar al conocimiento del clima, el tiempo y los problemas de contaminación del aire y a la vez ofrecer servicios y productos requeridos por los miembros en el cumplimiento de su mandato nacional. El sistema de seguimiento VAG se centra en seis clases de variables las cuales son ozono, radiación UV, gases de efecto

invernadero, aerosoles, gases reactivos seleccionados y química de las precipitaciones (OMM, 2013).

### **3.8.3 Vigilancia Atmosférica Global, área –Aerosoles-**

La Vigilancia de la Atmósfera Global (VAG) de aerosol se esfuerza "para determinar la distribución espacio-temporal de las propiedades de los aerosoles relacionados con el forzamiento climático y calidad del aire a escala de tiempo multidecenales".

El objetivo principal del Programa de la VAG Aerosol es mejorar la cobertura, la eficacia y la aplicación de medidas de aerosoles a largo plazo dentro de la VAG y con las redes de cooperantes en todo el mundo así como fomentar una mayor presentación de datos y la utilización de los datos de la VAG en aerosol.

Respecto a esta área focal la OMM define sobre los aerosoles:

Los aerosoles transportados por el aire afectan muchos aspectos de la salud humana y el medio ambiente. La masa del aerosol es tóxica y se relaciona con problemas respiratorios crónicos con incidencias cardiovasculares agudas.

Por otra parte, los aerosoles influyen en el balance energético atmosférico a través de efectos directos e indirectos. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) analiza estos efectos directos e indirectos de los aerosoles (Anexo E).

## **3.9 COLOMBIA**

Colombia, pertenece a la Región III Suramericana (Anexo F), es miembro de la OMM desde el 5 de enero de 1962 donde el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) es la máxima representación nacional.

Para que el monitoreo de la calidad del aire sea efectivo es necesario la participación de la Secretaría Distrital de Ambiente Mediante específicamente el Observatorio Ambiental de Bogotá, D.C. (OAB), quien fue adoptado desde diciembre del 2011 como sistema oficial de reporte y divulgación de la información, estadísticas e indicadores ambientales que producen las entidades de la Administración Pública Distrital (S.D.S, 2012).

El Distrito Capital cuenta con la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB), que permite recolectar información sobre la concentración de contaminantes

de origen antropogénico y natural además del comportamiento de los factores meteorológicos que regulan el transporte de los mismos en la atmósfera. Los datos recolectados en distintos sitios de la ciudad se reciben en una estación central y se someten a un proceso de validación y posterior análisis con el fin de evaluar el cumplimiento de los estándares de calidad de aire en Bogotá dados por la Resolución 601 del 4 de abril de 2006 y la Resolución 610 del 24 de Marzo de 2010 expedidas por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT).

La RMCAB desde 2008 modernizó su estructura, que involucró el cambio de software de manejo de datos, el reemplazo de los equipos que tenían más de 10 años de funcionamiento, la instalación de nuevos equipos para ampliar el monitoreo de los contaminantes en los diferentes sitios de la ciudad y la adquisición de una unidad móvil que comenzó a operar en el mes de noviembre de 2008 en las instalaciones de la Secretaría Distrital de Salud (S.D.S, 2012).

Para el 2010 la RMCAB sumó 15 estaciones fijas de monitoreo y una estación móvil, ubicadas en sitios estratégicos de la ciudad, dotadas con equipos de última tecnología que permiten realizar un monitoreo continuo de las concentraciones de material particulado ( $PM_{10}$ , PST,  $PM_{2.5}$ ), de gases contaminantes ( $SO_2$ ,  $NO_2$ , CO,  $O_3$ ) y de los parámetros meteorológicos de precipitación, velocidad y dirección de los vientos, temperatura, radiación solar, humedad relativa y presión barométrica (Secretaria Distrital de Ambiente, 2012).

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

La RMCAB (Anexo G) está conformada por quince estaciones automáticas y una estación móvil, las cuales detectan en forma continua la concentración de los principales contaminantes en la ciudad (Anexo H) y envían los datos a una central de datos en donde se evalúa la calidad de la información, se depura y se procesa. Posteriormente, se elaboran informes periódicos que incluyen el análisis de los datos y la verificación del cumplimiento de las normas de calidad del aire, para detectar las áreas o sectores que requieren atención prioritaria, en relación con los contaminantes que alcanzan concentraciones de interés.

Las estaciones utilizadas por la Secretaría Distrital de Ambiente, las cuales se encuentran a cargo de la Subdirección de Calidad del Aire, Auditiva y Visual y que conforman la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá se describe a continuación:

### 3.9.1.1 Estación Usaquén (Bosque)

Código Asignado a la estación en la RMCAB	1 (Estación fija)	
Tipo de SVCA	Automática	
Ubicación	Transversal 9 N° 133 – 95	
Coordenadas geográficas	Latitud: 4.70.939	Longitud: -74.03199
Tipo de zona	Urbana	
Tipo de Estación	Entorno de fondo	
Localización del punto de toma de muestra	Azotea	
Altura del punto de toma de muestra	21,0 mts	
Altura de meteorológicos	23,0 mts	

### 3.9.1.2 Sagrado Corazón

Código Asignado a la estación en la RMCAB	2 (Estación fija)	
Tipo de SVCA	Automática	
Ubicación	Calle 37 No 8-40	
Coordenadas geográficas	Latitud:	Longitud:

	4.6252 9	-74.0724
Tipo de zona	Urbana	
Tipo de Estación	De fondo	
Altura del punto de toma de muestra	10,0 mts	
Altura de meteorológicos	10,0 mts	

### 3.9.1.3 Estación Carvajal (SONY)

Código Asignado a la estación en la RMCAB	3 (Estación fija)	
Tipo de SVCA	Automática	
Ubicación	Autopista Sur No.61-40	
Coordenadas geográficas	Latitud: 4.59580	Longitud: -74.14855
Tipo de zona	Urbana	
Tipo de Estación	Industria	
Localización del punto de toma de muestra	Azotea	
Altura del punto de toma de muestra	10,0 mts	
Altura de meteorológicos	10,0 mts	

### 3.9.1.4 Estación Tunal

Código Asignado a la estación en la RMCAB	4 (Estación fija)
Tipo de SVCA	Automática
Ubicación	Carrera 24 N° 49 – 86 Sur

Coordenadas geográficas	Latitud: 4.57.61,9	Longitud: -74.13.09,3
Tipo de zona	Urbana	
Tipo de Estación	Entorno de fondo	
Localización del punto de toma de muestra	Zona verde	
Altura del punto de toma de muestra	4,0 mts	
Altura de meteorológicos	10,0 mts	

### 3.9.1.5 Estación Parque Simón Bolívar (IDRD)

Código Asignado a la estación en la RMCAB	5 (Estación fija)	
Tipo de SVCA	Automática	
Ubicación	Calle 63 No. 47-06	
Coordenadas geográficas	Latitud: 04.39.30, 5	Longitud: -74.05.02,3
Tipo de zona	Urbana	
Tipo de Estación	De fondo	
Localización del punto de toma de muestra	Zona verde	
Altura del punto de toma de muestra	4,6 mts	
Altura de meteorológicos	10,0 mts	

### 3.9.1.6 Estación Las Ferias (Carrefour)

Código Asignado a la estación en la RMCAB	6 (Estación fija)	
Tipo de SVCA	Automática	
Ubicación	Av. Calle 80 N° 69Q – 50 (antigua Calle 81 68 – 50)	
Coordenadas geográficas	Latitud:	Longitud:

	04.41.37,0	-74.05.09,5
Tipo de zona	Urbana	
Tipo de Estación	De fondo	
Localización del punto de toma de muestra	Zona verde	
Altura del punto de toma de muestra	4,0 mts	
Altura de meteorológicos	10,0 mts	

### 3.9.1.7 Estación San Cristóbal

Código Asignado a la estación en la RMCAB	7 (Estación fija)	
Tipo de SVCA	Automática	
Ubicación	Carrera 2 este N° 12 – 78 Sur	
Coordenadas geográficas	Latitud: 04.57.25	Longitud: -74.08.36
Tipo de zona	Urbana	
Tipo de Estación	De fondo	
Localización del punto de toma de muestra	Zona verde	
Altura del punto de toma de muestra	4,0 mts	
Altura de meteorológicos	10,0 mts	

### 3.9.1.8 Estación Guaymaral (Escuela)

Código Asignado a la estación en la RMCAB	8 (Estación fija)
Tipo de SVCA	Automática
Ubicación	AV Carrera 45 N° 205 – 59 (antigua Autopista Norte Km. 13)



Coordenadas geográficas	Latitud: 04.47.13,0	Longitud: -74.02.52,0
Tipo de zona	Rural	
Tipo de Estación	De fondo	
Localización del punto de toma de muestra	Zona verde	
Altura del punto de toma de muestra	4,0 mts	
Altura de meteorológicos	10,0 mts	

### 3.9.1.9 Estación Kennedy

Código Asignado a la estación en la RMCAB	9 (Estación fija)	
Tipo de SVCA	Automática	
Ubicación	Carrera 86 N° 40-55 Sur	
Coordenadas geográficas	Latitud: 04.37.29,9	Longitud: -74.09.40,7
Tipo de zona	Urbana	
Tipo de Estación	De fondo	
Localización del punto de toma de muestra	Zona verde	
Altura del punto de toma de muestra	7,0 mts	
Altura de meteorológicos	10,0 mts	

### 3.9.2.10 Estación Suba (Corpas)

Código Asignado a la estación en la RMCAB	11 (Estación fija)	
Tipo de SVCA	Automática	
Ubicación	Carrera 111 N° 157 – 45 (Clínica Corpas AV. Corpas Km. 13)	
Coordenadas geográficas	Latitud: 04.45.54,4	Longitud: -74.05.48,4

Tipo de zona	Suburbano
Tipo de Estación	De fondo
Localización del punto de toma de muestra	Azotea
Altura del punto de toma de muestra	10,3 mts
Altura de meteorológicos	12,3 mts

### 3.9.2.11 Estación móvil (Actual ubicación)

Código Asignado a la estación en la RMCAB	12 (Estación móvil)	
Tipo de SVCA	Automática	
Ubicación	Carrera 32 No. 12-81	
Coordenadas geográficas	Latitud: _____	Longitud: _____
Tipo de zona	Urbana	
Tipo de Estación	Entorno de fondo	
Localización del punto de toma de muestra	Patio	
Altura del punto de toma de muestra	4,0 mts	
Altura de meteorológicos	10,0 mts	

### 3.9.2.12 Estación Puente Aranda

Código Asignado a la estación en la RMCAB	13 (Estación fija)	
Tipo de SVCA	Automática	
Ubicación	Carrera 65 No. 10-95	
Coordenadas geográficas	Latitud: 04.38.04, 8	Longitud: -74.07.15,0
Tipo de zona	Urbana	

Tipo de Estación	De fondo
Localización del punto de toma de muestra	Azotea
Altura del punto de toma de muestra	24, 0 mts
Altura de meteorológicos	26, 0mts

### 3.9.2.13 Estación Fontibón

Código Asignado a la estación en la RMCAB	14 (Estación fija)	
Tipo de SVCA	Automática	
Ubicación	Carrera 96G N° 17B – 49 (antigua Carrera 95 N° 24 – 49)	
Coordenadas geográficas	Latitud: 04.40.23,1	Longitud: -74.08.42,2
Tipo de zona	Urbana	
Tipo de Estación	De fondo	
Localización del punto de toma de muestra	Azotea	
Altura del punto de toma de muestra	14,0 mts	
Altura de meteorológicos	16, 0 mts	

### 3.9.2.14 Estación Usme

Código Asignado a la estación en la RMCAB	15 (Estación fija)	
Tipo de SVCA	Automática	
Ubicación	Carretera a Usme N° 16 – 71	
Coordenadas geográficas	Latitud: 04.29.87,8	Longitud: -74.07.58,1
Tipo de zona	Rural	
Tipo de Estación	Meteorológica	

Localización del punto de toma de muestra	Zona verde
Altura de meteorológicos	10, 0 mts

### 3.9.2.15 Estación Vitelma

Código Asignado a la estación en la RMCAB	16 (Estación fija)	
Tipo de SVCA	Automática	
Ubicación	Calle 9 Sur con Carrera 9 Este	
Coordenadas geográficas	Latitud: 04.34.53,6	Longitud: -74.04.40,2
Tipo de zona	Rural	
Tipo de Estación	Meteorológica	
Localización del punto de toma de muestra	Zona verde	
Altura de meteorológicos	10,0 mts	

### 3.9.2 Contaminación atmosférica y su impacto sobre la salud.

Múltiples son los cambios que han estado ocurriendo durante décadas en la atmósfera y en el balance de radiación global producto de material particulado y gases que las actividades humanas, y también ciertos fenómenos naturales, han estado generando y liberando a la atmósfera (CEPIS, 2005).

La contaminación del aire se ha convertido en una de las principales preocupaciones de la salud pública de muchas ciudades de América de Sur y el Caribe, donde las concentraciones de partículas y otros contaminantes exceden las normas nacionales de calidad. La exposición a los tipos y concentraciones de contaminantes que frecuentemente se encuentra en las zonas urbanas se ha relacionado con un aumento de riesgo de mortalidad y morbilidad debido a una variedad de condiciones, dentro de las que se encuentran incluidas las Enfermedades Respiratorias Agudas (CEPIS, 2005).

El notable deterioro de la calidad del aire en Bogotá, así como su directa relación con problemas de salud ha generado una creciente preocupación por parte de las autoridades ambientales y de salud pública de la ciudad. Sin embargo a pesar de los esfuerzos realizados en años recientes, el problema de contaminación atmosférica es cada vez más severo. Esta situación se explica, en parte, por el acelerado crecimiento económico que se ha presentado en Bogotá. Dicho crecimiento se manifiesta en una mayor demanda de energía y por consiguiente en un acelerado consumo de combustibles fósiles (Gaitán y Cancino, 2007).

## 4. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1 ÁREA DE UBICACIÓN

La siguiente investigación se llevó a cabo en las siguientes localidades:

- Localidad de Chapinero (Anexo J)  
Terraza de la Fundación Universitario Los Libertadores, sita en la localidad de Chapinero, ciudad de Bogotá, Colombia.  
Posición: Norte  $04^{\circ} 39'05.9''$  y Oeste  $074^{\circ}03'56.9''$   
Altitud: 2453 msnm
- Nemocón, embalse del Neusa (Anexo K)  
Posición: Latitud Norte 5004', Latitud Oeste 73053'  
Altitud: 2585 msnm

### 4.2 DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE TURBIEDAD ATMOSFÉRICA ( $\beta$ ).

Se determinó el coeficiente de turbiedad atmosférica ( $\beta$ ) en las localidades de Chapinero y Nemocón siguiendo para esto el Modelo de Ångström apoyado en la Ley de Lambert Bougert Beer.

#### 4.2.1 Método de cálculo del coeficiente de turbiedad ( $\beta$ )

Para calcular el coeficiente  $\beta$ , se realizaron mediciones simultáneas de Radiación solar directa (que es la que llega sobre una superficie normal al rayo solar por unidad de área y unidad de tiempo) medida con el pirheliómetro calibrado en ciudad de México y las variables meteorológicas: temperatura, humedad del aire, presión atmosférica y columna total de ozono que se toma del satélite NASA. Los datos se miden en días despejados (sin nubes).

La irradiancia solar directa que se mide en toda la banda del espectro solar, se calcula  $\beta$ , igualando el valor medio en  $W/m^2$  con la irradiancia teórica que llegaría si no existiese atmósfera y se obtiene por la igualdad sugerida por Bird and Hulstrom que

expresa la radiación solar directa ( $I_n$ ) en función de las transmitancias de los principales constituyentes de la atmósfera, entre ellos el aerosol. Se describe como sigue:

$$I_n = 0.9751 E_0 I_{sc} \tau_r \tau_o \tau_g \tau_w \tau_a$$

Donde:

$I_n$  = Radiación solar directa en toda la banda en  $W/m^2$

**0.9751** = Factor calculado debido intervalo ancho del espectro ( $0.3 - 3.0 \mu m$ ), que indica que solamente llega un 97 % de radiación solar del total de toda la banda.

$I_{sc}$  = Constante solar ( $1367 W/m^2$ ).

$E_o$  = Factor de corrección por excentricidad del giro de la tierra.

$\tau_r$  = Transmitancia de radiación solar por dispersión de Rayleigh.

$\tau_o$  = Transmitancia de radiación solar por absorción del Ozono.

$\tau_g$  = Transmitancia de radiación solar por gases uniformemente mezclados.

$\tau_w$  = Transmitancia de radiación solar por vapor de agua.

$\tau_a$  = Transmitancia de radiación solar por presencia de aerosoles.

Factor de corrección por excentricidad del giro de la tierra ( $E_o$ ) se determina por la ecuación de Spencer:

$$E_o = (R_o/R) = 1,00011 + 0,034221 \cos \alpha + 0,00128 \sin \alpha + 0,000719 \cos 2 \alpha + 0,000077 \sin 2 \alpha$$

Donde:  $\alpha$ , es la posición angular de la tierra en su giro alrededor del sol para cualquier día del año, se determina así:  $\alpha = 2 \pi (dn - 1) / 365$ , el dn es el día juliano del año.

$R_o$  = Distancia promedio tierra – sol (1 U.A),

$R$  = Distancia tierra sol para cualquier día del año.

$\tau_r$  = Transmitancia de la radiación debida a la dispersión de Rayleigh.

$$\tau_r = \text{Exp} [ - 0.0903 (m_a)^{0.84} ( 1.0 + (m_a)^{1.01} ) ]$$

$(m_a)$  = Es la masa de aire modificada a la presión de la estación a cualquier altura sobre el nivel del mar, y se determina con la siguiente igualdad:

$$m_a = m_r ( P / 1013.25 )$$

$m_r$  = es la masa de aire relativa en función de la elevación solar, se determina por la siguiente igualdad :

$$m_r = [ \text{Cos}\theta + 0.50572 ( 96.07995 - \theta )^{-1.6364} ]^{-1}$$

donde  $\theta$  es el ángulo cenital.

$\tau_o$  = **transmitancia de la radiación debido a la absorción por el ozono**

$$\tau_o = 1 - [ 0.1611 U_3 ( 1 + 139.48 U_3 )^{-0.3035} - 0.002715 U_3 ( 1 + 0.044 U_3 + 0.0003 U_3^2 )^{-1} ]$$

Donde:

$$U_3 = \frac{\Omega}{1000} \cdot m_r$$

Y  $\Omega$  es la columna total de ozono en unidades Dobson.

$\tau_g$  = **Transmitancia debida a la absorción por gases uniformemente mezclados**

$$\tau_g = e^{(-0.0127 m_a^{0.26})}$$

$\tau_w$  = Transmitancia debida a la absorción por el vapor de agua

$$\tau_w = 1 - .4959 U_1 \left[ ( 1 - 79.034 U_1 )^{0.6828} + 6.385 U_1 \right]^{-1}$$

Donde:

$$U_1 = w \cdot m_r$$

Y  $w$  se define como “columna de agua precipitable” y Leckrner la expresa en función de la humedad relativa con la siguiente ecuación:

$$w = 0,493 \Phi_r P_s / T$$

donde  $\Phi_r$  es la humedad relativa del aire, T es la temperatura ambiente en grados Kelvin y  $P_s$  es la presión parcial del vapor de agua saturado en el aire y es dado con la siguiente ecuación:

$$P_s = \exp ( 26,23 - 5416/T ),$$

$\tau_a$  = **Transmitancia de radiación debida a la atenuación por los aerosoles**

$$\tau_a = [ ( 0.12445 \alpha - 0.0162 ) + ( 1.003 - 0.125 \alpha ) ] e^{-\beta m_a ( 1.089 \alpha + 0.5123 )}$$



Donde  $\beta$  es el coeficiente de turbiedad atmosférica y se encuentra en el rango de 0.0 a 0.4 y  $\alpha$  es el coeficiente del tamaño de las partículas del aerosol.

Los valores de  $\alpha$  están relacionados con el radio promedio de las partículas en suspensión en la atmósfera, variando de 4 a 0. Cuando las partículas son muy pequeñas como las partículas de aire,  $\alpha$  se aproxima a 4 y cuando son muy grandes se aproximan a 0. Generalmente  $\alpha$  tiene un valor entre 0,5 y 2,5 y comúnmente se emplea un valor de 1,3 como lo sugiere el propio Ångström.

#### **4.2.2 Instrumentos de medición**

Pirheliómetro

El equipo utilizado en este trabajo se corresponde con un NIP (Normal Incidente Pyrheliometer) de Eppley (Figura 2), El cual fue calibrado con la Referencia Mundial de Radiación Solar (WRR) en la Universidad Autónoma de México en diciembre de 2006, para validez y confiabilidad de las medidas.

Termohigrómetro (Anexo L)

Voltímetro (Anexo M)

Receptor GPS (Anexo N)

#### **4.3 COEFICIENTE DE TURBIEDAD ATMOSFÉRICA ( $\beta$ ) PARA LAS LOCALIDADES DE NEMOCÓN Y CHAPINERO LOS AÑOS 2011 Y 2012.**

Los datos de turbiedad atmosféricas ( $\beta$ ) obtenidos para Nemocón y Chapinero mediante la metodología citada anteriormente fueron comparados según la prueba estadística de Mann-Whitney-Wilcoxon (5%).

Posteriormente a la comparación del coeficiente de turbiedad atmosférica ( $\beta$ ) en ambas localidades se procedió a relacionarla con el nivel de calidad atmosférica sugerido por Ångström. Para los aerosoles atmosféricos,  $\alpha$  se encuentra generalmente en el rango de 0,5 a 2,5. Un buen valor promedio para estimaciones de la atenuación por aerosoles es  $\alpha = 1,3 \pm 0,5$  (Muhammad, 1983). El parámetro  $\beta$  varía entre 0 y 0,5.

<b>Atmósfera</b>	<b><math>\beta</math></b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b>Visibilidad (Km)</b>
Limpia	0,0	1,3	340
Clara	0,1	1,3	28
Turbia	0.2	1,3	11
Muy Turbia	0.4	1,3	< 5

Tabla 2. Valores de  $\alpha$  y  $\beta$  para distintas situaciones de visibilidad atmosférica

#### **4.4 DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE TURBIDEZ ATMOSFÉRICA ( $\beta$ ) EN LA LOCALIDAD DE CHAPINERO ENTRE LOS AÑOS 2007 Y 2012.**

Los datos de turbidez atmosférica ( $\beta$ ) provenientes de Chapinero a lo largo de los años 2011 y 2012 fueron graficados a lo largo del año en estudio para evaluar los meses de menor y mayor contaminación atmosférica, y compararlos entre sí para determinar la dinámica de dicho comportamiento a través de los últimos años.

La comparación de los comportamientos de turbidez atmosférica entre los años 2007 y 2012 se efectuó en forma de distribución, realizándose la prueba estadística de Kolmogorov-Smirnov (5%).

#### **4.5 ASOCIACIÓN ENTRE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA ( $PM_{10}$ ) Y LA MORBILIDAD POR ENFERMEDADES RESPIRATORIAS, HOSPITAL DE CHAPINERO E.S.E., 2011.**

##### **4.5.1 Determinación del valor anual de $PM_{10}$ y su comportamiento en el año 2011.**

Se procedió a la recolección de datos de  $PM_{10}$  diario de la localidad de Chapinero y a su graficación para cada mes del año 2011 y se contrastó con los valores máximos permisibles de  $PM_{10}$  establecidos de  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  según la Resolución 610 (2010) y la Agencia de Protección del Medio Ambiente, respectivamente.

El índice de calidad del aire respecto a los niveles de PM<sub>10</sub> diario se determinó mediante la ubicación del PM<sub>10</sub> diario, calculado como valor promedio anual para el año 2011, de acuerdo a la categoría de riesgo para la salud que se presenta a continuación:

Valor del Índice	Nivel Concerniente a la Salud	Declaraciones Preventivas	Población Afectada	Efectos en la Salud
0-50	Bueno	Ninguna	Niños y niñas menores de 12 años con antecedentes de asma, o síndrome bronco-obstructivo recurrente, y mayores de 60 años con antecedentes de Enfermedad pulmonar obstructiva crónica- EPOC (asma, enfisema)	A pesar que los niveles están por debajo de la norma de calidad del aire, cualquier concentración de contaminantes puede tener afectación en la salud, con el inicio de síntomas o molestias asociadas al sistema respiratorio tales como la irritación de mucosas.
51-100	Moderado	La gente extremadamente sensible debe considerar reducir la actividad física prolongada y pesada que esté haciendo al 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.	El grupo anterior, fumadores, todos los niños y niñas menores de 12 años, y adultos mayores 60 años y población que realiza ejercicio o labora al aire libre.	Incremento de la probabilidad de ocurrencia de síntomas respiratorios tales como irritación de mucosas, dolor de cabeza, malestar general y tos en personas sensibles, con enfermedades respiratorias y/o cardiovasculares. En cuanto a las personas sanas hay irritación de mucosas.

101-150	Desfavorable para Grupos Sensibles	Los niños, los adultos activos, y personas con enfermedades cardíacas o pulmonares, tales como asma, deben reducir los esfuerzos prolongados o pesados que realizan al aire libre, sobre todo los niños y los mayores de 60 años.	El grupo anterior mas población general	<p>Personas de los grupos sensibles pueden presentar enfermedades respiratorias y cardiovasculares o complicación de las mismas.</p> <p>En cuanto a las personas sanas presenta un incremento de ocurrencia de síntomas respiratorios tales como irritación de mucosas, dolor de cabeza, malestar general, tos.</p>
151-200	Desfavorable	Los niños, los adultos activos, y personas con enfermedades cardiovasculares o respiratorias, tal como asma, deben evitar al realizar actividades prolongadas o pesadas al aire libre. Se debe reducir la actividad que se esté realizando al aire libre, sobre todo en niños y personas mayores de 60 años.	El grupo anterior mas población general	Complicación de enfermedades en las personas de los grupos sensibles. En las personas sanas se da el inicio de enfermedades respiratorias y cardiovasculares.
201-300	Muy desfavorable	Los niños y los adultos activos, y la gente con enfermedades cardíacas o pulmonares, tal como asma, deben evitar todo el esfuerzo al aire libre. Especialmente los niños, debe evitar la actividad fuerte o prolongada al aire	El grupo anterior mas población general.	La población sensible presenta efectos severos y en la población en general se aumenta el número de enfermedades respiratorias y cardiovasculares.

		libre.		
301-500	Peligroso	Todas las personas deben evitar cualquier actividad física al aire libre.	El grupo anterior mas población general.	Continúa la activación de la alerta epidemiológica pues la población en general ya presenta daños en el sistema respiratorio y cardiovascular.

Índice de Calidad de Aire por categorías de riesgo para la salud (Secretaria Distrital de Salud ,2009).

Ante la ausencia de reportes de la estación No. 10 (Chico Lago) se tomaron los datos de la estación No. 5 (Parque Simón Bolívar, IDRD); la cual pertenece al mismo sector de estudio.

Código asignado a la estación en la RMCAB	5 (Estación fija)		
Tipo de SVCA	Automática		
Ubicación	Calle 63 N°. 47-06		
Coordenadas geográficas	Latitud: 04° 39'30''	Longitud: 74°05'02''	
Tipo de zona	Urbana		
Tipo de estación	De fondo		
Equipos	<b>Parámetro</b>	<b>Nombre</b>	<b>Principio analítico</b>
	PM10	Bet One Bam 1020	Atenuación Beta
	PM2.5	Thermo Scientific FH62C14	Atenuación Beta
	O3	Tapi 400E	Fotómetro UV no dispersivo
	CO	Ecotech EC 9830	Absorción de infrarrojo con filtro de gas.
	SO2	Tapi 100E	Fluorescencia pulsada
	NO2	Thermo Scientific 42i	Quimioluminiscencia

Localización del punto de toma de muestra	Zona verde
Altura del punto de toma de muestra	4,6 m
Altura de meteorológicos	10,0 m

Características de la Estación No 5 (Parque Simón Bolívar (IDRD)). Informe Anual Calidad del Aire de Bogotá RMCAB año 2001 (Secretaria Distrital de Ambiente, 2012)

#### **4.5.2 Determinar la relación entre $PM_{10}$ y aparición de enfermedades respiratorias 2011.**

Los datos mensuales de  $PM_{10}$  diario provenientes de la estación No. 5 Parque Simón Bolívar colectados se relacionaron con el promedio mensual de pacientes con enfermedad respiratoria reportados por el Hospital de Chapinero E.S.E.

La relación lineal entre estas dos variables se realizó con la prueba estadística de correlación de rango de Spearman (5%) utilizando para ello el paquete estadístico STATGRAPHICS PLUS 5.1.

#### **4.5.3 Determinación de la población más vulnerable ante los niveles de contaminación atmosférica.**

Los datos de pacientes con enfermedad respiratoria asistidos por el hospital de Chapinero E.S.E, fueron ubicados de acuerdo con la clasificación de grupos etarios establecidas por la OMS de la siguiente forma:

- Pre-escolar: Es la etapa comprendida entre los 0 y los 5 años de edad,
- Escolar: Es la etapa comprendida entre los 6 y 10 años de edad,
- Adolescencia: Es la etapa comprendida entre los 11 y 20 años de edad,
- Madurez: Es la etapa comprendida entre los 21 y 59 años de edad,
- Vejez: Es la etapa comprendida para edades superiores a 60 años de edad,

La determinación del grupo etario de mayor vulnerabilidad se llevó a cabo por comparación de los valores promedios obtenidos en cada categoría, utilizando las pruebas estadísticas ANOVA (5%) y la Prueba de Comparación de Medias de Duncan (5%).

Para ambas pruebas el software estadístico utilizado, correspondió con STATGRAPHIC PLUS 5.1

## 5. RESULTADOS

### 5.1 COMPARACIÓN DEL COEFICIENTE DE TURBIDEZ ATMOSFÉRICA ENTRE LAS LOCALIDADES DE NEMOCÓN Y CHAPINERO (2011-2012).

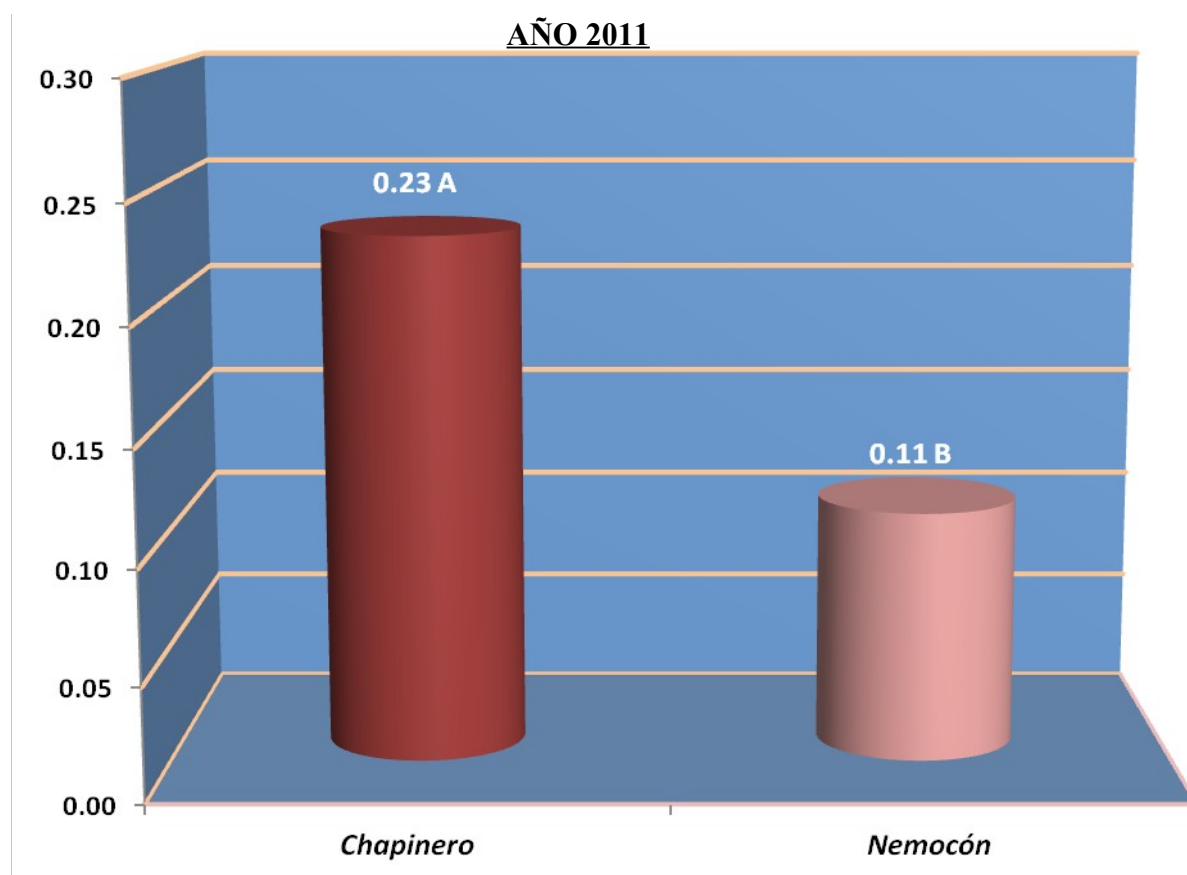


Gráfico 1: Turbiedad atmosférica ( $\beta$ ) de las localidades de Nemocón y Chapinero en el año 2011.

Nota: Letras diferentes representan diferencia significativa para Prueba de Mann Whitney Wicoxon (5%)

Como se muestra en el gráfico 1, la turbidez atmosférica ( $\beta$ ) en la localidad de Chapinero (0.23), supera significativamente a la arrojada en la localidad de Nemocón (0.11) en el año 2011.

Resulta importante señalar que el registro de turbiedad atmosférica en la zona de estudio supera el doble del reporte que se muestra en Nemocón.

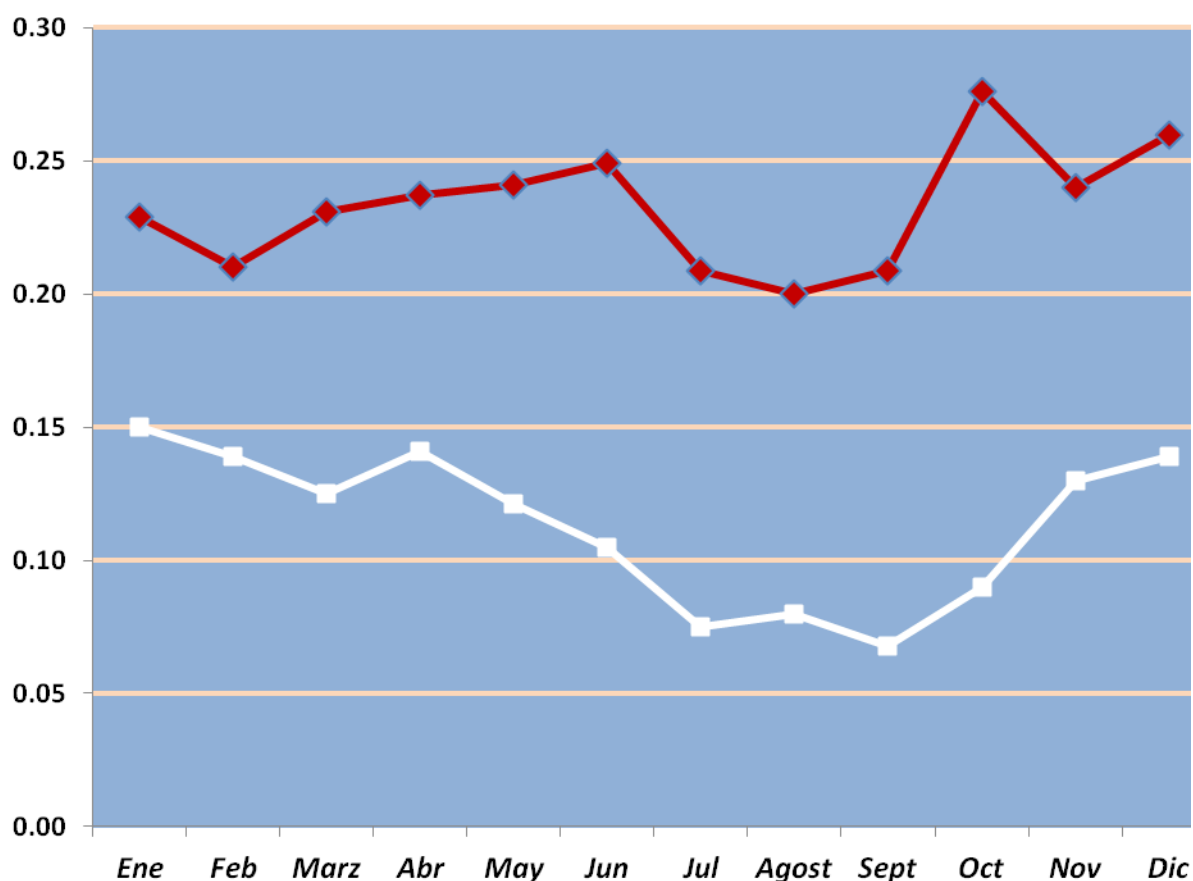


Gráfico 2: Curva de comportamiento de la turbiedad atmosférica ( $\beta$ ) durante el año 2011 en las localidades de Chapinero y Nemocón.(Anexo I)



El intervalo de los valores de turbiedad atmosférica durante el año 2011 resulta completamente diferente en ambas localidades según se muestra en el gráfico 2.

En Nemocón los datos permanecen por debajo de 0.15 durante todo el año, llegando a un valor mínimo de 0.07. Mientras que en la localidad de Chapinero los registros permanecen durante el año 2011 por encima de 0.20, alcanzando un valor máximo de 0.28.

En ambas localidades los meses de menor turbiedad se encuentran comprendidos en el trimestre julio-septiembre. Sin embargo los meses de mayor turbiedad atmosférica en Chapinero corresponden a junio, octubre y diciembre; mientras que en Nemocón estos meses son enero, abril y diciembre.

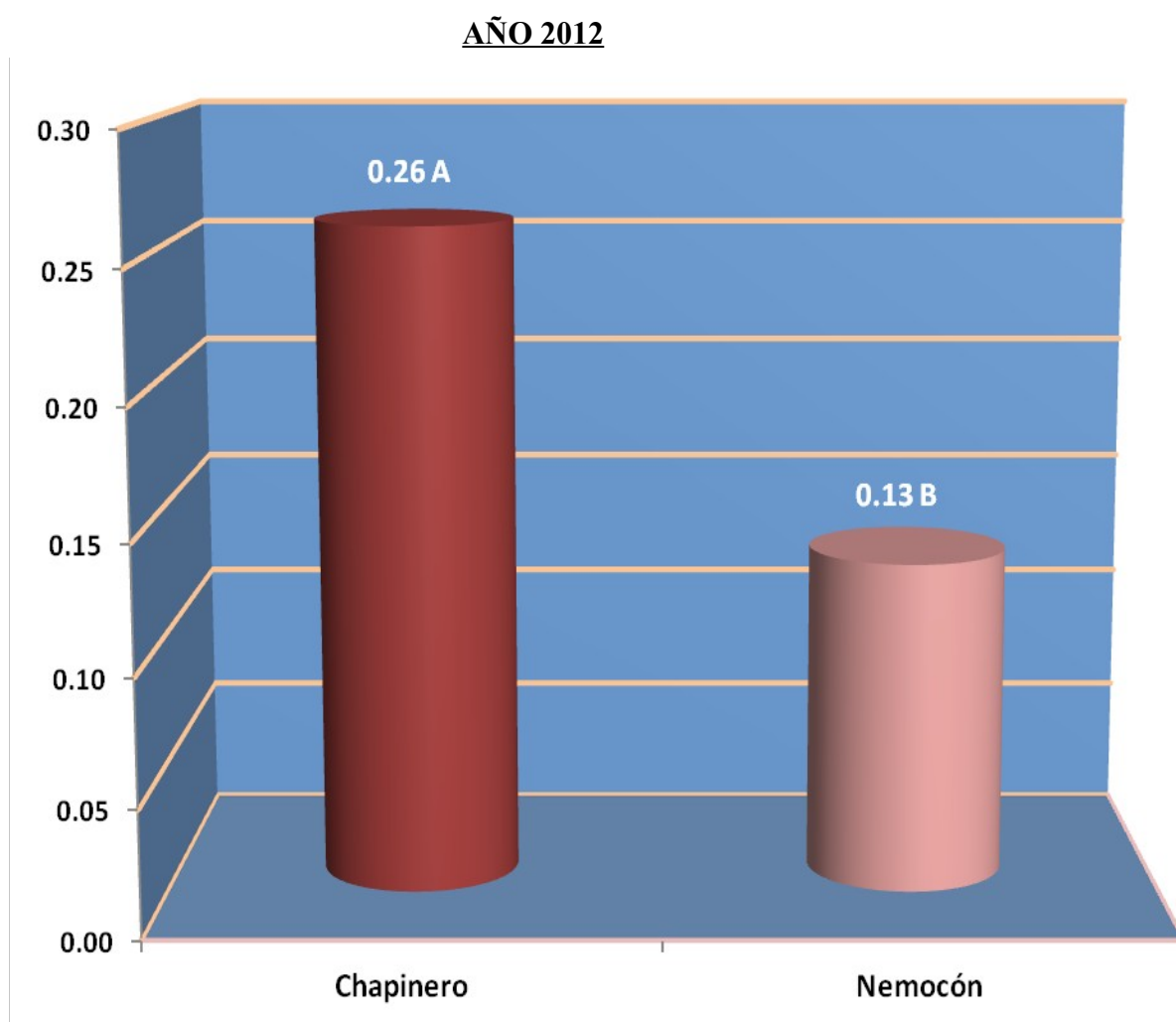


Gráfico 3: Turbiedad atmosférica ( $\beta$ ) de las localidades de Nemocón y Chapinero en el año 2012.

Nota: Letras diferentes representan diferencia significativa para Prueba de Mann Whitney (5%)

De modo similar a lo mostrado en el año 2011 (grafico 1). La turbidez atmosférica ( $\beta$ ) en la localidad de Chapinero, supera significativamente la registrada en la localidad de Nemocón (gráfico 3) y se mantiene que el resultado de turbiedad atmosférica ( $\beta$ ) llega a duplicar al registro de turbiedad en el sitio de atmósfera limpia (Nemocón).

La calidad de la atmósfera para la localidad de Chapinero durante los dos años de evaluación (2011 y 2012) de acuerdo a la clasificación dada por Ångström se orienta atmósfera turbia.

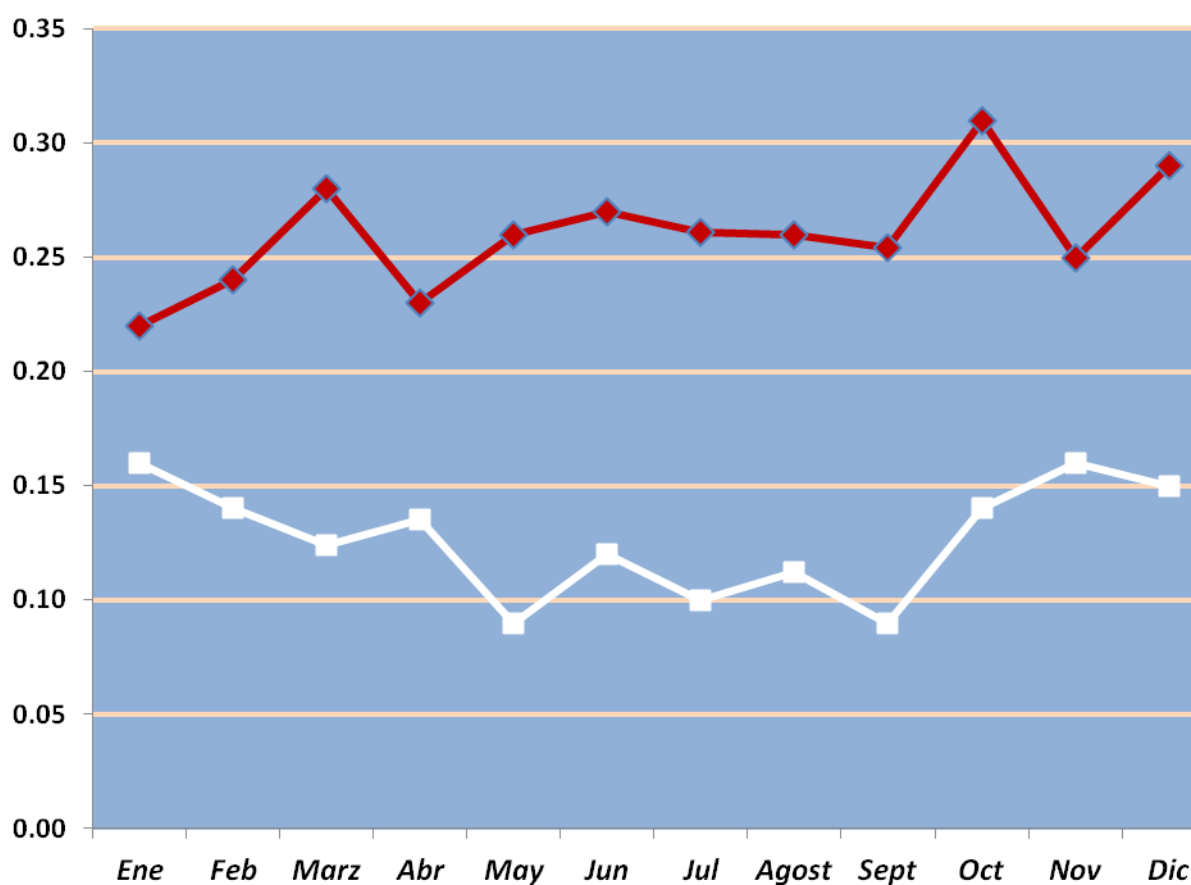


Gráfico 4: Curva de comportamiento de la turbiedad atmosférica ( $\beta$ ) durante el año 2012 en las localidades de Chapinero y Nemocón.

Al igual de lo referido en el año 2011 (gráfico 2), durante el año 2012 la dinámica de la turbidez atmosférica difiere entre ambas localidades (gráfico 4). Mientras que en Nemocón los registros se mantienen entre 0.09 y 0.16; en Chapinero los registros se mantienen entre los valores de 0.22 y 0.31.

Los meses de mayor turbiedad atmosférica ( $\beta$ ) en Chapinero corresponden a marzo, octubre y diciembre, y los de registros más bajos se encuentran en los meses de enero, febrero y abril.

En Nemocón los meses de altos niveles de turbiedad fueron enero y el trimestre octubre-diciembre. Resaltando mayo, julio y septiembre como los de menores índices de turbiedad atmosférica.

Similares resultados fueron obtenidos por Simbaqueva et al, 2009, al comparar la atmósfera de la ciudad de Bogotá con el municipio de Nemocón. La validez de la metodología empleada “Metodología de selección de días despejados” es demostrada por los trabajos realizados por los autores Erbs et al., 1982; Reindl et al., 1990; Batlles et al., 2000 en el ámbito europeo y por los autores Raichijk y Fasulo, 2010; Wright J., 2008 en Latinoamérica.

Pero además esta metodología es avalada por el hecho de que los valores de turbiedad atmosférica determinados por esta metodología tienen semejanzas con los obtenidos por vía satélite, (Polo 2010).

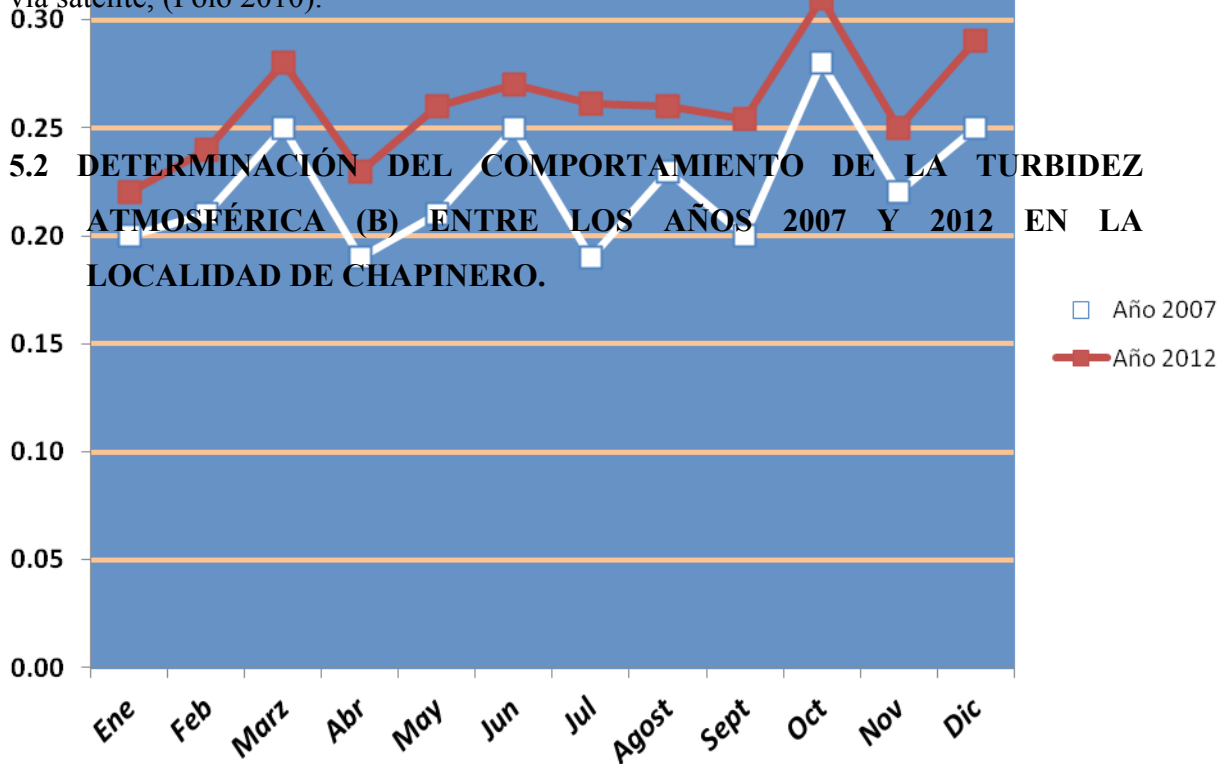


Gráfico 5: Comportamiento de la turbiedad atmosférica ( $\beta$ ) para la localidad de Chapinero entre el período 2007-2012.(Anexos C y D)

Como muestra el gráfico 5, las curvas que muestran el comportamiento de este coeficiente durante el período 2007- 2012 muestran el mismo comportamiento para prueba Kolmogorov-Smirnov (5%). En ambas curvas los picos de mayor turbiedad atmosférica se presentan en los meses marzo, junio, octubre y diciembre. Siendo a su vez los meses de enero, abril, julio y septiembre los de menores registros.

La turbiedad atmosférica ( $\beta$ ) muestra un ligero incremento en el año 2012 respecto al quinquenio anterior para todos los meses analizados. En el año 2007 el coeficiente de turbiedad atmosférica ( $\beta$ ) oscila entre 0.18 y 0.28, mientras que en el 2012 oscila en un rango de 0.23 y 0.32.

Cierta analogía en estos resultados fueron reportados por Boscá y col., 1993 en España para diferentes ciudades Valencia y Sevilla, años 1989 y 1990. En dicho trabajo los valores medios mensuales de turbiedad atmosférica sufren una evolución similar a lo largo de los años analizados con sólo ligeras diferencias del orden del 7% y el 20% en Valencia y Sevilla respectivamente.

### 5.3 ASOCIACIÓN ENTRE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA (PM<sub>10</sub>) Y LA MORBILIDAD POR ENFERMEDADES RESPIRATORIAS, HOSPITAL DE CHAPINERO E.S.E, 2011.

#### 5.3.1 Determinación del valor anual de PM<sub>10</sub> y su comportamiento en el año 2011.

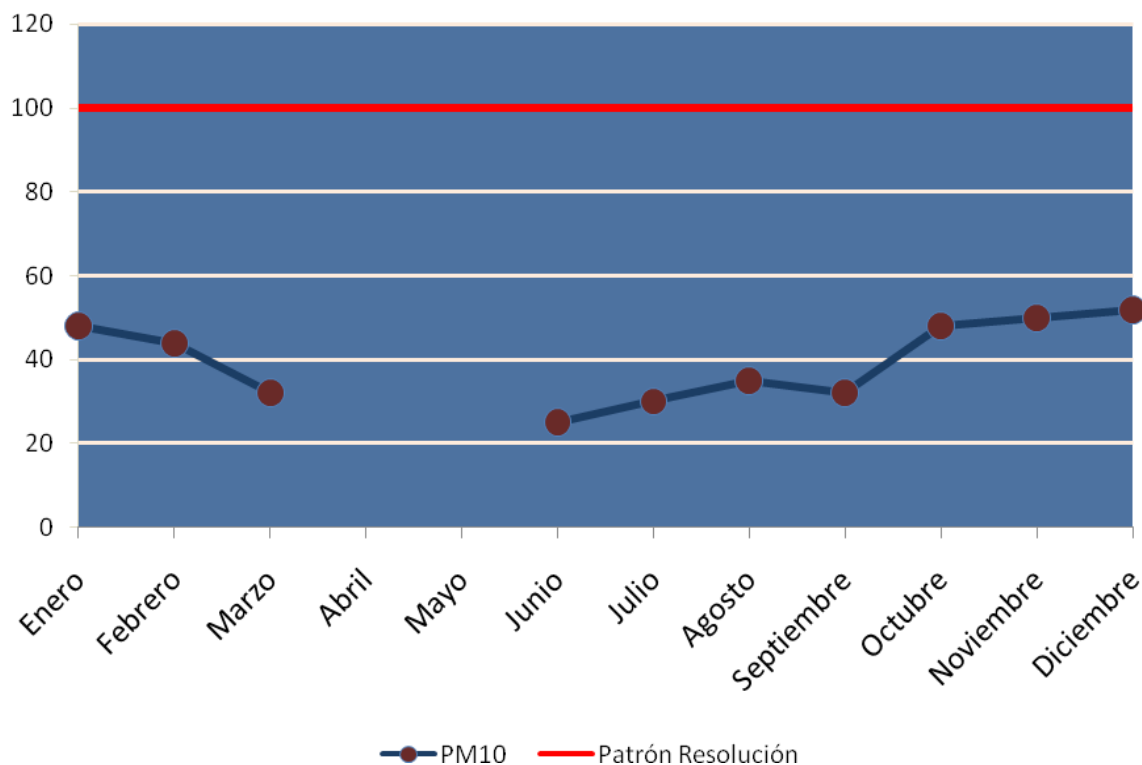


Gráfico 6: Comportamiento mensual de PM<sub>10</sub> diario en el año 2011, Estación Parque Simón Bolívar

La gráfica 6, presenta los datos de PM<sub>10</sub> durante el año 2011. Los valores emitidos por la estación de monitoreo ubicada en el Parque Simón Bolívar refieren un 89% de validez al no mostrar los datos de los meses abril y mayo. Durante el año en estudio los niveles de PM<sub>10</sub> diario se mantuvieron entre el rango de 22 y 52 μg/m<sup>3</sup>. Los meses de menor concentración de material particulado son: marzo, junio, julio y septiembre, siendo enero, octubre, noviembre y diciembre los meses de mayor presencia de material particulado en la atmósfera de la localidad en estudio.

El valor promedio anual de PM<sub>10</sub> resultó 37.5 μg/m<sup>3</sup> lo cual lo ubica en la categoría de bueno.

El comportamiento de  $PM_{10}$  durante el año 2011 así como su ubicación dentro de la primera categoría de riesgo para la salud coincide con los reportados desde el año 2007 por la Secretaria Distrital de Salud y por la Secretaria Distrital de Medioambiente.

### 5.3.2 Determinar la relación entre $PM_{10}$ y aparición de enfermedades respiratorias 2011.

Variables	Pacientes con enfermedad respiratoria	$PM_{10}$
Pacientes con enfermedad respiratoria	-	0.9294
$PM_{10}$	0.9294	-

Tabla1. Correlación entre los valores mensuales de  $Pm_{10}$  diario (Red de Monitoreo Calidad del Aire, Parque Simón Bolívar) y número de pacientes atendidos por enfermedad respiratoria , Hospital de Chapinero E.S.E año 2011.

Para el año 2011, se encontró que entre existe un fuerte correlación entre las variables  $PM_{10}$  y número de pacientes con enfermedades respiratoria en la localidad de Chapinero (Tabla1). Dicha correlación muestra un coeficiente de 0.9294 la cual la caracteriza como fuertemente positiva.

La alta relación entre los niveles de  $PM_{10}$  diario y la aparición de pacientes con enfermedad respiratoria constituye un fenómeno que se presenta a nivel mundial (OPS, 2005), en concordancia a lo reportado por Ballester et al, 2005 en España y en México por Marset y Martínez, 1998; dentro de contexto colombiano se destacan Echeverri y Maya, 2008 en Medellín, Montealgre, 1993, Ibáñez y Kenneth, 2001 en la ciudad Bogotá.

### 5.3.3 Determinación de la población más vulnerable ante los niveles de contaminación atmosférica.

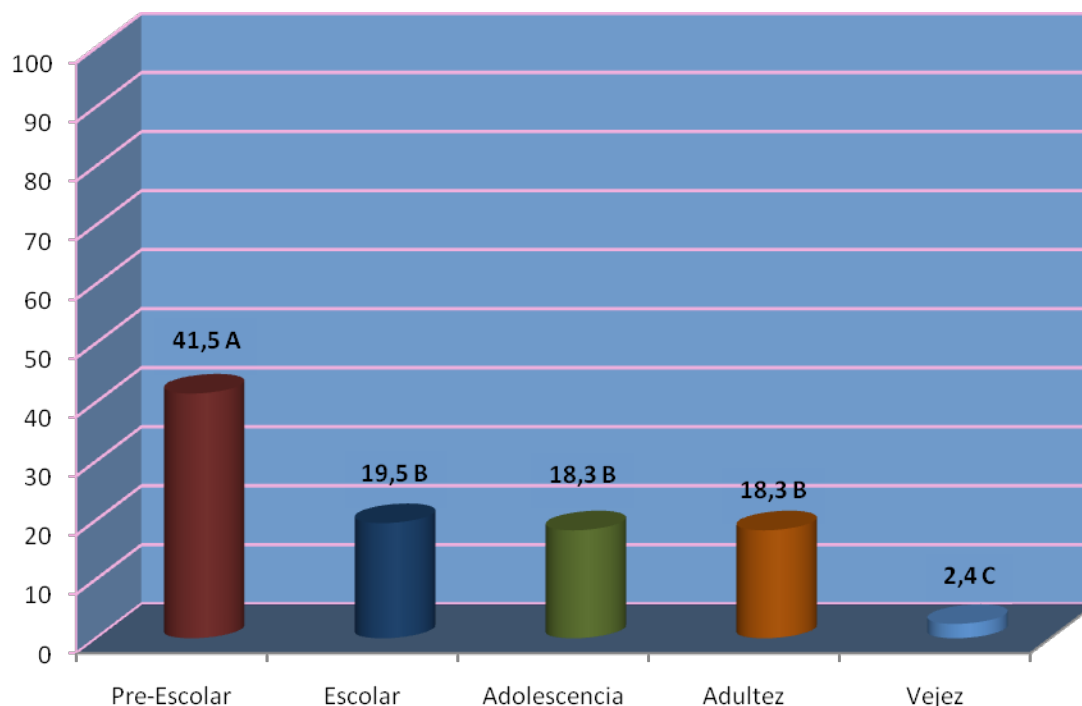


Gráfico 7. Relación de los pacientes atendidos por enfermedad respiratoria en el Hospital de Chapinero E.S.E de acuerdo a los grupos etarios para el año 2011.

Nota: Letras diferentes representan diferencias significativas para prueba de Comparación de Media de Duncan (5%).

La gráfica anterior relaciona el número de pacientes atendidos con enfermedades respiratorias y el grupo etareo al que pertenecen. El grupo mas vulnerable corresponde con el nivel pre-escolar, alcanzando el valor significativamente más alto de todos los reportados. Le sigue un segundo grupo estadísticamente similar que comprende las edades escolar, adolescencia y madurez. Por último se ubica el grupo vejez, el cual es el ciclo con el valor mas bajo de aparición de pacientes con enfermedades respiratorias.

Los resultados anteriores coinciden con los estudios realizados por Solarte y Caicedo, 1999 y por Calixto y Díaz, 1995 ambos en la Ciudad de Bogotá y por Arciniégas en el 2006.

## **6. ANALISIS Y DISCUSIÓN**

### **6.1 COMPARACIÓN DEL COEFICIENTE DE TURBIDEZ ATMOSFÉRICA ( $\beta$ ) ENTRE LAS LOCALIDADES DE NEMOCÓN Y CHAPINERO (2011 Y 2012).**

El análisis de los valores anuales de turbidez atmosférica ( $\beta$ ) mostrados en los gráficos 1 y 2, donde se aprecia el incremento significativo de la turbiedad atmosférica ( $\beta$ ) en la localidad de Chapinero con respecto a Nemocón en los años 2011 y 2012. En ambos períodos de evaluación, no solo resulta visible el incremento de la turbiedad atmosférica ( $\beta$ ) para la localidad de Chapinero sino que se refleja la aparición de una problemática aún más preocupante que es la disminución de la calidad atmosférica.

Este marcado incremento en la turbidez atmosférica ( $\beta$ ) es el resultado de la emisión de aerosoles provenientes en mayor grado del tráfico vehicular. La presencia en Chapinero



de un gran número de troncales dentro de las que se destacan: Carrera 7, Carrera 11, Carrera 13, autopista norte, Calle 100, Calle 85, Calle 82, calle 72, Calle 64, Calle 53, Calle 45, Calle 39, todo esto implica un gran número de vehículos en circulación, tanto de tráfico liviano como servicio público colectivo lo que convierte a las fuentes móviles en la principal fuente de emisión de aerosoles representando hasta el 60% de la contaminación en dicha localidad.

Un ejemplo que corrobora lo planteado con anterioridad lo constituye la marcada disminución de la turbidez atmosférica en los días sin carro.

De acuerdo a la categoría establecida por Ångström para relacionar turbidez atmosférica ( $\beta$ ) con calidad de la atmósfera el nivel de calidad atmosférica de la localidad de Chapinero corresponde con una categoría de atmósfera turbia, la cual trae consigo no sólo la disminución de la visibilidad a una distancia de 11 km, sino que aporta el hecho de que la categoría de calidad de la atmósfera en este sitio sea la penúltima en deterioro reportada en esta escala.

La variación de los meses de máximos y mínimos reportes de turbiedad en Chapinero durante los años 2011 y 2012 podría ser la consecuencia de la no existencia de una fuente fija emisora de aerosoles, lo cual apoya la teoría de que la principal fuente en esta zona lo constituye el transporte de vehículos.

La dificultad de una diferenciación real de las estaciones impide determinar si los meses de invierno o verano constituyen los de mayor riesgo de alcanzar los máximos registros de turbiedad. Sin embargo dentro de este heterogéneo comportamiento se destaca que diciembre aparece de forma constante como mes de alta turbidez. Esto podría estar relacionado con el incremento en el tráfico vehicular y la combustión durante las actividades festivas de la época que arrojan compuestos químicos como CO.

## **6.2 DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE TURBIDEZ ATMOSFÉRICA (B) EN LA LOCALIDAD DE CHAPINERO ENTRE LOS AÑOS 2007 Y 2012.**

Si bien se repite el mismo patrón en ambos años, 2011 y 2012, representa un llamado de atención la tendencia al incremento de la diferencia de la turbidez atmosférica de la zona de estudio en comparación con los registros del quinquenio anterior. O sea, aún cuando el incremento de la turbidez atmosférica es ligero y no representa por sí mismo

un empeoramiento de la calidad atmosférica, manteniéndose de modo inalterable la categoría de atmosfera turbia en ambos años; la sola tendencia al incremento de la turbidez de la atmósfera debe representar una alarma para comenzar a revertir esta alteración.

### **6.3 ASOCIACIÓN ENTRE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA (PM<sub>10</sub>) Y LA MORBILIDAD POR ENFERMEDADES RESPIRATORIAS, HOSPITAL DE CHAPINERO E.S.E, 2011.**

El comportamiento de la concentración de PM<sub>10</sub> diario durante el 2011, así como el promedio alcanzado se encuentra por debajo de lo establecido tanto por lo indicado por la Agencia de Protección Ambiental (150 µg/m<sup>3</sup>) y lo establecido en la Res.610 del 2010 (100 µg/m<sup>3</sup>). A pesar de que los valores de material particulado inhalable en la atmosfera distan de valores críticos, un análisis de acuerdo a la categoría de riesgo podría llevar a concluir la necesidad de tomar medidas preventivas en cuanto a salud se refiere.

De acuerdo a la categoría de clasificación de riesgo los resultados obtenidos se encuentran en la primera categoría siendo los niños menores de doce años con historial de enfermedades respiratorias el grupo más vulnerable.

Este resultado se evidencia al mostrar que los niños menores de 12 años, edad preescolar y escolar, representan aproximadamente el 60% de todos los casos reportados de pacientes con enfermedades respiratorias. La edad preescolar se considera por tanto, la población estadísticamente más durante el estudio realizado para el año 2011.

El material particulado constituye el factor de mayor incidencia en la salud. Esto se evidencia en el hecho de que el coeficiente de correlación alcanzó la cifra de 0.92 lo que indica que aproximadamente el 81% de las enfermedades respiratorias están relacionadas con este parámetro de contaminación atmosférica.

Resulta de interés el alto grado de correlación existente entre los niveles de Pm<sub>10</sub> y el número de pacientes con enfermedad respiratoria. Si a esto se le suma de que la población infantil constituye el mayor porcentaje afectado, es necesario tomar medidas preventivas que apunten a disminuir el número de casos en Bogotá de las Enfermedad Respiratoria Aguda (ERA) en menores de 5 años (Secretaria Distrital de Salud, Boletín Epidemiológico años 2003-2008).

La gran relación entre la aparición de enfermedades respiratoria como asma, bronquitis infección respiratoria y los valores de  $PM_{10}$  son el resultado de la fácil penetración de este en las vías respiratorias altas y bajas.

El material particulado no solo es un transportador de partículas, sino que también moviliza microorganismo relacionados con esta patología como por ejemplo microorganismos pertenecientes a los géneros *Pseudomonas*, *Serratia*, *Klebsiella*, *Corynebacteria* y *Staphylococcus* responsables de generar afecciones respiratorias.

## 7. CONCLUSIONES

- La turbidez atmosférica en la localidad de Chapinero superó estadísticamente la registrada en Nemocón en los años 2011 y 2012.
- La calidad de la atmósfera, para los años 2011 y 2012, en la localidad de Chapinero correspondió a atmósfera turbia según la clasificación Ångström, esto debido a la contaminación atmosférica generada por el sistema de transporte de combustión.
- Durante 2011 en ambas localidades los meses de menor turbiedad atmosférica fueron los comprendidos dentro del trimestre julio-septiembre. Mientras que los meses de mayor turbiedad atmosférica en Chapinero corresponden a junio, octubre y diciembre, y en Nemocón estos meses son enero, abril y diciembre.
- Durante 2012 los meses de mayor turbiedad atmosférica en Chapinero corresponden a marzo, octubre y diciembre, y los de registros más bajos se encuentran en los meses de enero, febrero y abril. Mientras que en Nemocón los meses de elevados niveles de turbiedad fueron enero y el trimestre octubre-diciembre. Siendo mayo, julio y septiembre como los de menores índices de turbiedad atmosférica.

- Se recoge igual comportamiento de la turbidez atmosférica en Chapinero entre los años 2007 y 2012, aunque se muestra una ligera tendencia al incremento.
- Correlación significativa entre los valores de  $PM_{10}$  y el número de pacientes con ER para el año 2011, Hospital de Chapinero.
- La población más afectada por ER resulto ser la infantil destacándose la edad preescolar (menores de 5 año) con valores significativamente superiores.

## **8. RECOMENDACIONES**

En Colombia el seguimiento y cumplimiento de vigilancia en la emisión atmosférica de aerosoles no se cumple estrictamente, por tal razón se recomienda establecer la metodología propuesta en este trabajo para dar fin a esta problemática.

Tanto el Estado Colombiano como las entidades competentes deben mostrar interés financiero para la adquisición de equipos o instrumentos que faciliten la toma de datos y la ejecución de trabajos de investigación que competan al tema.

El tema tratado debe socializarse con la comunidad académica con el propósito de estimular las investigaciones en temas relacionados con la calidad del aire ya que la problemática es compleja y amerita investigaciones a nivel regional, nacional e internacional con el fin de establecer las tendencias de fenómeno contaminante y establecer los correctivos.

## 9. REFERENCIAS

Ångström A., 1929; On the Atmospheric Transmission of Sun Radiation and on dust in the air. *Geografis. Annal.* 2, 156-166

Ångström A., 1930; On the Atmospheric Transmission of Sun Radiation. *Geografis. Annal.* 3, 130-159.

Ångström A., 1961; Techniques of Determining the Turbidity of the Atmosphere, *Tellus* XIII, 2, 214-223.

Ångström A., 1964; The parameters of Atmospheric Turbidity, *Tellus* XIV,1, 64-75p

Ångström A.K., 1970; On determinations of the Atmospheric Turbidity and their Relation to Pyrheliometric Measurements, *Advan. Geoph.* 44, 269-284.

Arciniegas Angela, Rodríguez Carolina, Pachón Jorge<sup>1</sup>, Sarmiento Hugo, Hernández Luis Jorge, 2006 Estudio de la morbilidad en niños menores a cinco años por enfermedad respiratoria aguda y su relación con la concentración de partículas en una zona industrial de la ciudad de Bogotá. *ACTA NOVA*; Vol. 3, N° 2, junio 2006.

ASHRAE, 1974; Handbook of Fundamentals, The American Society of Heating, Refrigeration, and Air Conditioning Engineers

Atwater M.A. and Ball J.T., 1978; A numeral solar radiation model based on standar meteorological observations, *Solar Energy* 21, 163-170. También ver *Energy* 23, página 275 (1979)

Balairón, L., 1998. “Escenarios climáticos” en Energía y Cambio Climático. Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General del Instituto Nacional de Meteorología. Serie Monografías. Madrid, 39-56.

Barry, R.G. and Chortley, R.J., 1998. *Atmósfera, tiempo y clima*. Ediciones Omega, S.A., Barcelona.

Bird R.E and Hulstrom R.L., 1979; Application of the Monte Carlo techniques to Insolation Characterization and Prediction, Solar Energy Research Institute SERI/RR-36-306, Golden CO

Bird R.E., 1984; A simple solar spectral model for direct normal and diffuse horizontal irradiance, solar energy 32, 461-471

Bird R. E.; R. E. Hulstrom. 1980. Direct Insolation Models. SERI/TR-335-344. Golden, CO: Solar Energy Research Institute.

Bird and Hulstrom, 1981 Application of the Montecarlo Techniques to Insolation Characterization and Prediction, Solar Energy Research Institute SERI/ RR 36 -306.

Blanco Luis. C, 2004. Caracterización microbiológica del material particulado como factor de riesgo sobre la salud en la localidad de Puente Aranda, Bogotá D.C. XXIX Congreso de la Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS)

CEPIS, 2005. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, “Evaluación de los efectos de la contaminación del aire en la salud de América del Sur y el Caribe”, Washington, D.C, 2005, disponible en [www.bvsde.ops-oms.org/sde/ops-sde/bvsde.shtml](http://www.bvsde.ops-oms.org/sde/ops-sde/bvsde.shtml)

Coulson K.L., 1975; *Solar and Terrestrial Radiation*, Academic Press, New York

Cuadrat, J.M y M. F. Pita. 1997. *Climatología*. Ediciones Cátedra S.A. Madrid, España. 496 pp.

Davies J.A and Hay J.E,; 1979; Calculation of the Solar Radiation Incident on a Horizontal Surface, Proceedings of the First Canadian Solar Radiation Data Workshop, April 17-19 (1978), Canadian Atmospheric Environment Service.

Davies J.A.; McKay D.C., Luiciani G. and Abde-Wahab, 1988; Validation of Models for Estimating Solar Radiation on Horizontal Surface, IEA Task IX Final Report, Vol. 1, Atmospheric Environment Service, Downsview.

Davies J.A. and D.C. McKay, 1989; Evaluación of Select Models for Estimating Solar Radiation on Horizontal Surface, Solar Energy, 43, 3, 153-168

Díaz, Rodríguez Ana María. 2005. "Caracterización de los aerosoles atmosféricos y su influencia en los niveles de radiación UV en la región de Canarias". Tesis Doctorales. Ciencias y Tecnología. Universidad La Laguna, San Cristóbal (España). <ftp://tesis.bbt.ull.es/ccpytec/cp265.pdf>.

Directiva 1999/30/CE del Consejo de 22 de abril de 1999 relativa a los valores límite de SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>, partículas y Pb en el aire ambiente DOUE L 163 de 29.6.1999

Duffie, J.A. y Beckman, 1991. W.A. Solar Engineering of Thermal Processes. New York: John Wiley & Sons, 919 p.

Echeverri L. C y Maya G. 2008, Relación entre las partículas finas (pm<sub>2.5</sub>) y respirables (pm<sub>10</sub>) en la ciudad de Medellín. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, volumen 7, No. 12, pp. 23-42 - ISSN 1692-3324.

Emmet, E.A.1973 *Ultraviolet radiation as a cause of skin tumors*, CRC Crit, Rev. Toxicol.,2: 211-255p.

EPPLEY LAB, Laboratorio Eppley, (en línea) (Citado el 28 de Agosto de 2008)  
Disponible en Internet, <http://www.eppleylab.com/>

Feagle R.G. and Businger J.A., 1963; An Introduction to ATMOSPHERIC PHYSICS, Academic Press, New York.

Finlayson-Pitts, B. J., and J. N. Pitts, Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere: Theory, Experiments, and Applications, academic press, San Diego, California, USA, 2000.

Font, I., 1956. El tiempo atmosférico en las Islas Canarias. Servicio Meteorológico Nacional INM, Serie A, No. 26. Madrid.

Gaitán M. y Cancino J., 2007. Rev.ing. n.26 Bogotá jul./dic. 2007, versión impresa ISSN 0121-4993.

Garabatos, M. 1990. Temas de Agrometeorología. Naturaleza de la Agrometeorología. Unidad de Agrometeorología. Tomo 2. Consejo Profesional de Ingeniería Agronómica y Orientación Gráfica Editora S.R.L., Buenos Aires, Argentina. 97 pp.

Gueymard C., 1993; Critical Analysis and Performance Assessment of Clear Sky Solar Irradiance Models using Theoretical and measured Data, Solar Energy 51, 121-138.

Hoyt D.V., 1978; A Model for the Calculation of Solar Global Insolation, Solar Energy 21, 27-35 p.

Ibáñez Ana M. y Kenneth McConnello, 2001. A morbidity valuation: Acute Respiratory Illnesses in Bogotá, Colombia, Universidad de los Andes y Universidad de Maryland.

IDEAM, 2005 UPME. Atlas de Radiación Solar de Colombia. Bogotá. Imprenta Nacional.

IPCC, 2001: Working Group I: The Scientific Basis. Chapter 5. Aerosols, their Direct and Indirect Effects.

Iqbal, M. 1983. An Introduction to Solar Radiation. Vancouver-Canadá: Academic press, 377p, 1983.

Jansen, T.J, 1985. Solar Engineering Technology. New Jersey: Prentice Hall, 205p, 1985.

Junge C.E., 1959: Atmospheric Chemistry, Advances in Geophysics 4, p 8

Karalis J.D., Pissimanis D.K. and Notaridou V.A., 1982; Estimation of Global, Direct and Diffuse Solar Radiation in Athen under Clear Sky Conditions, Arch. Met. Geoph. Biokl. **B131**, 369-377

Kasten F, 1966. A new table and approximate formula for relative optical air mass. Arh. Meteorological Geophys. Bioklimatol. Ser B 14, 206 – 223.

Kreith, F. y Kreider, J.F. 1978. Principles of Solar Engineering. Washington: Hemisphere Publishing C Corporation, 725p.



- Lacis A.A, and Hansen J.E., 1974; A Parameterization for Absorption in Earth's Atmosphere, *J.Atmos. Sci.*31, 118-133
- Lamap. 1986. Revised Introduction Manual on Radiation Instruments and Measurements. WMO/TD-N° 149. Ginebra: WCRP Publications Series N° 7, 134p.
- Lave, Lester B.; Eugene P. Seskin (1973). «An Analysis of the Association Between U.S. Mortality and Air Pollution». *J. Amer. Statistical Association* 68: pp. 342.
- Leckner B. 1978. The spectral distribution of solar of solar radiation at the earth surface – elements of a model. *Solar Energy* 20(2):143-150.
- Linke F., 1922; *Beitr. Physik Freien Atm.* 10, p. 191
- Linke F., 1929; *Beitr. Physik Freien Atm.* 15, p. 176
- Louche A., G. Simonot and M. Iqbal, 1988; Experimental verification of som Clear-Sky Insolation Models, *Solar Energy*, **41**, 3, 273-279
- Mächler M.A., 1983; Parametrization of solar irradiation under clean skies, M. Sc Thesis, University of British Columbia, Vancouver (Canada)
- Mächler M.A. and Iqbal M., 1985; A Modification of the ASHRAE Clear Sky Irradiation Model, *ASHREA Trans.* **91**, 106-115
- Marset P., Martinez Navarro F. L, 1998. Los modelos explicativos del proceso salud-enfermedad, las explicaciones causales. En *Salud Pública*, México DF, Mc Graw Hill, pp 55-77.
- Mokdad, Ali H.; et al. (2004). «Actual Causes of Death in the United States, 2000». *J. Amer. Med. Assoc.* 291 (10): pp. 1238.
- Moon P., 1940; Proposed Standard Solar Radiation Curves for Engineering Use, *Journal of Franklin Institute* **230**, 583-617
- Muhammad I. 1983, An introduction to solar radiation, Academic press, New York.
- Organización Mundial de Meteorología (OMM), 1996 Nuestro Medio Ambiente Atmosférico, Secretaria General Ch-1211 Ginebra Suiza.

Organización Panamericana de la Salud, Evaluación de los efectos de la contaminación del aire en la Salud de América Latina y el Caribe, Washinton, D.C, 2005

Polo Martínez J., 2010. Optimización de modelos de estimación de la radiación solar a partir de imágenes de satélite. ISBN: 978-84-693-3187-3

Raichijk C. y A. Fasulo, 2010 Estudio de la Turbiedad atmosférica en la ciudad de San Luis, Argentina. Energías renovables y medio ambiente, Vol. 25, pp. 23-28

Reyes Coca, S., 2001. Introducción a la Meteorología, universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, B.C, México.

Robinson, N.1966. Solar Radiation. Haifa-Israel: Elsevier Publishing Company, 343p.

Secretaria Distrital de Medio Ambiente, 2012. Informe Anual calidad del Aire, Bogotá, RMCAB.

Secretaria Distrital de Ambiente, 2009.UN-HABITAD, UNAL-IDEA. Agenda Ambiental Localidad Chapinero.

Simbaqueva, O.1990. Factores astronómicos y geográficos que afectan la radiación solar incidente sobre la superficie terrestre. Bogotá, HIMAT, 37p.

Spencer J. W. 1971. Fouries series representation of the position of the Sun. Search 2(5), 172.

Solarte I. Caicedo et al, 1999. Contaminación atmosférica y enfermedad respiratoria en niños menores de 14 años en Bogotá, Informe Universidad Javeriana.

Teramura, A.H., et. all, 1990. *Effects of UV-B radiation on soybean yield and seed quality: a six year field study*, *Physiol. Plant.*, 80, 5-11.

Van de Hulst H.C., 1957; *Light Scattering by Small Particles*, John Wiley and sons, New York.

Varo M. M.,2006 Tesis doctorado “Modelización de la radiación ultravioleta solar” España.

Velazco, V.,2006. Studies on the Transport of CO and Related Biomass Burning Emissions Using Ground Based Fourier Transform Infrared Spectrometry, thesis Doctoral de Universidad de Bremen, Bremen, Germany.

Watt D., 1978; On the Nature and Distribution of Solar Radiation, U.S. Department of Energy, HCP/ T2552-01

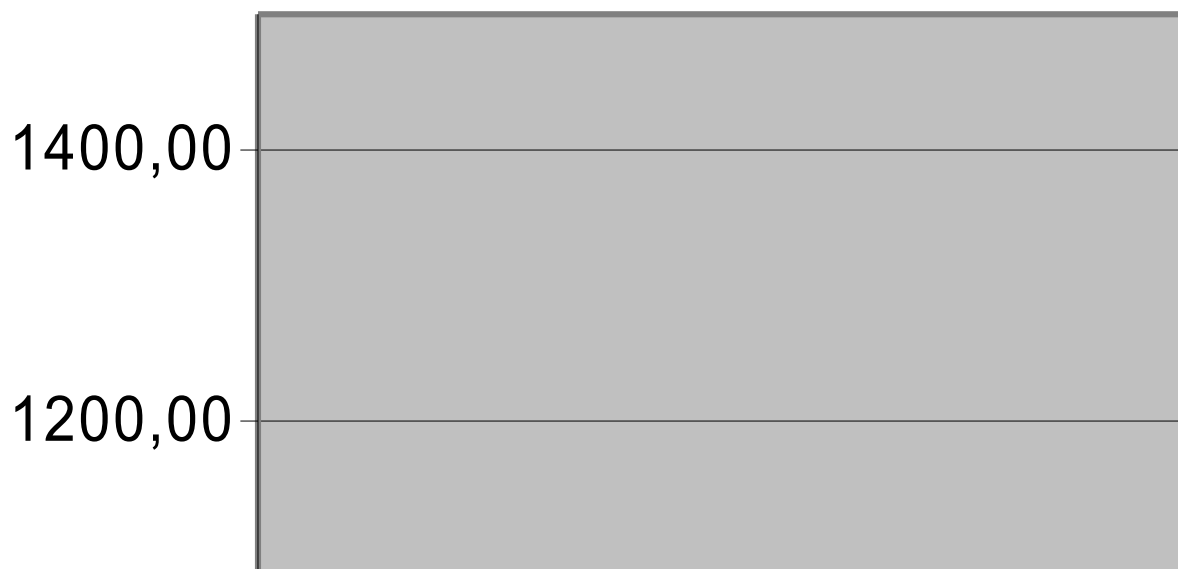
WMO (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION), 1983. Guide to meteorological instrument and observing practiques. 5th edition, Geneve.

## ANEXOS

### *Anexo A*

Medidas Simultáneas de Radiación entre el Radiómetro a calibrar y el de Referencia Mundial en el Centro Regional de Radiación solar Universidad Autónoma de México

**Inte**



***Anexo B***

Documentación de certificación de calibración de Pirheliómetro marca Eppley.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO

# INSTITUTO DE GEOFISICA

CIUDAD UNIVERSITARIA

DELEGACION DE COYOACAN

CODIGO 54816 MEXICO, D.F.

## CERTIFICACIÓN DEL FACTOR DE CALIBRACIÓN DEL PIRHELÍOMETRO Marca Eppley, con Número de Serie 6088E6.

De acuerdo con el reporte que se adjunta en hojas separadas, el Observatorio de Radiación Solar, Centro Radiométrico Regional (CRR) de la AR-IV (OMM), certifica que:

El Factor de Calibración o Constante de Respuesta Instrumental que se obtuvo durante la calibración del pirhelímetro, marca Eppley y número de serie 6088E6, es el siguiente:

$$C_n = 8.85 \mu V/(W/m^2)$$

Esta "Constante" del referido pirhelímetro se obtuvo de acuerdo con el procedimiento que para el efecto recomienda la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

Este procedimiento consiste en realizar mediciones simultáneas con el pirhelímetro en cuestión y el pirhelímetro del CRR, HF-29223 de Referencia Regional (AR-IV, OMM). De esta manera la calibración se realiza transfiriendo la escala de Referencia Radiométrica Mundial (WRR por sus siglas en inglés) al pirhelímetro por medio de la "Constante" obtenida. La presente calibración se realizó durante los días 27, 28 y 29 de noviembre de 2006.

La presente se extiende de buena fé, para los efectos que el usuario determine, el día

19 de febrero de 2007.

Atentamente,

Dr. Agustín Muñoz V.  
Coordinador responsable  
ORS-CRR

# Datos me

Dia 1

hora F

Radiación solar direc  
09:00

en Nemocón en el m  
09:30

10:00

Dia 1 hora Pres  
10:30

*Anexo D*

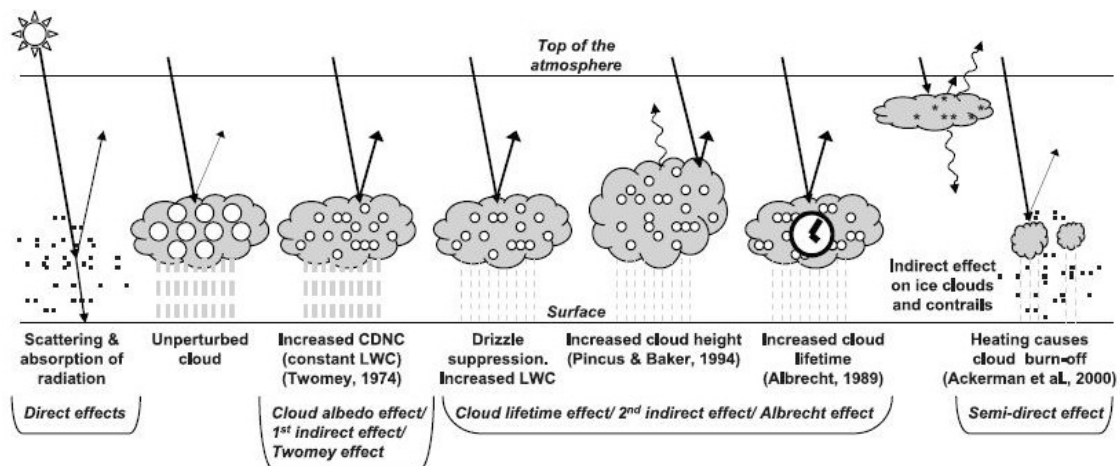
09:00 75

09:30 75

### *Anexo E*

Diagrama esquemático que muestra los diversos mecanismos radiactivos asociados con efectos de las nubes que han sido identificados como importantes con relación a los aerosoles. Los puntos negros representan las pequeñas partículas de aerosol, los círculos más grandes son gotas en las nubes. Las líneas rectas representan el incidente y refleja

la radiación solar y las líneas onduladas representan la radiación terrestre. Los círculos blancos indican llenas de gotitas de nubes concentración número (CDNC). La nube imperturbable contiene más grande nube baja a medida que sólo aerosoles naturales están disponibles como núcleos de condensación, mientras que la perturbada nube contiene un mayor número de gotas de nube más pequeñas como los aerosoles naturales y antropogénicos están disponibles como núcleos de condensación (CCN). Los guiones grises verticales representan las precipitaciones, y LWC se refiere al contenido de agua líquida (Base de las Ciencias Físicas, AR4 Report, IPCC, 2007).





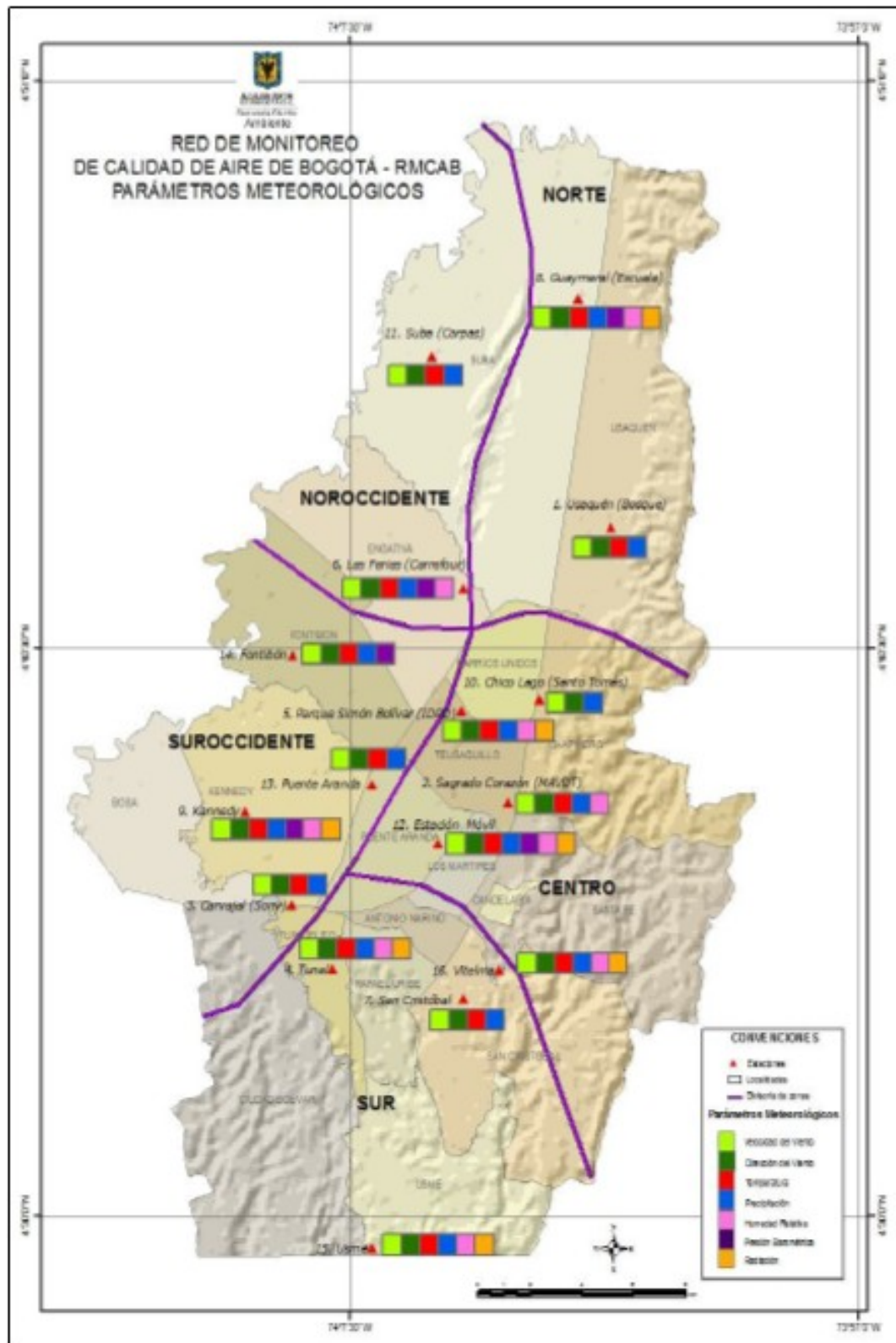
*Anexo F*

Miembros de la OMM, Colombia desde 1962 pertenece a la Asociación Regional III (América del Sur). Fuente: OMM, [http://www.wmo.int/pages/members/region3\\_es.html](http://www.wmo.int/pages/members/region3_es.html)

Anexo G

Ubicación geográfica de las estaciones de la RMCAB y analizadores de contaminantes.

Fuente: Secretaria Distrital de Medio Ambiente 2012

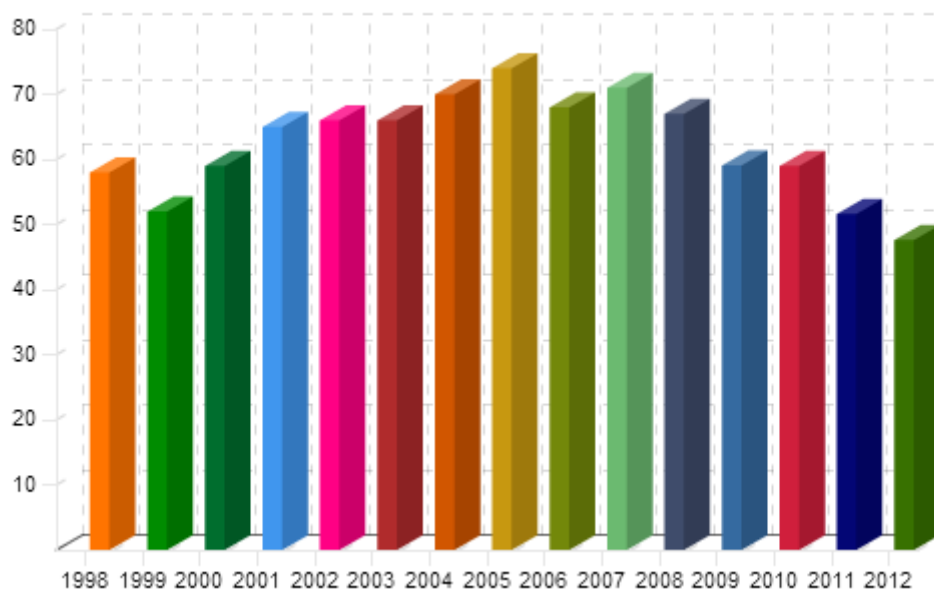


**Anexo H**

Material Particulado Inferior a 10 Micras ( $\mu$ ) Promedio Anual - PM<sub>10</sub>. Fuente: 2012

<http://oab.ambientebogota.gov.co/index.shtml?s=l&id=1&v=1>

**Material Particulado Inferior a 10 Micras ( $\mu$ ) Promedio Anual PM<sub>10</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )**



Fecha	Material Particulado Inferior a 10 Micras ( $\mu$ ) Promedio Anual PM <sub>10</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
1998	58
1999	52
2000	59
2001	65
2002	66
2003	66
2004	70
2005	74
2006	68
2007	71
2008	67
2009	59,10
2010	59
2011	51,63
2012	47,60

*Anexo I*

# RESUMEN DE DATOS MEDIC

## BOGOTA

Año                      Mes                      día                      hora

2011                      1                      2                      752

*Anexo J*

Terraza Universidad Los Libertadores, Chapinero, Bogotá. Fuente autora, 2012



***Anexo K***

Embalse de Neusa, Nemocón. Fuente autora, 2012



*Anexo L*

## Termohigrómetro



*Anexo M*  
Voltímetro





*Anexo N*

Receptor GPS

