

**VALORACIÓN ESTADÍSTICA Y COMPARATIVA DEL CÁLCULO DEL
ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE EN BUCARAMANGA**

LILIA YANETH QUIROGA CASTAÑEDA

ZULLY CONSUELO TÉLLEZ MEDINA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
2005**

**VALORACIÓN ESTADÍSTICA Y COMPARATIVA DEL CÁLCULO DEL
ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE EN BUCARAMANGA**

LILIA YANETH QUIROGA CASTAÑEDA

ZULLY CONSUELO TÉLLEZ MEDINA

**Trabajo de grado presentado para optar al título de
ESPECIALISTA EN INGENIERIA AMBIENTAL**

**Director
EDGAR FERNANDO CASTILLO MONROY
Ingeniero Químico, Ph.D**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTA
BUCARAMANGA
2005**

*A Dios, mi Familia y Carlos Andrés, por su infallible
amor, compañía y apoyo.*

Lilia Yaneth Quiroga Castañeda

*A Luis Eugenio, mi soporte y apoyo.
A Sergio Andrés y Laurita, mis amados hijos,
motivo de mi existencia.
A mis padres, los pilares de mi vida.*

Lully Consuelo Téllez Medina

AGRADECIMIENTOS

Las autoras expresan sus agradecimientos:

Al doctor Edgar Fernando Castillo Monroy, director de este estudio, por su invaluable apoyo, sus acertadas orientaciones y su incondicional respaldo.

Al doctor Álvaro Ramírez García, Jefe de la Escuela de Ingeniería Química, porque sin su importante apoyo no habría sido posible obtener este anhelado logro.

Al Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales, CEIAM, por la calidez y el

CONTENIDO

| | Página |
|---|--------|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1. CONTAMINACIÓN DEL AIRE | 3 |
| 1.1 EL AIRE | 3 |
| 1.1.1 Agentes de contaminación | 3 |
| 1.1.2 Reacciones químicas en la atmósfera | 4 |
| 1.1.3 Clasificación de las fuentes de contaminación del aire | 6 |
| 1.1.4 Influencia de factores meteorológicos y topográficos en la contaminación del aire en las ciudades | 8 |
| 1.1.5 Efectos nocivos sobre el hombre | 10 |
| 1.1.6 Efectos socioeconómicos | 11 |
| 1.2 CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE | 11 |
| 1.2.1 Índices de Calidad del Aire | 11 |
| 1.2.2 Contaminantes criterio | 17 |
| 1.2.3 Metodologías de medición de los contaminantes | 21 |

| | | |
|-------|---|----|
| 1.3 | POLÍTICAS DE CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA | 21 |
| 1.3.1 | Acciones de control, seguimiento y monitoreo desarrolladas en Bucaramanga | 21 |
| 1.3.2 | Políticas de control implementadas en Estados Unidos | 24 |
| 1.3.3 | Política ambiental interna en México | 24 |
| 1.3.4 | Plan de prevención y descontaminación atmosférica (PPDA), Chile | 25 |
| 2. | CÁLCULO DE LOS ÍNDICES DE CALIDAD DEL AIRE | 26 |
| 2.1 | DESARROLLO DE LA MACRO | 26 |
| 2.1.1 | Llevar los datos a una hoja de cálculo de Excel® | 26 |
| 2.1.2 | Cálculo de los índices de calidad el aire | 29 |
| 2.1.3 | Ejecución de la macro | 37 |
| 3. | ÍNDICES DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL PARA LAS DIFERENTES ESTACIONES DE MUESTREO | 43 |
| 3.1 | ANÁLISIS DE LOS ÍNDICES DE CALIDAD DEL AIRE PARA CADA METODOLOGÍA | 43 |
| 3.1.1 | Estación Centro | 43 |
| 3.1.2 | Estación Chimitá | 50 |
| 3.1.3 | Estación Ciudadela | 56 |

| | |
|--|----|
| 3.1.4 Estación Florida | 56 |
| 3.2 RELACIONES ENTRE LOS DIFERENTES ÍNDICES | 67 |
| 4. COMPORTAMIENTO DE LOS CONTAMINANTES | 71 |
| 4.1 COMPORTAMIENTO DE LOS CONTAMINANTES EN LA ESTACIÓN CENTRO | 71 |
| 4.1.1 Radiación Solar | 71 |
| 4.1.2 Presión atmosférica | 71 |
| 4.1.4 Gases contaminantes: Óxidos de Nitrógeno (NO ₂ , NO _x y NO), Dióxido de azufre (SO ₂), y ozono (O ₃) | 71 |
| 4.1.5 Monóxido de Carbono (CO) | 76 |
| 4.1.6 Material particulado (PM ₁₀) | 76 |
| 4.2 COMPORTAMIENTO DE LOS CONTAMINANTES EN LA ESTACIÓN CHIMITÁ | 78 |
| 4.2.1 Radiación Solar | 78 |
| 4.2.2 Presión Atmosférica | 78 |
| 4.2.3 Temperatura | 78 |
| 4.2.4 Gases contaminantes: Óxidos de Nitrógeno (NO ₂ , NO _x y NO), Dióxido de azufre (SO ₂), y ozono (O ₃) | 80 |
| 4.2.5 Monóxido de carbono | 80 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 4.3 | MODELOS DE PREDICCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES | 83 |
| 4.3.1 | Estación Centro | 83 |
| 4.3.3 | Estación Ciudadela | 99 |
| 4.3.4 | Estación Florida | 101 |
| | CONCLUSIONES | 103 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 104 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Composición del aire cerca al nivel del mar | 4 |
| Tabla 2. Clasificación de los agentes contaminantes | 5 |
| Tabla 3. Efectos de algunos contaminantes sobre la salud | 10 |
| Tabla 4. Índice de calidad del aire de Bucaramanga, IBUCA | 12 |
| Tabla 5. Índice de calidad del aire de Estados Unidos, AQI | 13 |
| Tabla 6. Índice metropolitano de calidad del aire, IMECA. México | 14 |
| Tabla 7. Índice UV o de Radiación ultravioleta, México | 15 |
| Tabla 8. Índice de calidad del aire por material particulado, ICAP. Chile | 16 |
| Tabla 9. Niveles de emergencia ambiental para PM ₁₀ . Chile | 16 |
| Tabla 10. Cuadro comparativo de metodologías de medición de contaminantes | 22 |
| Tabla 11. Conformación Red de monitoreo CDMB, Bucaramanga | 23 |
| Tabla 12. Índices de calidad del aire en estudio | 26 |
| Tabla 13. Valores límite para depuración de información de la red de monitoreo de la CDMB | 31 |
| Tabla 14. Valor representativo diario de cada contaminante | 31 |
| Tabla 15. Determinación de IMECA para cada contaminante | 32 |
| Tabla 16. Valores límite para el cálculo del AQI | 33 |
| Tabla 17. Índices ICA e ICAP, Chile | 33 |
| Tabla 18. Calificación del índice de calidad de Chile | 34 |
| Tabla 19. Valores límite de cada contaminante para el cálculo del IBUCA | 34 |
| Tabla 20. Valores límite por contaminante para el cálculo del ICA | 35 |
| Tabla 21. Valores y categorías del ICA | 36 |
| Tabla 22. Información utilizada para la generación de los modelos matemáticos. | |

| | |
|--|-----|
| Estación Centro | 84 |
| Tabla 23. Información utilizada para la generación de los modelos matemáticos. Estación Chimitá | 93 |
| Tabla 24. Información utilizada para la generación de los modelos matemáticos. Estación Ciudadela | 99 |
| Tabla 25. Información utilizada para la generación de los modelos matemáticos. Estación Florida | 101 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Localización Red de monitoreo CDMB en el área metropolitana de Bucaramanga | 23 |
| Figura 2. Presentación de datos suministrados por la Red de monitoreo | 27 |
| Figura 3. Definición del tipo de datos de origen | 28 |
| Figura 4. Definición de los separadores contenidos en los datos | 28 |
| Figura 5. Delimitación de columnas y definición del formato de datos en cada una | 29 |
| Figura 6. Datos llevados a la hoja de cálculo | 30 |
| Figura 7. Sección de la macro en que se caracterizan los datos | 30 |
| Figura 8. Creación de comandos para seleccionar los datos representativos para Concentraciones máximas diarias | 31 |
| Figura 9. Creación de comandos para seleccionar los datos representativos para Concentraciones promedio diarias | 32 |
| Figura 10. Sección de la macro que asigna características cualitativas a los índices Calculados | 36 |
| Figura 11. Creación de un botón de la macro en la barra de herramientas | 37 |
| Figura 12. Procedimiento inicial para la creación de un comando personalizado de la macro | 38 |
| Figura 13. Procedimiento para la creación de un botón personalizado para ejecutar la macro | 39 |
| Figura 14. Ingreso de datos a la macro | 39 |
| Figura 15. Índices de calidad del aire generados por la macro | 40 |
| Figura 16. Resultados estadísticos generados por la macro | 41 |
| Figura 17. Comportamiento mensual del índice de calidad del aire | 41 |
| Figura 18. Gráfico comparativo de los índices de calidad del aire | 42 |
| Figura 19. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de Calidad AQI en la estación centro. Meses de enero, julio y diciembre de 2003. | 44 |

| | |
|---|----|
| Figura 20. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de Calidad IMECA en la estación centro. Meses de enero, julio y diciembre de 2003. | 45 |
| Figura 21. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de Calidad ICHICA en la estación centro. Meses de enero, julio y diciembre de 2003. | 47 |
| Figura 22. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de Calidad ICA en la estación centro. Meses de enero, julio y diciembre de 2003. | 48 |
| Figura 23. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de Calidad IBUCA en la estación centro. Meses de enero, julio y diciembre de 2003. | 49 |
| Figura 24. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de Calidad AQI en la estación Chimitá. Meses de enero, julio y diciembre de 2003. | 51 |
| Figura 25. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de Calidad IMECA en la estación Chimitá. Meses de enero, julio y diciembre de 2003. | 52 |
| Figura 26. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de Calidad ICHICA en la estación Chimitá. Meses de enero, julio y diciembre de 2003. | 53 |
| Figura 27. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de Calidad ICA en la estación Chimitá. Meses de enero, julio y diciembre de 2003. | 54 |
| Figura 28. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de Calidad IBUCA en la estación Chimitá. Meses de enero, julio y diciembre de 2003. | 55 |
| Figura 29. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de Calidad AQI en la estación Ciudadela. Meses de enero, julio y diciembre de 2003. | 57 |
| Figura 30. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de Calidad IMECA en la estación Ciudadela. Meses de enero, julio y diciembre de 2003. | 58 |
| Figura 31. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de Calidad ICHICA en la estación Ciudadela. Meses de enero, julio y diciembre de 2003. | 59 |
| Figura 32. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de Calidad ICA en la estación Ciudadela. Meses de enero, julio y diciembre de 2003. | 60 |
| Figura 33. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de Calidad IBUCA en la estación Ciudadela. Meses de enero, julio y diciembre de 2003. | 61 |
| Figura 34. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de Calidad AQI en la estación Florida. Meses de enero, julio y diciembre de 2003. | 62 |
| Figura 35. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de Calidad IMECA en la estación Florida. Meses de enero, julio y diciembre de 2003. | 63 |

| | |
|---|----|
| Figura 36. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de Calidad ICHICA en la estación Florida. Meses de enero, julio y diciembre de 2003. | 64 |
| Figura 37. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de Calidad ICA en la estación Florida. Meses de enero, julio y diciembre de 2003. | 65 |
| Figura 38. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de Calidad IBUCA en la estación Florida. Meses de enero, julio y diciembre de 2003. | 66 |
| Figura 39. Comparación entre los diferentes índices de contaminación del aire para el NO ₂ (Centro y Chimitá) | 69 |
| Figura 40. Comparación entre los diferentes índices de contaminación del aire para el CO (Centro y Florida) | 69 |
| Figura 41. Comparación entre los diferentes índices de contaminación del aire para el SO ₂ (Centro y Chimitá) | 70 |
| Figura 42. Comparación entre los diferentes índices de contaminación del aire para el O ₃ (Chimitá y Ciudadela) | 70 |
| Figura 43. Comparación entre los diferentes índices de contaminación del aire para el PM ₁₀ (Centro y Florida) | 70 |
| Figura 44. Radiación solar en la estación Centro | 72 |
| Figura 45. Presión atmosférica en la estación Centro | 73 |
| Figura 46. Temperatura en la estación Centro | 73 |
| Figura 47. Concentración de NO ₂ . Estación Centro | 74 |
| Figura 48. Concentración de NO _x . Estación Centro | 74 |
| Figura 49. Concentración de NO. Estación Centro | 75 |
| Figura 50. Concentración de SO ₂ . Estación Centro | 75 |
| Figura 51. Concentración de O ₃ . Estación Centro | 76 |
| Figura 52. Concentración de CO. Estación Centro | 77 |
| Figura 53. Concentración de PM ₁₀ . Estación Centro | 77 |
| Figura 54. Radiación solar en la estación Chimitá | 78 |
| Figura 55. Presión atmosférica en la estación Chimitá | 79 |

| | |
|--|----|
| Figura 56. Temperatura en la estación Chimitá | 79 |
| Figura 57. Concentración de NO ₂ . Estación Chimitá | 80 |
| Figura 58. Concentración de NO _x . Estación Chimitá | 81 |
| Figura 59. Concentración de NO. Estación Chimitá | 81 |
| Figura 60. Concentración de SO ₂ . Estación Chimitá | 82 |
| Figura 61. Concentración de O ₃ . Estación Chimitá | 82 |
| Figura 62. Concentración de CO. Estación Chimitá | 83 |
| Figura 63. Comportamiento de la Radiación solar en la Estación Centro | 87 |
| Figura 64. Comportamiento de la Presión en la Estación Centro | 87 |
| Figura 65. Comportamiento de la Temperatura en la Estación Centro | 88 |
| Figura 66. Variación de la concentración de NO ₂ . Estación Centro | 88 |
| Figura 67. Variación de la concentración de NO _x . Estación Centro | 89 |
| Figura 68. Variación de la concentración de NO. Estación Centro | 89 |
| Figura 69. Variación de la concentración de SO ₂ . Estación Centro | 90 |
| Figura 70. Variación de la concentración de CO. Estación Centro | 90 |
| Figura 71. Variación de la concentración de O ₃ . Estación Centro | 91 |
| Figura 72. Variación de la concentración de PM ₁₀ . Estación Centro | 91 |
| Figura 73. Comportamiento de la Radiación solar en la Estación Chimitá | 92 |
| Figura 74. Comportamiento de la Presión atmosférica en la Estación Chimitá | 95 |
| Figura 75. Variación de la concentración de NO ₂ . Estación Chimitá | 95 |
| Figura 76. Variación de la concentración de NO _x . Estación Chimitá | 96 |
| Figura 77. Variación de la concentración de NO. Estación Chimitá | 96 |
| Figura 78. Variación de la concentración de SO ₂ . Estación Chimitá | 97 |
| Figura 79. Variación de la concentración de CO. Estación Chimitá | 97 |

| | |
|---|-----|
| Figura 80. Variación de la concentración de O ₃ . Estación Chimitá | 98 |
| Figura 81. Comportamiento de la Temperatura. Estación Chimitá | 99 |
| Figura 82. Variación de la concentración de CO. Estación Ciudadela | 100 |
| Figura 83. Variación de la concentración de O ₃ . Estación Ciudadela | 100 |
| Figura 84. Variación de la concentración de CO. Estación Florida | 102 |
| Figura 85. Variación de la concentración de PM ₁₀ . Estación Florida | 102 |

RESUMEN

TÍTULO: VALORACIÓN ESTADÍSTICA Y COMPARATIVA DEL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE EN BUCARAMANGA*

LILIA YANETH QUIROGA CASTAÑEDA
ZULLY CONSUELO TÉLLEZ MEDINA**

ÍNDICE, CALIDAD, AIRE, CÁLCULO

Este estudio busca valorar cuantitativa y cualitativamente el índice de calidad del aire de Bucaramanga, confrontándolo con diferentes metodologías empleadas internacionalmente, para obtener parámetros numéricos de comparación que permitan correlacionar el comportamiento del índice local con factores meteorológicos y estimar su utilidad como mecanismo de evaluación ambiental.

Para su elaboración, se recopiló material bibliográfico que incluyó la revisión de la normatividad vigente a nivel internacional. Con esta información y con base en los datos de concentración de contaminantes reportados por las estaciones de la red de monitoreo de calidad del aire de la Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, CDMB, se desarrolló una herramienta de cómputo que permite calcular el índice de calidad del aire por medio de las metodologías empleadas en Estados Unidos, México, Chile y Colombia y la de aplicación a nivel local, además de realizar el análisis estadístico y comparativo de los datos y la estimación de tendencias matemáticas anuales para cada uno de los contaminantes y datos meteorológicos.

Con los resultados obtenidos gracias a la herramienta desarrollada, se estimó la proporcionalidad entre los índices analizados, encontrándose coherencia entre la metodología local y las empleadas internacionalmente. Con la correlación matemática se pudo inferir la composición atmosférica durante el día para los diferentes contaminantes monitoreados, con su respectivo intervalo de confianza y los diversos parámetros estadísticos, con lo cual se puede evaluar el efecto de políticas ambientales dispuestas para periodos específicos de tiempo, comparando las composiciones obtenidas por la red de monitoreo y las composiciones arrojadas por el modelo.

* Monografía

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Especialización en Ingeniería Ambiental
Edgar Fernando Castillo Monroy

ABSTRACT

TITLE: STATISTIC AND COMPARATIVE VALUATION OF THE CALCULATION OF THE QUALITY INDEX OF THE AIR IN BUCARAMANGA*

LILIA YANETH QUIROGA CASTAÑEDA
ZULLY CONSUELO TÉLLEZ MEDINA**

INDEX QUALITY AIR CALCULATION

This study seeks to value the quantity and the quality of the of the quality index of the air in Bucaramanga, confronting it with different internationally employed methodologies, to obtain numerical parameters of comparison that allow correlating the behavior of the local index with meteorological factors and estimate their use as a mechanism of environmental evaluation.

For its manufacture, bibliographical material which included the revision of the valid normative at an international level was collected. With this information and based in the data on the concentration of pollutants reported by the stations of the air quality monitoring network of the Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, CDMB [Corporation for the Defense of the Plateau of Bucaramanga], a computation tool which allowed the calculation of the quality index of the air through the methodologies employed in the Chile, Colombia, Mexico and the United States, and the methodology carried out at a local level was developed. This computation tool carried out the statistical and comparative analysis of the data and the estimate of the annual mathematical tendencies for each of the pollutants and meteorological data.

With the results obtained thanks to the tool that was developed, the proportionality between the analyzed indexes was estimated, and coherence was found between the local methodology and those employed internationally. With the mathematical correlation the daily atmospheric composition could be inferred for the different pollutants monitored, with their respective confidence intervals and diverse statistical parameters. With this, the effect of ecological policies can be evaluated and disposed for specific periods of time, comparing the compositions obtained by the monitoring network and the compositions given by the model.

* Monograph

** Physicochemical Engineering Faculty
Specialization in Environmental Engineering
Edgar Fernando Castillo Monroy

INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire es uno de los problemas ambientales más importantes. Las causas que originan esa contaminación son diversas, pero el mayor índice es provocado por las actividades industriales, comerciales, domésticas y agropecuarias. Sin embargo, el nivel de contaminación está influenciado por otros factores. El clima afecta de manera decisiva la presencia de contaminantes atmosféricos y los efectos que éstos pueden tener. Los vientos, la temperatura y la radiación solar modifican de manera drástica la dispersión de contaminantes y la presencia de reacciones químicas que acentúan la contaminación.

El incremento de las cantidades de gases y partículas potencialmente dañinas para la salud y el ambiente se ha constatado a escala global. El desarrollo sustentable se presenta como una alternativa a los modelos que han propiciado la degradación del ambiente a partir de la búsqueda de respuestas creativas para corregir las fallas y evitar menos problemas.

Este estudio tiene como objetivo general la valoración estadística y comparativa del índice de calidad del aire para la ciudad de Bucaramanga, realizando un análisis detallado de los índices de calidad del aire determinados por diferentes metodologías, con el fin de obtener parámetros numéricos de comparación que permitan correlacionar el comportamiento del índice de calidad local con factores meteorológicos que permitan establecer su utilidad como parámetro de evaluación ambiental para la proyección de políticas de regulación de la contaminación.

Para el tratamiento de la información recopilada se desarrolló una herramienta de cómputo que permite calcular el índice de calidad del aire por cualquiera de las metodologías conocidas.

Para el logro de los objetivos propuestos se plantearon una serie de tareas. Inicialmente, se realizó una revisión bibliográfica con recopilación de material nacional e internacional, así como la revisión de la normatividad vigente a nivel mundial y el estado del arte en cuanto a características ambientales y epidemiológicas. A partir del material recopilado, se desarrolló la herramienta informática para el cálculo del índice de calidad del aire y, una vez tabulada, organizada y procesada esta información, se realizó el análisis estadístico de los resultados al aplicar las diferentes metodologías y normatividades para la determinación de los índices de calidad del aire, planteando una forma de estimación de promedios mensuales y anuales para cada contaminante evaluado.

Este documento contiene el informe final con los resultados de la investigación y sus conclusiones. Está estructurado en cuatro capítulos. En la primera parte se encuentran los antecedentes y la teoría que soportan este estudio, como resultado de la recopilación de la información referente al estado del arte y la normatividad vigente. En el segundo capítulo se presenta la descripción del software creado en una hoja electrónica para el tratamiento de la información preliminar, el cual realiza el cálculo de los índices de calidad

del aire para las metodologías estudiadas y el soporte estadístico de dichos cálculos. Con base en la información obtenida anteriormente se desarrolla un tercer capítulo, en el cual se analiza el comportamiento de cada uno de los índices de calidad del aire realizando una comparación entre ellos, lo que permite encontrar las correlaciones de estos parámetros respecto al de carácter local. En la última parte se presentan las gráficas de variación diaria de índices y contaminantes durante todo el año en estudio, las cuales sirven como base para desarrollar el modelo matemático de predicción de contaminantes, teniendo en cuenta factores meteorológicos y su influencia sobre la variación del comportamiento de los contaminantes.

1. CONTAMINACIÓN DEL AIRE

La contaminación ambiental ha existido siempre a lo largo de la historia. El crecimiento industrial y la expansión de las ciudades sin planificación ni provisión de infraestructura adecuada se ha desarrollado de forma vertiginosa. La contaminación atmosférica es un fenómeno generalizado en los grandes centros urbanos y las zonas industriales de los diversos países. Sin embargo, los tipos y las fuentes de contaminación varían por áreas específicas.

La presencia de sustancias contaminantes en la atmósfera, que por su naturaleza, tiempo de permanencia, concentración o nivel puedan afectar a los seres vivos, es conocida como contaminación atmosférica. Según sus propiedades físicas, los contaminantes atmosféricos pueden agruparse en gases, partículas y ruidos.

La contaminación atmosférica es ocasionada por diferentes fuentes, entre las que se encuentran las móviles, como los automotores, y las fijas como las chimeneas de las fábricas. A nivel nacional existe una red de vigilancia que no obstante sus limitaciones, ha permitido establecer que en las principales ciudades, los niveles de contaminación se encuentran por encima de las normas sobre límites tolerables. Este hecho es agravado por efecto de las inversiones térmicas que se presentan en diversas épocas del año.

1.1 EL AIRE

El aire es una mezcla de gases cuya composición varía de acuerdo con la altura, aunque está relativamente estable en el conjunto de la Troposfera. El Decreto 948 de junio 5 de 1995 del Ministerio del Medio Ambiente, el cual reglamenta la protección y el control de la calidad del aire en Colombia, define la contaminación atmosférica como el fenómeno de acumulación o concentración de contaminantes en el aire.

El aire se considera puro cuando no contiene sustancias diferentes a las que entran en su composición natural. La composición del aire puro a nivel del mar se indica en la Tabla 1.

Por otra parte, la presencia de sustancias extrañas en su composición o modificaciones en la concentración normal de los gases que lo componen es lo que se denomina aire contaminado. El concepto de aire puro es teórico pues siempre existirán en el aire algunas trazas de impurezas producidas por causas naturales. El aire contaminado se encuentra sobre todo en la parte inferior de la atmósfera en zonas cercanas a centros urbanos o industriales.

1.1.1 Agentes de contaminación. El decreto 948/95 define los contaminantes del aire como los fenómenos físicos o sustancias o elementos en estado sólido, líquido o

gaseoso causantes de efectos adversos en el medio ambiente, los recursos naturales renovables y en 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 éstas. Los elementos causantes de la contaminación del aire pueden clasificarse tal como se observa en la Tabla 2.

Tabla 1. Composición del aire cerca al nivel del mar

| ELEMENTO | PORCENTAJE EN VOLUMEN |
|-----------------------|-----------------------|
| Nitrógeno | 78.084 |
| Oxígeno | 20.946 |
| Argón | 0.934 |
| Gas carbónico | 0.035 |
| Neón | 0.00182 |
| Helio | 0.00052 |
| Metano | 0.00015 |
| Kriptón | 0.0001 |
| Monóxido de nitrógeno | 0.00001 |
| Hidrógeno | 0.00005 |
| Xenón | 0.0000009 |
| Dióxido de nitrógeno | 0.00000001 |
| Ozono | 0.00000001-0.00000004 |
| Óxido nítrico | 0.000000002 |
| Sulfuro de hidrógeno | 0.000000002 |
| Vapor de agua | 0.01-7.0 |

Fuente: Wark – Warner. Contaminación del Aire. 1998.

En Colombia, el Decreto 002 del 11 de Enero de 1982 del Ministerio de Salud reglamentó las Normas de Calidad del Aire y sus Métodos de Medición. En esta normatividad se encuentran contenidos los contaminantes criterio: partículas en suspensión, dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), oxidantes fotoquímicos (como el ozono O₃) y óxido de nitrógeno (NO₂), sus métodos de análisis y la frecuencia mínima de muestreo. Estos criterios son especificados para ciertas fuentes como calderas a base de carbón, fábricas de cementos, hornos de clinker, industrias metalúrgicas, plantas productoras de asfalto y mezclas asfálticas, entre otras industrias.

1.1.2 Reacciones químicas en la atmósfera. Constituyen uno de los mecanismos de auto purificación de la atmósfera. Las transformaciones químicas conducen a neutralizar los contaminantes. Sin embargo, en las etapas de transición pueden aparecer contaminantes de mayor agresividad que los originales. Los contaminantes secundarios del aire son aquellos que se producen a través de las reacciones químicas que se registran en la atmósfera. Los gases aerosoles pueden reaccionar y dar origen a agentes secundarios de contaminación.

En NO originado en los procesos de combustión, puede oxidarse a NO₂ y más tarde producir ácido nítrico. El dióxido de azufre (SO₂) puede oxidarse a SO₃ y posteriormente, en presencia de humedad, dar origen a ácido sulfúrico. El ácido sulfúrico al reaccionar con carbonatos da origen a sulfatos que pueden ser utilizados por las plantas. En este proceso, el ácido sulfúrico, producto intermedio, puede ocasionar diferentes efectos a través de la lluvia ácida.

Tabla 2. Clasificación de los agentes contaminantes

| | |
|------------------------|--|
| Partículas | <ul style="list-style-type: none"> • Microorganismos: Bacterias, virus y esporas • Elementos no vivos: Carbón, ceniza, cemento, metales, metaloides, compuestos orgánicos y gránulos vegetales. |
| Gases y vapores | <ul style="list-style-type: none"> • Compuestos del carbono: Gas carbónico, monóxido de carbono, óxidos de hidrocarburos y éteres. • Compuestos del azufre: Anhídrido sulfuroso, sulfuro de hidrógeno y mercaptanos. • Compuestos de nitrógeno: Óxidos y amoníaco • Halógenos: Cloro y flúor |
| Aerosoles | <ul style="list-style-type: none"> • Fluorocarbonados |
| Sustancias radiactivas | <ul style="list-style-type: none"> • Radón, kriptón y otras |
| Plaguicidas químicos | <ul style="list-style-type: none"> • Insecticidas, herbicidas, fungicidas y raticidas. |

Fuente: Wark – Warner. Contaminación del Aire. 1998.

El ozono (O₃) uno de los principales contaminantes de las ciudades modernas se forma por dos vías. En una de ellas el NO₂ se transforma en NO por acción de las radiaciones ultravioleta del Sol. En esta reacción se libera un átomo de oxígeno que reacciona con el oxígeno molecular para formar O₃. En el proceso intervienen moléculas de N₂ u O₂ requeridos para transportar el exceso de energía. El ciclo se cierra cuando el NO reacciona con el ozono.

El ozono urbano también se forma por la reacción de compuestos orgánicos volátiles (COV) que reaccionan con radicales libres en fase vapor. En este proceso se forma NO₂ que alimenta el ciclo anterior y conduce a la formación de más ozono. Ejemplos de COV son el formaldehído y la acroleína. Los radicales de OH se forman al reaccionar el oxígeno con el vapor de agua o en la fotólisis de aldehídos y ácido nítrico.

Los COV y los NO_x se acumulan durante las horas pico de tráfico automotor. Al salir el sol, las reacciones conducen a la formación de ozono; proceso que continúa a lo largo del día.

Al ocultarse el sol, la producción de ozono se detiene y su concentración en el aire tiende a disminuir.

1.1.3 Clasificación de las fuentes de contaminación del aire. Las fuentes de contaminación del aire pueden ser naturales o artificiales. Los malos olores producidos por la descomposición de organismos, la emisión de gases tóxicos por los volcanes, la difusión en el aire de granos de polen y otros fenómenos, son considerados por algunos autores como fuentes naturales de contaminación. Estas formas de contaminación tienen, sin embargo, un efecto nocivo reducido, debido a que son producidas por sustancias que provienen de fuentes dispersas; a menudo alejadas de grupos humanos y son rápidamente eliminadas por procesos naturales.

Se entiende por contaminación artificial del aire aquella originada o producida en una fuente natural o artificial, con mediación de la actividad humana (Decreto 02 de 1.982). Son estas actividades del hombre las que al alterar dramáticamente los procesos naturales, están originando una serie de reacciones que constituyen una amenaza real para la mayoría de los seres vivos.

Fuentes Naturales

- El suelo: Los vientos al levantar del suelo polvo y arena, sobre todo en regiones áridas y planas, pueden ocasionar problemas de incomodidad y molestia a los seres humanos. El transporte por este medio de algunas esporas que habitan en los primeros centímetros del suelo pueden ocasionar algunos tipos de enfermedades.
- Los volcanes: Las erupciones y emanaciones permanentes de los volcanes son una fuente natural de vapores, gases y partículas que en algunos casos son tóxicos para los humanos. Son especialmente tóxicos los compuestos de azufre. Los volcanes también han sido asociados a cambios climáticos.
- Las partículas vegetales: Los granos de polen producidos por algunas especies vegetales como el pino, pueden ocasionar alergias en el ser humano. Así mismo, algunas plantas son el origen de algunas esporas, bacterias y virus que producen diversos tipos de alergias en el hombre.
- La descomposición de organismos: La descomposición de residuos animales y vegetales puede ser aerobia (en presencia de aire) o anaerobia (sin aire). En este proceso bacteriano, los organismos se transforman en sustancias más simples que entran a formar parte del suelo y producen gases y partículas, tales como el amoníaco, gas carbónico, H₂S, sulfuros y metano, entre otros.

Fuentes Fijas

El Decreto 948/95 define las fuentes fijas de contaminación como aquellas situadas en un lugar determinado e inamovible, aún cuando la descarga de contaminantes se produzca

en forma dispersa. De acuerdo con dicha norma, pueden existir Fuentes fijas puntuales que son las que emiten contaminantes al aire por ductos o chimeneas y Fuentes fijas dispersas o difusas que son aquellas en que los focos de emisión de una fuente fija se dispersan en un área, por razón del desplazamiento de la acción causante de la emisión, como en el caso de las quemas abiertas controladas en zonas rurales.

* Fuentes Móviles

De acuerdo con el Decreto 948/95, son aquellas que por razón de su uso o propósito, son susceptibles de desplazamiento, como los automotores o vehículos de transporte a motor de cualquier naturaleza.

- Transporte Terrestre

Es indudable que uno de los avances tecnológicos más representativos de este siglo lo constituye el diseño y la construcción del automóvil. Sin embargo, el crecimiento incontrolado de las formas de transporte individual con vehículos de combustión interna, así como la búsqueda comercial de mayor velocidad y potencia en los automóviles, ha hecho del transporte una de las principales fuentes de contaminación atmosférica. El problema de contaminación por el transporte es especialmente grave en las grandes ciudades debido a la gran cantidad de automóviles existentes.

Algunos autores consideran que un 70% de la contaminación aérea es originada por los automóviles. Por otra parte, el automóvil es una fuente de ruidos, un productor de accidentes y una causa importante de la llamada crisis energética. La contaminación del aire por los vehículos, se produce principalmente por los gases de escape del motor y en menor proporción por vapores en el carburador, el tanque de combustible y el cárter.

Los principales agentes de contaminación que producen estos vehículos son: monóxido de carbono, bióxido de carbono, hidrocarburos, óxidos de nitrógeno, plomo, partículas, aldehídos y aromáticos, (hidrocarburos asociados al cáncer).

- Aviones Supersónicos

Las emisiones de óxidos de nitrógeno a gran altura pueden contribuir al deterioro de la capa de ozono.

- Industria Química Inorgánica

La producción industrial de ácido clorhídrico, fosfórico, nítrico, de cloro, abonos minerales, hidróxido de sodio, potasio, etc., genera agentes contaminantes tales como: gases, vapores y partículas.

- Fábrica de Pasta y Papel

Durante el transporte, mezclado, producción de pastas y proceso de blanqueado esta industria produce, entre otros contaminantes, polvos, SO₂, Cloro, Mercaptanos.

- Fábrica de Alimentos

Este tipo de industria libera a la atmósfera partículas y malos olores.

- Centrales nucleares

Los primeros riesgos en la producción de energía nuclear comienzan en las minas donde el minero recibe una irradiación debida al uranio y a los elementos de su cadena como el radio, radón y torio. Así mismo, al inhalar partículas radioactivas del ambiente se produce una irradiación interna con radiaciones alfa. En el proceso de enriquecimiento y transporte existen igualmente riesgos de contaminación radiactiva del personal operario.

- Incineración de residuos

El transporte, depósito y combustión de basuras producen malos olores, partículas, patógenos, humos y diferentes sustancias que dependen del material incinerado; algunas muy tóxicas producidas en la quema de plásticos. Se ha detectado la presencia de dioxinas y furanos en gases generados en incineradores.

- Plaguicidas químicos

Los plaguicidas químicos son sustancias tóxicas que pueden ingresar al organismo por vía respiratoria, oral y a través de la piel. Pueden ocasionar intoxicaciones agudas y crónicas así como efectos sobre el material genético asociados al cáncer y las mutaciones

- Tabaco

En recintos cerrados, el humo del tabaco afecta tanto al fumador como a las demás personas presentes en el interior del local. Al fumar se produce una destilación-seca que produce 45 sustancias identificadas. Entre ellas tenemos: Nicotina, Óxidos de Carbono, Hidrocarburos cancerígenos, Compuestos de azufre, Alcohol metílico, Fenoles, Plomo, 3,4-benzopireno (asociado al cáncer).

- Incendios forestales

La tala y quema de bosques para expansión agrícola o ganadera es una fuente importante de emisiones a la atmósfera.

1.1.4 Influencia de factores meteorológicos y topográficos en la contaminación del aire en las ciudades.

*** Factores Meteorológicos**

Si bien, algunos factores meteorológicos son importantes en el proceso de auto purificación de la atmósfera, otros pueden tener efectos adversos. Los factores meteorológicos favorables a la auto purificación son los vientos, la temperatura, la turbulencia y las precipitaciones. Entre los adversos se cuentan la humedad, las nubes y la inversión térmica.

En algunos accidentes colectivos ocurridos en Gran Bretaña y USA, se comprobó la influencia determinante de factores como las nieblas y la inversión térmica en el agravamiento del fenómeno de contaminación.

Vientos: La rapidez de difusión y dilución en el aire de los gases emanados por las chimeneas y tubos de escape está en proporción directa con la velocidad y dirección de las corrientes de viento. Así, una baja velocidad del aire corresponde al desplazamiento lento de la capa de aire contaminado hasta grandes distancias, mientras que una

velocidad alta diluye rápidamente los contaminantes en una gran masa de aire. Una ausencia total de corrientes de aire lógicamente impide la dispersión de los contaminantes y tiende a acumularlos en zonas cercanas al lugar de emisión.

Por otra, en la fase de selección de la localización de instalaciones industriales es necesario tener en cuenta la dirección del viento para evitar que éste arrastre las impurezas hacia sitios densamente poblados

Temperatura: Los movimientos del aire son originados por diferencias de temperatura. Además de los movimientos horizontales es especialmente importante el fenómeno que produce la ascensión del aire de las capas inferiores, cercanas al suelo, debido a su calentamiento por el sol.

La ascensión del aire se produce debido a la menor temperatura existente en las capas superiores (la temperatura del aire disminuye aproximadamente 1°C con cada aumento de 100 metros en la altura). Así la corriente de aire ascendente arrastra las impurezas del aire evacuadas por las chimeneas y las diluye en un volumen mayor de aire disminuyendo en esta forma sus efectos nocivos.

Inversión Térmica: En algunas épocas, la situación anterior se invierte y puede ocurrir que una capa de aire frío sea retenida cerca a la superficie del suelo por una capa superior de aire caliente y se produce así la llamada inversión térmica. Este fenómeno impide la difusión de las sustancias contaminantes y produce una acumulación de éstas que puede ocasionar la muerte de numerosas personas como ocurrió en Londres en 1952. La inversión térmica puede ocurrir a diferentes alturas y, desde este punto de vista se clasifica como inversión de superficie, inversión a baja altura e inversión a gran altura.

Islas urbanas de calor: Este efecto se presenta en los centros urbanos donde la temperatura en el centro se encuentra varios grados por encima de la que se registra en los alrededores, a la misma hora. Este fenómeno está asociado a la capacidad calórica del concreto y el asfalto que cubren amplias áreas de las zonas urbanas. Estos materiales absorben la energía radiante y ocasionan la formación de celdas calientes en las que el aire caliente sube un poco y regresa a la superficie. Inversiones superficiales se presentan sobre estas islas de calor. Los contaminantes, atrapados en las celdas, permanecen en las áreas céntricas de las ciudades.

Turbulencia: Este fenómeno es provocado por un proceso mecánico complejo que es el resultado de diferencias de temperatura, vientos y factores del relieve. Así, la turbulencia es mínima en grandes extensiones planas. La dilución de contaminantes aumenta en proporción directa con el aumento en la turbulencia.

Precipitaciones: Las precipitaciones atmosféricas como la lluvia y la nieve absorben las impurezas del aire y las arrastran hacia el suelo donde posteriormente entran a formar parte del caudal de los ríos efectuando en esta forma un lavado de la atmósfera. Un exceso de contaminantes en la atmósfera puede dar origen a lluvias ácidas; precipitaciones de bajo pH.

Humedad: El vapor de agua en la atmósfera es considerado un factor desfavorable en el

proceso de auto purificación de la misma. Una alta humedad favorece la formación de nieblas y la concentración de impurezas. (Puede conducir a la formación del SMOG)

Nubes: La formación de un techo compacto y estático de nubes a baja altitud retarda el proceso de dilución de los contaminantes. Este fenómeno se produce sobre todo en regiones nórdicas y montañosas en las épocas frías del año. Por otra parte, las nubes en movimiento pueden arrastrar consigo impurezas y ayudar así a la auto purificación.

*** Factores topográficos**

El relieve, la vegetación, las construcciones, son obstáculos situados en el camino de las emisiones de gases y constituyen un factor importante en el proceso de difusión de los contaminantes y la auto purificación del aire. Estas barreras naturales o artificiales pueden desviar la dirección de los gases lateralmente o hacia las alturas.

Así mismo, los obstáculos pueden aumentar la turbulencia de las emisiones y por consiguiente acelerar su difusión. Por otra parte, la existencia de barreras alrededor de las zonas urbanas o industriales constituye un factor altamente desfavorable para el proceso de auto purificación, y solo, vientos muy fuertes y fenómenos de convección en periodos calientes, hacen posible la difusión de los contaminantes.

La vegetación se considera un factor favorable en el proceso de purificación pues algunas plantas pueden absorber o eliminar algunos agentes de contaminación. También influye en la regulación de la temperatura ambiente y la producción de oxígeno.

1.1.5 Efectos nocivos sobre el hombre. La acción nociva de la contaminación atmosférica sobre el hombre se efectúa, principalmente, a través de la respiración. En forma secundaria y después que las sustancias se han depositado, por medio del agua y los alimentos. La contaminación del aire difiere de la del agua, los alimentos y otros, en que el aire se mantiene en contacto íntimo y permanente con los tejidos del organismo. Por intermedio de las membranas de los alvéolos, el aire entra en contacto con la sangre que lo transporta por todo el cuerpo humano. Si el aire contiene impurezas, éstas son retenidas por el filtro pulmonar y posteriormente transportadas por todo el organismo. La contaminación del aire puede estar asociada a alergias, asma, irritaciones, cáncer e intoxicaciones crónicas y agudas. Algunos ejemplos son los siguientes:

Tabla 3. Efectos de algunos contaminantes sobre la salud.

| PATOLOGÍA | CONTAMINANTE QUE LA PRODUCE |
|--------------------|--|
| Alergias | Isocianatos |
| Asfixia | Monóxido de carbono |
| Irritación | Ácido hidroclicóric, amoniaco y cloro |
| Necrosis | Ozono y NO ₂ |
| Cáncer | Asbesto, arsénico y humo de cigarrillo |
| Venenos sistémicos | Benceno y arsénico. |

Fuente: OMS 2002

Cada sustancia genera efectos particulares. A continuación se enuncian las sustancias más importantes y sus efectos:

- Óxido de azufre: provoca irritación en el sistema respiratorio, deterioro en los árboles, en los textiles, el cuero, el papel y destrucción de la pintura.
- Óxido de nitrógeno: provoca irritación en los ojos, daña las hojas de los árboles de caucho y corroe los metales.
- Monóxido de carbono: provoca dolor de cabeza, náuseas y trastornos.
- Los hidrocarburos: son causa del cáncer y su influencia retarda el crecimiento de las plantas.
- Oxidantes fotoquímicos: provocan problemas pulmonares, decoloración en plantas y textiles.
- Partículas sólidas: provocan el oscurecimiento de la visión, agravan las afecciones pulmonares y corroen los metales.

1.1.6 Efectos socioeconómicos. Todos los efectos de la contaminación pueden ser traducidos con relativa facilidad en términos socioeconómicos.

Después de arrojadas las sustancias a la atmósfera, siguiendo la destrucción que causa a su paso hasta los efectos nocivos sobre los seres humanos, la contaminación tiene repercusiones indudables sobre la economía de los países. La contaminación del aire está asociada a un incremento de la corrosión, a daños en textiles y deterioro de edificaciones y papeles, entre otros.

Los contaminantes atmosféricos tienen un efecto directo sobre la producción agrícola.

1.2 CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE

El control de la contaminación del aire se realiza a través de normas de control de emisiones y de normas de calidad del aire o nivel de inmisión.

1.2.1 Índices de Calidad del Aire. El índice de la calidad del aire, se define como un valor representativo de los niveles de contaminación atmosférica y sus efectos en la salud, dentro de una región determinada. Para efectos del presente estudio, se tienen en cuenta los índices implementados para la evaluación y gestión de la calidad del aire no sólo a nivel local, sino también en Estados Unidos, México y Chile.

* **Índice de Calidad del Aire de Bucaramanga y su Área Metropolitana, (IBUCA).** En Colombia, a partir del Decreto 948 de Junio de 1995 del Ministerio del Medio Ambiente se reglamentó la protección y calidad del aire, estableciendo las normas y principios generales para la protección atmosférica y designando para la prevención, control y atención de episodios de contaminación a las autoridades ambientales locales, a fin de

mejorar la calidad de vida de la población y procurar su bienestar bajo el principio del desarrollo sostenible.

Con base en esta normatividad, la Corporación de Defensa de la Meseta de Bucaramanga, CDMB, autoridad ambiental encargada de monitorear la calidad del aire para Bucaramanga y su área metropolitana, implementó una red de calidad del aire que permite el acopio de información para la toma de decisiones en materia de políticas de control de la contaminación atmosférica y la evaluación del impacto de la misma. Los resultados de este sistema de monitoreo se presenta en términos del Índice de Calidad del Aire de Bucaramanga y su área metropolitana, IBUCA, el cual permite establecer cómo se encuentra la calidad del aire con respecto a la normatividad actual vigente. El indicador es adimensional y posee una escala de 0 a 10 que depende del grado de contaminación presente en la atmósfera, tal como se describe a continuación:

Tabla 4. Índice de Calidad del Aire de Bucaramanga, IBUCA.

| IBUCA | EQUIVALENTE PORCENTUAL EN TÉRMINOS DEL VALOR DE LA NORMA | DESCRIPTOR | COLOR |
|---------------|--|------------|-------|
| 0 – 1.25 | 0 – 12.5 | Bueno | |
| 1.26 – 2.50 | 12.6 – 25 | Moderado | |
| 2.51 – 7.50 | 25.1 – 75 | Regular | |
| 7.51 – 10.0 | 75.1 – 100 | Malo | |
| Mayor de 10.0 | Supera el valor de la norma | Peligroso | |

Fuente: CDMB, 2004

El reporte del IBUCA por estación se determina como el valor máximo de la relación entre la concentración medida y la norma de calidad del aire para cada contaminante medido (PM₁₀, SO_x, NO_x, CO, O₃).

El IBUCA es una herramienta importante en la determinación de indicadores que correlacionan las actividades propias del área y el impacto que éstas generan sobre las condiciones de calidad de la atmósfera, que orienten decisiones sobre la base del conocimiento, para de esta forma, materializar condiciones sostenibles de ocupación y crecimiento económico y urbano de la región.







* **Índice de Calidad de Aire de Estados Unidos, AIR QUALITY INDEX, (AQI).** En 1976, la Agencia de Protección Ambiental (**Environmental Protection Agency, EPA**) junto con el Consejo de Calidad Ambiental (**Council on Environmental Quality, CEQ**), adelantaron un estudio en el que encontraron que las 55 áreas urbanas de Estados Unidos y Canadá reportaban la calidad del aire mediante 14 formas diferentes, lo que significaba que cada área empleaba un índice de calidad del aire distinto.

Como resultado de este estudio y teniendo como base la Ley de Aire Puro (**Clean Air Act, CAA**) que establece normas nacionales de desempeño para las nuevas fuentes estacionarias (construidas o modificadas después de 1970), normas sobre emisiones de contaminantes atmosféricos peligrosos y de emisión de los vehículos, la EPA estableció las Normas Nacionales de Calidad del Aire (**National Ambient Air Quality Standards, NAAQS**) para contaminantes que ponen en peligro la salud o el bienestar públicos.

Las Normas Nacionales de Calidad del Aire incluyen normas primarias y secundarias. Las primarias deben dar un margen de seguridad adecuado de protección de la salud pública, (Código de Estados Unidos, Título 42, sección 7409(b)). Las secundarias protegen el bienestar público de efectos adversos anticipados (Código de Estados Unidos, Título 42, sección 7409(b)).

Con estos antecedentes, la EPA implementó un índice para reportar la calidad del aire que, entre otras ventajas, tuviera el soporte científico que permitiera relacionar calidad del aire con efectos sobre la salud y que fuera simple y de fácil comprensión para la comunidad en general. Este índice tiene en cuenta cinco contaminantes principales: Ozono, partículas en suspensión, monóxido de carbono, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno. Su escala se divide en seis categorías, tal como se presenta a continuación.

Tabla 5. Índice de Calidad del Aire de Estados Unidos, AQI.

| AQI | DESCRIPTOR | COLOR |
|-----------|--|---|
| 0 – 50 | Bueno |  |
| 51 – 100 | Moderado |  |
| 101 – 150 | No saludable para grupos sensibles |  |
| 151 – 200 | No saludable para población en general |  |
| 201 – 300 | Muy poco saludable |  |
| 301 – 500 | Peligroso |  |

Fuente: EPA. 2003

* **Índice Metropolitano de la Calidad del Aire, México, (IMECA).** En México, existen tres organismos principales que tienen competencia sobre los aspectos de contaminación atmosférica. La Secretaría de Desarrollo Social (SEMARNAP) es la entidad que regula las fuentes fijas en el Distrito Federal, expide las Normas Oficiales Mexicanas respecto al Reglamento Atmosférico, se encarga de aplicar y supervisar las actividades relacionadas con el control de la contaminación atmosférica y, en conjunto con la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SECOFI), establecen las normas oficiales relativas a los niveles máximos de emisiones contaminantes de vehículos automotores nuevos y en circulación. Además, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) tiene el

control administrativo sobre todos los centros de verificación de emisiones de transporte público federal. A su vez, los estados y municipios cuentan con sus propias dependencias locales para el control ambiental.

La SEMARNAP establece y mantiene un Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire, el cual integra datos que resultan del monitoreo atmosférico y de los inventarios de las fuentes de contaminación de la jurisdicción federal, así como de los estados y municipios.

De acuerdo con la Ley de Ecología, la SEMARNAP está a cargo de establecer normas de calidad del aire a nivel federal. Si bien los Estados pueden aplicar normas más estrictas localmente, las normas federales representan una base para las normas estatales. Estas normas tienen como base dos criterios específicos. Primero, la calidad del aire debe ser satisfactoria para los asentamientos humanos. Segundo, todas las emisiones contaminantes de fuentes naturales, artificiales, fijas o móviles deben reducirse o controlarse a fin de asegurar que la calidad del aire sea satisfactoria para el bienestar general de la población y el ambiente.

En la Ciudad de México se utilizan dos índices para determinar la calidad del aire: el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA) y el Índice UV o de Radiación Solar Ultravioleta. Para el IMECA se contempla el estudio de cinco contaminantes principales: SO₂, CO, PM₁₀, O₃ y NO₂.

El IMECA se define como un valor representativo de los niveles de contaminación atmosférica y sus efectos para la salud dentro de una región determinada. Tiene dos algoritmos de cálculo fundamentales. Uno para la obtención de subíndices correspondientes a diferentes indicadores de la calidad del aire y otro para la combinación de éstos en un índice global.

Tabla 6. Índice Metropolitano de Calidad del Aire, IMECA. México.

| IMECA | CALIDAD DEL AIRE | EFECTO |
|--------------|-------------------------|---|
| 0 – 100 | Satisfactoria | Situación favorable para la realización de todo tipo de actividades |
| 101 – 200 | No satisfactoria | Aumento de molestias menores en personas sensibles |
| 201 – 300 | Mala | Aumento de molestias e intolerancia relativa al ejercicio en personas con padecimientos respiratorios |
| 301 – 500 | Muy mala | Aparición de diversos síntomas e intolerancia al ejercicio en la población |

Fuente: Sistema de Información Ambiental, Ciudad de México. 2002.

El índice UV mide la fracción más energética del espectro solar, teniendo en cuenta que la radiación solar se divide en UV-A (320 – 400 nm), UV-B (290 – 320 nm) y UV-C (150 – 290 nm), la cual alcanza la superficie de la tierra, específicamente el UV-B. Se emplea una escala del 0 al 15 y se reporta en unidades estándar de energía, como mW/m² o MED/hr por unidad de área, donde MED es la dosis mínima de eritema, dosis que se requiere para provocar un eritema o enrojecimiento de la piel en individuos con piel blanca o sensible. Se convierte en unidades del índice UV como una convención internacional para reportar la radiación solar ultravioleta a la población.

Tabla 7. Índice UV o de Radiación Ultravioleta, México.

| ÍNDICE UV | CLASIFICACIÓN |
|-----------|---------------|
| 0 – 4 | Bajo |
| 4 – 7 | Medio |
| 7 – 9 | Alto |
| 9 – 15 | Extremo |

Fuente: Sistema de Información Ambiental, Ciudad de México. 2002.

* **Índices de Calidad del Aire de Chile, (ICA e ICAP).** En Chile se tiene como antecedente la resolución No. 1215 de 1978 con la cual se adoptaron las normas de la Agencia de Protección del Ambiente de Estados Unidos, EPA, en lo que respecta a calidad del aire. En 1988, el Ministerio de Salud de este país, mediante la resolución exenta No. 369 estableció un Índice de Calidad del Aire referido a Gases (ICA) y un Índice de Calidad del Aire para partículas (ICAP), que serían aplicados exclusivamente en la ciudad de Santiago.

El Servicio de Salud del Ambiente de la Región Metropolitana (SESMA) tiene a su cargo una red de monitoreo que permite mantener una constante vigilancia de los niveles de contaminación del aire que ocurren en la región durante todo el año. Para tal efecto, se emplea un índice de calidad del aire referido a gases, ICA, y un índice de calidad del aire referido a partículas, ICAP. Con estos dos parámetros es posible comparar los efectos que causan sobre la salud de la comunidad, la concentración de los siguientes contaminantes: Partículas suspendidas totales PTS, SO₂, CO, O₃, NO₂ y PM₁₀, este último, incluido en la norma correspondiente al Decreto Supremo No. 185 de 1991 del Ministerio de Minería.

El ICA resulta de la aplicación de una metodología contenida en la resolución No. 369 de 1988 del Ministerio de Salud, a las concentraciones de CO, SO₂, NO₂ y O₃, determinadas por la red de monitoreo. Sin embargo, la normatividad vigente referente a calidad del aire no define niveles que originen situaciones de emergencia respecto del O₃, CO, NO₂ y

SO₂, por tanto, los antecedentes para decretar una emergencia de contaminación son sólo los referidos al PM₁₀.

El ICAP emplea la misma metodología pero aplicada sobre a las concentraciones de material particulado de tamaño menor a 10 µm, PM₁₀ y permite a las autoridades competentes determinar si es posible llegar a un episodio crítico de contaminación, pues la base de esta metodología es la Prevención, ya que el modelo pronostica la calidad del aire del día siguiente. Por tanto, los episodios se decretan en forma preventiva para evitar alcanzar los niveles de contaminación pronosticados con lo cual, puede protegerse la salud de la población.

Tabla 8. Índice de Calidad del Aire por Material Particulado, ICAP. Chile

| ICAP | CALIFICACIÓN | PM ₁₀ Mg/m ³ (24 hr) | NIVEL | EPISODIO |
|-----------|--------------|---|-------|----------------|
| 100 – 199 | Bueno | 150 | 0 | - |
| 200 – 299 | Malo | 195 | 1 | Alerta |
| 300 – 399 | Crítico | 240 | 2 | Pre-emergencia |
| 400 – 500 | Peligroso | 285 | 2 | Pre-emergencia |
| > 501 | Excede | 330 | 3 | Emergencia |

Fuente: “Fuentes fijas. Normativa ambiental en Chile” (1995-1996)

Con el Decreto Supremo No. 59 de 1998 se determinan los niveles que originan situaciones de emergencia ambiental para PM₁₀, tal como se muestra a continuación:

Tabla 9. Niveles de emergencia ambiental para PM10. Chile.

| NIVEL | PM ₁₀ µg/m ³ (24 hr) |
|-------|--|
| 1 | 195 – 239 |
| 2 | 240 – 329 |
| 3 | 330 o superior |

Fuente: “Fuentes fijas. Normativa ambiental en Chile” (1995-1996)

Durante Pre-emergencias, el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones dispondrá de medidas de restricción vehicular en la ciudad de Santiago, que involucran a

automóviles, transporte de carga y de escombros, buses, servicio de metro bus y otros vehículos.

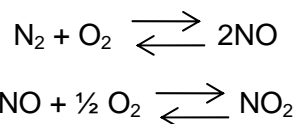
1.2.2 Contaminantes criterio. Los tipos y concentraciones de contaminantes emitidos y la población expuesta a la contaminación atmosférica varían de país en país. Así mismo, si bien se han caracterizado como contaminantes, entre otros, compuestos orgánicos volátiles, insecticidas, herbicidas y compuestos radioactivos que amenazan de diferente forma la salud humana, este estudio se concentra en aquellos agentes contaminantes incluidos en la normatividad vigente en Colombia. Tomando estos contaminantes como base para la investigación, se procede a la comparación con los estándares que para dichas sustancias señalan las normatividades vigentes en Estados Unidos, México y Chile.

* **Dióxido de Nitrógeno (NO₂).** Es un gas pardo-rojizo, no es inflamable pero sí tóxico y se caracteriza por un olor muy asfixiante. La mayor parte de los óxidos de nitrógeno se forman por la oxidación del nitrógeno atmosférico durante los procesos de combustión a temperaturas elevadas. El oxígeno y el nitrógeno del aire reaccionan para formar NO, oxidándose este posteriormente a NO₂.

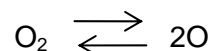
Los óxidos de nitrógeno contribuyen al smog, causan daño a plantas y animales y pueden afectar la salud humana, además contribuyen a la lluvia ácida y reaccionan con los VOC's para la formación de oxidantes fotoquímicos. Las altas concentraciones en el aire aparecen como nubes marrones, pues el gas absorbe la luz visible, especialmente en el área azul-verde. Las plantas de hojas grandes sufren necrosis y efectos sobre su crecimiento. En los humanos, a mayores concentraciones produce irritación de ojos y nariz, edema, bronquitis y pulmonía.

Cinética de la formación de los óxidos de nitrógeno:

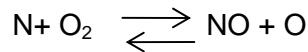
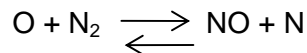
Las dos reacciones globales de importancia son aquellas que producen monóxidos de nitrógeno, NO, y dióxido de nitrógeno, NO₂. Las reacciones de equilibrio son:



El interés que se ha tenido en pronosticar las emisiones de monóxido de nitrógeno de fuentes móviles y estacionarias ha llevado a la formulación de varios modelos analíticos para la formación de NO en los procesos de combustión. El modelo básico actualmente en uso tuvo su origen en los trabajos de Zeldovich y colaboradores, hacia 1946. Una vez que se hayan formado los átomos de oxígeno por el proceso



las reacciones primarias que interesan, según los mecanismos de cadenas radicales libres de Zeldovich, serán:

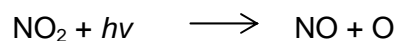


* **Ozono (O₃)**. Es un contaminante de origen secundario. Su formación ocurre por la reacción de los rayos solares con los óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre. La radiación solar actúa sobre el dióxido de nitrógeno separándolo y generando ozono.

Concentraciones de ozono a nivel del suelo por encima de las normas producen en individuos expuestos por periodos de un par de horas, disminución de la función pulmonar. Cuando se hace ejercicio, los mismos problemas aparecen a concentraciones más bajas y para exposiciones más largas.

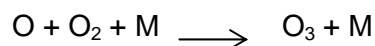
Cinética de la formación del Ozono:

La formación del ozono en la troposfera se atribuye por lo general al ciclo fotolítico del dióxido de nitrógeno. El dióxido de nitrógeno es altamente reactivo fotoquímicamente. Para las radiaciones por debajo de 0.38 μm, el gas se disocia según la reacción:

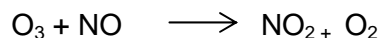
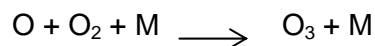
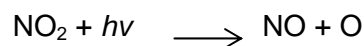


en donde $h\nu$ es la energía que poseen los fotones que emite el sol, ν es la frecuencia asociada con un fotón en particular y h es la constante de Planck.

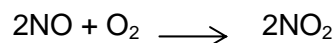
El O se combina con el O₂ (en presencia de un tercer cuerpo, M, capaz de aceptar energía) para formar ozono mediante la siguiente reacción:



Luego, el ozono oxida el monóxido de nitrógeno a dióxido de nitrógeno. En resumen, el ciclo fotolítico del dióxido de nitrógeno se puede representar por:



El NO₂ para la reacción se forma por oxidación directa del NO al NO₂, ya que el monóxido de nitrógeno que es liberado por fuentes estacionarias y móviles tiende a oxidarse por medio de la siguiente reacción:

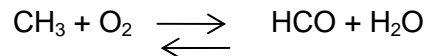


* **Monóxido de Carbono (CO)**. Es un gas no irritante, incoloro e insípido, producido por la combustión incompleta de combustibles carbónicos como la gasolina, el gas natural, el petróleo, el carbón, la madera, entre otros.

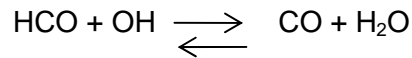
Es esencialmente inerte para las plantas o materiales. Reacciona con la hemoglobina de la sangre al formar carboxihemoglobina (HbCO), interfiriendo con la transferencia de oxígeno. Los efectos varían desde dolores de cabeza hasta la muerte, dependiendo de la exposición y la concentración a que se esté sometido.

Cinética de la formación de Monóxido de Carbono:

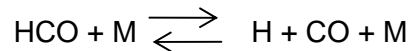
Actualmente se desconoce parcialmente la cinética de la oxidación del carbono. Se necesita una gran cantidad de trabajo adicional para lograr un mecanismo satisfactorio de reacción elemental para la formación del CO y el CO₂ en los procesos de combustión de hidrocarburos. En la mayoría de los estudios sobre los procesos de oxidación a alta temperatura para hidrocarburos, como el metano, los investigadores incluyen con frecuencia la reacción con el O₂ del radical metilo (CH₃),



como una reacción intermedia principal. Se ha propuesto entonces que el monóxido de carbono se forma principalmente por la reacción:

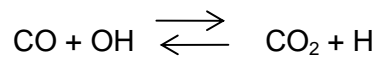


A pesar de que otra posibilidad podría ser:

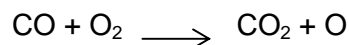


Usualmente, las flamas de los hidrocarburos contienen cantidades apreciables en la zona de dicha flama, de modo que no está restringida la formación de CO.

La conversión de CO a CO₂, está bastante bien establecida. La reacción principal, que es intrínsecamente rápida, se considera como sigue:



Otra ruta es la de la reacción de oxidación directa:



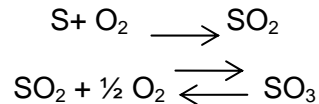
* **Dióxido de azufre (SO₂)**. Es un gas denso y muy tóxico que pertenece a la familia de los gases de óxidos de azufre, los cuales se producen principalmente por la combustión de compuestos que contienen azufre (carbón y aceite) y durante ciertos procesos industriales y en la producción de acero.

Se oxida lentamente en la atmósfera a trióxido de azufre y ambos se pueden hidrolizar para formar ácidos que se convierten en lluvia ácida, la cual causa daño a las plantas y

acidifica los cuerpos de agua. En los humanos, como el SO_2 es soluble, es absorbido rápidamente por el tracto respiratorio superior. El umbral de detección para sabor y olor es muy bajo. A concentraciones más altas se presenta bronco constricción y a mayores concentraciones se observa irritación de los ojos, nariz y garganta.

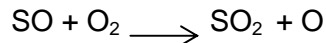
Cinética de la formación del Dióxido de Azufre:

Apoyándose sobre un nivel fundamental, los procesos de formación del SO_2 y el SO_3 no se pueden explicar cuantitativamente por simples relaciones globales

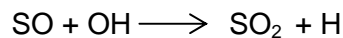


Los óxidos de azufre convencionales que se encuentran como productos estables, resultantes de la combustión a altas temperaturas de los combustibles que contienen azufre, son el SO_2 y el SO_3 .

Se ha propuesto que el monóxido, SO , constituye un importante producto intermedio dentro del esquema de reacción. Para abreviar, se supone que algún mecanismo produce SO a partir de las moléculas que contienen azufre, en el inicio de la zona de reacción. La etapa siguiente será examinar las reacciones elementales por las que se oxida el SO , primero a SO_2 , y finalmente a SO_3 . Se considera que las principales reacciones de formación del SO_2 son las siguientes:

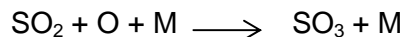


y

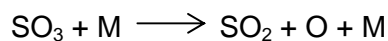
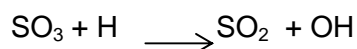
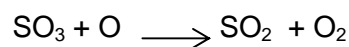


Estas reacciones producen también átomos de O y H , los que son altamente reactivos y que más tarde podrán incorporarse al esquema global de reacción. Es importante tener en mente que las reacciones de oxidación del azufre ocurren simultáneamente con la oxidación de los hidrocarburos del combustible. Este último proceso es el que produce grandes cantidades de especies intermedias, como el O , H y OH , los que quedan a las reacciones de los óxidos de azufre.

La mayor preocupación reside en la formación y remoción del SO_3 . La principal reacción de formación es el proceso de los tres cuerpos donde M es un tercer cuerpo que actúa como un absorbedor de energía.



Los procesos de tres cuerpos son, intrínsecamente, bastante lentos; sin embargo, esta reacción procederá rápidamente en la zona caliente de reacción debido a que la concentración de átomos de oxígeno es máxima en dicho lugar. Se cree que las etapas principales para la remoción del SO_3 son las siguientes:



La última etapa es un proceso de descomposición térmica.

* **Partículas en Suspensión.** Corresponden a una amplia clase de sustancias de distinta naturaleza química y física que existen como partículas sólidas o líquidas de una variada distribución de tamaños. Son emitidas directamente o pueden resultar de la transformación en la atmósfera de sustancias gaseosas como óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles.

A partir de un tamaño menor a $10 \mu\text{m}$ (PM_{10}), la fracción comienza a ser significativa en términos de salud para las personas. En este caso, estas partículas entran en el aparato respiratorio y están asociadas con muchas enfermedades respiratorias como bronquitis, asma, enfisema, pulmonía y enfermedades cardíacas.

1.2.3 Metodologías de medición de los contaminantes. Si bien, cada país cuenta con sus propias políticas de control de contaminación atmosférica, las metodologías de medición de contaminantes son muy similares para todos. Las tres principales herramientas empleadas son el monitoreo de la calidad del aire, los modelos de pronóstico y el inventario de emisiones.

En la Tabla 10 se presenta un cuadro comparativo de las diferentes metodologías de medición de contaminantes para los índices de calidad del aire en estudio.

1.3 POLÍTICAS DE CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA.

Corresponde a cada país, implementar las medidas de gestión ambiental con el fin de cumplir con el objetivo de reducir la emisión de contaminantes. De esta forma, con la medición oportuna de contaminantes criterio en zonas estratégicas, se determinan indicadores que correlacionan las actividades propias de la región y el impacto que éstas generan sobre las condiciones de calidad de la atmósfera, para orientar decisiones que permitan asegurar la sostenibilidad de ocupación, del crecimiento económico y urbano.

1.3.1 Acciones de control, seguimiento y monitoreo desarrolladas en Bucaramanga. La Corporación de Defensa de la Meseta de Bucaramanga, CDMB, autoridad que regula los aspectos ambientales en Bucaramanga y su área metropolitana, tiene dispuesta una red de monitoreo que permite conocer, en tiempo real y de manera confiable, el estado de la contaminación del aire en su área de influencia, con la cual se busca llevar a cabo un manejo oportuno de las situaciones que representen peligro para

la comunidad, verificar el grado de cumplimiento de la normatividad, desarrollar políticas de control e informar y educar a la ciudadanía.

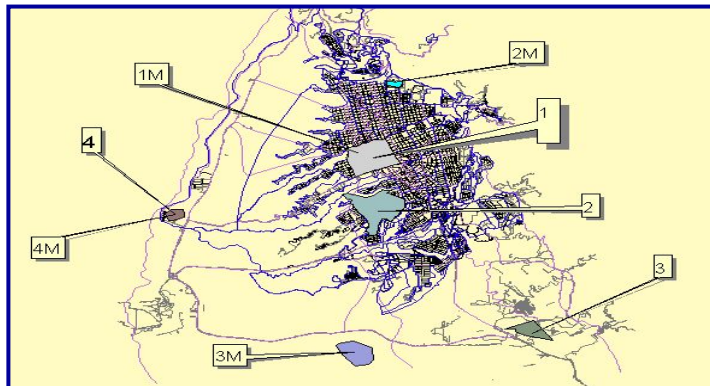
Dentro de las políticas de control implementadas por la CDMB, se realiza un seguimiento de la contaminación generada por fuentes fijas y por fuentes móviles. Para el primer grupo, el trabajo se concentra en la regulación de la descarga de contaminantes, la emisión de ruido y olores ofensivos, el otorgamiento de permisos de emisión, los instrumentos y medios de control y vigilancia y el régimen de sanciones por la comisión de infracciones.

Tabla 10. Cuadro comparativo de metodologías de medición de contaminantes.

| CONTAMINANTE | COLOMBIA | ESTADOS UNIDOS | MÉXICO | CHILE |
|------------------|---|---|---|--|
| NO ₂ | Método de Jacobs y Hochheiser | | | |
| O ₃ | Quimiluminiscencia de fase gaseosa | Quimiluminiscencia | Quimiluminiscencia Fotometría ultravioleta | Quimiluminiscencia |
| CO | Fotometría infrarroja no dispersiva | Fotometría infrarroja no dispersiva | Fotometría infrarroja no dispersiva | Fotometría infrarroja no dispersiva |
| SO ₂ | Pararosanilina | Pararosanilina; Fluorescencia ultravioleta | Pararosanilina | Pararosanilina |
| PM ₁₀ | Método gravimétrico por muestreador de alto volumen | Método gravimétrico de muestreador de alto o bajo volumen equipado con cabezal PM ₁₀ . Monitor de atenuación Beta. Microbalanza de oscilaciones inducidas (TEOM) | Muestreador de alto volumen | Método gravimétrico de muestreador de alto o bajo volumen equipado con cabezal PM ₁₀ . Método por transducción gravimétrica de oscilaciones inducidas. Microbalanza de oscilaciones de sensor en voladizo con cabezal PM ₁₀ . Métodos basados en atenuación Beta. |

Fuente: Autores

Figura 1. Localización Red de Monitoreo CDMB en el área metropolitana de Bucaramanga.



Fuente: CDMB, 2003.

Tabla 11. Conformación Red de Monitoreo CDMB, Bucaramanga.

| IDENTIFICACIÓN | LOCALIZACIÓN | PARÁMETROS MEDIDOS |
|--------------------------------|---|---|
| 1 | Centro | PM ₁₀ , CO, NO ₂ , SO ₂ y O ₃ |
| 2 | Ciudadela | CO y O ₃ |
| 3 | Floridablanca | PM ₁₀ y CO |
| 4 | Chimitá | PM ₁₀ , CO, NO ₂ , SO ₂ y O ₃ |
| ESTACIONES MICROMETEREOLÓGICAS | | |
| 1M | Centro | Velocidad del viento Dirección del viento Humedad relativa Presión barométrica Radiación solar Temperatura ambiente Precipitación |
| 2M | Chimitá | |
| 3M | UIS | |
| 4M | Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, PTAR | |

Fuente: CDMB, 2003.

La labor desarrollada con las fuentes móviles reviste gran importancia, pues el parque automotor que circula por el área metropolitana de Bucaramanga es el principal generador de contaminantes que afectan la calidad del aire. Por ello, las actividades están encaminadas al estudio de solicitudes relacionadas con la instalación de centros de diagnóstico para la expedición de certificados de emisión de gases, el seguimiento a estos establecimientos y la realización de operativos de control sobre las fuentes móviles que circulan por el área metropolitana de Bucaramanga.

Adicionalmente, la CDMB realiza campañas de sensibilización ciudadana en torno a la problemática de contaminación del aire con lo cual, se busca socializar el significado y

alcance del IBUCA para que la comunidad aprenda de su importancia y las implicaciones sobre la salud.

1.3.2 Políticas de control implementadas en Estados Unidos. Dada la complejidad de sus programas ambientales y el número total de instalaciones objeto de regulación, los programas ambientales de Estados Unidos se basan en autoridad compartida y acuerdos de cooperación entre el gobierno nacional y los gobiernos estatales para implementar y aplicar las leyes ambientales.

La EPA es la máxima autoridad nacional en materia ambiental. Una vez que promulga o revisa una norma, a cada Estado se le exige presentar a dicha agencia un plan en el que describa la manera en que espera implementar y mantener la norma en estudio. La EPA revisa dicho plan y una vez emite su aprobación, junto con el Estado comparten la autoridad para hacer cumplir las disposiciones aplicables.

La EPA cuenta con tres medios civiles básicos de aplicación: emitir una orden administrativa exigiendo cumplimiento, iniciar una acción civil para imponer multas u obtener una orden judicial y evaluar las multas administrativas. Es así como esta agencia cuenta con amplias facultades de inspección y supervisión para instrumentar y aplicar la Ley de Aire Puro. También posee facultades generales de emergencia para responder a peligros inminentes y considerables para la salud y el bienestar públicos o para el ambiente.

1.3.3 Política ambiental interna en México. Esta política constituye una fuerte posición del gobierno en materia ambiental, que en conjunto con la adopción de compromisos internacionales, han desencadenado la actualización de leyes e instrumentos jurídicos que han permitido la consecución de las metas ambientales.

El marco legislativo general de protección y control de la contaminación atmosférica se establece en los artículos 110 al 1116 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Estas disposiciones estipulan los criterios generales en cuanto a la calidad del aire, las facultades de la SEMARNAP y de las autoridades estatales, un régimen general de permisos, un régimen especial de autorización de fuentes fijas federales, zonas de calidad del aire, además de un programa de incentivos fiscales para las industrias que instalen equipo para el control de emisiones a la atmósfera.

Con el fin de garantizar que las políticas ambientales en materia de recursos naturales, especialmente en lo que tiene que ver con emisiones atmosféricas, se cumplan, se han desarrollado tres programas de inspección fundamentales:

- Fuentes de contaminación en el ámbito nacional. Tiene como misión, verificar que las fuentes de emisión cumplan con la normatividad ambiental en materia de contaminación atmosférica, residuos peligrosos, actividades altamente riesgosas, impacto ambiental y ruido.
- Vehículos nuevos en planta. Busca asegurar que los vehículos, antes de salir de las plantas ensambladoras, cumplan con la normatividad en relación con el nivel de emisiones de gases de combustión y ruido.

- Reducción de emisiones a la atmósfera durante contingencias ambientales en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. En este caso, se cuenta con un programa de emergencia para episodios críticos de contaminación atmosférica y se han modificado los horarios escolares en época de invierno. En caso de un riesgo inminente de peligro para el ambiente o el bienestar públicos, la SEMARNAP puede emprender cualquiera de las siguientes acciones de respuesta: a) Clausurar las instalaciones o las fuentes contaminantes que causen el estado de emergencia ambiental. b) Confiscar materiales y residuos peligrosos, así como vehículos o instrumentos directamente relacionados con la emergencia ambiental. c) Neutralizar la emergencia ambiental; y d) Promover ante otras autoridades la aplicación de medidas de seguridad adicionales.

1.3.4 Plan de prevención y descontaminación atmosférica (PPDA), Chile. Está estructurado considerando una serie de exigencias para actividades y fuentes existentes, exigencias y actividades para fuentes nuevas y un programa para enfrentar episodios críticos.

En una primera etapa, el PPDA exige la compensación para todas las actividades y proyectos nuevos significativos desde el punto de vista de emisión de contaminantes atmosféricos. En segunda instancia, se habilitan mecanismos de compensación para las actividades y fuentes significativas existentes, de tal forma que se les permita cumplir de manera eficiente con sus metas individuales de reducción.

Se definieron instrumentos administrativos y económicos que contribuirían al cumplimiento de las metas de reducción de emisiones. Para tal fin, se establecieron dos tipos de instrumentos. El primero, las regulaciones directas o instrumentos administrativos, los cuales buscan asegurar estándares ambientales aceptables mediante la fijación de normas de emisión para industrias y vehículos, de composición de combustibles, de innovación tecnológica o requerimientos técnicos asociados a determinadas fuentes. El segundo, las regulaciones indirectas o instrumentos económicos, entre los que se destacan la revisión de impuestos específicos a combustibles, revisión de los valores de permisos de circulación, de tarifación vial, el perfeccionamiento de mecanismos de compensación de emisiones de material particulado para fuentes industriales, entre otros.

2. CÁLCULO DE LOS ÍNDICES DE CALIDAD DEL AIRE

Antes de explicar la aplicación que se desarrolló, se presenta una definición de qué es una macro. Una macro son un conjunto de instrucciones que sirven para automatizar procesos. La que se desarrolló en el presente estudio es una rutina que se encarga de calcular los índices de calidad del aire por día para la ciudad de Bucaramanga a partir de los datos suministrados por la CDMB de las siguientes sustancias: Óxido de carbono (CO), Dióxido de nitrógeno (NO₂), Dióxido de azufre (SO₂), Ozono (O₃), Material particulado menor a 10 micras (PM₁₀), usando las normas de calidad del aire de: Estados Unidos, México, Chile y Colombia. La macro genera un índice de calidad del aire por día para cada contaminante de acuerdo con la legislación ambiental y método de cálculo de cada uno de los países antes mencionados. Cabe aclarar que para efectos de diferenciar los parámetros en estudio, en la realización del software al índice de calidad del aire de Chile se le llamó ICHICA.

Tabla 12. Índices de Calidad del Aire en estudio.

| País | Índice de calidad el aire |
|----------------|---------------------------|
| Estados Unidos | AQI |
| México | IMECA |
| Chile | ICHICA |
| Colombia | ICA, IBUCA |

Fuente: Autores.

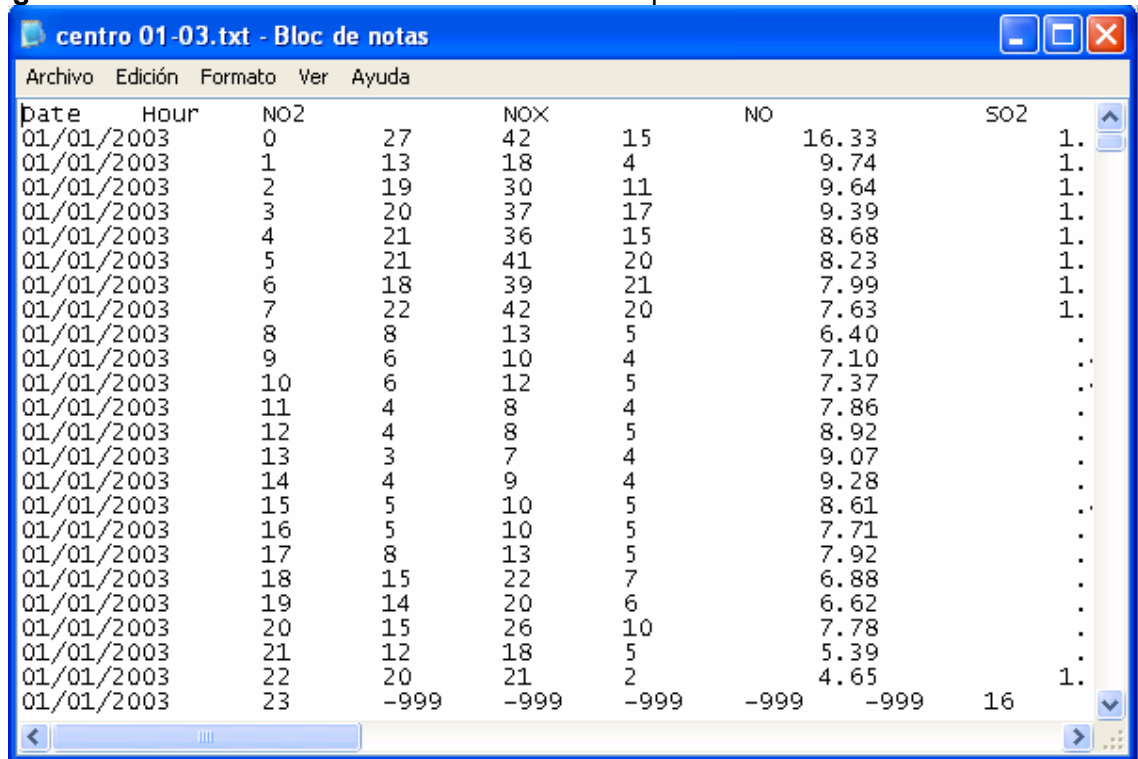
Además, se calculan para cada mes las medidas estadísticas (mínimo, máximo, media, desviación estándar y coeficiente de variación) más significativas para cada uno de los índices de calidad por contaminante.

Luego de haber generado cada uno de los índices de la calidad del aire se construyeron las curvas correspondientes al comportamiento de cada contaminante durante el mes, haciendo uso del asistente para gráficos con el que cuenta Excel®.

2.1 DESARROLLO DE LA MACRO

2.1.1 Llevar los datos a una hoja de cálculo de Excel®. Los datos suministrados por la red de monitoreo no están en formato de hoja de cálculo de Excel, están en formato de texto, como se puede ver en la siguiente figura:

Figura 2. Presentación de los datos suministrados por la Red de monitoreo.



| Date | Hour | NO2 | NOX | NO | SO2 |
|------------|------|------|------|------|-------|
| 01/01/2003 | 0 | 27 | 42 | 15 | 16.33 |
| 01/01/2003 | 1 | 13 | 18 | 4 | 9.74 |
| 01/01/2003 | 2 | 19 | 30 | 11 | 9.64 |
| 01/01/2003 | 3 | 20 | 37 | 17 | 9.39 |
| 01/01/2003 | 4 | 21 | 36 | 15 | 8.68 |
| 01/01/2003 | 5 | 21 | 41 | 20 | 8.23 |
| 01/01/2003 | 6 | 18 | 39 | 21 | 7.99 |
| 01/01/2003 | 7 | 22 | 42 | 20 | 7.63 |
| 01/01/2003 | 8 | 8 | 13 | 5 | 6.40 |
| 01/01/2003 | 9 | 6 | 10 | 4 | 7.10 |
| 01/01/2003 | 10 | 6 | 12 | 5 | 7.37 |
| 01/01/2003 | 11 | 4 | 8 | 4 | 7.86 |
| 01/01/2003 | 12 | 4 | 8 | 5 | 8.92 |
| 01/01/2003 | 13 | 3 | 7 | 4 | 9.07 |
| 01/01/2003 | 14 | 4 | 9 | 4 | 9.28 |
| 01/01/2003 | 15 | 5 | 10 | 5 | 8.61 |
| 01/01/2003 | 16 | 5 | 10 | 5 | 7.71 |
| 01/01/2003 | 17 | 8 | 13 | 5 | 7.92 |
| 01/01/2003 | 18 | 15 | 22 | 7 | 6.88 |
| 01/01/2003 | 19 | 14 | 20 | 6 | 6.62 |
| 01/01/2003 | 20 | 15 | 26 | 10 | 7.78 |
| 01/01/2003 | 21 | 12 | 18 | 5 | 5.39 |
| 01/01/2003 | 22 | 20 | 21 | 2 | 4.65 |
| 01/01/2003 | 23 | -999 | -999 | -999 | -999 |

Fuente: Autores

Para llevarlos a una hoja de cálculo debe crearse un archivo en Excel® y usar el asistente para importar texto, siguiendo la secuencia que se muestra a continuación:

Paso 1. Determinar el tipo de los datos originales, marcando la opción Delimitados.

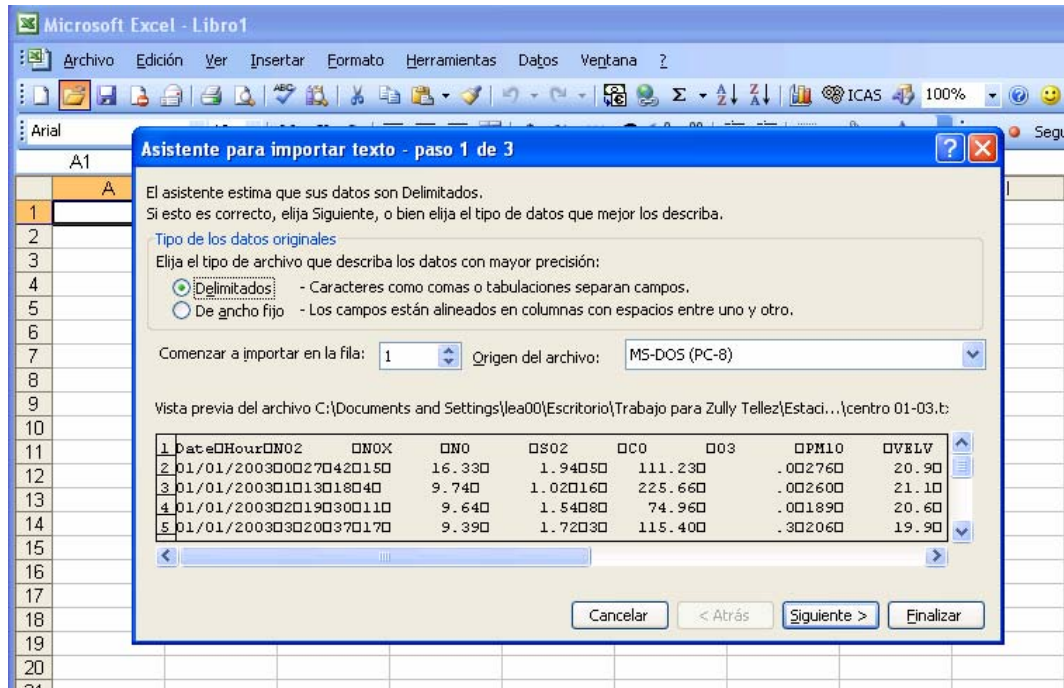
Paso 2. Determinar los separadores y escoger el calificador de texto.

Paso 3. Escoger el formato de los datos en columna

Este procedimiento permite cambiar los datos que originalmente se encuentran en bloques de texto a una hoja de cálculo de Excel®. Puede apreciarse la diferencia si se compara la figura 2 con la figura 6.

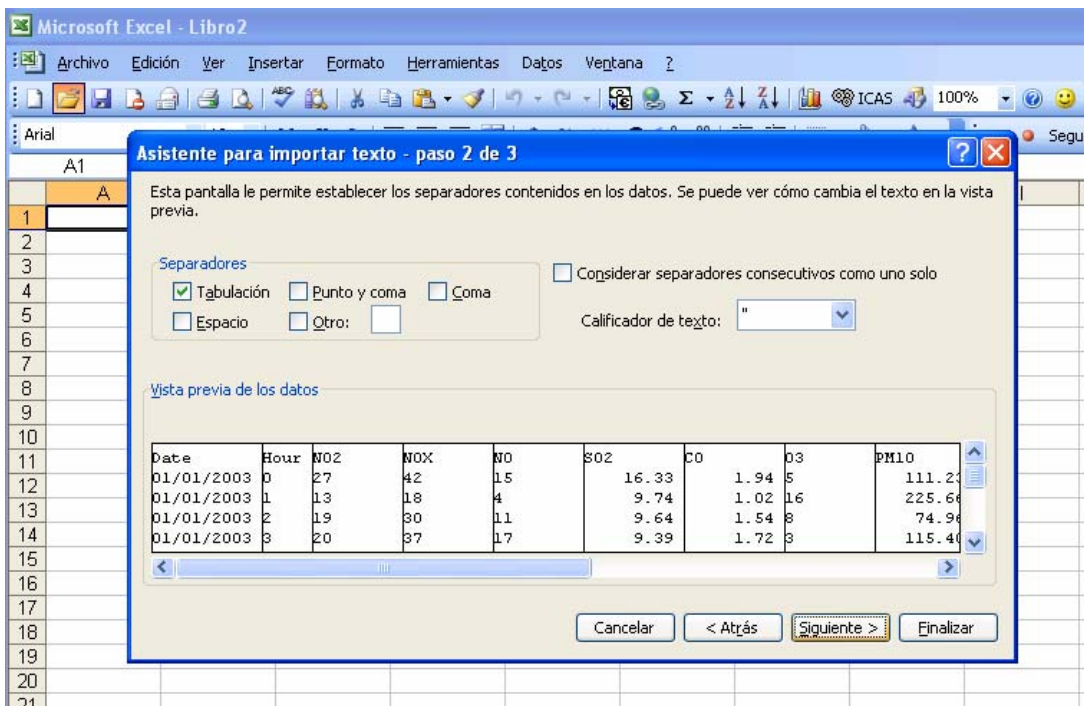
Debido a que los datos provenientes de las estaciones son tomados como texto por Excel®, es necesario hacer un cambio de formato en la macro, para convertirlos en formato de números y de esta forma evitar problemas durante la realización de los cálculos (ver figura 7).

Figura 3. Definición del tipo de datos de origen.



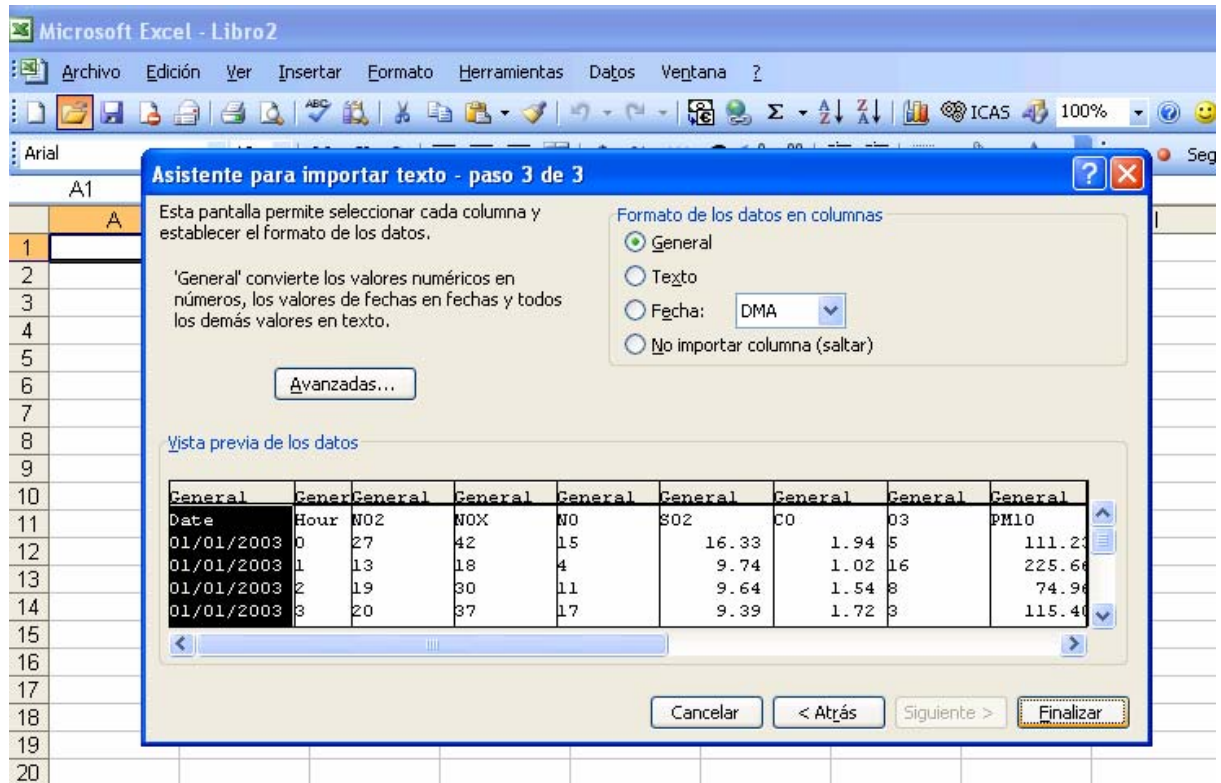
Fuente: Autores

Figura 4. Definición de los separadores contenidos en los datos.



Fuente: Autores

Figura 5. Delimitación de columnas y definición del formato de datos en cada una.



Fuente: Autores.

2.1.2 Cálculo de los índices de calidad el aire. Los datos de entrada al programa se toman de la hoja de cálculo correspondiente a las mediciones hechas por la red de monitoreo, donde se reportan las concentraciones para cada hora del día (ver figura 6).

De acuerdo con la Figura 6 se observa que a cada contaminante le corresponde una columna específica. Para cada estación se hace una selección de los datos que son representativos para cada uno de los contaminantes. Puesto que pueden presentarse situaciones como la calibración de los instrumentos de medición que originan datos extremos, aquellos que se encuentren por fuera del rango son descartados. En la Tabla 13 se muestran los valores de depuración para cada estación y contaminante.

Para cada contaminante se debe seleccionar, o bien la concentración máxima del día o la concentración promedio del día; en la Tabla 14 se relaciona para cada contaminante cuál es el valor representativo diario y en la Figura 8 se muestra la sección de la macro en la que se crean los comandos para escoger los datos convenientes.

Figura 6. Datos llevados a la hoja de cálculo.

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I |
|----|------------|------|------|------|------|-------|------|------|--------|
| 1 | Date | Hour | NO2 | NOX | NO | SO2 | CO | O3 | PM10 |
| 2 | 01/01/2003 | 0 | 27 | 42 | 15 | 16.33 | 1.94 | 5 | 111.23 |
| 3 | 01/01/2003 | 1 | 13 | 18 | 4 | 9.74 | 1.02 | 16 | 225.66 |
| 4 | 01/01/2003 | 2 | 19 | 30 | 11 | 9.64 | 1.54 | 8 | 74.96 |
| 5 | 01/01/2003 | 3 | 20 | 37 | 17 | 9.39 | 1.72 | 3 | 115.40 |
| 6 | 01/01/2003 | 4 | 21 | 36 | 15 | 8.68 | 1.69 | 2 | 129.58 |
| 7 | 01/01/2003 | 5 | 21 | 41 | 20 | 8.23 | 1.81 | 3 | 107.07 |
| 8 | 01/01/2003 | 6 | 18 | 39 | 21 | 7.99 | 1.68 | 3 | 110.74 |
| 9 | 01/01/2003 | 7 | 22 | 42 | 20 | 7.63 | 1.66 | 11 | 124.81 |
| 10 | 01/01/2003 | 8 | 8 | 13 | 5 | 6.40 | .62 | 25 | 117.45 |
| 11 | 01/01/2003 | 9 | 6 | 10 | 4 | 7.10 | .42 | 31 | 75.63 |
| 12 | 01/01/2003 | 10 | 6 | 12 | 5 | 7.37 | .44 | 31 | 72.94 |
| 13 | 01/01/2003 | 11 | 4 | 8 | 4 | 7.86 | .33 | 30 | 56.24 |
| 14 | 01/01/2003 | 12 | 4 | 8 | 5 | 8.92 | .36 | 27 | 56.47 |
| 15 | 01/01/2003 | 13 | 3 | 7 | 4 | 9.07 | .32 | 27 | 74.68 |
| 16 | 01/01/2003 | 14 | 4 | 9 | 4 | 9.28 | .32 | 29 | 66.27 |
| 17 | 01/01/2003 | 15 | 5 | 10 | 5 | 8.61 | .41 | 31 | 64.18 |
| 18 | 01/01/2003 | 16 | 5 | 10 | 5 | 7.71 | .38 | 31 | 56.02 |
| 19 | 01/01/2003 | 17 | 8 | 13 | 5 | 7.92 | .52 | 28 | 53.93 |
| 20 | 01/01/2003 | 18 | 15 | 22 | 7 | 6.88 | .93 | 21 | 58.25 |
| 21 | 01/01/2003 | 19 | 14 | 20 | 6 | 6.62 | .79 | 22 | 79.68 |
| 22 | 01/01/2003 | 20 | 15 | 26 | 10 | 7.78 | .96 | 20 | 78.38 |
| 23 | 01/01/2003 | 21 | 12 | 18 | 5 | 5.39 | .82 | 20 | 74.13 |
| 24 | 01/01/2003 | 22 | 20 | 21 | 2 | 4.65 | 1.04 | -999 | 77.74 |
| 25 | 01/01/2003 | 23 | -999 | -999 | -999 | -999 | -999 | 16 | 89.66 |

Fuente: Autores

Figura 7. Sección de la macro en que se caracterizan los datos

```

Sub CAMBIO()
    Dim texto As Double
    Dim j As Integer
    Dim i As Integer
    For j = 2 To 745
        For i = 67 To 68
            c = Chr(i)
            texto = Val(Range(c & j).Value)
            Range(c & j).Value = texto
        Next i
    Next j
End Sub
    
```

Fuente: Autores

Después de tener el valor representativo del día se procede a calcular el índice de calidad del aire según las diferentes normas ambientales.

Tabla 13. Valores límites para depuración de información de la red de monitoreo de la CDMB.

| Estación | NO ₂ | O ₃ | CO | SO ₂ | PM ₁₀ |
|-----------|-----------------|----------------|-----|-----------------|------------------|
| Centro | >200 | >150 | >10 | >50 | >300 |
| Chimitá | >150 | >100 | >10 | >40 | >300 |
| Ciudadela | - | >150 | >10 | - | - |
| Florida | - | - | >10 | - | >300 |

Fuente: Autores

Tabla 14. Valor representativo diario de cada contaminante.

| Contaminante | Valor representativo diario |
|------------------|--------------------------------|
| NO ₂ | Concentración máxima del día |
| O ₃ | Concentración máxima del día |
| CO | Concentración máxima del día |
| SO ₂ | Concentración promedio del día |
| PM ₁₀ | Concentración promedio del día |

Fuente: Autores

Figura 8. Creación de comandos para seleccionar los datos representativos para concentraciones máximas diarias.

```

Macro01-03.xls - [Módulo1 (Código)]
Inicio  Formato  Depuración  Ejecutar  Herramientas  Complementos  Ventana  Ayuda
Lín 512, Col 3
(ibucano2)

For i = 2 To limite Step 24
    maximo = 0
    For j = i To i + 23
        valor = Range("c" & j).Value
        If valor >= 0 And valor < 200 Then
            If valor > maximo Then
                maximo = valor
            End If
        End If
    Next j
Next i
    
```

Fuente: Autores

Figura 9. Creación de comandos para seleccionar los datos representativos para concentraciones promedio diarias.

```

Macro 01-03.xls - [Módulo1 (Código)]
Formato  Depuración  Ejecutar  Herramientas  Complementos  Ventana  Ayuda
Lín 696, Col 40
ibucapm10

For i = 2 To limite Step 24
    promedio = 0
    contador = 0
    suma = 0
    For j = i To i + 23
        valor = Range("i" & j).Value
        If valor > 0 And valor < 300 Then
            suma = suma + valor
            contador = contador + 1
            promedio = suma / contador
        End If
    Next j

```

Fuente: Autores

- Para calcular el IMECA se toma como base la siguiente tabla:

Tabla 15. Determinación de IMECA para cada contaminante.

| Contaminante | Intervalo | Ecuación |
|------------------|-----------------|---|
| O ₃ | 0.0 – 0.11 ppm | $I_{O_3} = 909.090909 * C_{O_3}$ |
| | 0.11 – 0.60 ppm | $I_{O_3} = 816.326630 * C_{O_3} + 1020409$ |
| NO ₂ | 0.0 – 0.21 ppm | $I_{NO_2} = 476.190476 * C_{NO_2}$ |
| | 0.21 – 2.00 ppm | $I_{NO_2} = 223.463387 * C_{NO_2} + 53.07264$ |
| SO ₂ | 0.0 – 0.13 ppm | $I_{SO_2} = 769.230769 * C_{SO_2}$ |
| | 0.13 – 1.00 ppm | $I_{SO_2} = 459.770114 * C_{SO_2} + 40.22989$ |
| CO | 0.0 – 11.0 ppm | $I_{CO} = 9.090909 * C_{CO}$ |
| | 11.0 – 50.0 ppm | $I_{CO} = 10.256410 * C_{CO} + 12820512$ |
| PM ₁₀ | 0 – 50 ppm | $I_{PM_{10}} = C_{PM_{10}}$ |
| | 51 – 350 ppm | $I_{PM_{10}} = (1/2) * C_{PM_{10}} + 2.5$ |
| | 351 – 420 ppm | $I_{PM_{10}} = (10/7) * C_{PM_{10}} - 300$ |
| | 421 – 500 ppm | $I_{PM_{10}} = (10/8) * C_{PM_{10}} - 225$ |
| | 501 – 600 ppm | $I_{PM_{10}} = C_{PM_{10}} - 100$ |

Fuente: Sistema de Información Ambiental, Ciudad de México. 2002.

Después de tener el valor numérico, se hace uso de la Tabla 6 para calificar el índice.

- Para el cálculo del AQI, se usó interpolación lineal de acuerdo con la ecuación desarrollada por la EPA:

$$I_p = \frac{I_{Hi} - I_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}} (C_p - BP_{Lo}) + I_{Lo}$$

en la cual:

- I_p = Índice de calidad para el contaminante
- C_p = Concentración promedio del contaminante
- BP_{Hi} = Valor límite mayor o igual a C_p (Tabla 18)
- BP_{Lo} = Valor límite menor o igual a C_p (Tabla 18)
- I_{Hi} = Valor del AQI correspondiente a BP_{Hi}
- I_{Lo} = Valor del AQI correspondiente a BP_{Lo}

Y haciendo uso de la siguiente tabla:

Tabla 16. Valores límite para el cálculo del AQI

| <i>BP</i> | | | | | <i>I</i> | <i>Category</i> |
|---------------------|-------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|------------|--------------------------------------|
| O3 (ppm) | PM10 (ug/m3) | CO (ppm) | SO2 (ppm) | NO2 (ppm) | AQI | |
| 0.000-0.064 | 0-54 | 0.0-4.4 | 0.000-0.034 | - | 0-50 | Good |
| 0.065-0.084 | 55-154 | 4.5-9.4 | 0.035-0.144 | - | 51-100 | Moderate |
| 0.085-0.104 | 155-254 | 9.5-12.4 | 0.145-0.224 | - | 101-150 | Unhealthy for sensitive groups |
| 0.105-0.124 | 255-354 | 12.5-15.4 | 0.225-0.304 | | 151-200 | Unhealthy |
| 0.125-0.374 | 355-424 | 15.5-30.4 | 0.305-0.604 | 0.65-1.24 | 201-300 | Very unhealthy |
| - | 425-504 | 30.5-40.4 | 0.605-0.804 | 1.25-1.64 | 301-400 | Hazardous |
| - | 505-604 | 40.5-50.4 | 0.805-1.004 | 1.65-2.04 | 401-500 | Hazardous |

Fuente: EPA, 1999.

- Para el cálculo del Índice de calidad del aire de Chile (llamado en este estudio ICHICA) se empleó la siguiente tabla y una función lineal para interpolar dentro de los rangos.

Tabla 17. Índices ICA e ICAP, Chile

| ÍNDICE | CO (ppm) | SO ₂ (ug/m3) | NO ₂ (ug/m3) | O ₃ (ug/m3) | PM ₁₀ (ug/m3) |
|--------|-------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 100 | 9 | 365 | 470 | 160 | 150 |
| 200 | 19 | 929 | 1290 | 470 | 195 |
| 300 | 30 | 1493 | 2110 | 780 | 240 |
| 400 | 40 | 2056 | 2930 | 1090 | 285 |
| 500 | 50 | 2620 | 3750 | 1400 | 330 |

Fuente: "Fuentes fijas. Normativa ambiental en Chile" (1995-1996)

A continuación del cálculo numérico del índice se califica el mismo, de acuerdo con la siguiente tabla:

Tabla 18: Calificación del Índice de calidad del aire de Chile.

| Índice | Calificación |
|---------|--------------|
| 0-100 | Bueno |
| 101-200 | Regular |
| 201-300 | Malo |
| 301-400 | Critico |
| 401-500 | Peligroso |

Fuente: Resolución 369 de 1988. Ministerio de Salud, Subsecretaría de Salud. Chile.

- Para calcular el IBUCA se usó la expresión:

$$IBUCA(\text{Compuesto } i) = \frac{(\text{Valor representativo de } i)}{\text{Norma de emisión}} \times 10$$

Los correspondientes valores máximos permisibles de acuerdo con la norma de emisión de contaminantes vigente para Colombia, el Decreto 002 de 1982, son:

Tabla 19. Valores límite de cada contaminante para el cálculo del IBUCA.

| CONTAMINANTE | VALOR LÍMITE |
|------------------|-----------------------|
| NO ₂ | 114 ppb |
| O ₃ | 77 ppb |
| CO | 31 ppm |
| SO ₂ | 136 ppb |
| PM ₁₀ | 134 µg/m ³ |

Fuente: Autores.

Para evaluar la calidad del aire con el IBUCA se emplea la Tabla 4, con la cual se clasifica el índice en cinco rangos cuyos valores varían de 1 a 10 y para los cuales se asigna su respectiva calificación.

- Para calcular el ICA se propone utilizar polinomios de diferente orden, calculados por interpolación no lineal con base en la siguiente tabla:

Tabla 20. Valores límite por contaminante para el cálculo del ICA

| ICA | P _{M10} (ug/m ³) | SO ₂ (ug/m ³) | CO (ppm) | O ₃ (ug/m ³) | NO ₂ (ug/m ³) |
|-----|--|---|-------------|--|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 50 | 50 | 80 | 4.5 | 118 | |
| 100 | 150 | 365 | 13 | 235 | |
| 200 | 350 | 800 | 15 | 400 | 1130 |
| 300 | 420 | 1600 | 30 | 800 | 2260 |
| 400 | 500 | 2100 | 40 | 1000 | 3000 |
| 500 | 600 | 2620 | 50 | 1200 | 3750 |

Fuente: EPA, 1999

Los polinomios obtenidos son:

- Dióxido de nitrógeno

$$ICA(NO_2) = (-0.0000000099809 * \text{concentración}^3 + 0.000088719 * \text{concentración}^2 - 0.1231 * \text{concentración} + 240.1625)$$

- Dióxido de azufre

$$ICA(SO_2) = (-5.663E-17 * \text{concentración}^6 + 3.0447E-12 * \text{concentración}^5 - 0.0000000072509 * \text{concentración}^4 + 0.0000075685 * \text{concentración}^3 - 0.0035539 * \text{concentración}^2 + 0.8644 * \text{concentración} + 3.0636)$$

- Óxido de Carbono

Para este compuesto se debió segmentar la función y calcular para cada sección su correspondiente polinomio, obteniendo tres funciones, así:

1. Para concentraciones de 0 hasta 13

$$ICA(CO) = -0.4022 * \text{concentración}^2 + 12.921 * \text{concentración} + 0,00000000000004$$

2. Para concentraciones de 13 hasta 15

$$ICA(CO) = 50 * \text{concentración} - 550$$

3. Para concentraciones de 15 hasta 50

$$ICA(CO) = 0.0818 * \text{concentración}^2 + 3.3374 * \text{concentración} + 130.57$$

- Ozono

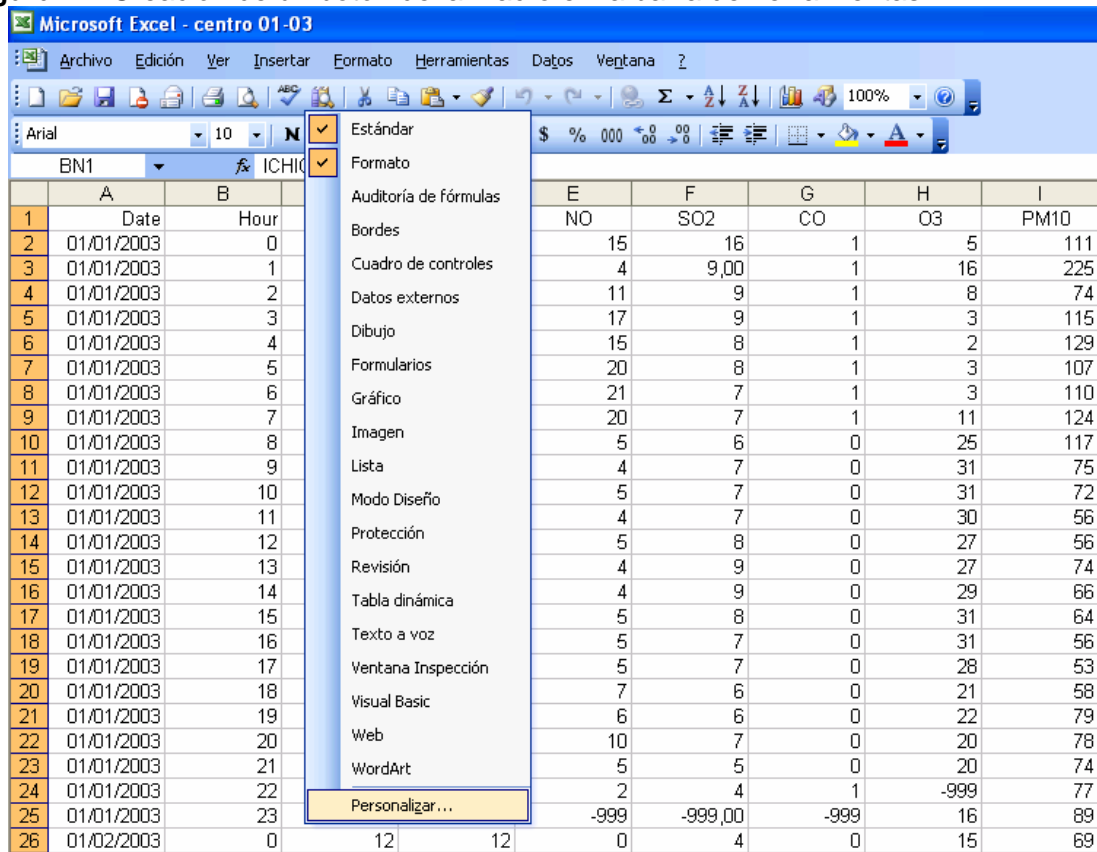
$$ICA(O_3) = -1.0906E-14 * \text{concentración}^6 + 0.00000000035746 * \text{concentración}^5 - 0.000000041872 * \text{concentración}^4 + 0.000020849 * \text{concentración}^3 - 0.0040957 * \text{concentración}^2 + 0.6788 * \text{concentración} - 0.00020135$$

2.1.3 Ejecución de la macro. A continuación se citarán, en detalle, los pasos que se deben seguir para ejecutar correctamente la macro.

Antes de comenzar, se debe asignar la macro a un botón en la barra de herramientas, para esto se realiza el siguiente procedimiento:

1. Oprimir clic derecho sobre la barra de herramientas
2. Escoger la opción “Personalizar” (Figura 11)

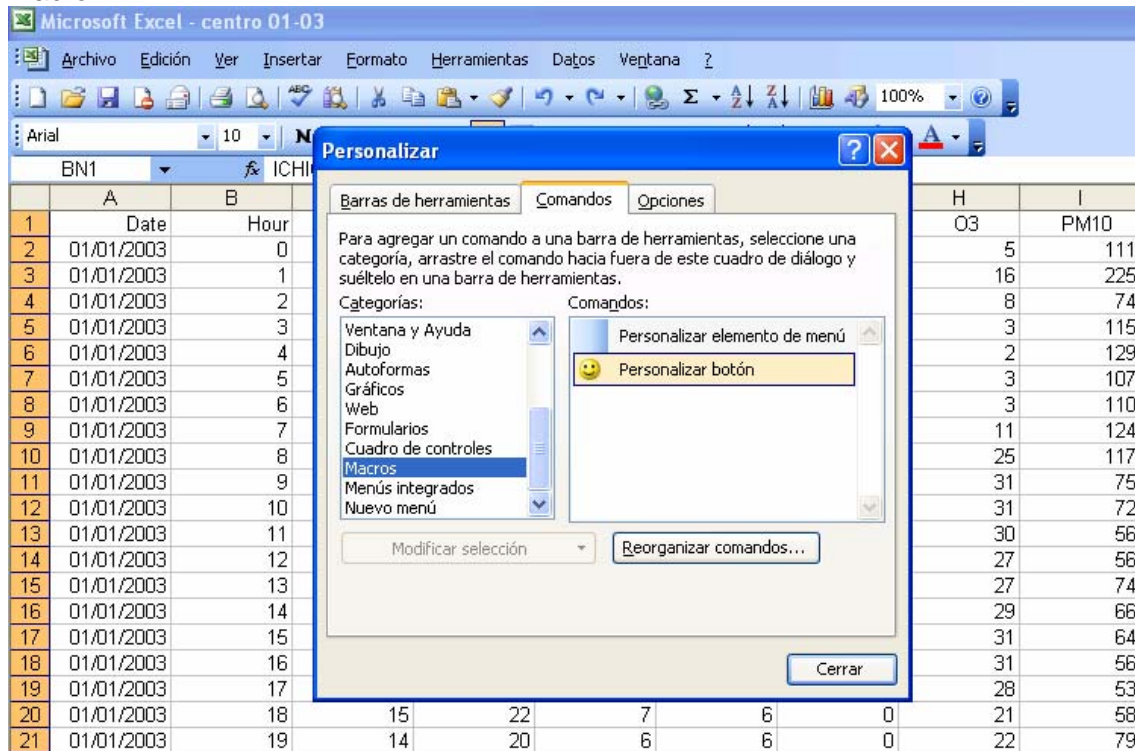
Figura 11. Creación de un botón de la macro en la barra de herramientas



Fuente: Autores

3. En la pestaña “Comandos” se busca la categoría “Macros”
4. Tomar el botón de la carita feliz que aparece y arrastrarlo hasta la barra de herramientas

Figura 12. Procedimiento inicial para la creación de un comando personalizado de la macro

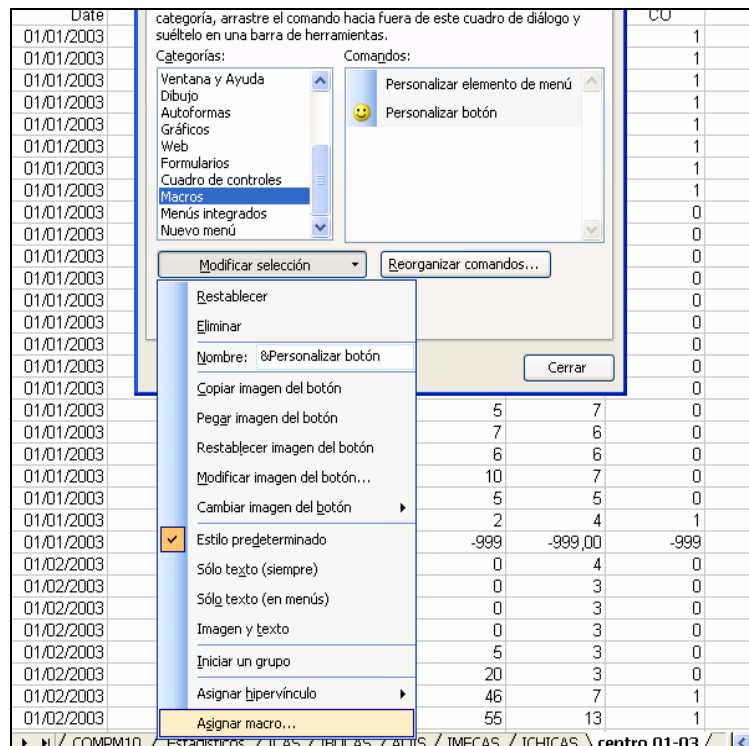


Fuente: Autores

5. Luego ir a la opción "Modificar selección" y haciendo clic sobre ella escoger "asignar macro..." y en todo el listado que aparece se selecciona la macro de nombre "total"
6. El proceso concluye en este punto. Si se desea, es posible personalizar el botón dándole un nombre y escogiendo un icono particular, para esto se regresa a la opción "Modificar selección" y se realiza la siguiente secuencia:
 - Clic en la opción "Imagen y texto"
 - Asignarle el nombre deseado en la opción Nombre
 - Y en la opción "Cambiar imagen del botón" dar clic y seleccionar la imagen deseada.

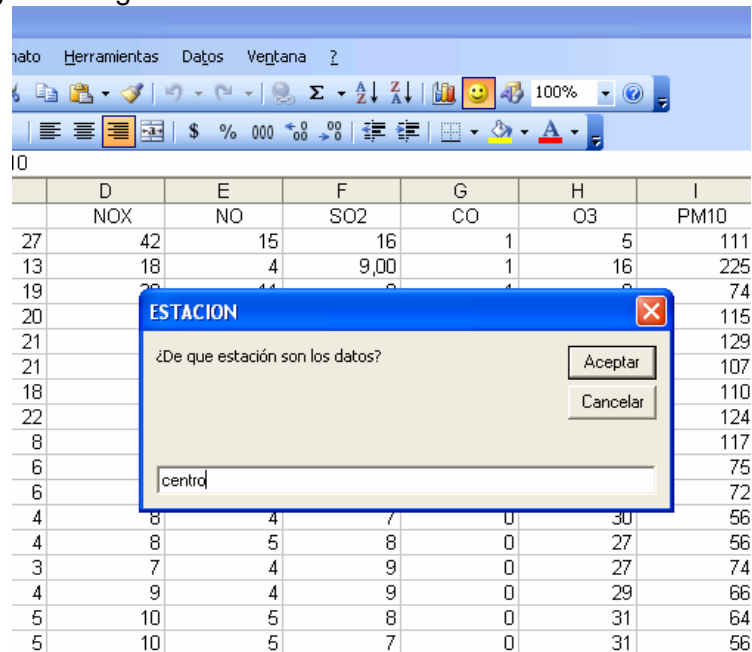
Luego de tener el botón con la macro ya asignada se procede a abrir el archivo que contiene los datos de concentraciones de los contaminantes por mes; a continuación se inserta una nueva hoja de cálculo en el mismo libro y se le asigna un nombre. Después, se hace clic en el botón creado anteriormente y se indica cuántos días tiene el mes que se está procesando y a qué estación pertenecen los datos; el nombre de la estación debe ir en minúscula.

Figura 13. Procedimiento para la creación de un botón personalizado para ejecutar la macro



Fuente: Autores

Figura 14. Imagen del ingreso de datos a la macro



Fuente: Autores

Esto es suficiente para que la macro genere los índices de calidad del aire, de acuerdo con la estación y también las medidas estadísticas, que aparecerán en la hoja nueva que se creó.

Figura 15. Índices de calidad del aire generados por la macro.

| | AB | AC | AD | AE | AF | AG | AH | AI | AJ | AK |
|----|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|-------------|-----------|
| 1 | IBUCAN02 | Categoria | IBUCA03 | Categoria | IBUCACO | Categoria | IBUCASO2 | Categoria | IBUCAPM10 | Categoria |
| 2 | 2,36842105 | moderado | 4,02597403 | regular | 0,32258065 | buena | 0,56265985 | buena | 6,851119403 | regular |
| 3 | 3,68421053 | regular | 3,76623377 | regular | 0,64516129 | buena | 0,6297954 | buena | 5,814676617 | regular |
| 4 | 3,42105263 | regular | 3,50649351 | regular | 0,64516129 | buena | 0,48202614 | buena | 5,724502488 | regular |
| 5 | 3,07017544 | regular | 4,28571429 | regular | 0,64516129 | buena | 0 | buena | 5,951492537 | regular |
| 6 | 2,71929825 | regular | 4,80519481 | regular | 0,32258065 | buena | 0 | buena | 5,615671642 | regular |
| 7 | 2,10526316 | moderado | 4,54545455 | regular | 0,32258065 | buena | 0 | buena | 4,928482587 | regular |
| 8 | 3,50877193 | regular | 4,54545455 | regular | 0,64516129 | buena | 0,55995475 | buena | 5,914179104 | regular |
| 9 | 3,24561404 | regular | 4,54545455 | regular | 0,32258065 | buena | 0,42199488 | buena | 5,600124378 | regular |
| 10 | 3,59649123 | regular | 3,24675325 | regular | 0,64516129 | buena | 0,52244582 | buena | 6,380597015 | regular |
| 11 | 4,29824561 | regular | 4,41558442 | regular | 0,64516129 | buena | 0,60741888 | buena | 7,394278607 | regular |
| 12 | 3,33333333 | regular | 5,84415584 | regular | 0,64516129 | buena | 0,53069054 | buena | 7,223258706 | regular |
| 13 | 2,36842105 | moderado | 5,06493506 | regular | 0,32258065 | buena | 0,29411765 | buena | 6,504975124 | regular |
| 14 | 3,68421053 | regular | 5,06493506 | regular | 0,64516129 | buena | 0,55555556 | buena | 7,192164179 | regular |
| 15 | 4,03508772 | regular | 17,7922078 | peligrosa | 0,64516129 | buena | 0,51120448 | buena | 7,260572139 | regular |
| 16 | 3,59649123 | regular | 4,80519481 | regular | 0,32258065 | buena | 0,48161765 | buena | 5,939054726 | regular |
| 17 | 4,12280702 | regular | 3,50649351 | regular | 0,64516129 | buena | 0,4578877 | buena | 6,097636816 | regular |
| 18 | 4,38596491 | regular | 4,80519481 | regular | 0,96774194 | buena | 0,48713235 | buena | 6,539179104 | regular |
| 19 | 3,15789474 | regular | 3,50649351 | regular | 0,32258065 | buena | 0,36764706 | buena | 6,119402985 | regular |
| 20 | 1,92982456 | moderado | 4,67532468 | regular | 0 | buena | 0,29844291 | buena | 5,230099502 | regular |
| 21 | 4,12280702 | regular | 3,76623377 | regular | 0,32258065 | buena | 0,4876161 | buena | 5,842661692 | regular |
| 22 | 4,8245614 | regular | 6,36363636 | regular | 0,64516129 | buena | 0,58823529 | buena | 6,187810945 | regular |
| 23 | 4,73684211 | regular | 4,93506494 | regular | 0,64516129 | buena | 0,43797954 | buena | 6,072761194 | regular |
| 24 | 4,73684211 | regular | 5,06493506 | regular | 0,64516129 | buena | 0,5379257 | buena | 5,864427861 | regular |

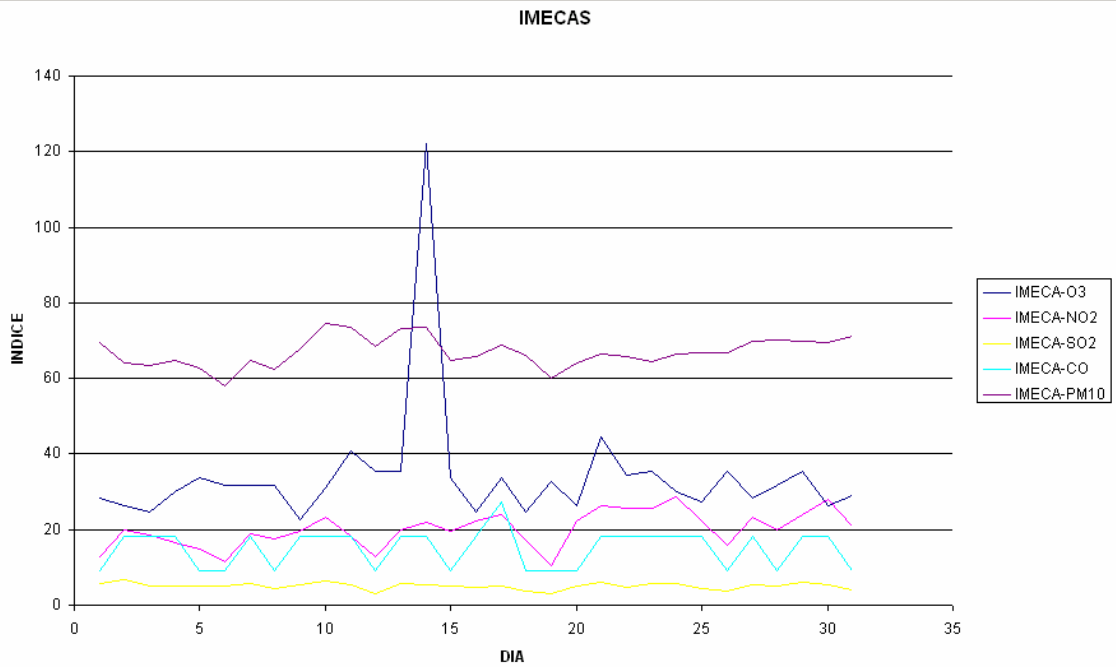
Fuente: Autores

Figura 16. Resultados estadísticos generados por la macro

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N |
|----|------------|------------|---|------------|------------|---|------------|------------|---|------------|------------|---|------------|------------|
| 1 | ICANO2 | | | IBUCANO2 | | | AQINO2 | | | IMECANO2 | | | ICHICANO2 | |
| 2 | Maximo | 0 | | Maximo | 5,26315789 | | Maximo | 0 | | Maximo | 28,5714282 | | Maximo | 12,7659574 |
| 3 | Minimo | 0 | | Minimo | 1,92982456 | | Minimo | 0 | | Minimo | 10,4761903 | | Minimo | 4,68085106 |
| 4 | Media | 0 | | Media | 3,69590643 | | Media | 0 | | Media | 20,0634918 | | Media | 8,96453901 |
| 5 | Desviacion | 0 | | Desviacion | 1,4900695 | | Desviacion | 0 | | Desviacion | 4,58309794 | | Desviacion | 2,58319643 |
| 6 | Coficiente | 0 | | Coficiente | 40,3167538 | | Coficiente | 0 | | Coficiente | 22,8429726 | | Coficiente | 28,8157196 |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | ICASO2 | | | IBUCASO2 | | | AQISO2 | | | IMECASO2 | | | ICHICASO2 | |
| 9 | Maximo | 10,2113663 | | Maximo | 0,6297954 | | Maximo | 12,5959079 | | Maximo | 6,58862876 | | Maximo | 2,3466349 |
| 10 | Minimo | 5,51955416 | | Minimo | 0,29411765 | | Minimo | 5,88235294 | | Minimo | 3,07692308 | | Minimo | 1,09589041 |
| 11 | Media | 7,43489928 | | Media | 0,43961657 | | Media | 9,75638378 | | Media | 5,10333921 | | Media | 1,6380234 |
| 12 | Desviacion | 2,69193674 | | Desviacion | 0,48358158 | | Desviacion | 2,49025131 | | Desviacion | 1,70695595 | | Desviacion | 1,00696205 |
| 13 | Coficiente | 36,2067682 | | Coficiente | 110,000761 | | Coficiente | 25,5243271 | | Coficiente | 33,4478247 | | Coficiente | 61,4742163 |
| 14 | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | ICACO | | | IBUCACO | | | AQICO | | | IMECACO | | | ICHICACO | |
| 16 | Maximo | 11,1540725 | | Maximo | 0,96774194 | | Maximo | 34,0909091 | | Maximo | 27,272727 | | Maximo | 33,3333333 |
| 17 | Minimo | 2,13255208 | | Minimo | 0,32258065 | | Minimo | 11,3636364 | | Minimo | 9,090909 | | Minimo | 11,1111111 |
| 18 | Media | 6,66946159 | | Media | 0,52688172 | | Media | 18,9393939 | | Media | 15,151515 | | Media | 18,5185185 |
| 19 | Desviacion | 2,5269519 | | Desviacion | 0,53147004 | | Desviacion | 5,3030303 | | Desviacion | 4,41738776 | | Desviacion | 5,20498864 |
| 20 | Coficiente | 37,8883942 | | Coficiente | 100,870844 | | Coficiente | 28 | | Coficiente | 29,1547595 | | Coficiente | 28,1069386 |
| 21 | | | | | | | | | | | | | | |
| 22 | ICA03 | | | IBUCA03 | | | AQI03 | | | IMECA03 | | | ICHICA03 | |
| 23 | Maximo | 14,455133 | | Maximo | 17,7922078 | | Maximo | 116,076923 | | Maximo | 122,040838 | | Maximo | 85,625 |
| 24 | Minimo | 7,6482676 | | Minimo | 3,24675325 | | Minimo | 0 | | Minimo | 22,7272727 | | Minimo | 15,625 |
| 25 | Media | 11,616862 | | Media | 4,91774892 | | Media | 3,86923077 | | Media | 34,3407552 | | Media | 23,6666667 |
| 26 | Desviacion | 2,64576474 | | Desviacion | 2,35734062 | | Desviacion | 14,7990994 | | Desviacion | 12,7105591 | | Desviacion | 9,14262947 |
| 27 | Coficiente | 22,7752102 | | Coficiente | 47,9353593 | | Coficiente | 382,481694 | | Coficiente | 37,0130446 | | Coficiente | 38,6308287 |
| 28 | | | | | | | | | | | | | | |
| 29 | ICAPM10 | | | IBUCAPM10 | | | AQIPM10 | | | IMCECAPM10 | | | ICHICAPM10 | |
| 30 | Maximo | 60,5132203 | | Maximo | 7,39427861 | | Maximo | 72,8190236 | | Maximo | 74,5416667 | | Maximo | 66,0555556 |
| 31 | Minimo | 46,6956014 | | Minimo | 4,92848259 | | Minimo | 56,4650673 | | Minimo | 58,0208333 | | Minimo | 44,0277778 |
| 32 | Media | 54,5055892 | | Media | 6,24823798 | | Media | 65,2181117 | | Media | 66,8631944 | | Media | 55,8175926 |
| 33 | Desviacion | 5,68918516 | | Desviacion | 1,81415513 | | Desviacion | 6,32113567 | | Desviacion | 6,39765705 | | Desviacion | 6,42178464 |
| 34 | Coficiente | 14,4000000 | | Coficiente | 10,0000000 | | Coficiente | 10,0000000 | | Coficiente | 10,0000000 | | Coficiente | 10,0000000 |

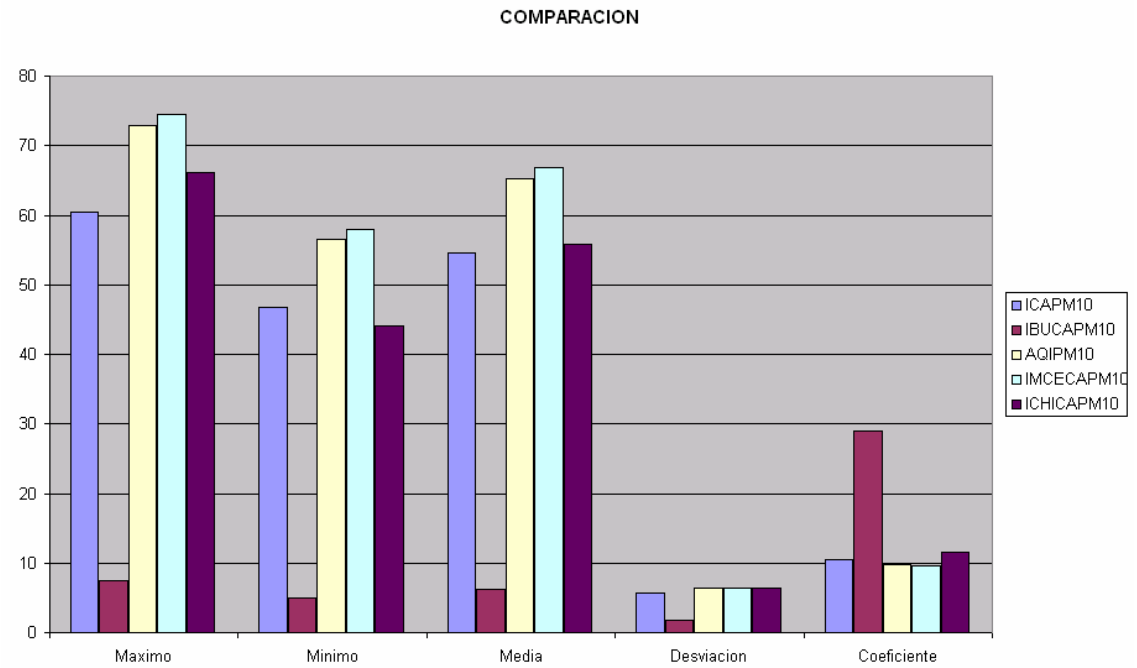
Fuente: Autores

Figura 17. Comportamiento mensual del índice de calidad del aire



Fuente: Autores

Figura 18. Gráfico comparativo de los índices de calidad del aire



Fuente: Autores

3. ÍNDICES DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL PARA LAS DIFERENTES ESTACIONES DE MUESTREO

3.1 ANÁLISIS DE LOS ÍNDICES DE CALIDAD DEL AIRE PARA CADA METODOLOGÍA

Por medio de la macro desarrollada para la evaluación de los diferentes índices de calidad del aire se obtuvieron los datos necesarios para poder comparar las metodologías en estudio en las diferentes estaciones para la información correspondiente al año 2003.

3.1.1 Estación Centro. Por medio de los datos obtenidos de la estación de monitoreo Centro, se midieron los índices para las concentraciones de Oxido de carbono (CO), Dióxido de nitrógeno (NO₂), Dióxido de azufre (SO₂), Ozono (O₃), Material particulado menor a 10 micras (PM₁₀).

De acuerdo con la metodología del AQI, el índice correspondiente al PM₁₀ varía entre los rangos bueno y moderado, manteniéndose especialmente en este último, a pesar de que para el segundo semestre del año en estudio cambia de valores cercanos a 60 a valores aproximados a 45. Para el CO se observa una tendencia hacia el rango que lo califica como bueno. La categorización del NO₂ y del O₃ no es apreciable por medio de la metodología AQI, pues ésta requiere de mayores concentraciones de NO₂ y O₃ en relación con las medidas por los equipos de monitoreo locales.

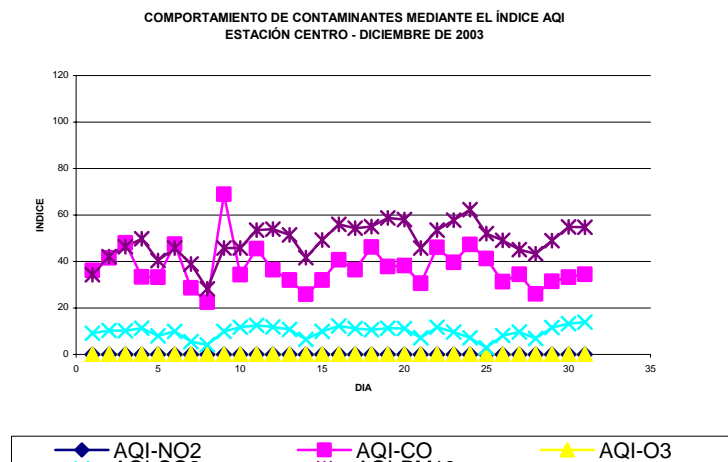
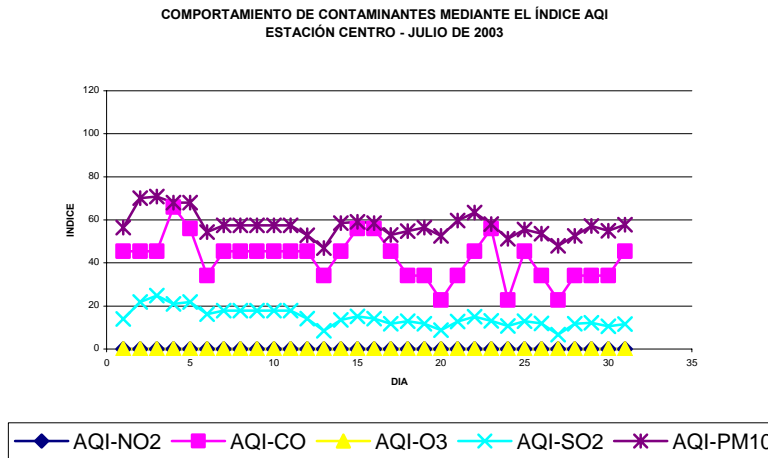
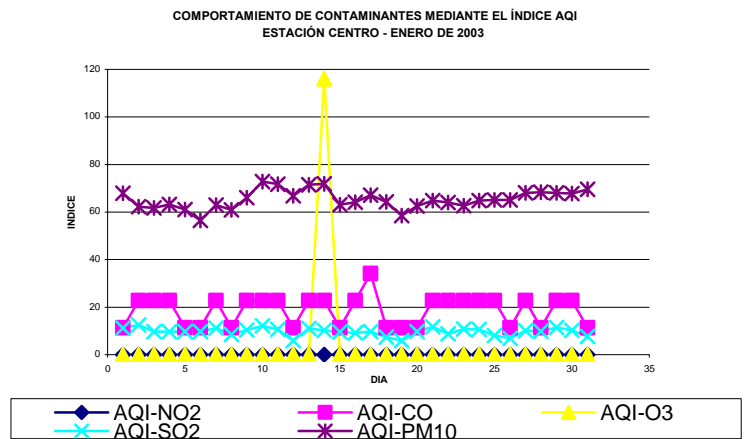
La metodología IMECA muestra de igual manera que el material particulado es el contaminante más fuerte ya que su índice tiende a mantenerse entre 50 y 70; de igual manera el índice del CO muestra que a partir del mes de enero, su concentración aumenta desde un valor cercano a 20 hasta llegar a tener valores alrededor de 30, sin embargo este índice no muestra un aumento tan drástico en su valor como el mostrado por el índice AQI-CO. El SO₂ muestra un comportamiento similar al mostrado por el índice AQI-SO₂ registrando un valor aproximado a 10.

A diferencia de la metodología AQI, la metodología IMECA es más sensible y drástica con los contaminantes NO₂ y O₃. Los índices para ambos contaminantes tienden a mantenerse con valores entre 20 y 30.

Dentro de esta metodología los valores presentados se califican como satisfactorios para todos los contaminantes.

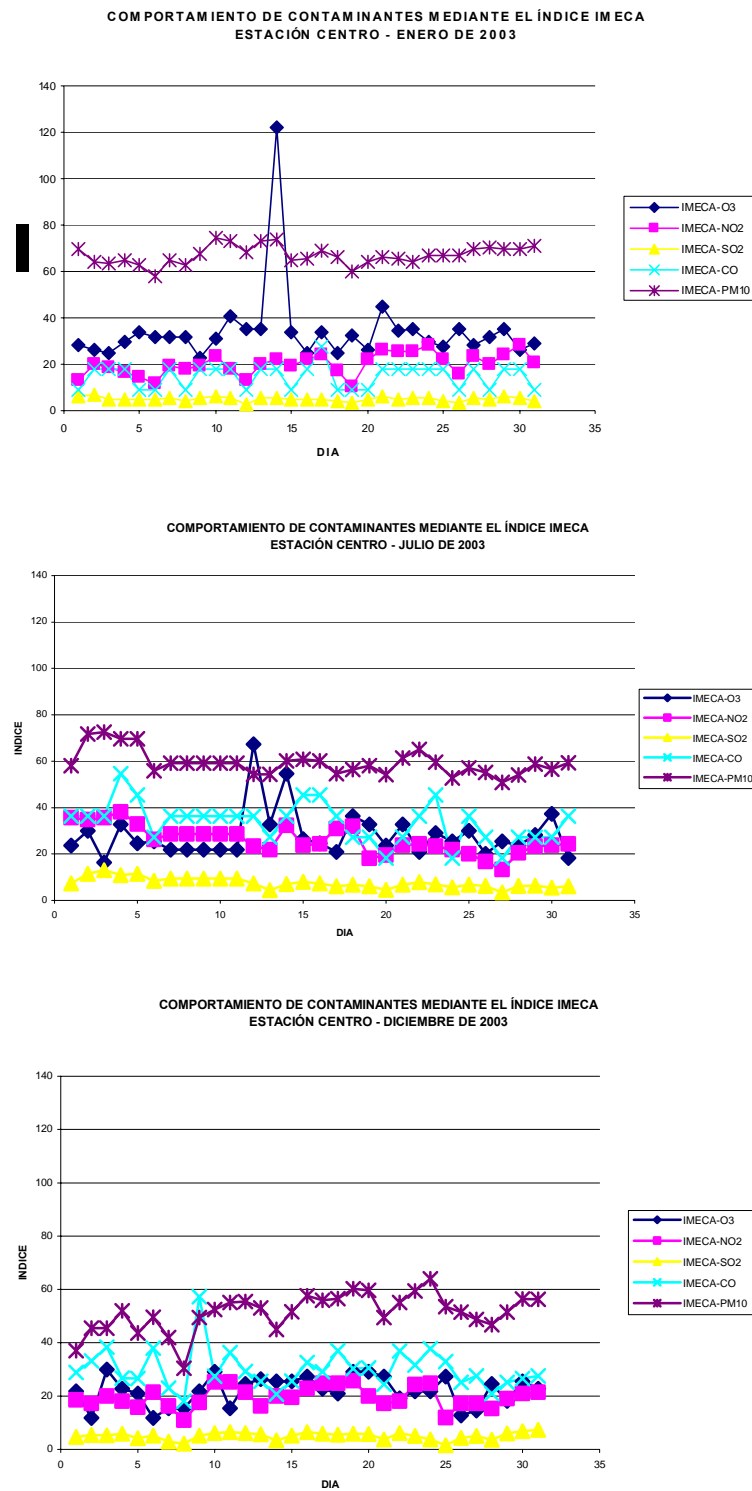
Al comparar las gráficas presentadas para el índice AQI y el IMECA se puede observar que las líneas para el PM₁₀ son muy similares.

Figura 19. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de calidad AQI en la estación centro. Meses de enero, julio y diciembre de 2003.



Fuente: Autores

Figura 20. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de calidad IMECA en la estación centro. Meses de enero, julio y diciembre de 2003.



Fuente: Autores

La metodología ICHICA presenta comportamientos similares a los mostrados por la metodología AQI para el PM₁₀, para CO y para el SO₂. De igual forma presenta un comportamiento similar para el NO₂ y el O₃ al mostrado por la metodología IMECA. Según esta metodología, los valores mostrados por los diferentes contaminantes reciben una calificación Buena.

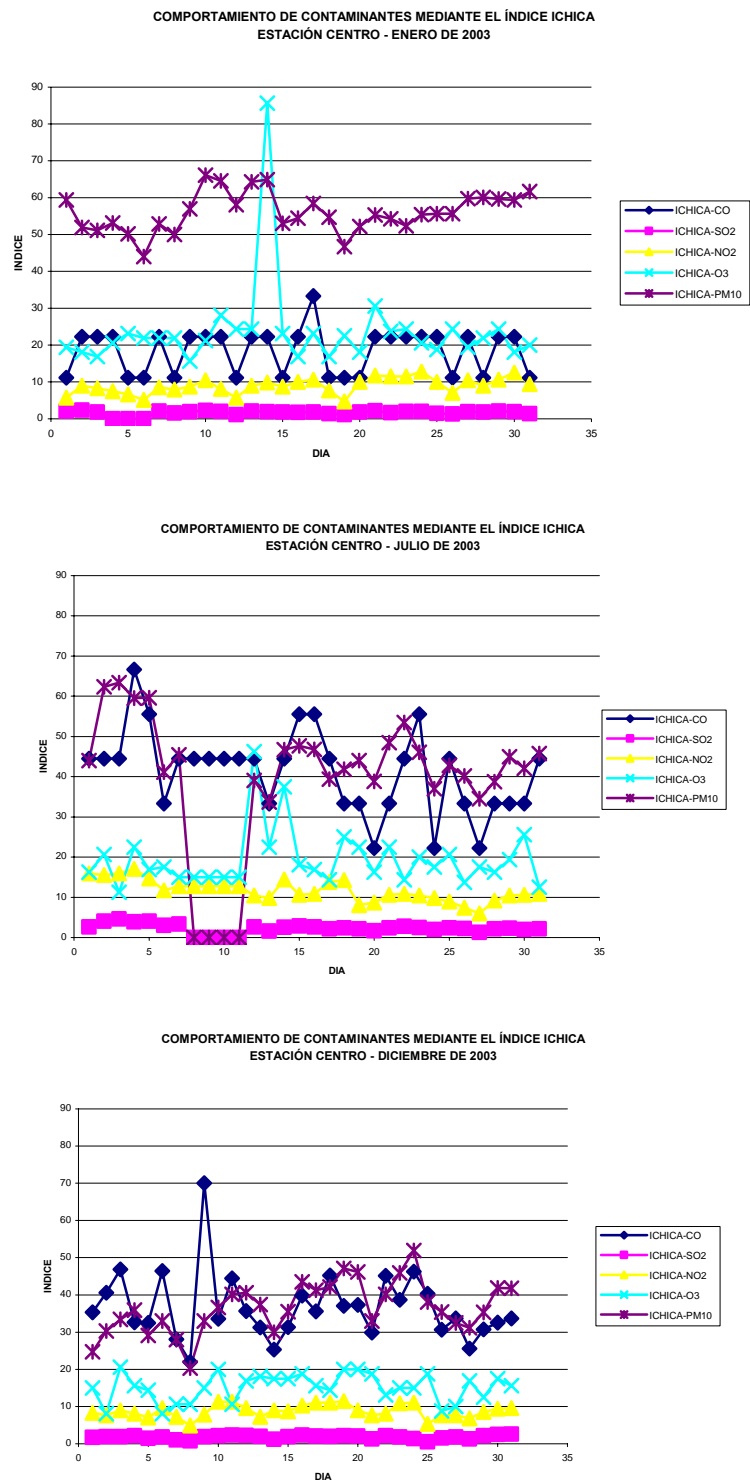
La metodología ICA presenta un comportamiento bastante similar al mostrado por las metodologías AQI e IMECA para el PM₁₀, el NO₂ y el SO₂. En el caso del CO y el O₃ mantiene una calificación baja, con valores menores que los mostrados por el índice IMECA. Esto indica que este método no es tan estricto con el CO y el O₃ como el índice IMECA para el caso del O₃ y como el índice AQI para el CO.

Éste método presenta una calificación entre regular y buena para el PM₁₀ y buena para los demás contaminantes.

Cuando se aplica la metodología IBUCA, se observa que esta metodología respecto a la metodología ICA, se comporta igual para el CO ya que el valor de este índice aumenta con los meses hasta llegar a un punto entre bueno y moderado, alrededor de 1 y 2. Con respecto al SO₂, aunque se acerca a valores de 2, tiende a mantenerse con valores menores a 1, esto le da una calificación de Buena. El índice para el PM₁₀ muestra que es el contaminante más importante, tendiendo a valores entre 4 y 6, recibiendo como calificación Regular, según esta metodología. Cabe también destacar que junto con el material particulado, esta metodología también le da gran importancia a otros contaminantes como son el O₃ y el NO₂ ya que sus índices también son bastante altos, tanto que sus valores son muy similares a los del material particulado, por lo que su calificación es Regular.

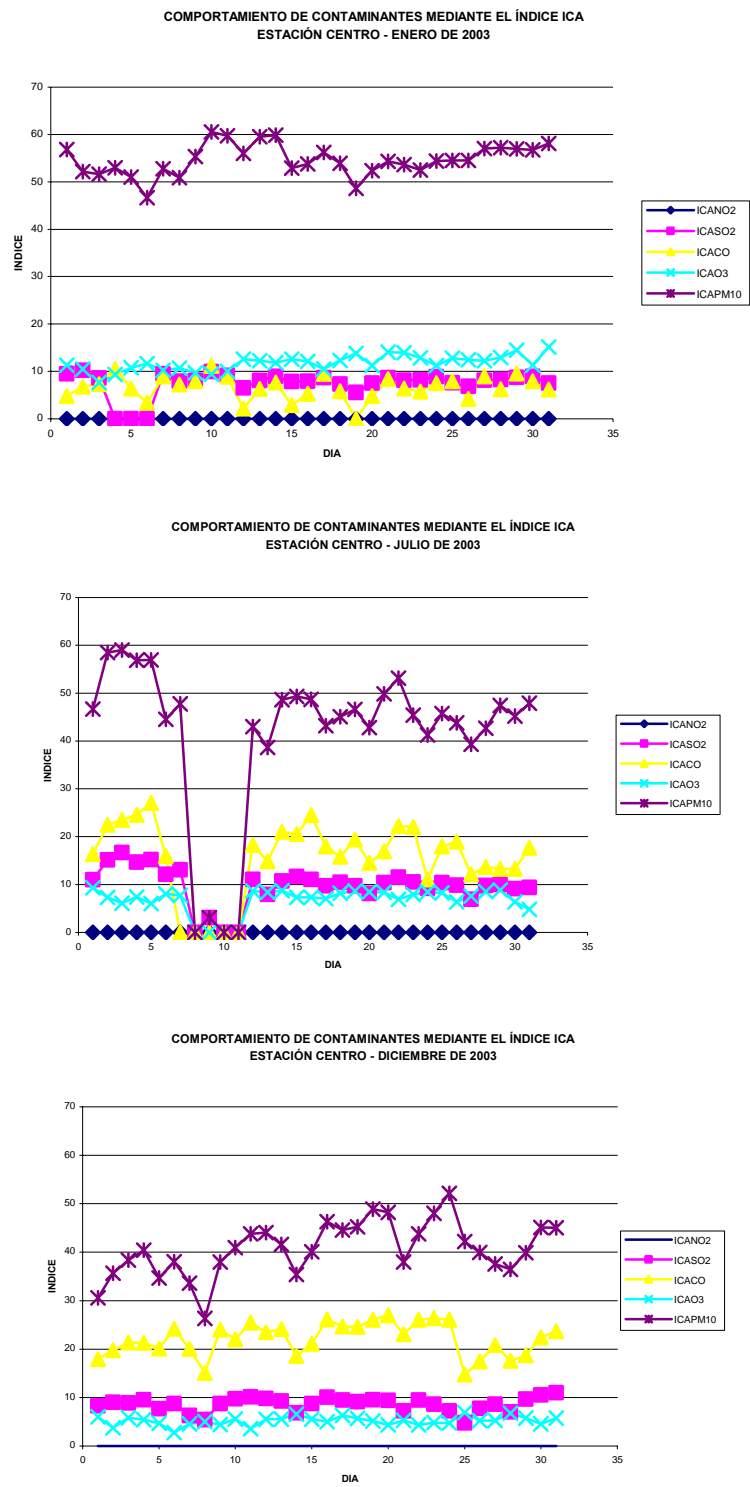
Al comparar las diferentes metodologías aquí estudiadas para los contaminantes evaluados, puede verse que los principales contaminantes presentes alrededor de la estación Centro son, de mayor a menor incidencia, el PM₁₀, el NO₂, el O₃ y el CO; el SO₂ presenta valores bajos.

Figura 21. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de calidad ICHICA en la estación centro. Meses de enero, julio y diciembre de 2003



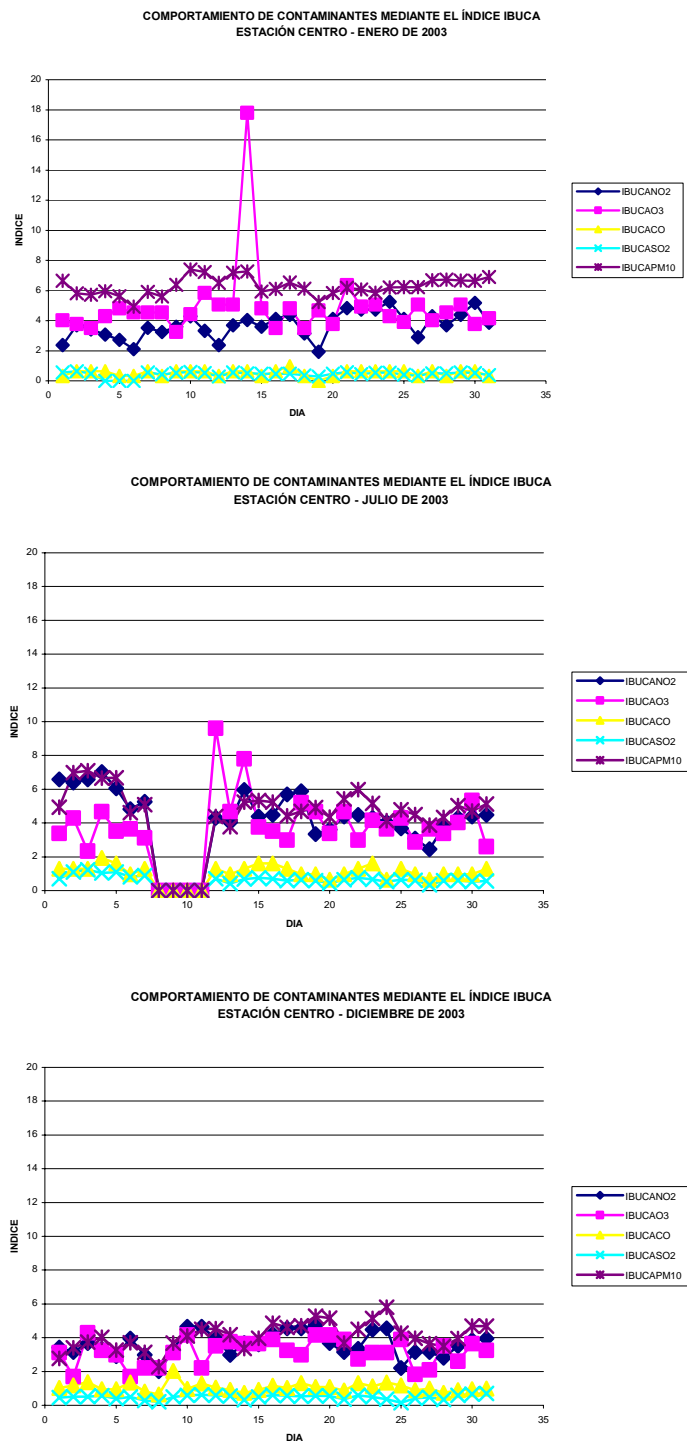
Fuente: Autores

Figura 22. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de calidad ICA en la estación centro. Meses de enero, julio y diciembre de 2003



Fuente: Autores

Figura 23. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de calidad IBUCA en la estación centro. Meses de enero, julio y diciembre de 2003



Fuente: Autores

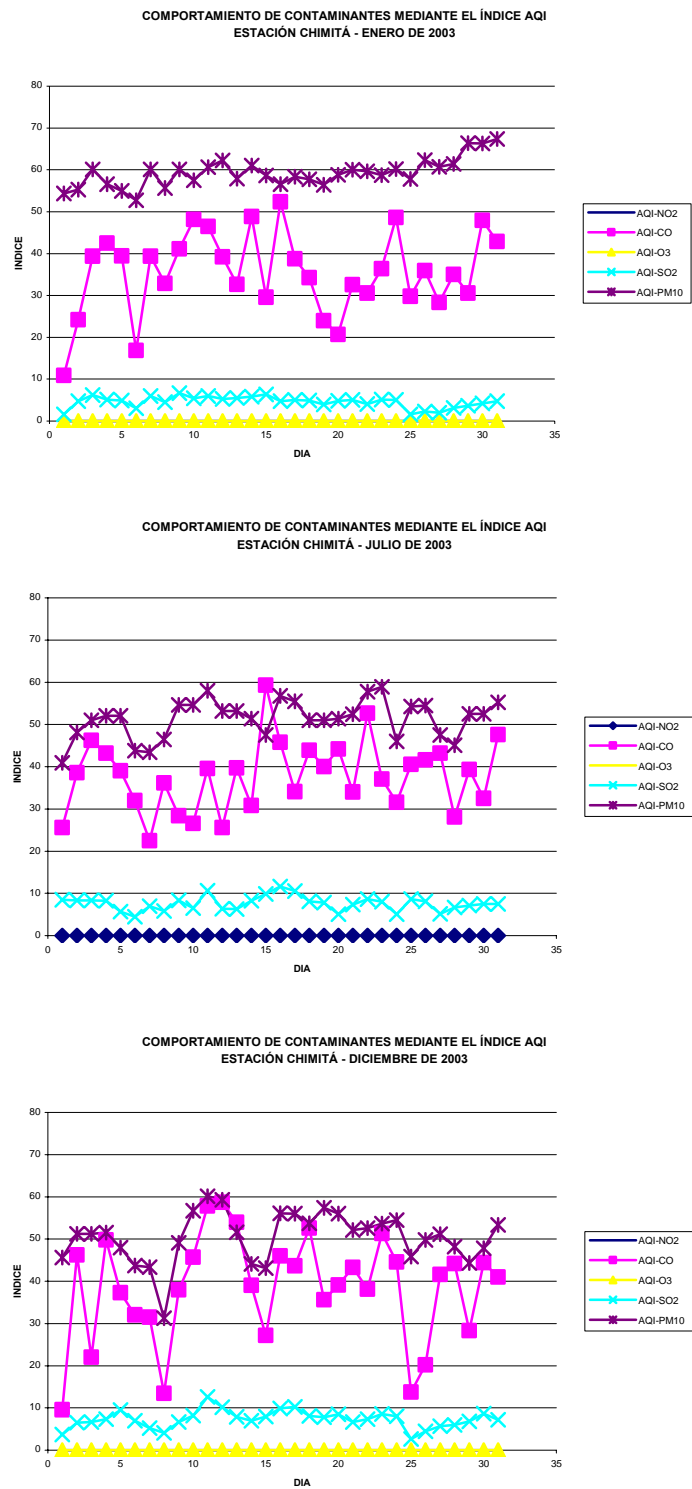
3.1.2 Estación Chimitá. Para esta estación de monitoreo, se midieron de igual forma los índices para las concentraciones de CO, NO₂, SO₂, O₃ y PM₁₀. Los diferentes índices muestran que los principales contaminantes de esta zona son el PM₁₀, el CO y el O₃.

Al igual que en la estación centro, el índice para el contaminante PM₁₀ tiende a mantenerse alrededor de 50 para los índices AQI e IMECA, 40 para los índices ICHICA e ICA y alrededor de 4 para IBUCA. Estos valores permiten calificarlo como Bueno a moderado para el índice AQI, regular para el IBUCA y Bueno para las demás metodologías.

Otro contaminante de gran importancia en esta estación es el CO. Este contaminante, según el índice AQI toma valores de bueno y moderado, pero los valores > 50 son muy escasos.

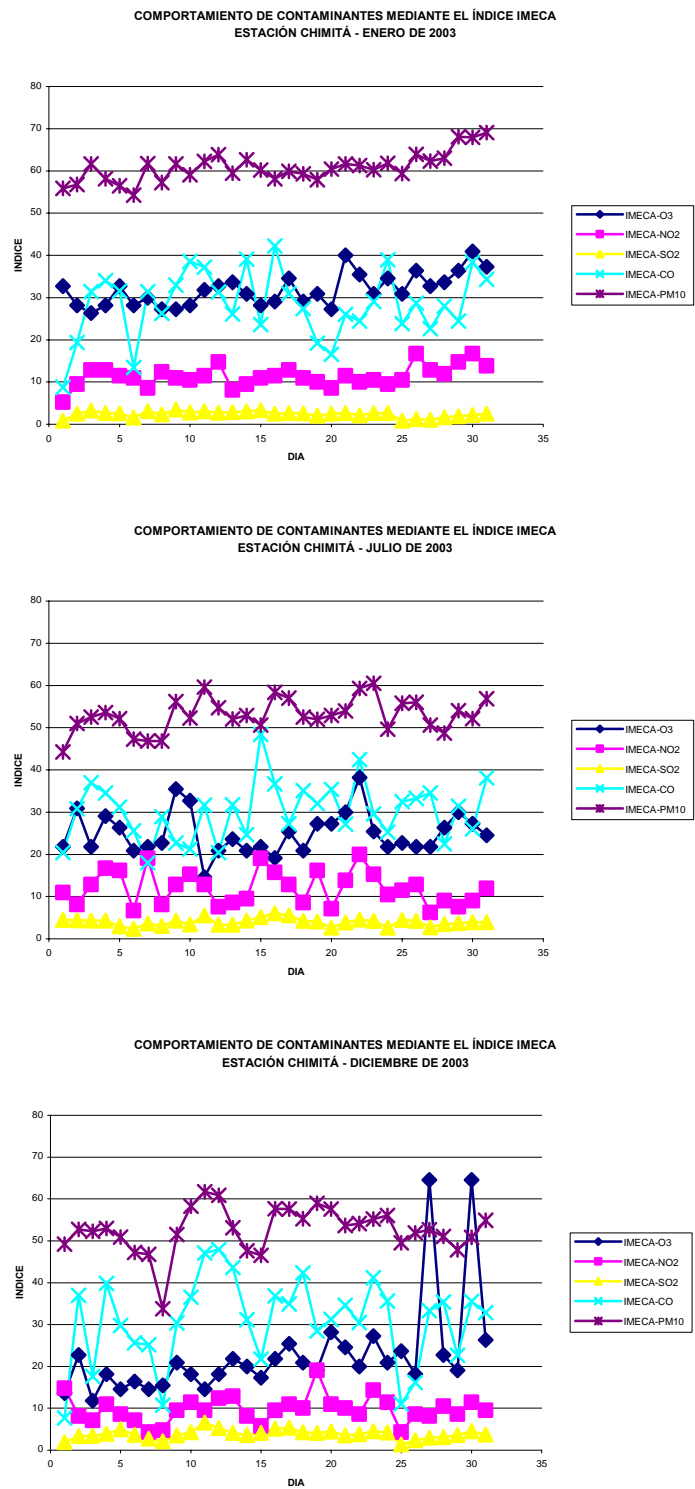
El O₃ es otro contaminante que tiene gran significado y aunque tiene poco significado para los índices IMECA, ICHICA e ICA, el índice IBUCA muestra que las concentraciones de este contaminante se encuentran dentro de una calificación regular. Similar comportamiento se puede observar para el NO₂, que mientras para los índices IMECA e ICHICA presenta valores bajos, para el IBUCA se encuentra entre los valores de moderado y regular.

Figura 24. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de calidad AQI en la estación Chimitá. Meses de enero, julio y diciembre de 2003



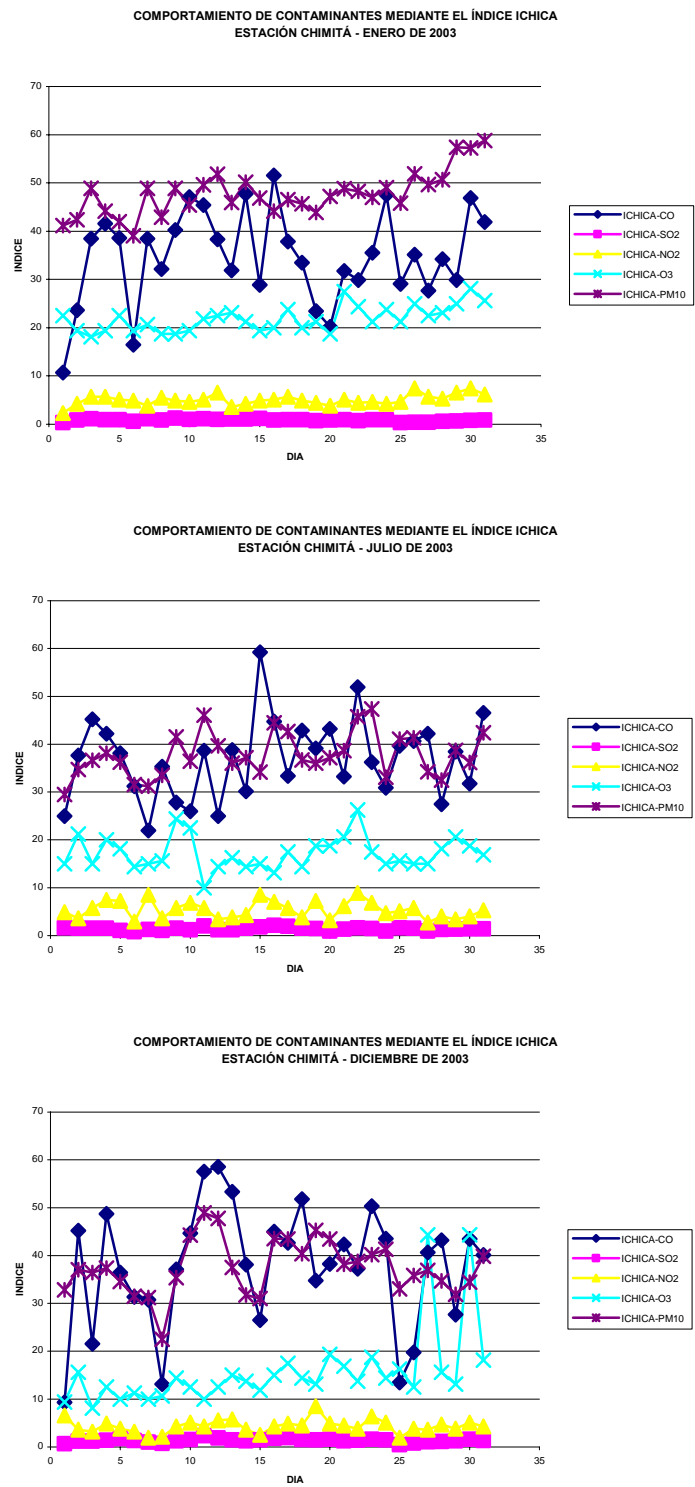
Fuente: Autores

Figura 25. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de calidad IMECA en la estación Chimitá. Meses de enero, julio y diciembre de 2003



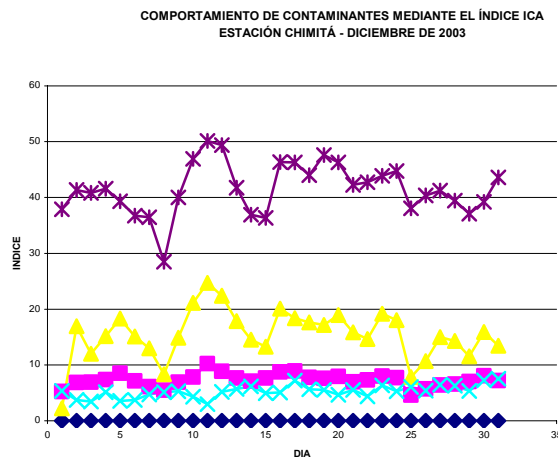
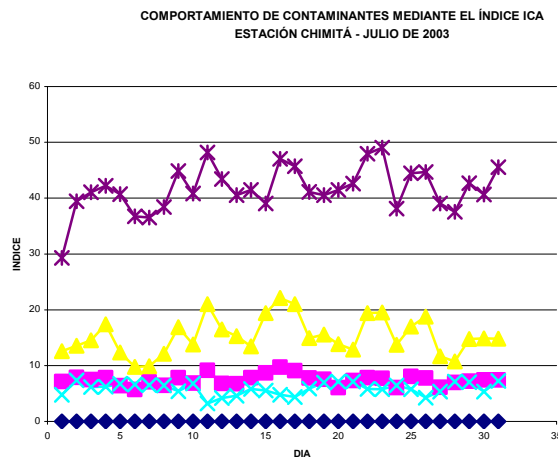
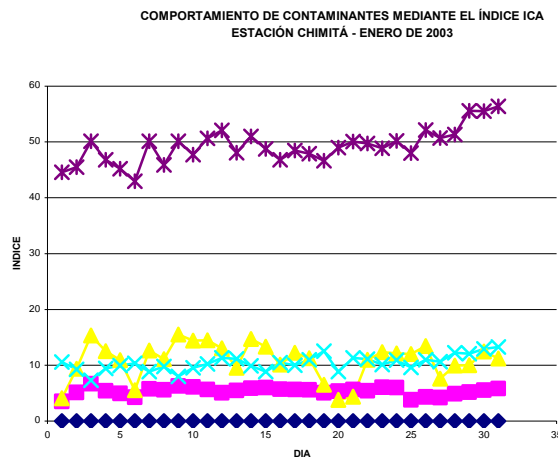
Fuente: Autores

Figura 26. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de calidad ICHICA en la estación Chimitá. Meses de enero, julio y diciembre de 2003



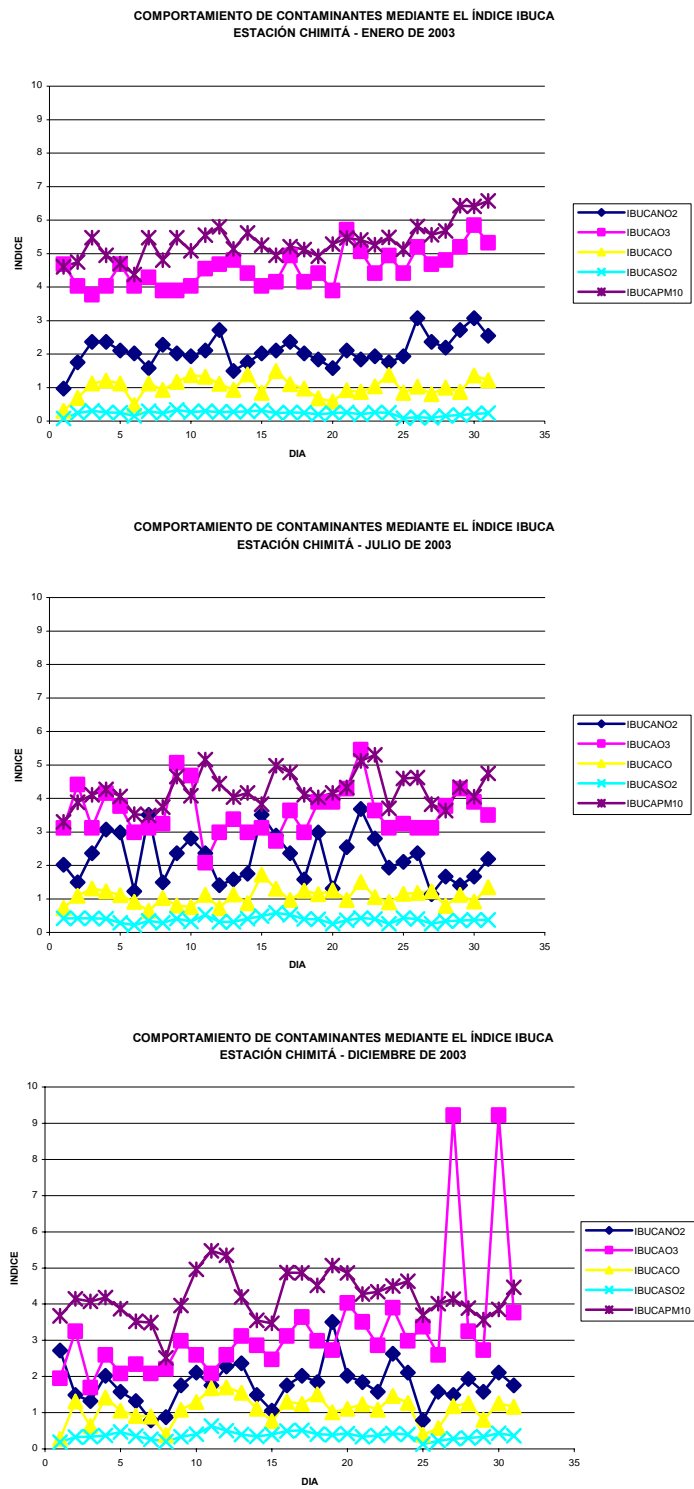
Fuente: Autores

Figura 27. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de calidad ICA en la estación Chimitá. Meses de enero, julio y diciembre de 2003



Fuente: Autores

Figura 28. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de calidad IBUCA en la estación Chimitá. Meses de enero, julio y diciembre de 2003

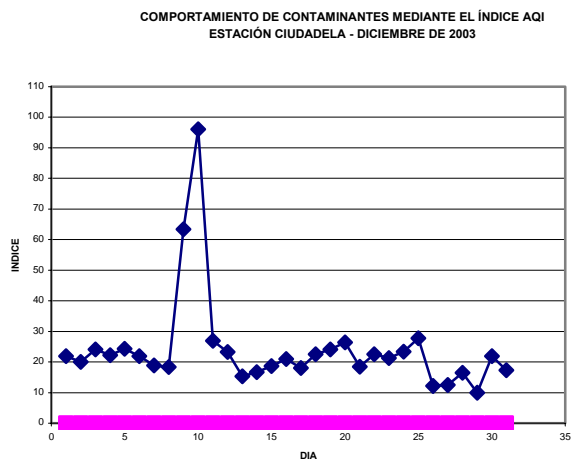
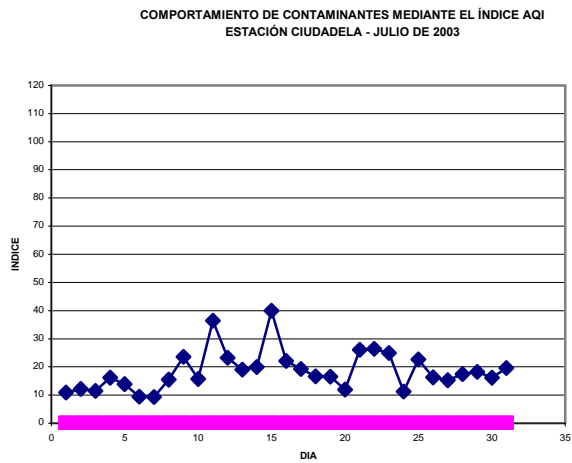
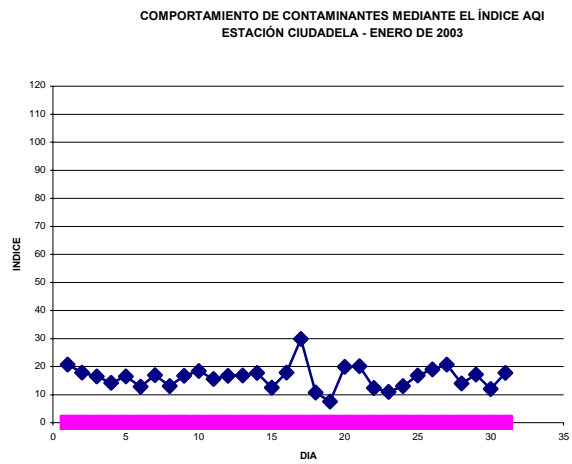


Fuente: Autores

3.1.3 Estación Ciudadela. Esta estación de monitoreo permite determinar los índices de calidad del aire para CO, O₃. Con los resultados obtenidos por medio de las diferentes metodologías se puede ver que el contaminante de mayor presencia en esta zona es el ozono, por encima del monóxido de carbono y aunque para la mayoría de las metodologías las concentraciones encontradas permiten calificarlos dentro del rango bueno, el índice IBUCA para el ozono lo coloca entre Regular y malo, ya que alcanza valores por encima de 7.5. Cabe resaltar que el método AQI no permite ver el comportamiento del ozono.

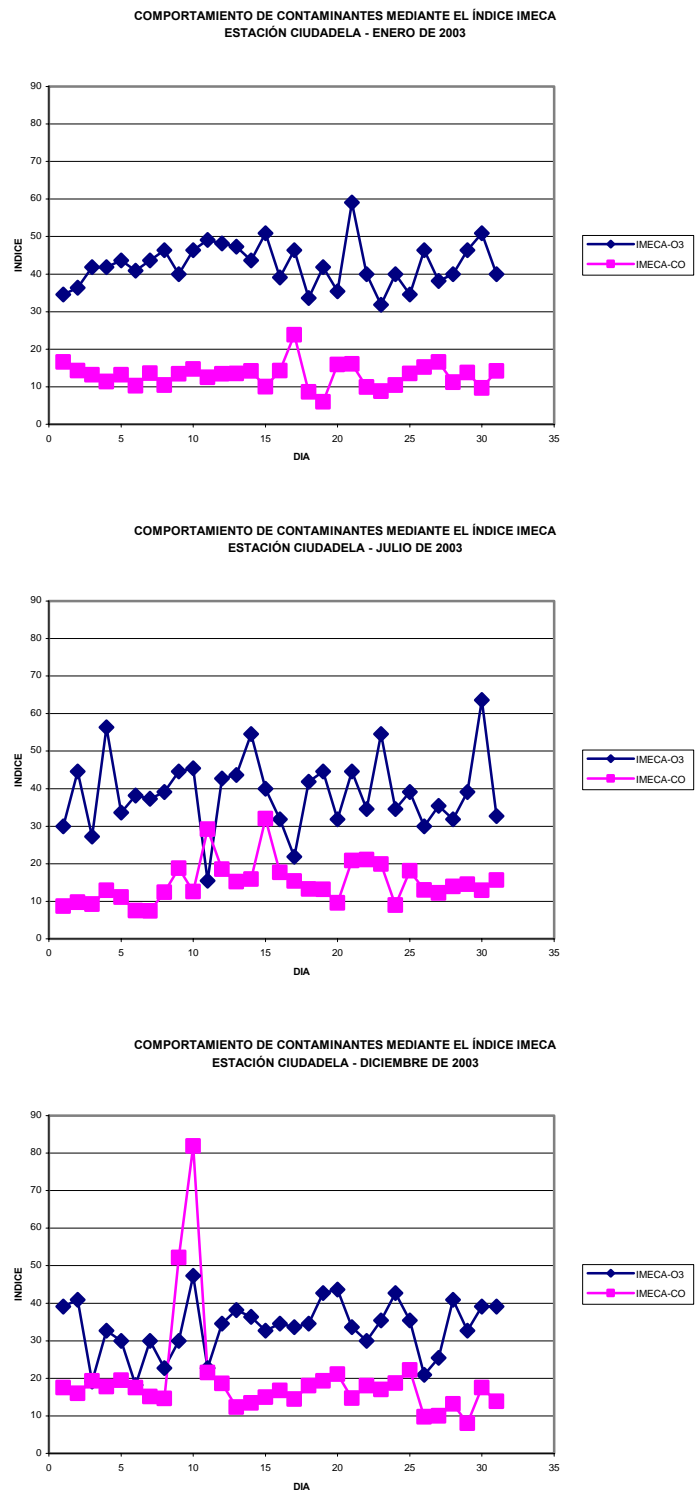
3.1.4 Estación Florida. En el caso de la estación Florida, se determinaron sus índices únicamente para el PM₁₀ y el CO. Los cálculos realizados para las diferentes metodologías muestran que el principal contaminante en esta zona es el material particulado, sin embargo, se observa que la concentración de este contaminante se encuentra en la calificación buena, incluida la metodología IBUCA. Sin embargo se acerca a la zona de moderado para AQI, ICA e IBUCA.

Figura 29. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de calidad AQI en la estación Ciudadela. Meses de enero, julio y diciembre de 2003



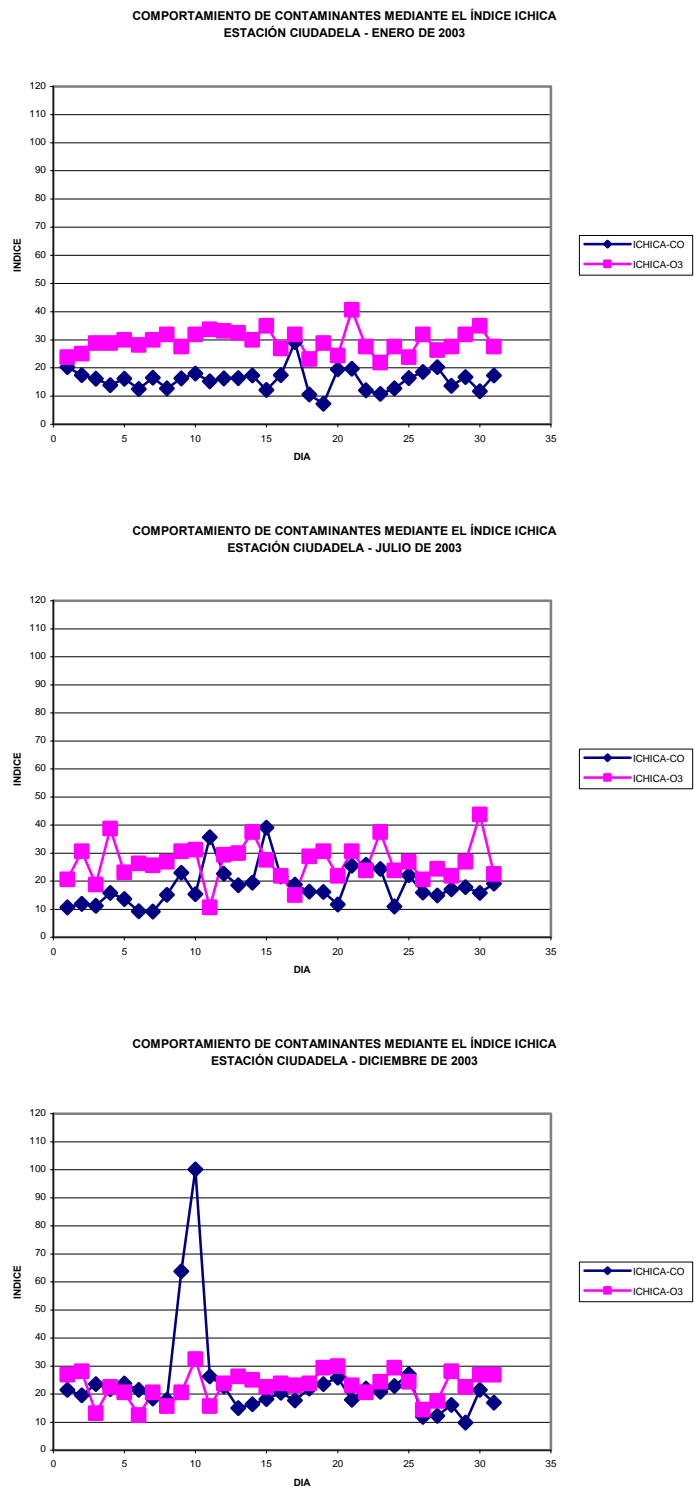
Fuente: Autores

Figura 30. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de calidad IMECA en la estación Ciudadela. Meses de enero, julio y diciembre de 2003



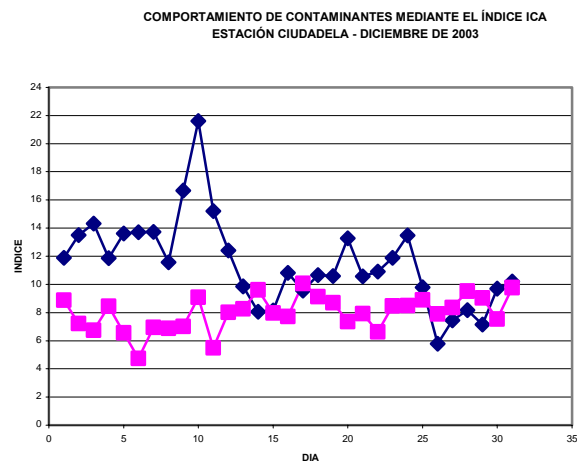
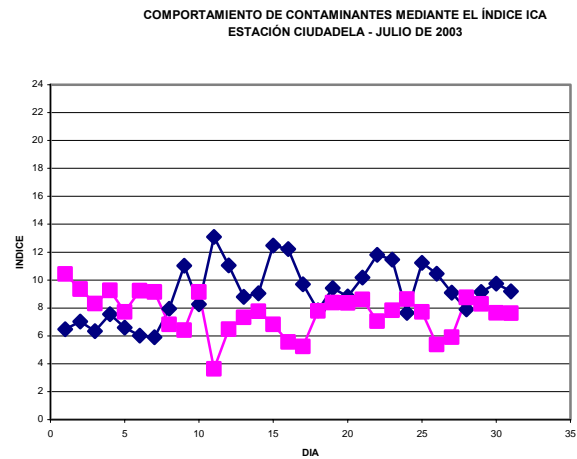
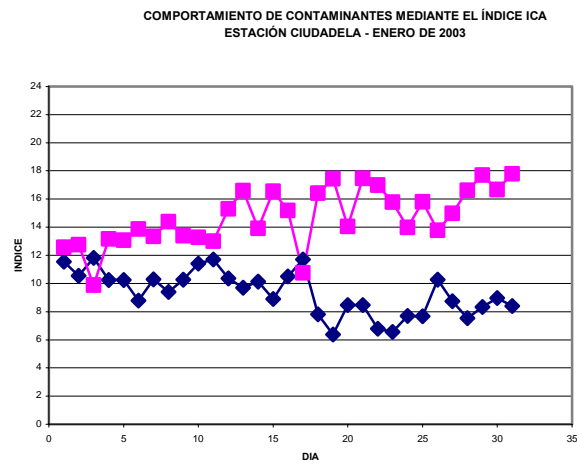
Fuente: Autores

Figura 31. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de calidad ICHICA en la estación Ciudadela. Meses de enero, julio y diciembre de 2003



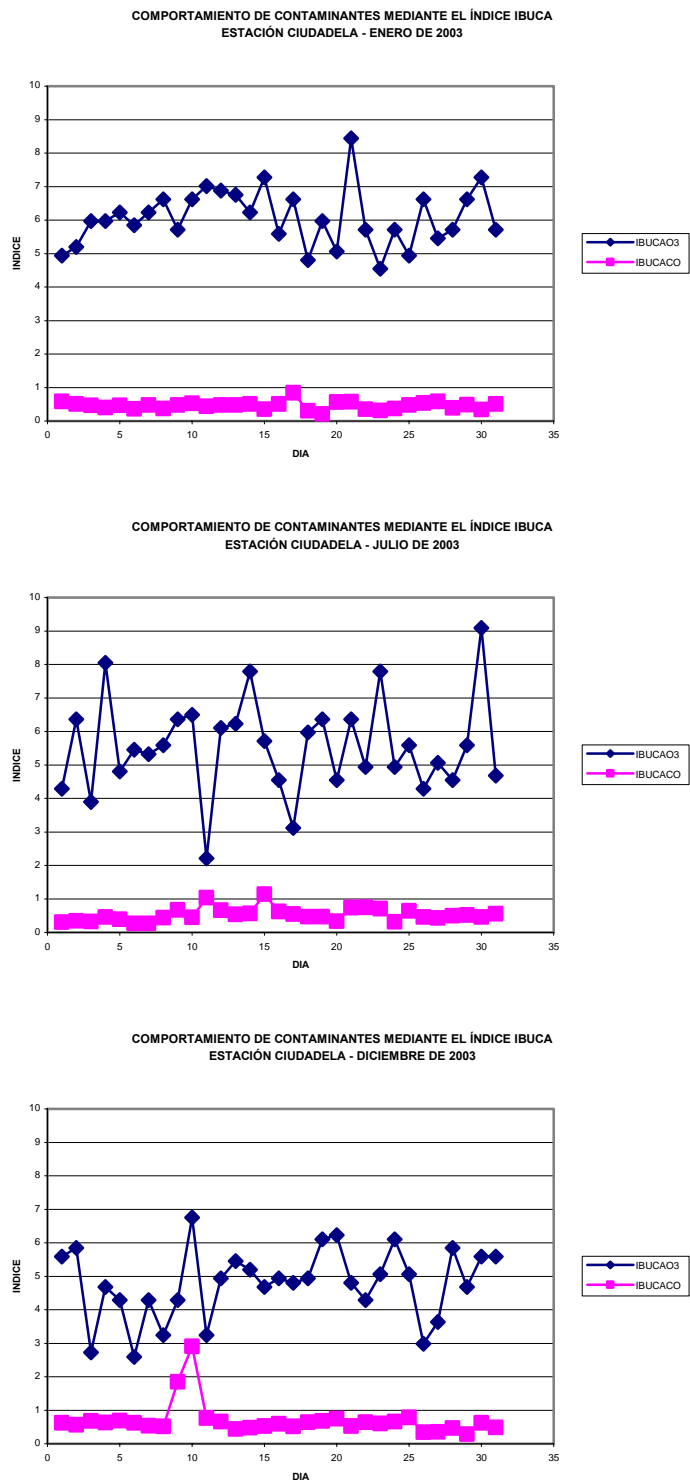
Fuente: Autores

Figura 32. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de calidad ICA en la estación Ciudadela. Meses de enero, julio y diciembre de 2003



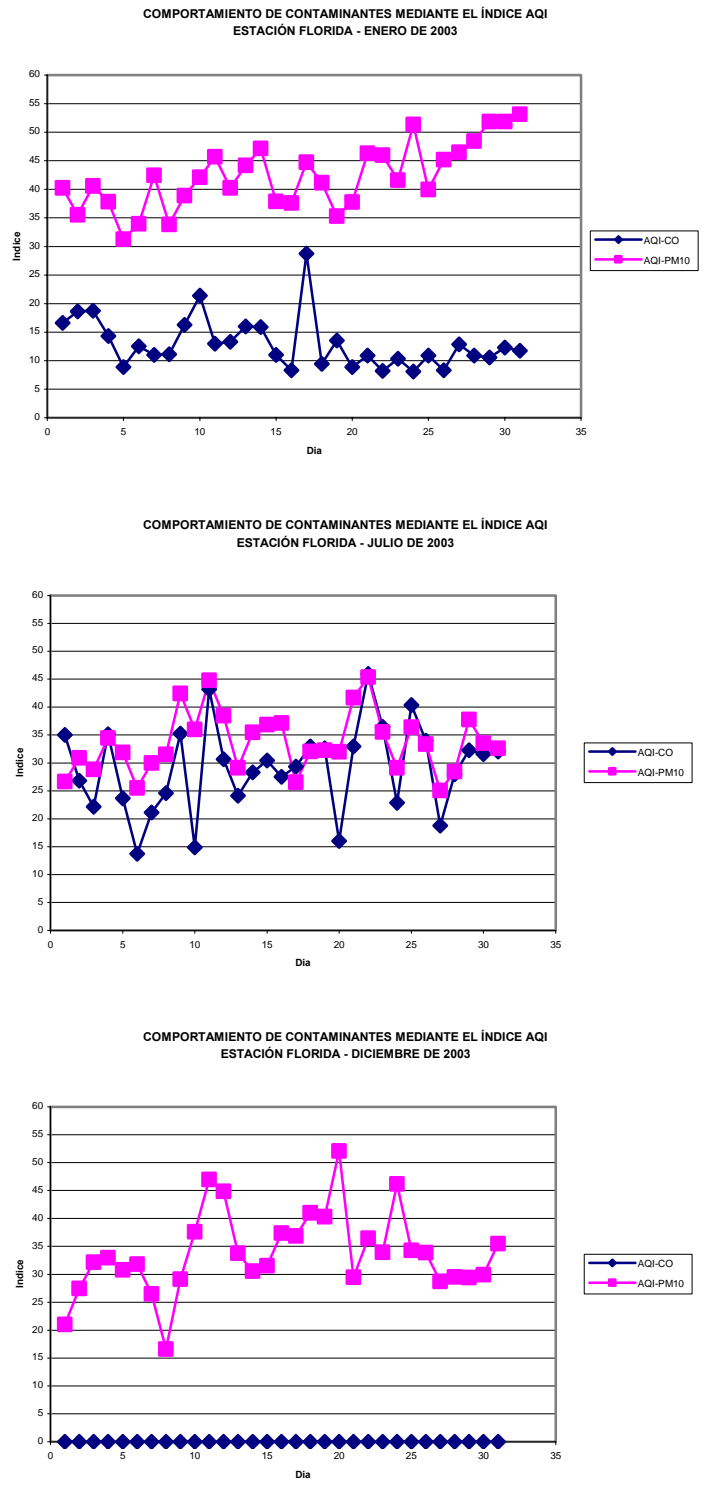
Fuente: Autores

Figura 33. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de calidad IBUCA en la estación Ciudadela. Meses de enero, julio y diciembre de 2003



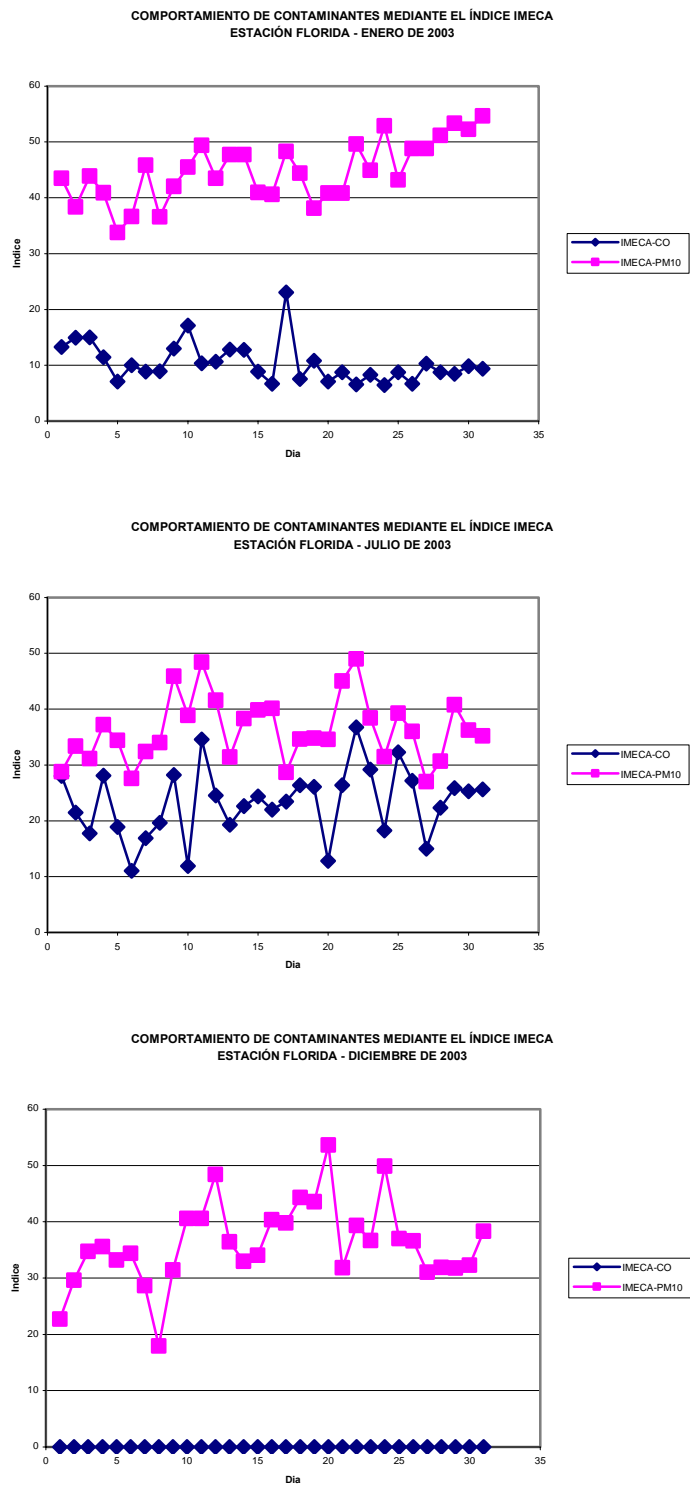
Fuente: Autores

Figura 34. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de calidad AQI en la estación Florida. Meses de enero, julio y diciembre de 2003



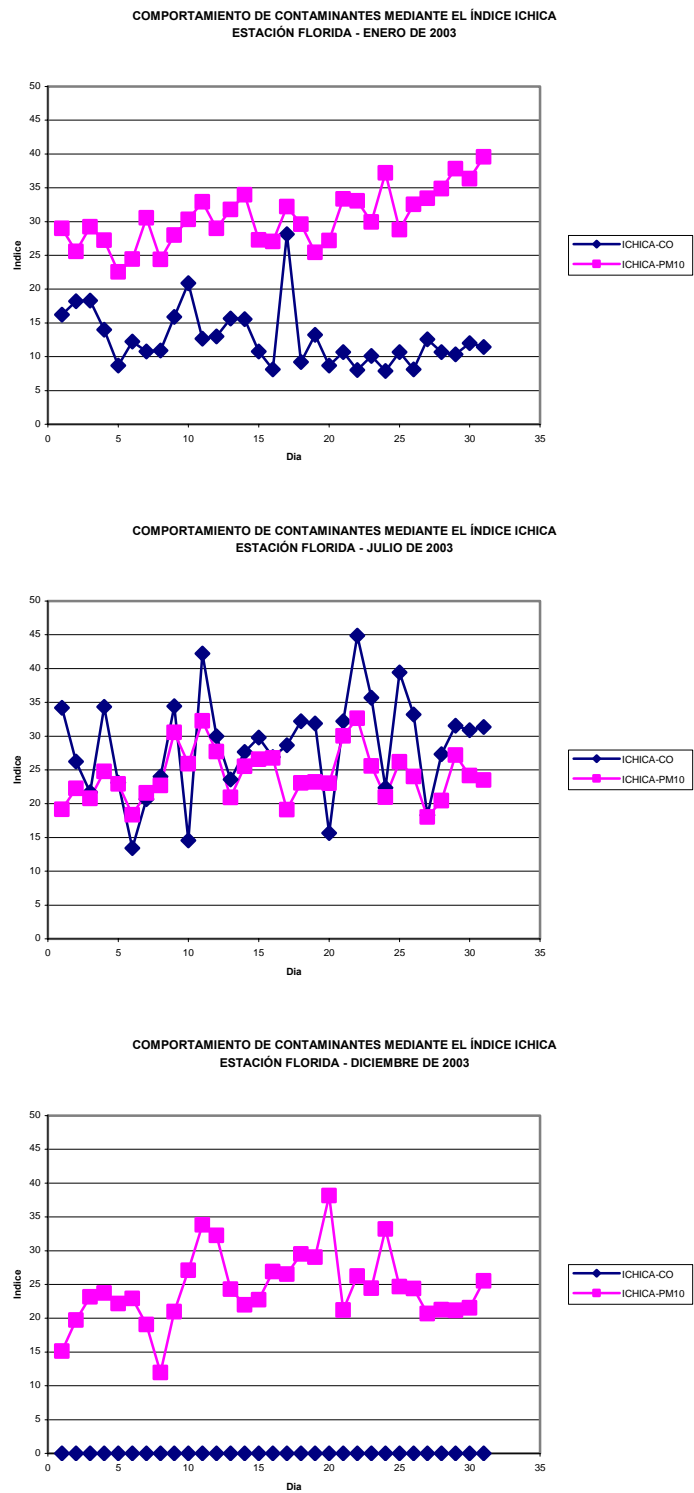
Fuente: Autores

Figura 35. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de calidad IMECA en la estación Florida. Meses de enero, julio y diciembre de 2003



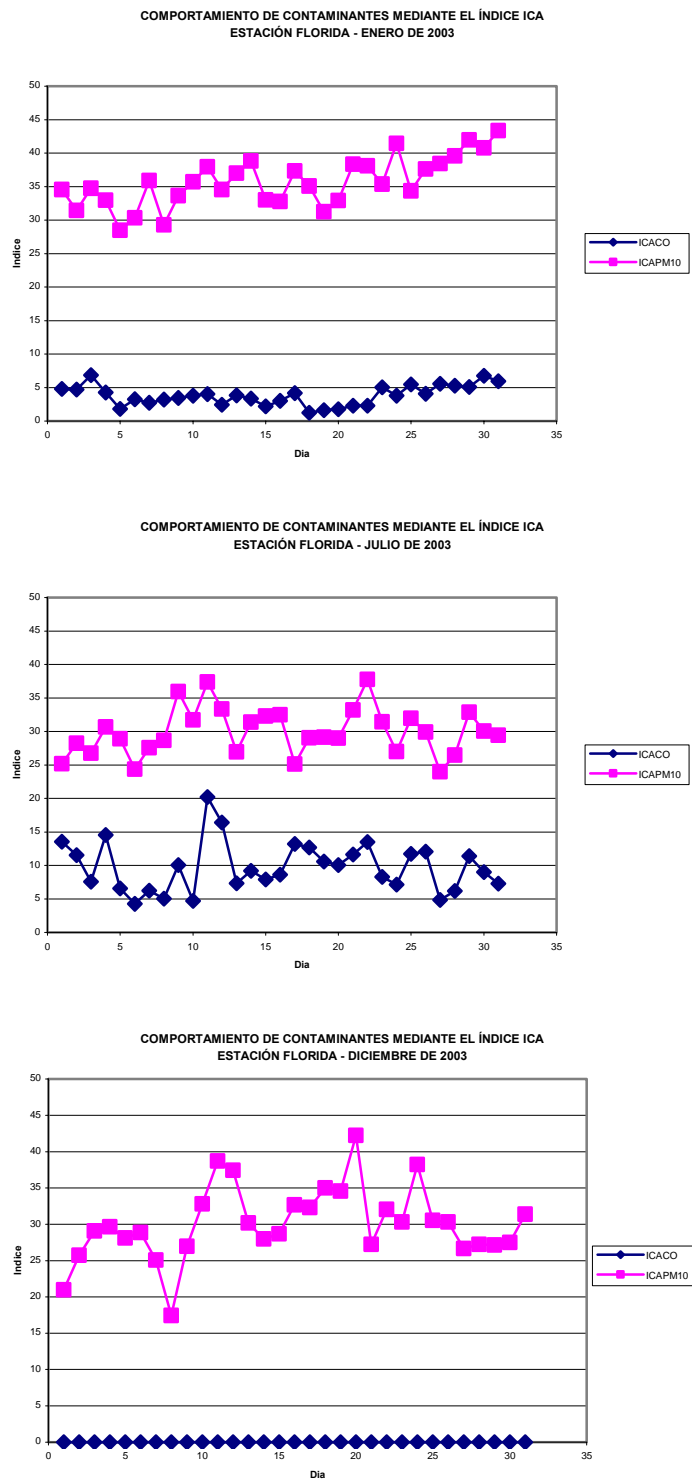
Fuente: Autores

Figura 36. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de calidad ICHICA en la estación Florida. Meses de enero, julio y diciembre de 2003



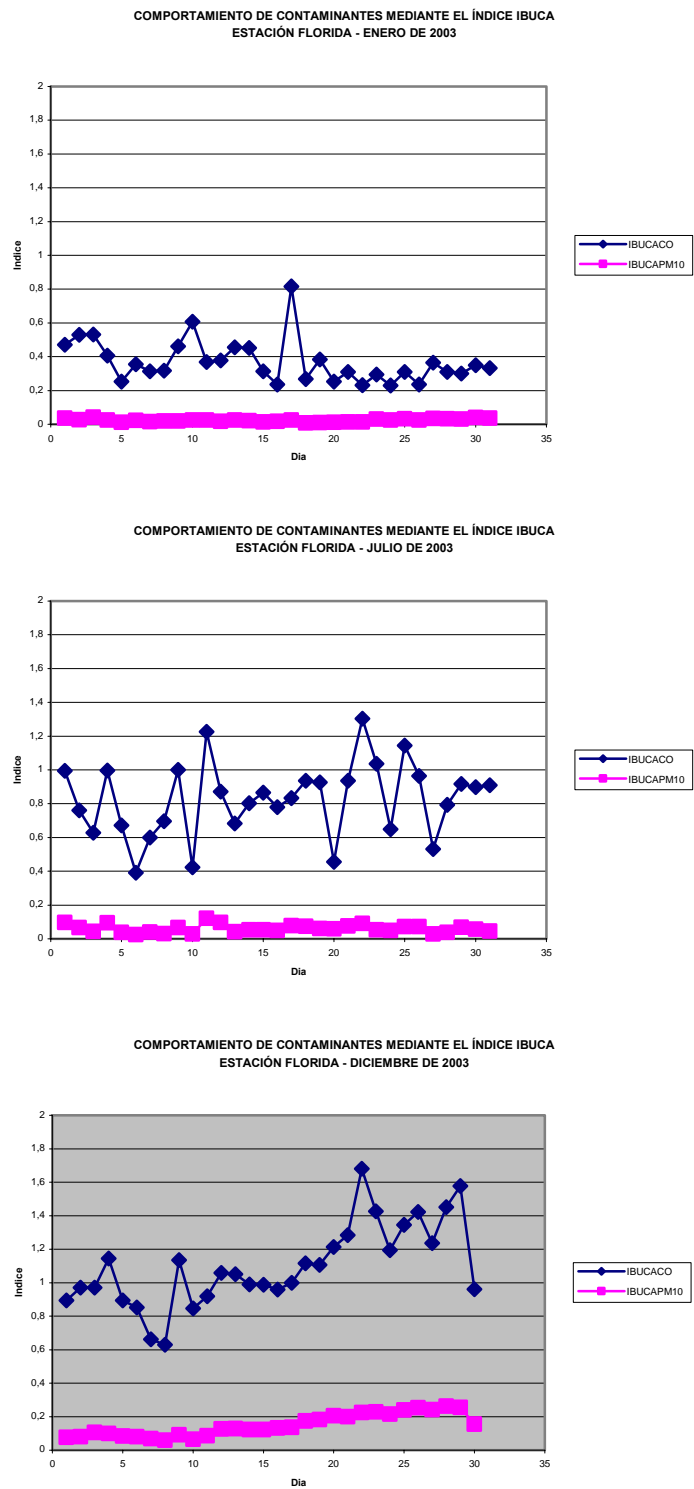
Fuente: Autores

Figura 37. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de calidad ICA en la estación Florida. Meses de enero, julio y diciembre de 2003



Fuente: Autores

Figura 38. Medida del comportamiento de contaminantes por medio del índice de calidad IBUCA en la estación Florida. Meses de enero, julio y diciembre de 2003



Fuente: Autores

3.2 RELACIONES ENTRE LOS DIFERENTES ÍNDICES.

Cuando se observan las gráficas generadas por los diferentes índices se ve que aunque los valores dados por cada metodología sean diferentes, el comportamiento de las gráficas muestra que los diferentes métodos guardan una relación entre sí.

Esta relación se puede observar mejor al comparar la información estadística generada por la macro creada. Analizando las gráficas de comparación entre los diferentes índices para los contaminantes estudiados, se puede observar que, efectivamente, esta relación existe.

A partir de aquí se encontraron las siguientes relaciones:

1. NO_2 . Con respecto al NO_2 se encontró que existe una relación constante entre las metodologías IMECA - IBUCA e ICHICA – IBUCA. Estas relaciones son:

$$IBUCA_{\text{NO}_2} = 5.4286 \times IMECA_{\text{NO}_2}$$

$$IBUCA_{\text{NO}_2} = 2.4255 \times ICHICA_{\text{NO}_2}$$

Debido a que los índices AQI e ICA presentan siempre un valor de cero, la relación es cero, ya que estas metodologías no pueden dar un valor para las concentraciones de NO_2 detectadas.

2. CO . Los índices correspondientes al CO muestran una relación constante entre las metodologías AQI – IBUCA, IMECA – IBUCA e ICHICA – IBUCA. Estas son:

$$IBUCA_{\text{CO}} = 35.23 \times AQI_{\text{CO}}$$

$$IBUCA_{\text{CO}} = 28.182 \times IMECA_{\text{CO}}$$

$$IBUCA_{\text{CO}} = 34.44 \times ICHICA_{\text{CO}}$$

Sin embargo, las metodologías ICA – IBUCA, a pesar de tener comportamientos similares, no tienen una relación constante. Esta relación toma valores entre 6 y 30, pero para la muestra analizada se obtiene un valor promedio de 20. De manera que

$$IBUCA_{\text{CO}} \cong 20 \times ICA_{\text{CO}}$$

3. SO_2 . Los índices para el SO_2 tienen un comportamiento similar a los índices para el CO , ya que mantienen una relación constante entre las mismas metodologías.

$$IBUCA_{\text{SO}_2} = 20 \times AQI_{\text{SO}_2}$$

$$IBUCA_{SO_2} = 10.46 \times IMECA_{SO_2}$$

$$IBUCA_{SO_2} = 3.73 \times ICHICA_{SO_2}$$

Con los índices ICA – IBUCA sucede lo mismo, a pesar de que en las gráficas muestran un comportamiento muy similar, la relación existente entre estos índices es variable, tomando valores entre 14 y 46. Sin embargo, de acuerdo con el análisis estadístico de la muestra estudiada el promedio es aproximado a 18, de manera que:

$$IBUCA_{SO_2} \cong 18 \times ICA_{SO_2}$$

4. O₃. El ozono sólo presenta una relación constante entre las metodologías IMECA – IBUCA e ICHICA – IBUCA. Estas son:

$$IBUCA_{O_3} = 7 \times IMECA_{O_3}$$

$$IBUCA_{O_3} = 4.8125 \times ICHICA_{O_3}$$

Con respecto a la metodología AQI, ésta no puede relacionarse ya que no es posible asignarle un índice para las concentraciones de ozono detectadas.

Las metodologías ICA – IBUCA presentan una relación variable, tomando valores entre 0,5 y 3.6 aproximadamente. La relación promedio de estas metodologías es aproximada a 2, por lo tanto:

$$IBUCA_{O_3} \cong 2 \times ICA_{O_3}$$

5. PM₁₀. Por último, con respecto a los índices para el material particulado, las diferentes metodologías presentan una relación variable con excepción de la existente entre ICHICA - IBUCA. La relación entre AQI – IBUCA toma valores entre 9 y 12, y su promedio es de 11. La relación entre ICA – IBUCA toma valores entre 8 y 9,7, y su promedio es de 9. Y la relación IMECA – IBUCA toma valores entre 10 y 13, con un promedio de 11. Estas relaciones son:

$$IBUCA_{PM_{10}} \cong 8.93 \times ICHICA_{PM_{10}}$$

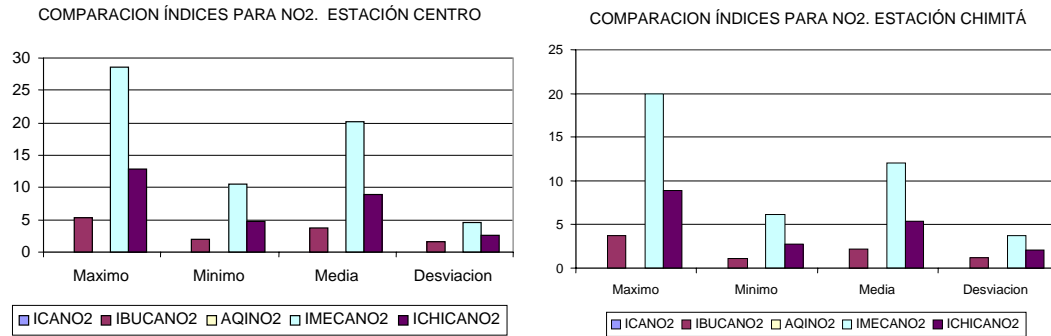
$$IBUCA_{PM_{10}} = 11 \times AQI_{PM_{10}}$$

$$IBUCA_{PM_{10}} \cong 9 \times ICA_{PM_{10}}$$

$$IBUCA_{PM_{10}} \cong 11 \times IMECA_{PM_{10}}$$

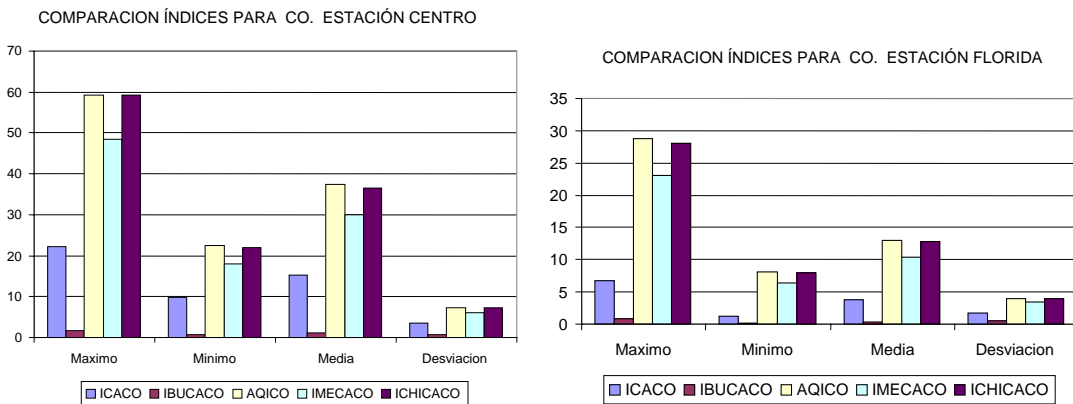
Estas relaciones muestran que cada una de las metodologías ha desarrollado su forma de medir la contaminación por material particulado.

Figura 39. Comparación entre los diferentes índices de contaminación del aire para el NO₂ (Centro y Chimitá)



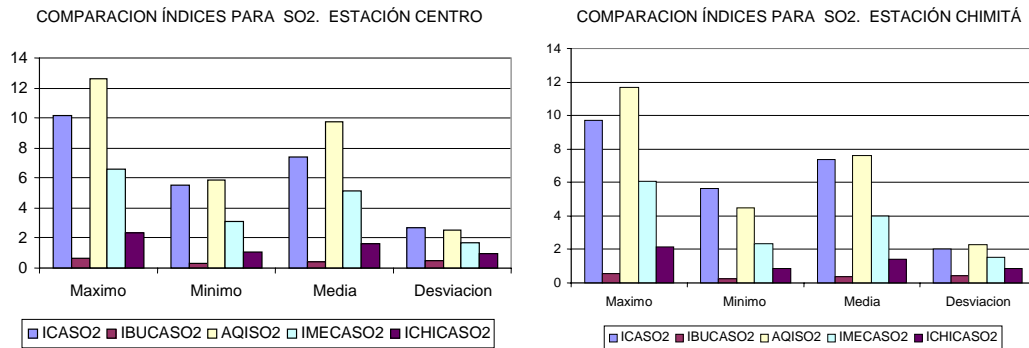
Fuente: Autores

Figura 40. Comparación entre los diferentes índices de contaminación del aire para el CO (Centro y Florida)



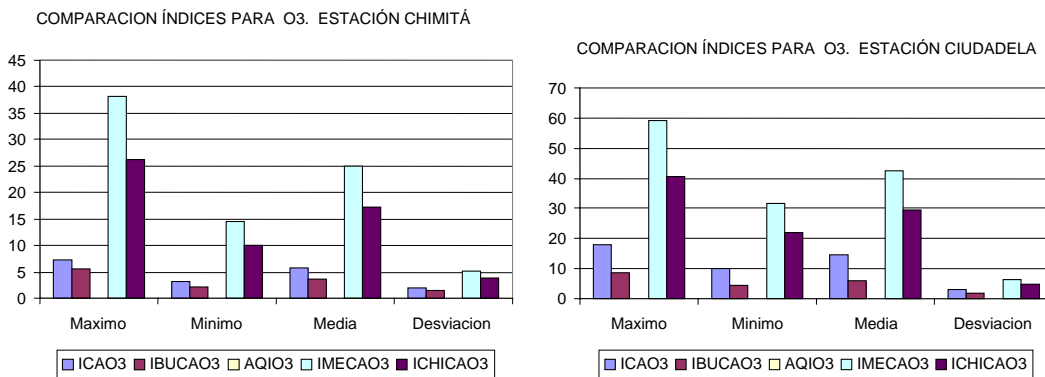
Fuente: Autores

Figura 41. Comparación entre los diferentes índices de contaminación del aire para el SO₂ (Centro y Chimitá)



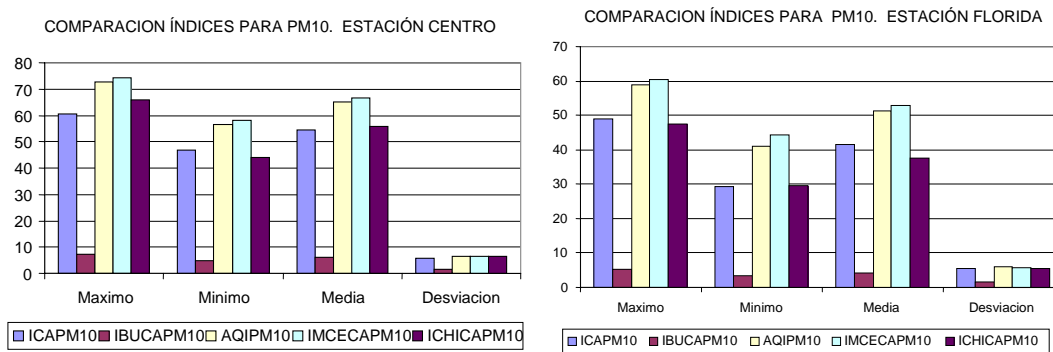
Fuente: Autores

Figura 42. Comparación entre los diferentes índices de contaminación del aire para el O₃ (Chimitá y Ciudadela)



Fuente: Autores

Figura 43. Comparación entre los diferentes índices de contaminación del aire para el PM₁₀ (Centro y Florida)



Fuente: Autores

4. COMPORTAMIENTO DE LOS CONTAMINANTES

Para identificar el comportamiento de los contaminantes objeto de este estudio, teniendo en cuenta los factores climáticos medidos en diferentes estaciones en el área metropolitana de Bucaramanga, se graficaron los datos obtenidos durante 365 días, las 24 horas del día en curvas que permitieran ver el comportamiento diario.

Para este fin se implementó una macro de Excel® para agrupar los datos de tal manera que se pudieran graficar. Sin embargo, la magnitud de la información obtenida no permitió el tratamiento de estos datos en una hoja de cálculo, lo que obligó a generar una aplicación en Matlab 6.0® que permitiera realizar un análisis gráfico así como determinar el comportamiento promedio de las variables medidas. Debido a algunos problemas que se producen durante la toma de datos, en momentos tales como el arranque y la calibración de los equipos, se hizo necesario depurar la información, filtrando estos valores proceder al análisis.

4.1 COMPORTAMIENTO DE LOS CONTAMINANTES EN LA ESTACIÓN CENTRO

4.1.1 Radiación Solar. La Figura 44 presenta los valores medidos para la radiación solar durante el año 2003. Esta figura muestra que sólo hay radiación solar entre las 5 am y las 6 pm aproximadamente y que la mayor incidencia se alcanza entre las 10 am y las 2 pm. Se observa que en los días de mayor radiación solar, se alcanzaron valores superiores a 1000 lumens.

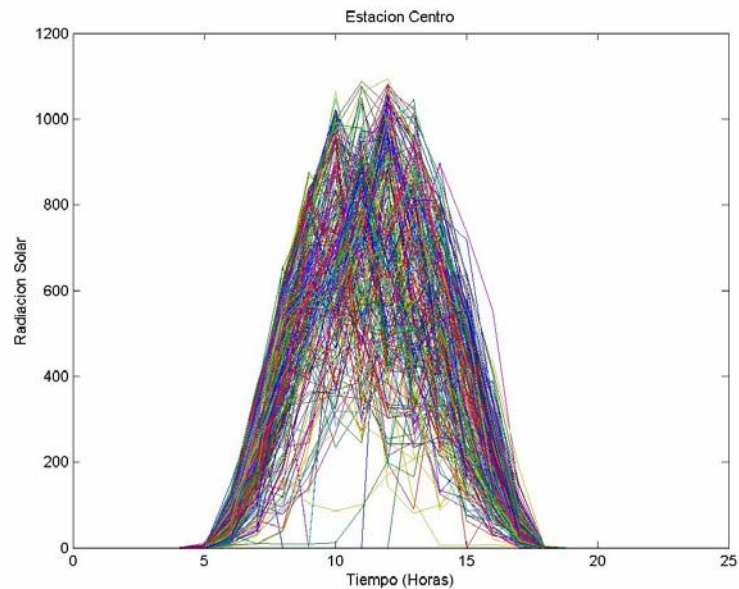
4.1.2 Presión atmosférica. La Figura 45 muestra el comportamiento de la presión atmosférica de la estación centro en el transcurso del año. Esta variable tomó valores entre los 560 y los 680 mm Hg, siendo estos muy marcados hacia los 650 mm Hg. Los valores más bajos se deben a los días de mayor pluviosidad.

4.1.3 Temperatura. La figura 46 muestra el comportamiento de la temperatura en el año 2003 y puede observarse que en la estación centro, las temperaturas más altas se alcanzaron hacia las 12 m, y la mayor temperatura registrada en el año estuvo alrededor de los 28°C; las temperaturas más bajas se alcanzaron hacia las 5 a.m., siendo la más baja de aproximadamente 13.5°C. El rango tan amplio de temperatura muestra cuáles fueron los días más fríos, en los que hubo poca radiación solar y condiciones de lluvia.

4.1.4 Gases contaminantes: Óxidos de Nitrógeno (NO₂, NO_x y NO), Dióxido de azufre (SO₂), y ozono (O₃). Los óxidos de nitrógeno son contaminantes muy peligrosos

para la salud de las plantas, los animales y del hombre. Las Figuras 47, 48 y 49, muestran el comportamiento de estos gases en el transcurso de un día. Se puede observar que en horas de la noche, la concentración de estos gases disminuye, pero hacia las 4 a.m., comienzan a aumentar. En horas del día se pueden observar dos tendencias: la primera y más común en la que en horas de la mañana, 8 a.m. para el NO, el NO_x y 9 a.m. para el NO₂, y hacia las 6 p.m. se alcanzan las mayores concentraciones de estos gases debido a que son horarios de alto tráfico vehicular. El hecho de que el pico de NO₂ se alcance a una hora mayor que la de los otros óxidos de nitrógeno se debe a que éste se forma a partir del NO.

Figura 44. Radiación solar en la estación Centro

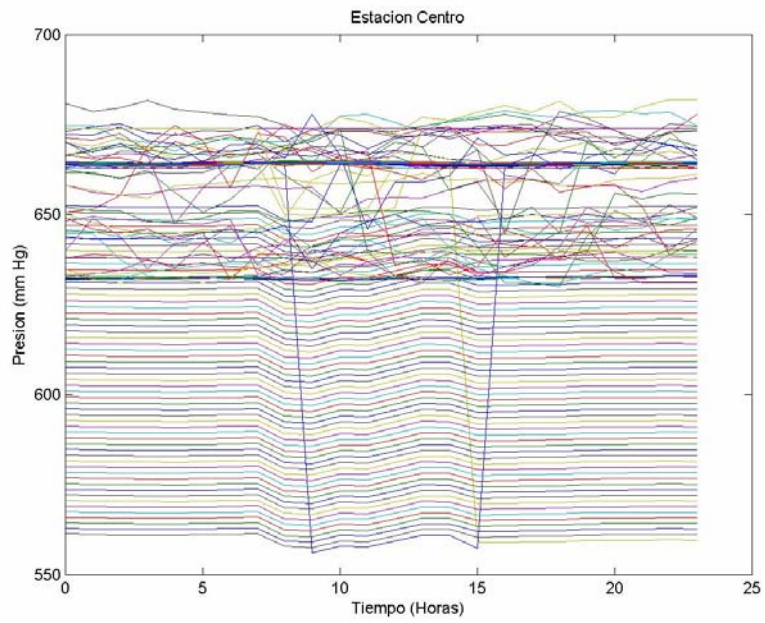


Fuente: Autores

Esta es una zona que presenta movimiento de vehículos durante todo el día y hacia las 12 m y las 2 p.m. este flujo vehicular aumenta, por lo que se esperaría que las concentraciones de los óxidos de nitrógeno presentaran valores más altos de concentración que los reportados hacia las 8 a.m. y hacia las 6 p.m. Esto se puede ver en la segunda tendencia en la que los picos de concentración se alcanzan hacia las 12 m y hacia las 2 p.m.

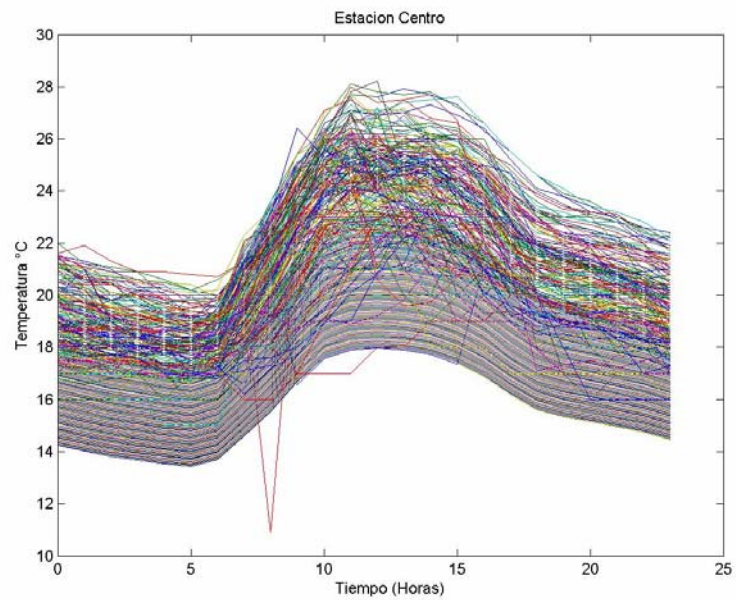
Un comportamiento similar se puede ver en la Figura 50 que muestra el comportamiento del dióxido de azufre. Estos dos comportamientos presentados en horas del día pueden explicarse por medio de la figura 51, la cual muestra la generación de ozono alrededor de la estación centro. Este ozono es formado por acción de la luz solar y la presencia de los óxidos de nitrógeno y el dióxido de azufre. La primera tendencia se debe a los días en los que la radiación solar fue alta y los óxidos de nitrógeno y el dióxido de azufre reaccionaron para formar ozono, y la segunda tendencia se da a causa de los días que hubo una baja radiación solar, y por lo tanto hubo poca formación de ozono.

Figura 45. Presión atmosférica en la estación Centro



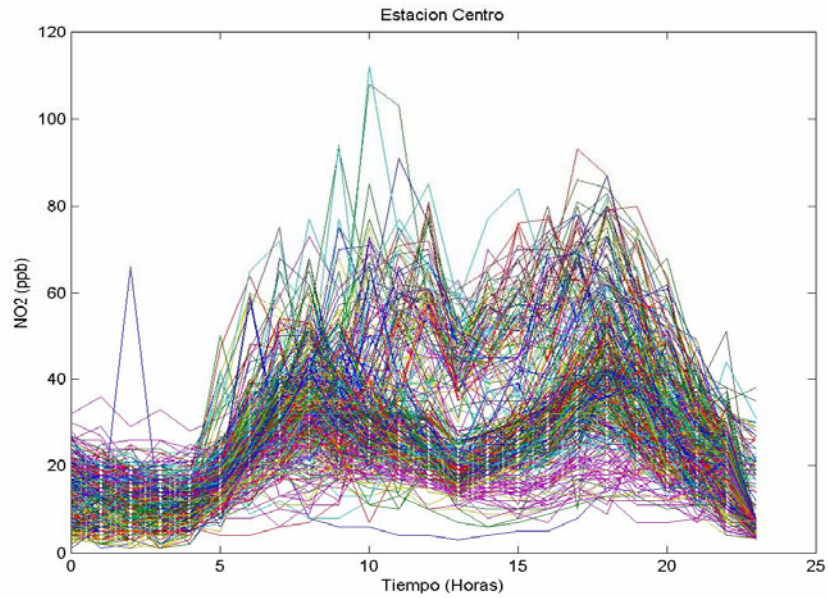
Fuente: Autores

Figura 46. Temperatura en la estación Centro



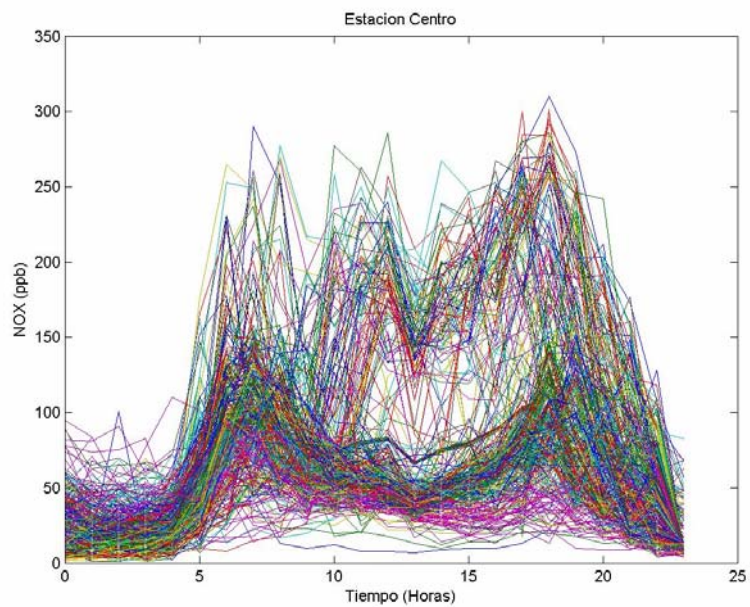
Fuente: Autores

Figura 47. Concentración de NO₂. Estación centro



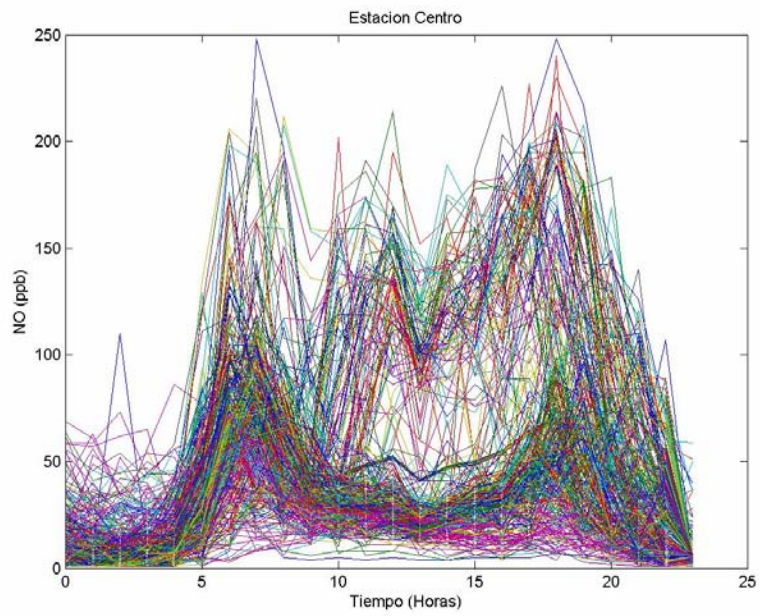
Fuente: Autores

Figura 48. Concentración de NO_x. Estación centro



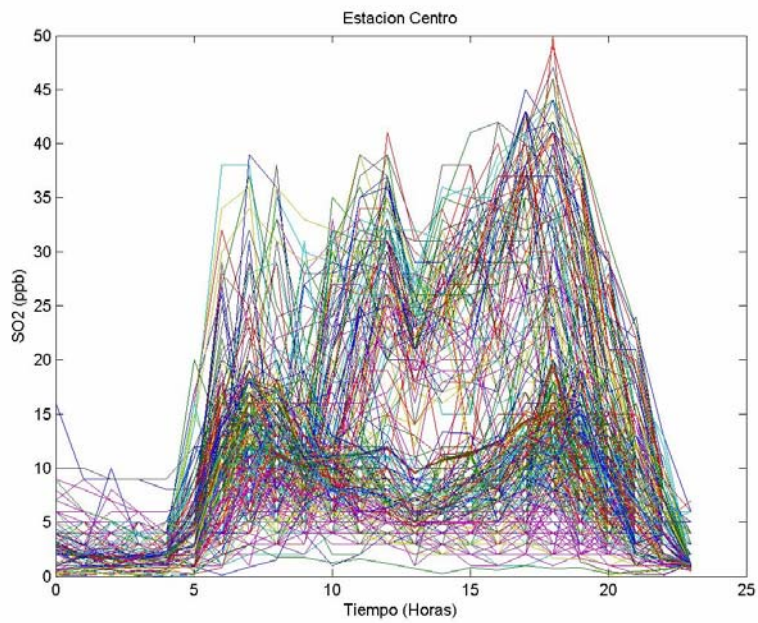
Fuente: Autores

Figura 49. Concentración de NO. Estación centro



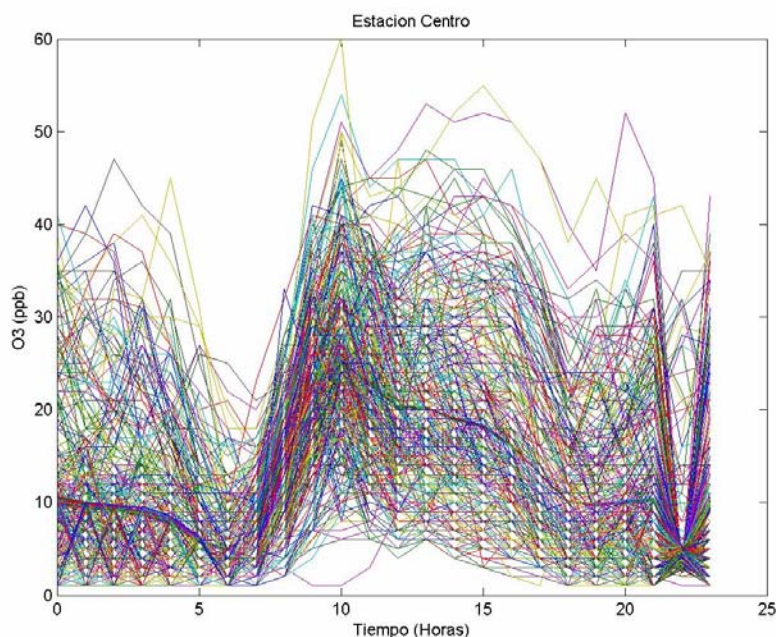
Fuente: Autores

Figura 50. Concentración de SO₂. Estación centro



Fuente: Autores

Figura 51. Concentración de O₃. Estación centro



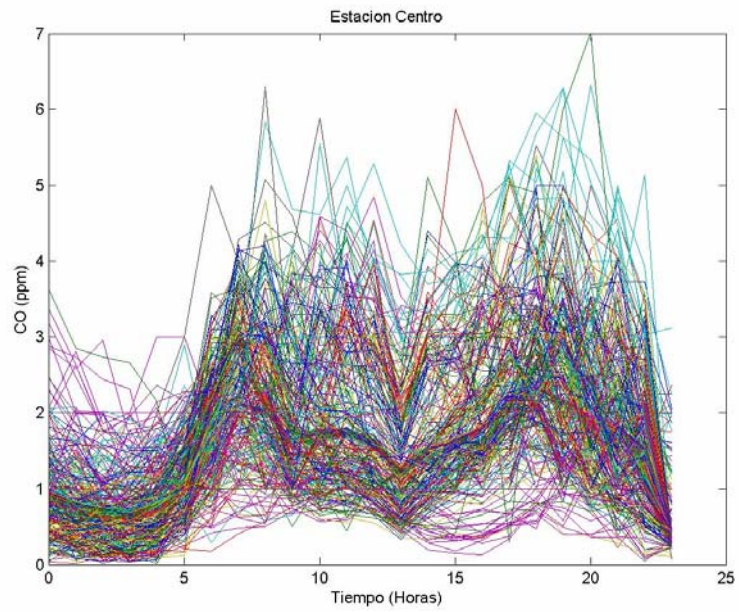
Fuente: Autores

4.1.5 Monóxido de Carbono (CO). Este gas se forma por mala combustión de combustibles como la gasolina, el ACPM y el gas. La Figura 52 muestra que hacia las 8 a.m. y las 6 p.m. se producen las mayores emisiones de CO, esto se debe a que son las horas de mayor circulación y hacia la 1 p.m. los niveles de emisión disminuyen a causa de la menor circulación de automotores.

4.1.6 Material particulado (PM10). Este contaminante ha demostrado presentar la mayor incidencia en la estación centro presentando los mayores valores hacia las 9 a.m. y hacia las 7 p.m. Sin embargo existe otra tendencia, la cual indica altas concentraciones hacia la 1 p.m.

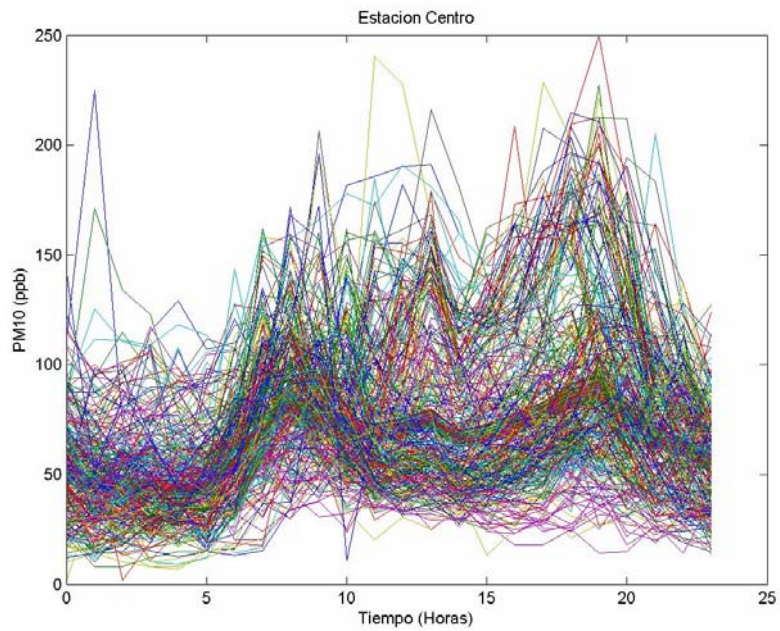
Algunas de estas partículas son emitidas directamente y otras se pueden producir a partir de reacciones de los óxidos de azufre, los óxidos de nitrógeno y material orgánico volátil. Estas dos tendencias, posiblemente estén ligadas a la reacción de formación del ozono, de manera tal que cuando la formación de ozono es alta, la producción de material particulado disminuye, mientras que cuando la formación del ozono es baja, las transformaciones en la atmósfera de los óxidos de nitrógeno, el dióxido de azufre junto con el material orgánico volátil acentúan la formación de estas partículas.

Figura 52. Concentración de CO. Estación centro



Fuente: Autores

Figura 53. Concentración de PM₁₀. Estación centro

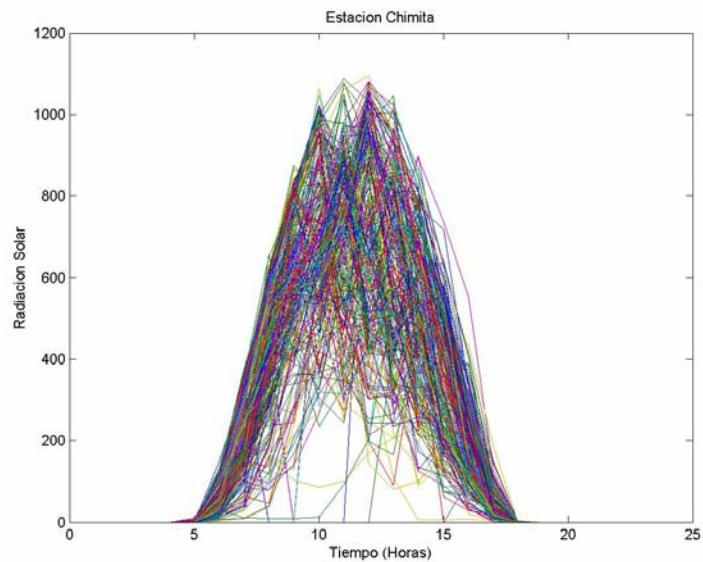


Fuente: Autores

4.2 COMPORTAMIENTO DE LOS CONTAMINANTES EN LA ESTACIÓN CHIMITÁ

4.2.1 Radiación Solar. Los valores de radiación solar de esta zona son muy similares a los registrados en la estación centro, con máximos aproximados a 1100 lumens. Los valores máximos normalmente se registran entre las 10 a.m. y las 2 p.m. La gráfica muestra que en para esta estación hay radiación solar entre las 5 a.m. y las 6:30 p.m. La Figura 54 muestra los valores registrados para la radiación solar en la estación Chimitá.

Figura 54. Radiación solar. Estación Chimitá

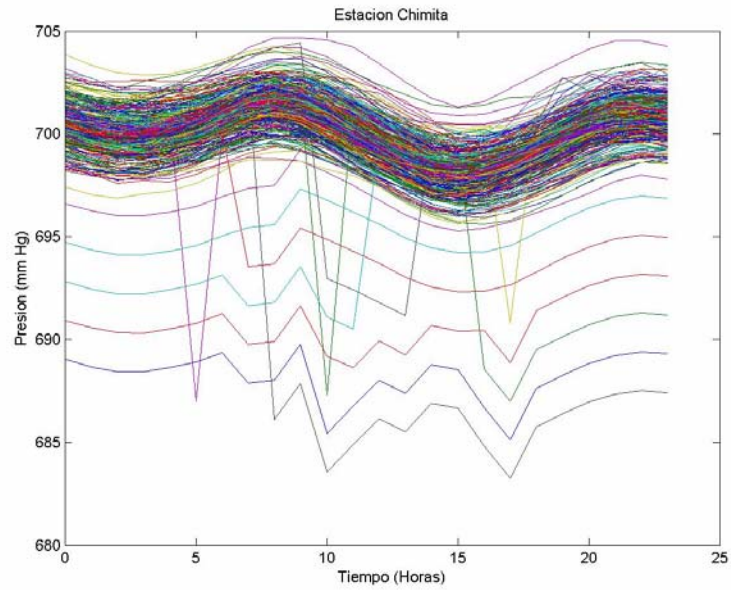


Fuente: Autores

4.2.2 Presión Atmosférica. La Figura 55 muestra que la presión atmosférica en la estación Chimitá es mucho más constante, manteniéndose alrededor de los 700 mm Hg. Este comportamiento se debe a que en esta zona se presentan menos lluvias que en la zona de la estación centro. Los valores más bajos se deben a los días lluviosos.

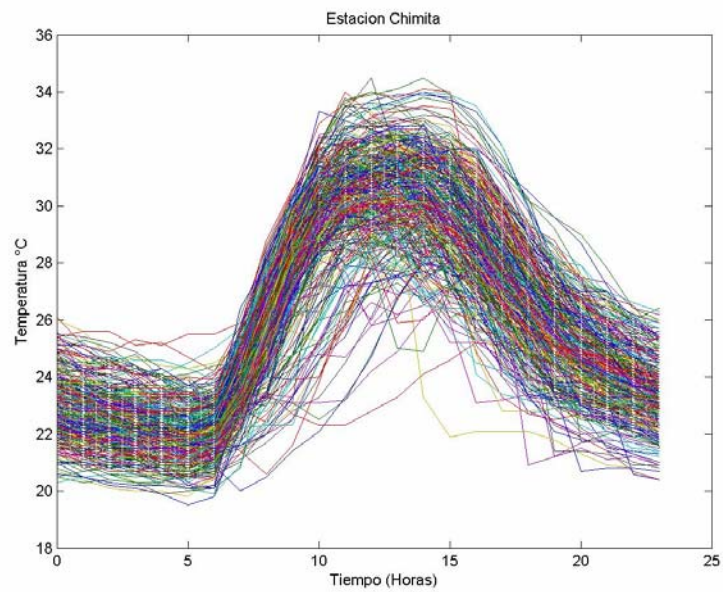
4.2.3 Temperatura. Debido a que en esta zona llueve poco y se encuentra a menor altura sobre el nivel del mar, los valores de temperatura registrados son mucho más altos. Como se puede ver en la Figura 56 las temperaturas más bajas registradas hacia las 5 a.m. varían entre los 20 y los 24 °C, y hacia las 12 m, hora en la que se registran las mayores temperaturas, éstas varían entre los 28 y los 34 °C.

Figura 55. Presión atmosférica. Estación Chimitá



Fuente: Autores

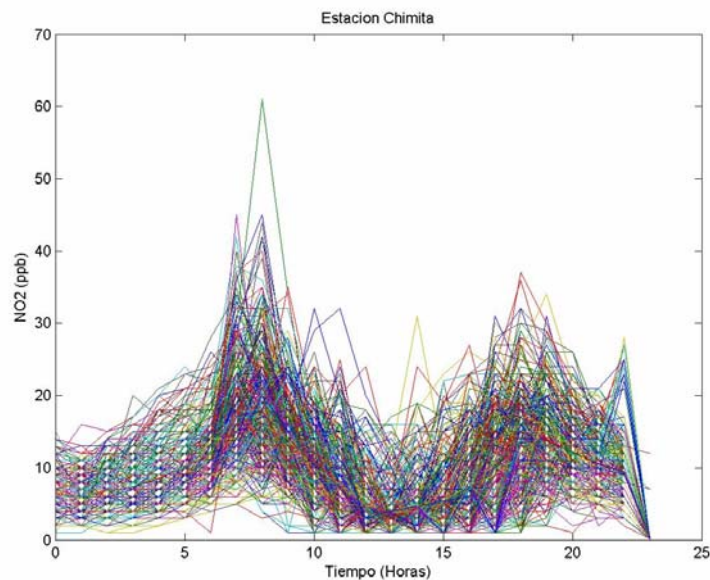
Figura 56. Temperatura. Estación Chimitá



Fuente: Autores

4.2.4 Gases contaminantes: Óxidos de Nitrógeno (NO₂, NO_x y NO), Dióxido de azufre (SO₂), y ozono (O₃). En la estación Chimitá, los óxidos de nitrógeno y el dióxido de azufre presentan una tendencia más constante en el transcurso de los 365 días del año 2003. Este comportamiento se debe a que las condiciones climáticas son más constantes, tal y como lo muestran las gráficas de presión atmosférica, temperatura y radiación solar. En este sector se presentan dos picos de concentración para los óxidos de nitrógeno y el dióxido de azufre, el primero y más alto hacia las 5 a.m. para el NO y el NO_x y hacia las 7:30 a.m. para el NO₂ y el SO₂. El segundo pico se alcanza pasadas las 6 p.m. (Ver Figuras 57, 58, 59 y 60). Estos picos de deben a que a estas horas hay mayor circulación de autos y a que estos gases reaccionan con los rayos solares para la formación de ozono, tal y como se ve en la figura 61, que muestra cómo a partir de las 7:30 a.m. la concentración de ozono comienza a aumentar a medida que la concentración de los óxidos de nitrógeno y del dióxido de azufre disminuyen alcanzando normalmente su mayor valor hacia las 12 m, hora en la que la concentraciones de NO, NO₂, NO_x y SO₂ alcanzan su valor más bajo.

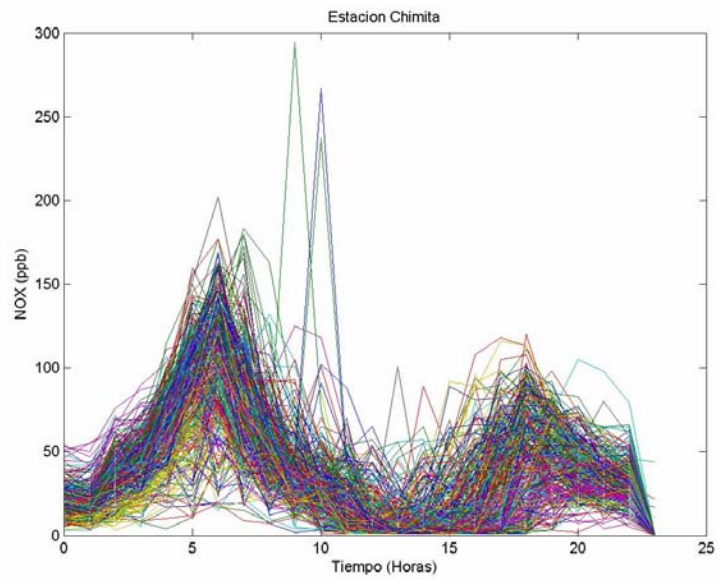
Figura 57. Concentración de NO₂. Estación Chimitá



Fuente: Autores

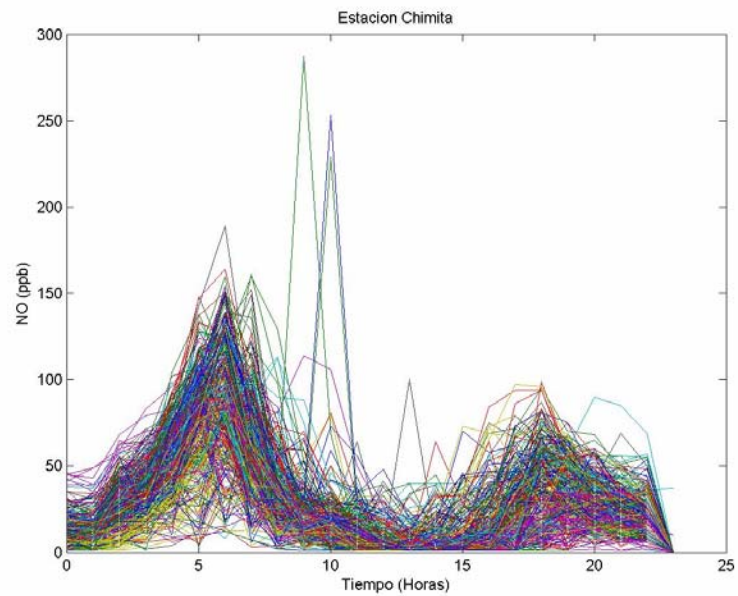
4.2.5 Monóxido de carbono. La Figura 62 muestra la concentración de CO en la estación Chimitá. De esta figura se puede determinar que las hora de mayor tráfico en la zona son las 5 a.m. y las 7 p.m., y en el resto del día el flujo vehicular es mucho menor.

Figura 58. Concentración de NO_x. Estación Chimitá



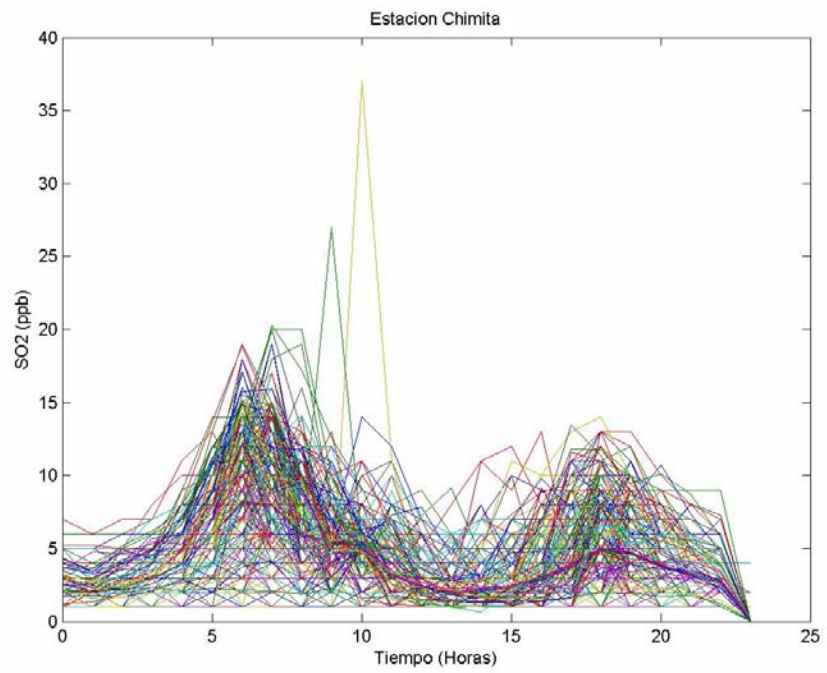
Fuente: Autores

Figura 59. Concentración de NO. Estación Chimitá



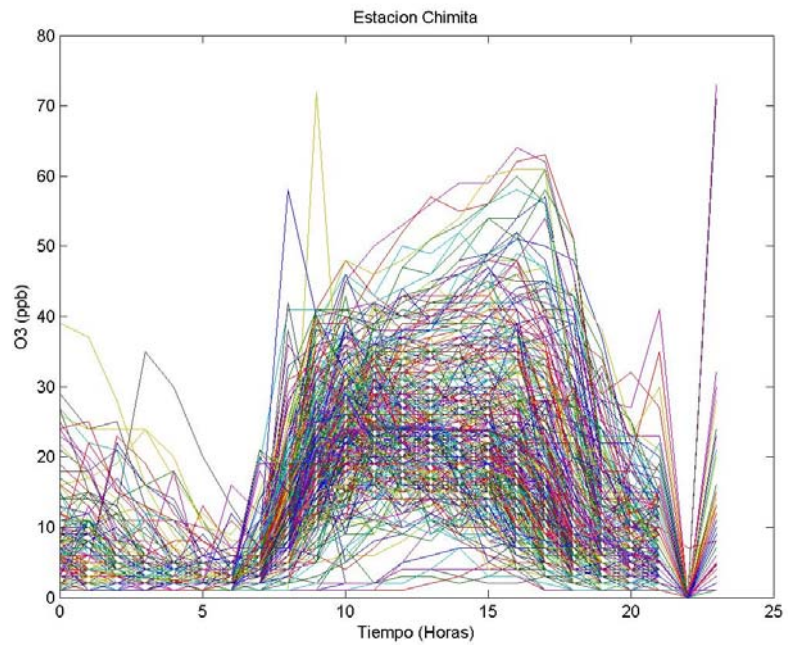
Fuente: Autores

Figura 60. Concentración de SO₂. Estación Chimitá



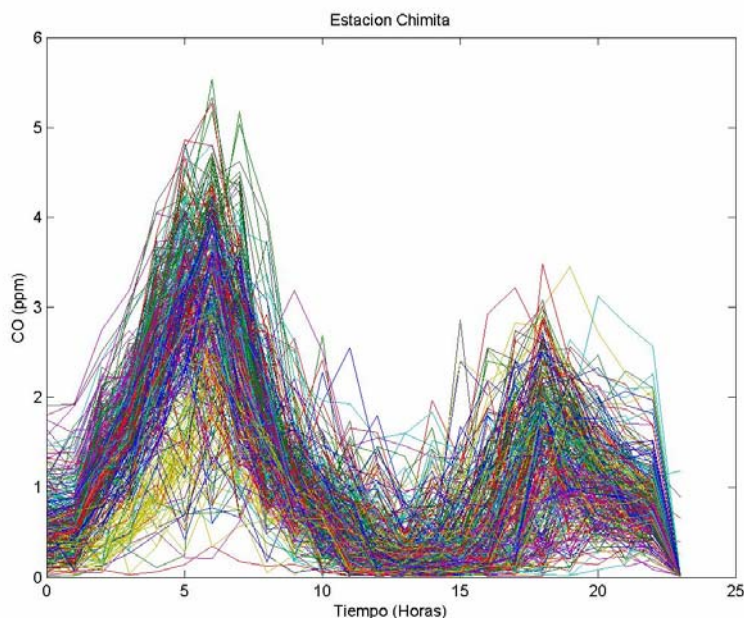
Fuente: Autores

Figura 61. Concentración de O₃. Estación Chimitá



Fuente: Autores

Figura 62. Concentración de CO. Estación Chimitá



Fuente: Autores

4.3 MODELOS DE PREDICCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES

Gracias a la cantidad de información que se obtuvo para los diferentes contaminantes y los diferentes factores climáticos, se establecieron modelos que permitan predecir los valores radiación, temperatura, presión y concentración de contaminantes en un día promedio. Los modelos obtenidos son:

4.3.1 Estación Centro. La estación centro reportó datos de concentración de contaminantes para NO_2 , NO_x , NO , SO_2 , CO , O_3 , PM_{10} y factores meteorológicos como radiación solar, presión atmosférica y temperatura. Para modelar el día promedio en la zona centro, se tomó el promedio hora de todos los datos obtenidos en el año junto con la desviación estándar. De esta manera se podrá predecir el probable valor de un determinado contaminante o factor climático dentro de un umbral de confianza determinado.

Los modelos se obtuvieron utilizando la función POLIFIT incluida en Matlab 6.0®. Los gráficos siguientes muestran la función encontrada dentro del rango de confiabilidad.

Tabla 22. Información utilizada para la generación de los modelos matemáticos. Estación centro

| Hora | NO ₂ | | | NO _x | | | NO | | |
|------|-----------------|---------------------|-----------------------|-----------------|---------------------|-----------------------|----------------|---------------------|-----------------------|
| | Promedio anual | Desviación Estándar | Desviación / Promedio | Promedio anual | Desviación Estándar | Desviación / Promedio | Promedio anual | Desviación Estándar | Desviación / Promedio |
| 0 | 14,27 | 6,21 | 0,44 | 26,26 | 2,50 | 0,10 | 17,13 | 1,59 | 0,09 |
| 1 | 12,93 | 5,62 | 0,43 | 23,28 | 2,13 | 0,09 | 14,89 | 1,27 | 0,09 |
| 2 | 12,25 | 5,79 | 0,47 | 22,57 | 2,03 | 0,09 | 14,69 | 1,28 | 0,09 |
| 3 | 11,63 | 5,00 | 0,43 | 22,42 | 1,96 | 0,09 | 14,30 | 1,20 | 0,08 |
| 4 | 12,26 | 4,30 | 0,35 | 27,07 | 2,03 | 0,07 | 14,68 | 1,14 | 0,08 |
| 5 | 17,40 | 5,98 | 0,34 | 51,50 | 4,40 | 0,09 | 25,86 | 2,86 | 0,11 |
| 6 | 24,95 | 8,66 | 0,35 | 90,28 | 9,73 | 0,11 | 39,81 | 5,43 | 0,14 |
| 7 | 31,02 | 9,95 | 0,32 | 99,26 | 12,01 | 0,12 | 41,67 | 5,90 | 0,14 |
| 8 | 33,74 | 10,85 | 0,32 | 87,06 | 11,52 | 0,13 | 40,10 | 7,29 | 0,18 |
| 9 | 32,34 | 11,76 | 0,36 | 73,06 | 10,10 | 0,14 | 33,03 | 5,71 | 0,17 |
| 10 | 32,55 | 14,42 | 0,44 | 76,14 | 11,28 | 0,15 | 46,62 | 13,16 | 0,28 |
| 11 | 32,58 | 14,86 | 0,46 | 81,65 | 11,44 | 0,14 | 53,55 | 8,20 | 0,15 |
| 12 | 31,42 | 15,46 | 0,49 | 83,94 | 12,04 | 0,14 | 59,06 | 9,33 | 0,16 |
| 13 | 25,57 | 13,06 | 0,51 | 67,65 | 9,70 | 0,14 | 49,36 | 7,84 | 0,16 |
| 14 | 27,99 | 13,74 | 0,49 | 76,41 | 11,57 | 0,15 | 55,80 | 15,72 | 0,28 |
| 15 | 30,67 | 14,88 | 0,49 | 81,43 | 11,88 | 0,15 | 57,92 | 11,13 | 0,19 |
| 16 | 34,05 | 15,09 | 0,44 | 89,56 | 12,65 | 0,14 | 61,66 | 9,89 | 0,16 |
| 17 | 39,46 | 15,68 | 0,40 | 104,45 | 14,50 | 0,14 | 66,52 | 10,75 | 0,16 |
| 18 | 42,27 | 15,89 | 0,38 | 112,70 | 15,49 | 0,14 | 65,16 | 10,54 | 0,16 |
| 19 | 36,90 | 13,73 | 0,37 | 98,12 | 13,11 | 0,13 | 57,45 | 9,02 | 0,16 |
| 20 | 30,54 | 11,14 | 0,36 | 76,28 | 9,51 | 0,12 | 44,33 | 6,44 | 0,15 |
| 21 | 24,83 | 8,67 | 0,35 | 59,39 | 6,73 | 0,11 | 36,12 | 4,76 | 0,13 |
| 22 | 19,59 | 7,46 | 0,38 | 43,22 | 4,11 | 0,10 | 25,77 | 2,51 | 0,10 |
| 23 | 7,59 | 6,27 | 0,83 | 13,48 | 1,16 | 0,09 | 12,02 | 1,06 | 0,09 |

Tabla 22. Información utilizada para la generación de los modelos matemáticos. Estación centro (continuación)

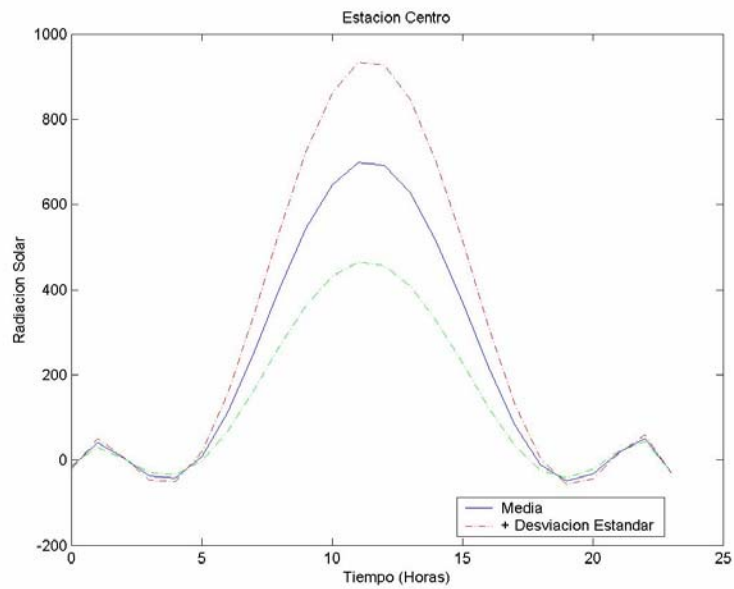
| Hora | CO | | | O3 | | | SO2 | | | PM10 | | |
|------|----------------|---------------------|-----------------------|----------------|---------------------|-----------------------|----------------|---------------------|-----------------------|----------------|---------------------|-----------------------|
| | Promedio anual | Desviación Estándar | Desviación / Promedio | Promedio anual | Desviación Estándar | Desviación / Promedio | Promedio anual | Desviación Estándar | Desviación / Promedio | Promedio anual | Desviación Estándar | Desviación / Promedio |
| 0 | 0,98 | 0,54 | 0,55 | 12,86 | 12,25 | 0,95 | 11,31 | 12,97 | 1,15 | 53,13 | 20,94 | 0,39 |
| 1 | 0,84 | 0,49 | 0,58 | 10,96 | 11,12 | 1,01 | 10,11 | 8,27 | 0,82 | 47,60 | 21,72 | 0,46 |
| 2 | 0,76 | 0,45 | 0,59 | 11,18 | 11,85 | 1,06 | 9,84 | 8,34 | 0,85 | 47,73 | 19,36 | 0,41 |
| 3 | 0,72 | 0,44 | 0,61 | 11,24 | 10,94 | 0,97 | 9,61 | 7,98 | 0,83 | 47,79 | 20,01 | 0,42 |
| 4 | 0,85 | 0,44 | 0,52 | 14,96 | 12,21 | 0,82 | 8,59 | 7,18 | 0,84 | 46,11 | 18,50 | 0,40 |
| 5 | 1,12 | 0,46 | 0,41 | 33,93 | 22,39 | 0,66 | 6,38 | 5,41 | 0,85 | 47,53 | 18,42 | 0,39 |
| 6 | 1,71 | 0,67 | 0,39 | 65,51 | 34,96 | 0,53 | 4,99 | 4,01 | 0,80 | 58,71 | 20,51 | 0,35 |
| 7 | 2,15 | 0,86 | 0,40 | 68,54 | 34,99 | 0,51 | 7,18 | 3,73 | 0,52 | 77,33 | 24,78 | 0,32 |
| 8 | 2,06 | 0,91 | 0,44 | 53,17 | 31,54 | 0,59 | 14,14 | 5,91 | 0,42 | 85,94 | 26,01 | 0,30 |
| 9 | 1,71 | 0,84 | 0,49 | 40,74 | 24,01 | 0,59 | 23,45 | 15,21 | 0,65 | 83,30 | 25,35 | 0,30 |
| 10 | 1,79 | 1,16 | 0,65 | 43,57 | 35,07 | 0,80 | 26,50 | 18,20 | 0,69 | 76,48 | 25,97 | 0,34 |
| 11 | 1,81 | 1,08 | 0,60 | 49,08 | 40,31 | 0,82 | 23,47 | 10,31 | 0,44 | 73,63 | 30,63 | 0,42 |
| 12 | 1,67 | 0,92 | 0,55 | 52,69 | 45,09 | 0,86 | 20,53 | 8,92 | 0,43 | 76,25 | 32,34 | 0,42 |
| 13 | 1,38 | 1,56 | 1,13 | 41,96 | 37,06 | 0,88 | 20,37 | 9,80 | 0,48 | 80,16 | 35,73 | 0,45 |
| 14 | 1,56 | 0,84 | 0,54 | 48,21 | 42,76 | 0,89 | 19,26 | 9,62 | 0,50 | 70,36 | 29,15 | 0,41 |
| 15 | 1,68 | 0,86 | 0,51 | 50,67 | 44,67 | 0,88 | 18,40 | 9,85 | 0,54 | 73,01 | 30,21 | 0,41 |
| 16 | 1,85 | 0,91 | 0,49 | 55,68 | 48,67 | 0,87 | 16,33 | 9,56 | 0,59 | 77,95 | 33,89 | 0,43 |
| 17 | 2,18 | 0,96 | 0,44 | 65,02 | 52,75 | 0,81 | 13,20 | 8,80 | 0,67 | 83,30 | 37,55 | 0,45 |
| 18 | 2,38 | 0,99 | 0,42 | 71,07 | 53,13 | 0,75 | 10,23 | 7,27 | 0,71 | 91,84 | 40,83 | 0,44 |
| 19 | 2,19 | 1,08 | 0,49 | 61,40 | 46,54 | 0,76 | 9,91 | 7,77 | 0,78 | 95,06 | 40,69 | 0,43 |
| 20 | 1,98 | 0,97 | 0,49 | 45,78 | 35,40 | 0,77 | 10,30 | 8,24 | 0,80 | 85,01 | 35,38 | 0,42 |
| 21 | 1,85 | 0,94 | 0,51 | 34,53 | 29,66 | 0,86 | 10,52 | 9,13 | 0,87 | 71,96 | 28,15 | 0,39 |
| 22 | 1,54 | 0,77 | 0,50 | 24,43 | 20,79 | 0,85 | 5,26 | 5,71 | 1,09 | 66,15 | 23,57 | 0,36 |
| 23 | 0,47 | 0,43 | 0,91 | 5,84 | 6,89 | 1,18 | 11,84 | 17,23 | 1,46 | 57,59 | 20,89 | 0,36 |

Tabla 22. Información utilizada para la generación de los modelos matemáticos. Estación centro (continuación)

| Hora | Temperatura °C | | | Presión | | | Radiación Solar | | |
|------|----------------|---------------------|-----------------------|----------------|---------------------|-----------------------|-----------------|---------------------|-----------------------|
| | Promedio anual | Desviación Estándar | Desviación / Promedio | Promedio anual | Desviación Estándar | Desviación / Promedio | Promedio anual | Desviación Estándar | Desviación / Promedio |
| 0 | 18,36 | 1,72 | 0,09 | 654,17 | 24,09 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | - |
| 1 | 18,08 | 1,68 | 0,09 | 654,03 | 24,08 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | - |
| 2 | 17,82 | 1,63 | 0,09 | 653,92 | 24,12 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | - |
| 3 | 17,64 | 1,59 | 0,09 | 653,86 | 24,12 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | - |
| 4 | 17,46 | 1,58 | 0,09 | 653,81 | 24,14 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | - |
| 5 | 17,32 | 1,56 | 0,09 | 653,96 | 24,09 | 0,04 | 0,89 | 1,39 | 1,56 |
| 6 | 17,66 | 1,55 | 0,09 | 654,08 | 24,13 | 0,04 | 55,45 | 32,70 | 0,59 |
| 7 | 18,82 | 1,78 | 0,09 | 654,27 | 24,15 | 0,04 | 215,21 | 93,23 | 0,43 |
| 8 | 20,13 | 2,07 | 0,10 | 653,69 | 25,28 | 0,04 | 414,94 | 149,90 | 0,36 |
| 9 | 21,60 | 2,26 | 0,10 | 653,35 | 25,91 | 0,04 | 584,76 | 188,86 | 0,32 |
| 10 | 22,80 | 2,37 | 0,10 | 653,71 | 25,31 | 0,04 | 669,19 | 204,94 | 0,31 |
| 11 | 23,23 | 2,37 | 0,10 | 653,55 | 25,28 | 0,04 | 678,97 | 205,53 | 0,30 |
| 12 | 23,24 | 2,28 | 0,10 | 653,67 | 24,75 | 0,04 | 703,58 | 247,55 | 0,35 |
| 13 | 23,09 | 2,25 | 0,10 | 653,86 | 24,17 | 0,04 | 624,17 | 223,85 | 0,36 |
| 14 | 22,88 | 2,26 | 0,10 | 653,82 | 24,12 | 0,04 | 526,11 | 194,07 | 0,37 |
| 15 | 22,43 | 2,27 | 0,10 | 653,14 | 25,31 | 0,04 | 364,98 | 159,19 | 0,44 |
| 16 | 21,77 | 2,17 | 0,10 | 653,31 | 24,77 | 0,04 | 189,14 | 93,08 | 0,49 |
| 17 | 20,87 | 2,04 | 0,10 | 653,48 | 24,72 | 0,04 | 44,05 | 30,83 | 0,70 |
| 18 | 20,13 | 1,93 | 0,10 | 653,54 | 24,73 | 0,04 | 0,14 | 0,47 | 3,36 |
| 19 | 19,78 | 1,88 | 0,10 | 653,89 | 24,63 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | - |
| 20 | 19,54 | 1,89 | 0,10 | 653,94 | 24,64 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | - |
| 21 | 19,28 | 1,86 | 0,10 | 654,00 | 24,67 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | - |
| 22 | 19,01 | 1,82 | 0,10 | 654,07 | 24,70 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | - |
| 23 | 18,64 | 1,78 | 0,10 | 654,03 | 24,67 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | - |

Fuente: Autores

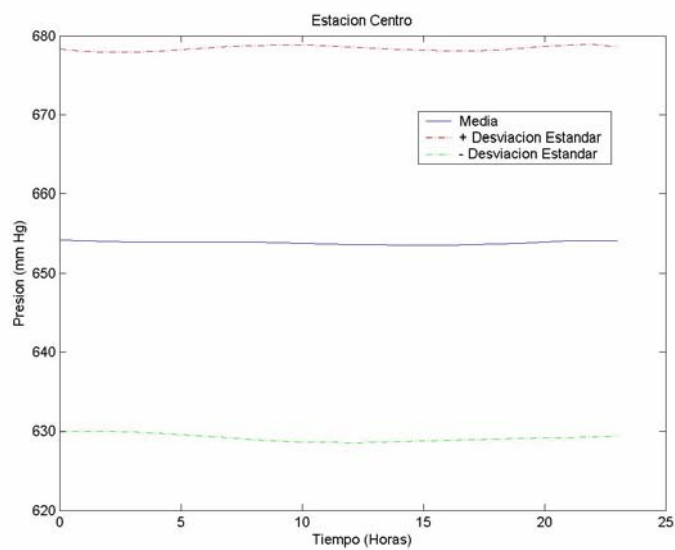
Figura 63. Comportamiento de la Radiación Solar en la Estación Centro.



Fuente: Autores

$$\text{Radiación Solar} = -14.4916 + 138.5361*t - 109.3323*t^2 + 26.8869*t^3 - 2.5501*t^4 + 0.1034*t^5 - 0.0015157*t^6$$

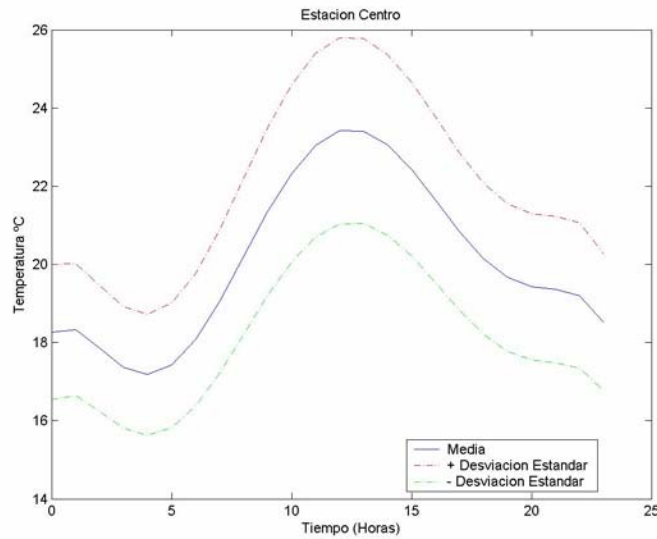
Figura 64. Comportamiento de la Presión en la Estación Centro



Fuente: Autores

$$\text{Presión} = 654.1567 - 0.18442 \cdot t + 0.048452 \cdot t^2 - 0.0049651 \cdot t^3 + 0.00012035 \cdot t^4 + 5.3914 \cdot 10^{-6} \cdot t^5 - 1.9912 \cdot 10^{-7} \cdot t^6$$

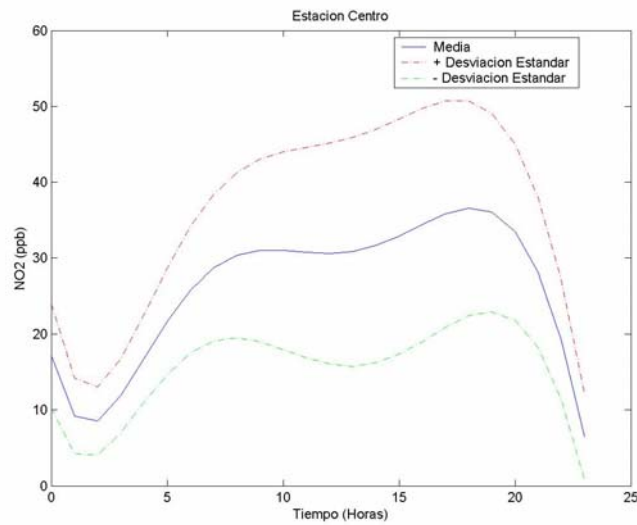
Figura 65. Comportamiento de la Temperatura en la Estación Centro



Fuente: Autores

$$\text{Temperatura} = 18.2709 + 0.59196 \cdot t - 0.68513 \cdot t^2 + 0.17052 \cdot t^3 - 0.01563 \cdot t^4 + 0.00061118 \cdot t^5 - 8.6831 \cdot 10^{-6} \cdot t^6$$

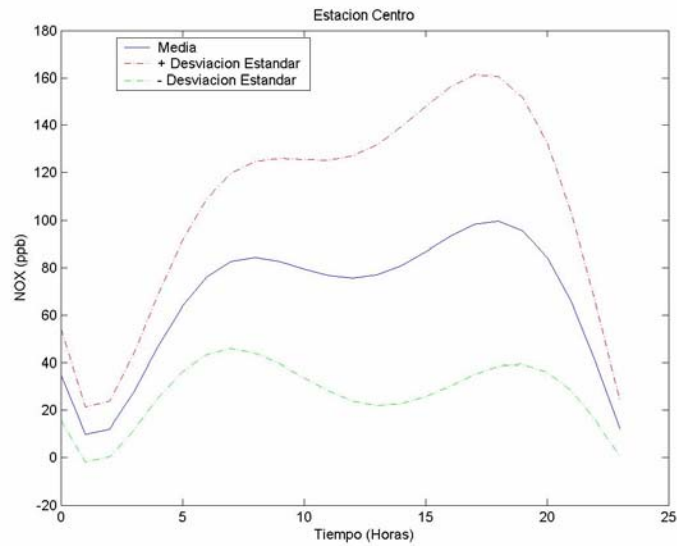
Figura 66. Variación de la concentración de NO₂. Estación Centro



Fuente: Autores

$$\text{NO}_2 = 17.2178 - 13.1245*t + 5.9333*t^2 - 0.88119*t^3 + 0.060042*t^4 - 0.0018971*t^5 + 2.2173E-5*t^6$$

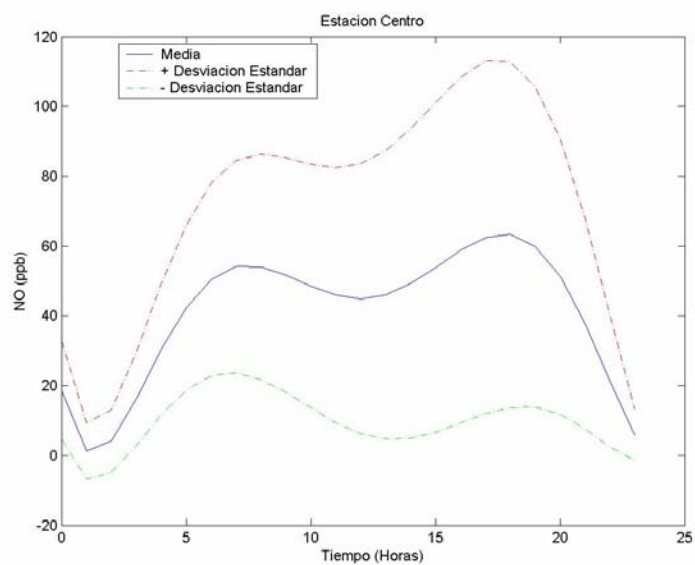
Figura 67. Variación de la concentración de NO_x. Estación Centro



Fuente: Autores

$$\text{NO}_x = 35.1193 - 45.3208*t + 23.6183*t^2 - 3.9041*t^3 + 0.29234*t^4 - 0.010159*t^5 + 0.00013245*t^6$$

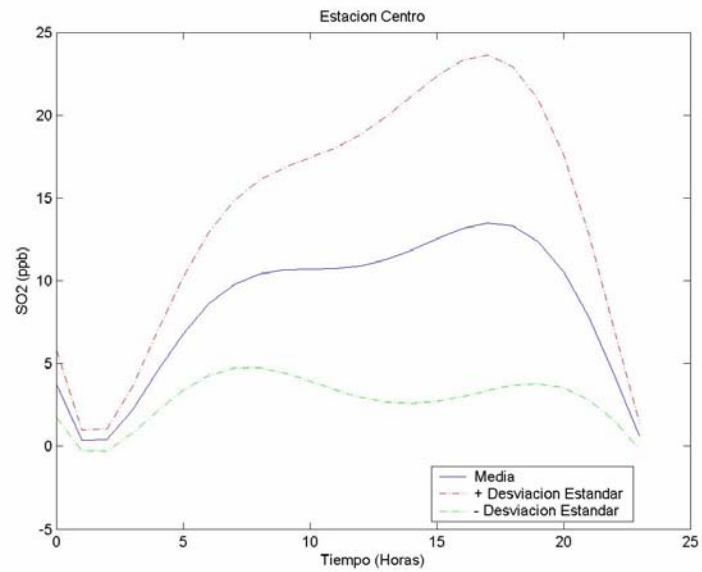
Figura 68. Variación de la concentración de NO. Estación Centro



Fuente: Autores

$$NO=18.3769-30.6658*t+16.7636*t^2-2.8489*t^3+0.21779*t^4-0.0077095*t^5+0.00010242*t^6$$

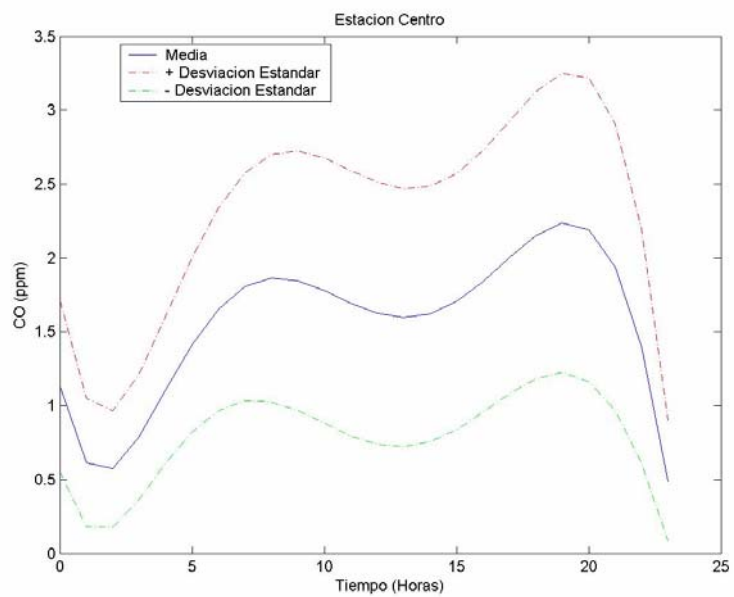
Figura 69. Variación de la concentración de SO₂. Estación Centro



Fuente: Autores

$$SO_2=3.7939-5.8953*t+2.9001*t^2-0.46379*t^3+0.034341*t^4-0.0011945*t^5+1.5665E-5*t^6$$

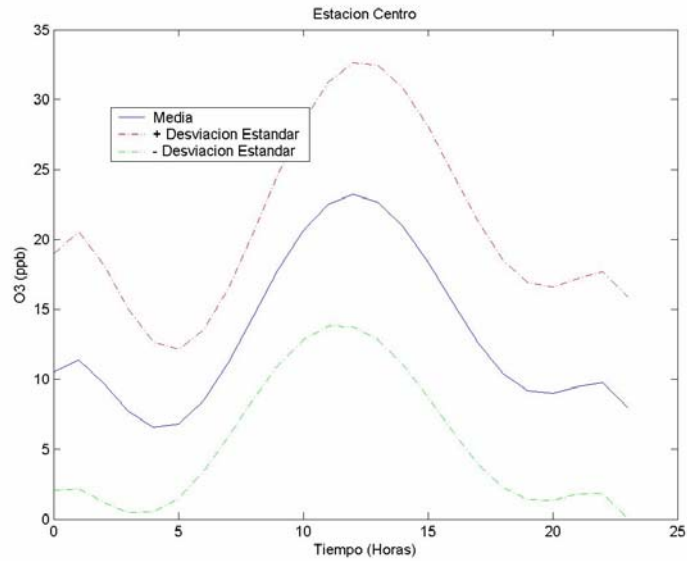
Figura 70. Variación de la concentración de CO. Estación Centro



Fuente: Autores

$$CO=1.1358-0.85586*t+0.38836*t^2-0.057549*t^3+0.0038047*t^4-0.00011346*t^5+1.2116E-6*t^6$$

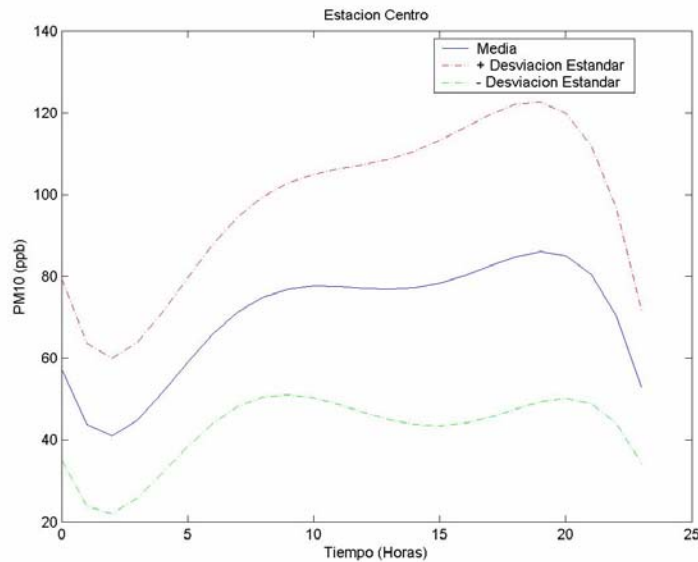
Figura 71. Variación de la concentración de O₃. Estación Centro



Fuente: Autores

$$O_3=10.5043+3.0988*t-2.8359*t^2+0.65532*t^3-0.058992*t^4+0.0023009*t^5-3.2747E-5*t^6$$

Figura 72. Variación de la concentración de PM₁₀. Estación Centro.



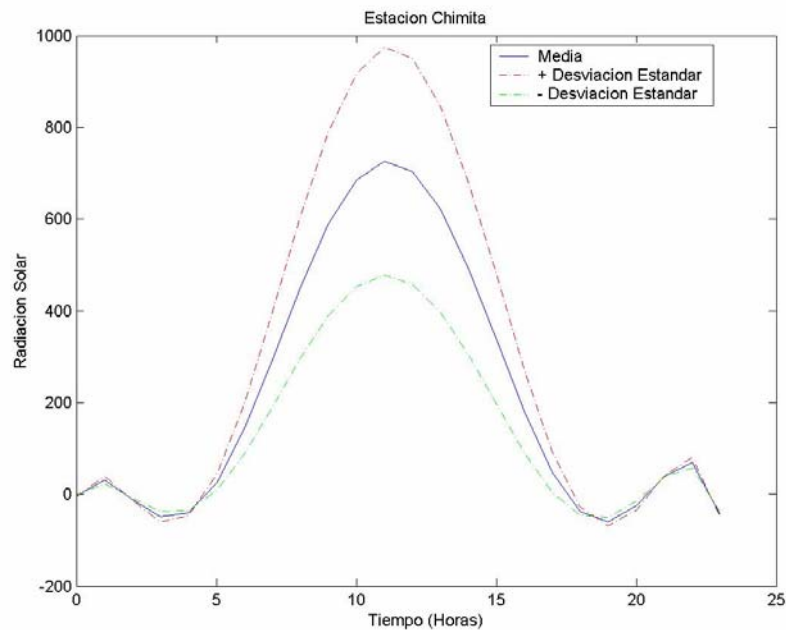
Fuente: Autores

$$PM_{10}=57.3744-20.8541*t +8.3084*t^2 -1.104*t^3 +0.066678*t^4 -0.0018223*t^5 +1.7446E-5*t^6$$

4.3.2 Estación Chimitá. La estación Chimitá reportó datos de concentración de contaminantes para NO₂, NO_x, NO, SO₂, CO, O₃, PM₁₀, radiación solar, presión atmosférica y temperatura. El modelamiento se hizo igual que para la estación centro. La Tabla 23 muestra la información utilizada para generar los modelos.

Con esa información se obtuvieron los siguientes modelos:

Figura 73. Comportamiento de la Radiación Solar. Estación Chimitá



Fuente: Autores

$$\text{Radiación Solar}=-3.6363+112.3589*t -101.2894*t^2 +26.4504*t^3 -2.5861*t^4 +0.10697*t^5 -0.001592*t^6$$

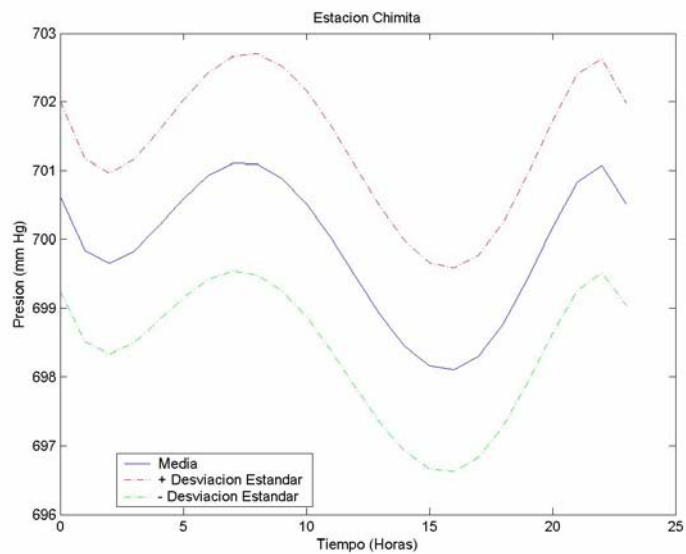
Tabla 23. Información utilizada para la generación de los modelos matemáticos. Estación Chimitá

| Hora | NO ₂ | | | NO _x | | | NO | | |
|------|-----------------|---------------------|-----------------------|-----------------|---------------------|-----------------------|----------------|---------------------|-----------------------|
| | Promedio anual | Desviación Estándar | Desviación / Promedio | Promedio anual | Desviación Estándar | Desviación / Promedio | Promedio anual | Desviación Estándar | Desviación / Promedio |
| 0 | 6,59 | 2,51 | 0,38 | 19,69 | 8,55 | 0,43 | 12,88 | 8,30 | 0,64 |
| 1 | 6,07 | 2,34 | 0,39 | 18,95 | 8,37 | 0,44 | 12,70 | 8,15 | 0,64 |
| 2 | 6,86 | 2,70 | 0,39 | 33,94 | 13,92 | 0,41 | 26,86 | 13,75 | 0,51 |
| 3 | 7,49 | 3,27 | 0,44 | 43,30 | 15,19 | 0,35 | 35,53 | 15,20 | 0,43 |
| 4 | 8,68 | 3,67 | 0,42 | 62,03 | 20,24 | 0,33 | 53,17 | 19,93 | 0,37 |
| 5 | 10,28 | 3,91 | 0,38 | 86,76 | 28,77 | 0,33 | 76,20 | 28,53 | 0,37 |
| 6 | 12,06 | 4,18 | 0,35 | 99,04 | 33,38 | 0,34 | 86,67 | 32,54 | 0,38 |
| 7 | 17,91 | 6,81 | 0,38 | 77,21 | 30,58 | 0,40 | 59,00 | 28,21 | 0,48 |
| 8 | 18,09 | 7,62 | 0,42 | 51,32 | 21,74 | 0,42 | 32,93 | 18,70 | 0,57 |
| 9 | 14,17 | 5,60 | 0,40 | 36,51 | 21,86 | 0,60 | 22,09 | 19,50 | 0,88 |
| 10 | 10,87 | 5,17 | 0,48 | 28,61 | 22,98 | 0,80 | 17,64 | 20,56 | 1,17 |
| 11 | 7,83 | 5,13 | 0,66 | 18,71 | 14,46 | 0,77 | 11,51 | 9,37 | 0,81 |
| 12 | 4,98 | 3,85 | 0,77 | 11,26 | 11,74 | 1,04 | 7,18 | 7,70 | 1,07 |
| 13 | 4,00 | 3,05 | 0,76 | 8,62 | 10,46 | 1,21 | 5,61 | 7,79 | 1,39 |
| 14 | 4,69 | 3,93 | 0,84 | 10,59 | 12,28 | 1,16 | 6,97 | 8,20 | 1,18 |
| 15 | 5,50 | 4,50 | 0,82 | 13,93 | 15,32 | 1,10 | 9,15 | 10,73 | 1,17 |
| 16 | 7,55 | 5,65 | 0,75 | 20,85 | 20,97 | 1,01 | 14,36 | 15,18 | 1,06 |
| 17 | 10,73 | 6,80 | 0,63 | 33,17 | 26,03 | 0,78 | 24,03 | 19,12 | 0,80 |
| 18 | 13,79 | 6,45 | 0,47 | 48,27 | 28,50 | 0,59 | 35,94 | 22,27 | 0,62 |
| 19 | 14,06 | 5,27 | 0,37 | 48,52 | 20,68 | 0,43 | 34,45 | 17,44 | 0,51 |
| 20 | 12,25 | 4,01 | 0,33 | 41,45 | 14,36 | 0,35 | 28,97 | 13,14 | 0,45 |
| 21 | 10,72 | 3,53 | 0,33 | 35,54 | 11,79 | 0,33 | 24,52 | 11,17 | 0,46 |
| 22 | 9,56 | 4,07 | 0,43 | 29,95 | 11,05 | 0,37 | 20,18 | 10,49 | 0,52 |
| 23 | 0,24 | 0,88 | 3,67 | 0,69 | 2,74 | 3,97 | 0,45 | 2,06 | 4,58 |

Tabla 23. Información utilizada para la generación de los modelos matemáticos. Estación Chimitá (Continuación)

| Hora | SO2 | | | CO | | | O3 | | | Temperatura °C | | |
|------|----------------|---------------------|-----------------------|----------------|---------------------|-----------------------|----------------|---------------------|-----------------------|----------------|---------------------|-----------------------|
| | Promedio anual | Desviación Estándar | Desviación / Promedio | Promedio anual | Desviación Estándar | Desviación / Promedio | Promedio anual | Desviación Estándar | Desviación / Promedio | Promedio anual | Desviación Estándar | Desviación / Promedio |
| 0 | 2,17 | 1,07 | 0,49 | 0,54 | 0,34 | 0,63 | 6,06 | 18,58 | 3,07 | 22,98 | 1,08 | 0,05 |
| 1 | 2,12 | 1,00 | 0,47 | 0,55 | 0,35 | 0,64 | 4,02 | 4,78 | 1,19 | 22,66 | 1,02 | 0,05 |
| 2 | 2,49 | 1,19 | 0,48 | 1,13 | 0,56 | 0,50 | 3,41 | 4,10 | 1,20 | 22,48 | 0,99 | 0,04 |
| 3 | 3,01 | 1,43 | 0,48 | 1,51 | 0,65 | 0,43 | 2,88 | 3,61 | 1,25 | 22,30 | 0,98 | 0,04 |
| 4 | 4,02 | 1,88 | 0,47 | 2,16 | 0,88 | 0,41 | 2,54 | 2,88 | 1,13 | 22,12 | 0,97 | 0,04 |
| 5 | 6,09 | 2,91 | 0,48 | 2,70 | 1,08 | 0,40 | 2,24 | 1,89 | 0,84 | 21,97 | 0,96 | 0,04 |
| 6 | 8,32 | 4,12 | 0,50 | 2,87 | 1,06 | 0,37 | 2,31 | 1,58 | 0,68 | 22,19 | 0,91 | 0,04 |
| 7 | 8,15 | 4,10 | 0,50 | 2,31 | 0,93 | 0,40 | 4,77 | 3,22 | 0,68 | 23,67 | 1,04 | 0,04 |
| 8 | 6,21 | 3,20 | 0,52 | 1,47 | 0,66 | 0,45 | 12,78 | 13,19 | 1,03 | 25,71 | 1,44 | 0,06 |
| 9 | 5,52 | 11,05 | 2,00 | 1,01 | 0,92 | 0,91 | 21,37 | 20,26 | 0,95 | 27,78 | 1,75 | 0,06 |
| 10 | 5,56 | 15,56 | 2,80 | 0,77 | 1,15 | 1,49 | 23,61 | 8,38 | 0,35 | 29,36 | 1,90 | 0,06 |
| 11 | 3,62 | 4,80 | 1,33 | 0,49 | 0,39 | 0,80 | 24,56 | 8,37 | 0,34 | 30,17 | 1,83 | 0,06 |
| 12 | 2,49 | 1,52 | 0,61 | 0,33 | 0,35 | 1,06 | 24,47 | 8,77 | 0,36 | 30,46 | 1,68 | 0,06 |
| 13 | 2,08 | 1,28 | 0,62 | 0,25 | 0,27 | 1,08 | 24,33 | 9,10 | 0,37 | 30,50 | 1,63 | 0,05 |
| 14 | 2,23 | 1,49 | 0,67 | 0,31 | 0,34 | 1,10 | 24,07 | 9,90 | 0,41 | 30,29 | 1,73 | 0,06 |
| 15 | 2,48 | 1,68 | 0,68 | 0,40 | 0,41 | 1,03 | 24,06 | 10,94 | 0,45 | 29,81 | 1,78 | 0,06 |
| 16 | 3,09 | 2,13 | 0,69 | 0,57 | 0,56 | 0,98 | 22,37 | 12,13 | 0,54 | 28,93 | 1,83 | 0,06 |
| 17 | 3,93 | 2,62 | 0,67 | 0,90 | 0,72 | 0,80 | 18,79 | 12,70 | 0,68 | 27,71 | 1,77 | 0,06 |
| 18 | 5,07 | 3,11 | 0,61 | 1,31 | 0,81 | 0,62 | 13,06 | 11,11 | 0,85 | 26,51 | 1,68 | 0,06 |
| 19 | 4,78 | 2,63 | 0,55 | 1,28 | 0,61 | 0,48 | 8,33 | 7,69 | 0,92 | 25,51 | 1,56 | 0,06 |
| 20 | 3,90 | 1,99 | 0,51 | 1,08 | 0,47 | 0,44 | 6,32 | 5,82 | 0,92 | 24,75 | 1,41 | 0,06 |
| 21 | 3,25 | 1,64 | 0,50 | 0,92 | 0,40 | 0,43 | 5,27 | 5,42 | 1,03 | 24,19 | 1,28 | 0,05 |
| 22 | 2,67 | 1,36 | 0,51 | 0,77 | 0,40 | 0,52 | 0,10 | 0,40 | 4,00 | 23,72 | 1,19 | 0,05 |
| 23 | 0,07 | 0,26 | 3,71 | 0,01 | 0,09 | 9,00 | 4,72 | 7,89 | 1,67 | 23,31 | 1,15 | 0,05 |

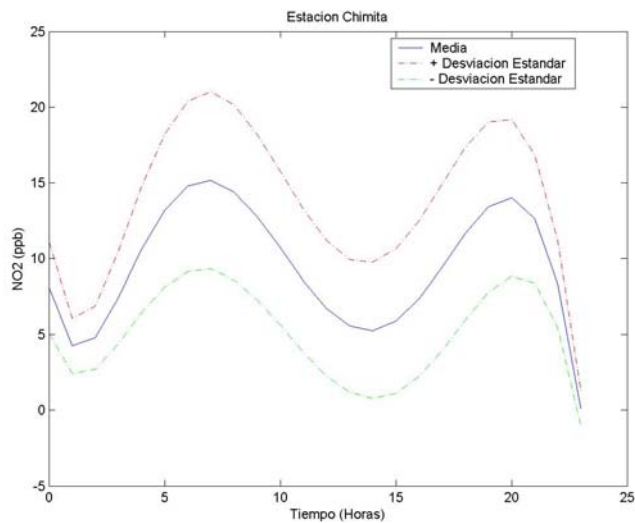
Figura 74. Comportamiento de la Presión. Estación Chimitá



Fuente: Autores

$$\text{Presion} = 700.6303 - 1.1672 * t + 0.42369 * t^2 - 0.045306 * t^3 + 0.0012696 * t^4 + 3.2012E-5 * t^5 - 1.4016E-6 * t^6$$

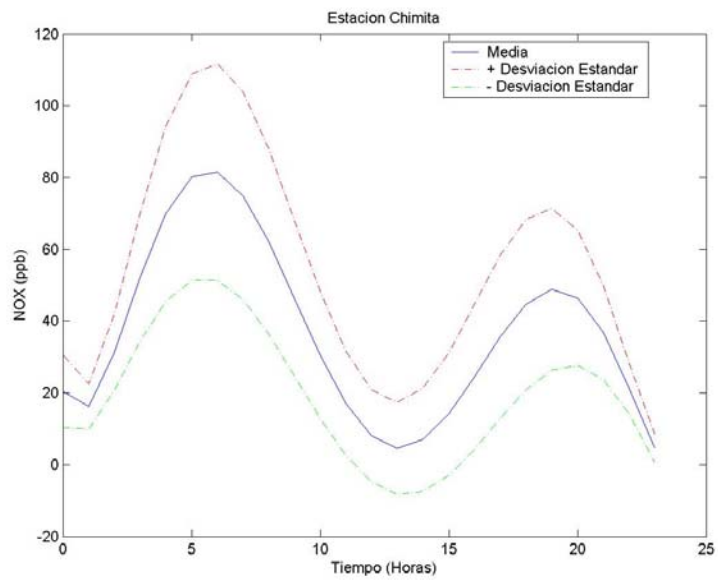
Figura 75. Variación de la concentración de NO₂. Estación Chimitá



Fuente: Autores

$$\text{NO}_2 = 8.1208 - 7.053 * t + 3.7459 * t^2 - 0.60388 * t^3 + 0.041419 * t^4 - 0.0012528 * t^5 + 1.3462E-5 * t^6$$

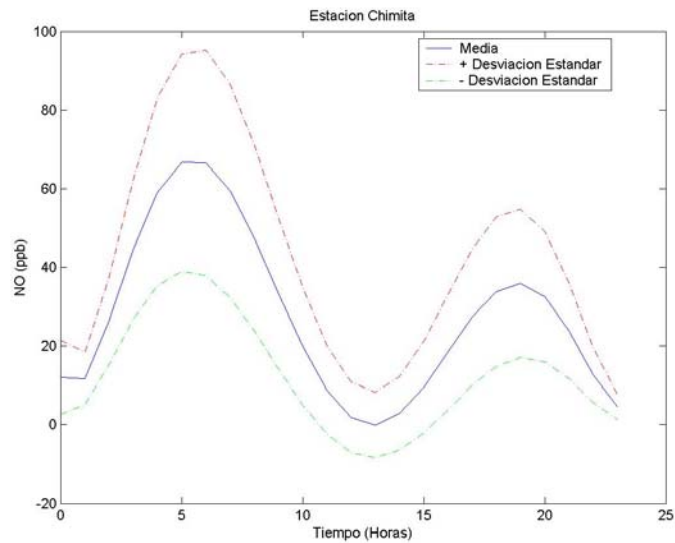
Figura 76. Variación de la concentración de NO_x. Estación Chimitá.



Fuente: Autores

$$NO_x = 20.3937 - 20.0399*t + 19.477*t^2 - 3.9641*t^3 + 0.32443*t^4 - 0.011738*t^5 + 0.00015626*t^6$$

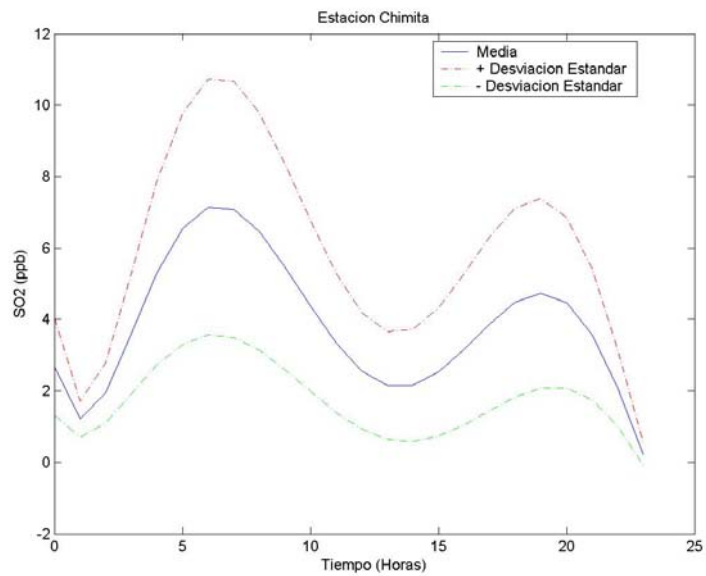
Figura 77. Variación de la concentración de NO. Estación Chimitá



Fuente: Autores

$$NO = 12.009 - 12.9117*t + 15.7529*t^2 - 3.379*t^3 + 0.28586*t^4 - 0.010638*t^5 + 0.00014554*t^6$$

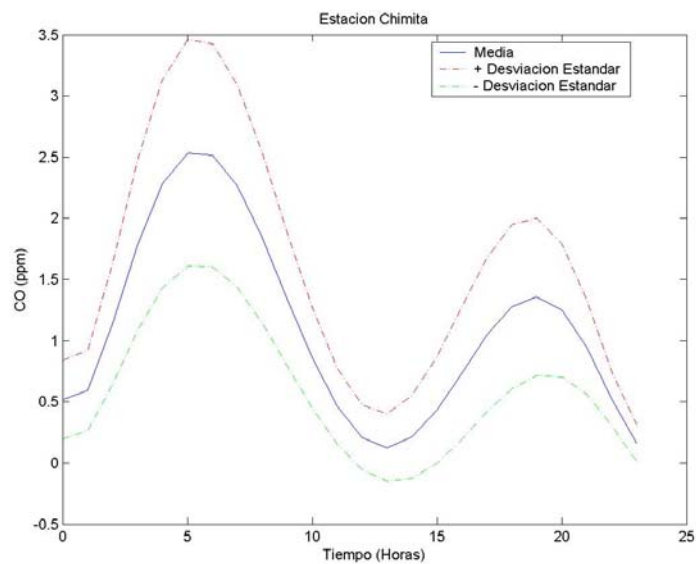
Figura 78. Variación de la concentración de SO₂. Estación Chimitá



Fuente: Autores

$$SO_2 = 2.6881 - 3.139*t + 1.9989*t^2 - 0.35821*t^3 + 0.027398*t^4 - 0.00094766*t^5 + 1.2179E-5*t^6$$

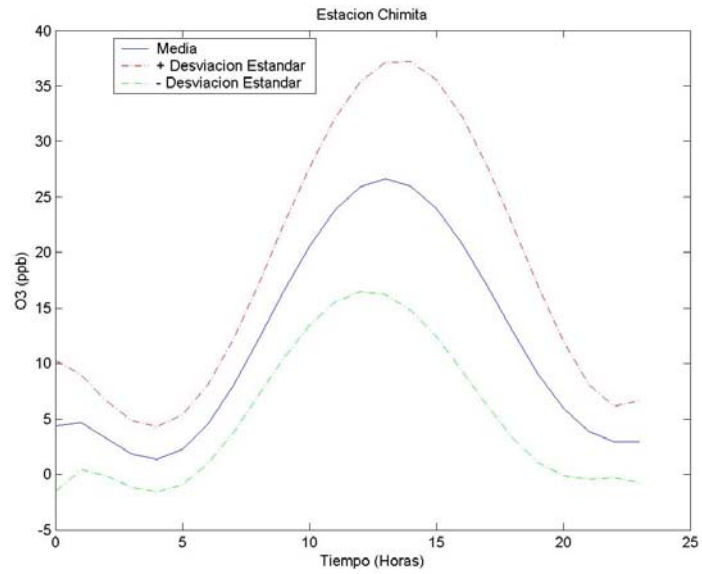
Figura 79. Variación de la concentración de CO. Estación Chimitá



Fuente: Autores

$$CO = 0.51737 - 0.32979*t + 0.50796*t^2 - 0.11134*t^3 + 0.0094476*t^4 - 0.00035072*t^5 + 4.7736E-6*t^6$$

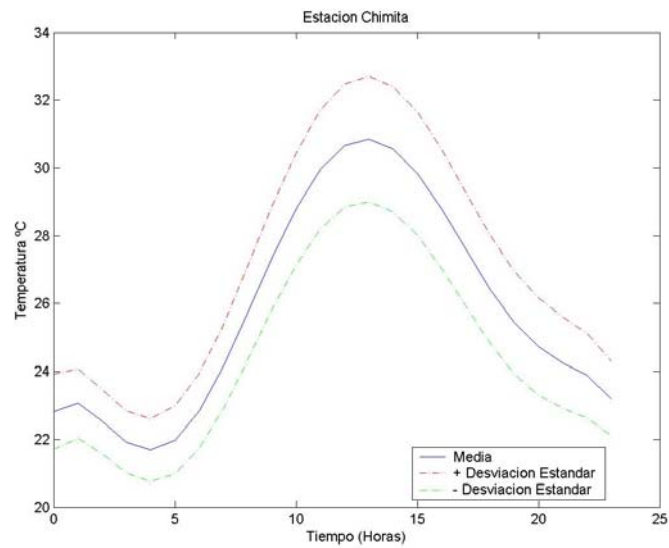
Figura 80. Variación de la concentración de O₃. Estación Chimitá



Fuente: Autores

$$O_3 = 4.3725 + 1.911 \cdot t - 2.0668 \cdot t^2 + 0.49882 \cdot t^3 - 0.043069 \cdot t^4 + 0.001559 \cdot t^5 - 2.0286 \cdot 10^{-5} \cdot t^6$$

Figura 81. Comportamiento de la Temperatura. Estación Chimitá



Fuente: Autores

$$\text{Temperatura} = 22.8195 + 0.97212 * t - 0.92941 * t^2 + 0.22066 * t^3 - 0.019493 * t^4 + 0.00073587 * t^5 - 1.0109E-5 * t^6$$

4.3.3 Estación Ciudadela. En esta estación se obtuvieron datos para el CO y el O₃. La Tabla 24 muestra la información utilizada para generar los modelos para esta estación.

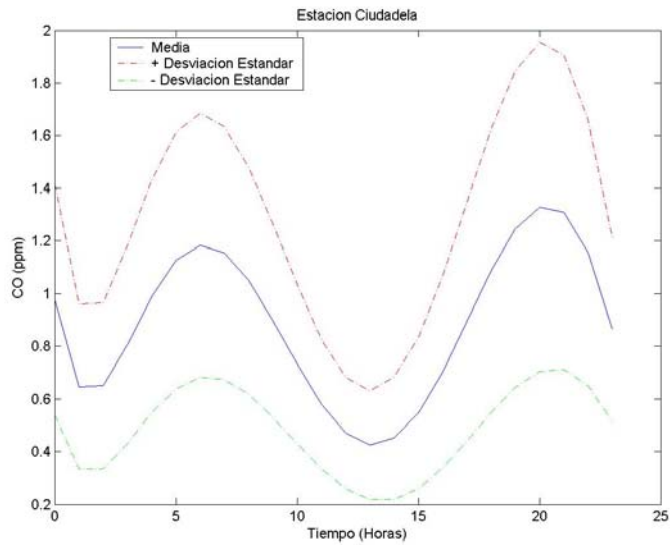
Tabla 24. Información utilizada para la generación de los modelos matemáticos. Estación Ciudadela

| Hora | CO | | | O3 | | |
|------|----------------|---------------------|-----------------------|----------------|---------------------|-----------------------|
| | Promedio anual | Desviación Estándar | Desviación / Promedio | Promedio anual | Desviación Estándar | Desviación / Promedio |
| 0 | 0,89 | 0,41 | 0,46 | 9,31 | 10,36 | 1,11 |
| 1 | 0,80 | 0,38 | 0,48 | 8,99 | 9,72 | 1,08 |
| 2 | 0,72 | 0,36 | 0,50 | 8,85 | 9,60 | 1,08 |
| 3 | 0,70 | 0,36 | 0,51 | 8,19 | 8,99 | 1,10 |
| 4 | 0,74 | 0,35 | 0,47 | 7,22 | 8,20 | 1,14 |
| 5 | 0,99 | 0,37 | 0,37 | 4,97 | 6,27 | 1,26 |
| 6 | 1,52 | 0,74 | 0,49 | 3,95 | 4,52 | 1,14 |
| 7 | 1,36 | 0,55 | 0,40 | 8,00 | 4,56 | 0,57 |
| 8 | 1,03 | 0,38 | 0,37 | 20,15 | 7,69 | 0,38 |
| 9 | 0,73 | 0,32 | 0,44 | 33,83 | 10,79 | 0,32 |
| 10 | 0,55 | 0,26 | 0,47 | 39,07 | 11,13 | 0,28 |
| 11 | 0,49 | 0,24 | 0,49 | 35,85 | 10,05 | 0,28 |
| 12 | 0,64 | 0,31 | 0,48 | 31,96 | 9,20 | 0,29 |
| 13 | 0,47 | 0,21 | 0,45 | 30,50 | 9,63 | 0,32 |
| 14 | 0,48 | 0,22 | 0,46 | 30,17 | 10,51 | 0,35 |
| 15 | 0,55 | 0,37 | 0,67 | 30,43 | 21,29 | 0,70 |
| 16 | 0,66 | 0,79 | 1,20 | 28,04 | 12,51 | 0,45 |
| 17 | 0,79 | 0,36 | 0,46 | 24,44 | 13,23 | 0,54 |
| 18 | 1,28 | 0,73 | 0,57 | 18,65 | 12,64 | 0,68 |
| 19 | 1,22 | 0,69 | 0,57 | 15,38 | 12,61 | 0,82 |
| 20 | 1,24 | 0,57 | 0,46 | 12,95 | 11,70 | 0,90 |
| 21 | 1,36 | 0,61 | 0,45 | 10,83 | 11,02 | 1,02 |
| 22 | 1,16 | 0,51 | 0,44 | 6,48 | 10,92 | 1,69 |
| 23 | 0,59 | 0,56 | 0,95 | 9,52 | 10,62 | 1,12 |

Fuente: Autores

Los modelos encontrados que permiten predecir la concentración de estos contaminantes son:

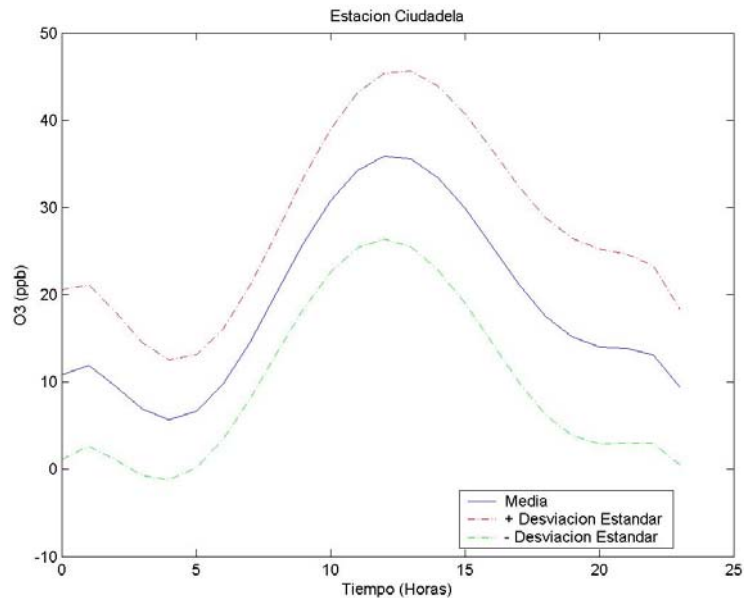
Figura 82. Variación de la concentración de CO. Estación Ciudadela



Fuente: Autores

$$CO = 0.97972 - 0.58137 * t + 0.29448 * t^2 - 0.050058 * t^3 + 0.0036931 * t^4 - 0.00012252 * t^5 + 1.4971E-6 * t^6$$

Figura 83. Variación de la concentración de O₃. Estación Ciudadela



Fuente: Autores

$$O_3 = 10.8478 + 4.1751*t - 3.9942*t^2 + 0.95107*t^3 - 0.086163*t^4 + 0.003359*t^5 - 4.7719E-5*t^6$$

4.3.4 Estación Florida. En la estación Florida se modelaron los contaminantes PM₁₀ y ozono. La Tabla 25 muestra los datos utilizados para realizar los modelos.

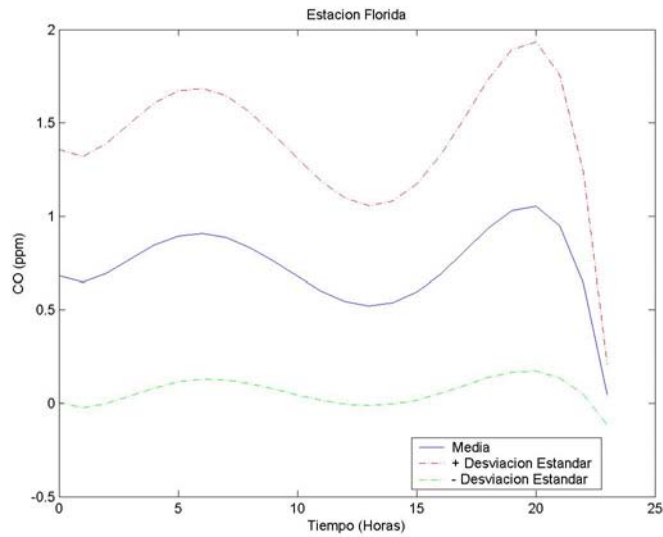
Tabla 25. Información utilizada para la generación de los modelos matemáticos. Estación Florida

| Hora | PM ₁₀ | | | CO | | |
|------|------------------|---------------------|-----------------------|----------------|---------------------|-----------------------|
| | Promedio anual | Desviación Estándar | Desviación / Promedio | Promedio anual | Desviación Estándar | Desviación / Promedio |
| 0 | 34,860 | 20,702 | 0,59 | 0,49 | 0,71 | 1,45 |
| 1 | 30,537 | 20,850 | 0,68 | 0,55 | 0,79 | 1,44 |
| 2 | 28,935 | 19,148 | 0,66 | 0,56 | 0,80 | 1,43 |
| 3 | 28,488 | 18,685 | 0,66 | 0,57 | 0,82 | 1,44 |
| 4 | 29,085 | 18,160 | 0,62 | 0,55 | 0,79 | 1,44 |
| 5 | 30,850 | 17,439 | 0,57 | 0,51 | 0,70 | 1,37 |
| 6 | 41,397 | 18,225 | 0,44 | 0,84 | 0,99 | 1,18 |
| 7 | 61,875 | 23,376 | 0,38 | 0,92 | 1,08 | 1,17 |
| 8 | 62,112 | 25,959 | 0,42 | 0,63 | 0,82 | 1,30 |
| 9 | 52,875 | 25,586 | 0,48 | 0,46 | 0,64 | 1,39 |
| 10 | 40,875 | 22,035 | 0,54 | 0,45 | 0,65 | 1,44 |
| 11 | 35,155 | 20,630 | 0,59 | 0,43 | 0,62 | 1,44 |
| 12 | 34,807 | 19,913 | 0,57 | 0,42 | 0,61 | 1,45 |
| 13 | 35,314 | 18,859 | 0,53 | 0,44 | 0,63 | 1,43 |
| 14 | 32,998 | 17,728 | 0,54 | 0,45 | 0,64 | 1,42 |
| 15 | 33,390 | 18,074 | 0,54 | 0,46 | 0,63 | 1,37 |
| 16 | 35,404 | 17,630 | 0,50 | 0,49 | 0,67 | 1,37 |
| 17 | 38,211 | 18,844 | 0,49 | 0,56 | 0,75 | 1,34 |
| 18 | 43,692 | 20,008 | 0,46 | 0,79 | 0,99 | 1,25 |
| 19 | 49,116 | 21,751 | 0,44 | 0,88 | 1,01 | 1,15 |
| 20 | 52,217 | 23,299 | 0,45 | 0,75 | 0,92 | 1,23 |
| 21 | 50,235 | 23,533 | 0,47 | 0,67 | 0,85 | 1,27 |
| 22 | 45,752 | 21,966 | 0,48 | 0,58 | 0,76 | 1,31 |
| 23 | 40,036 | 21,038 | 0,53 | 0,01 | 0,13 | 13,00 |

Fuente: Autores

Los modelos que describen el comportamiento de estos contaminantes son los siguientes:

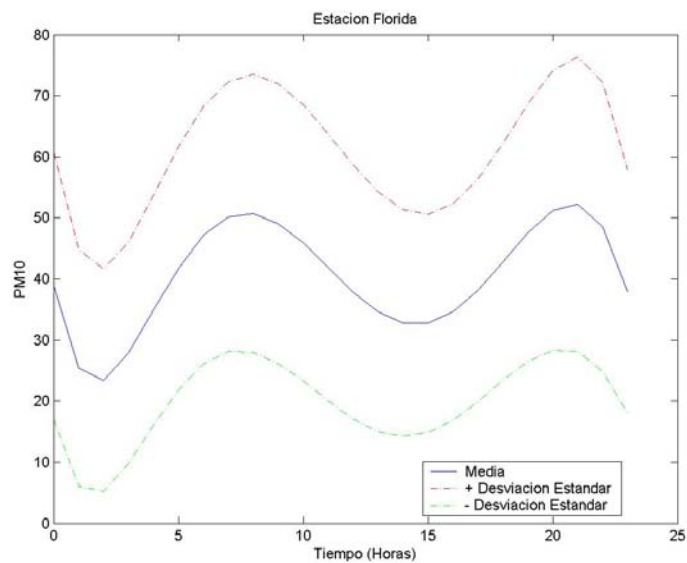
Figura 84. Variación de la concentración de CO. Estación Florida



Fuente: Autores

$$CO = 0.68185 - 0.093907 * t + 0.072118 * t^2 - 0.01259 * t^3 + 0.00081776 * t^4 - 1.9588E-5 * t^5 + 9.3141E-8 * t^6$$

Figura 85. Variación de la concentración de PM₁₀. Estación Florida



Fuente: Autores

$$PM10 = 39.0159 - 21.574 * t + 9.2092 * t^2 - 1.3113 * t^3 + 0.081649 * t^4 - 0.002254 * t^5 + 2.1866E-5 * t^6$$

CONCLUSIONES

- Se desarrolló una herramienta informática con la capacidad de realizar el procesamiento de los datos de la red de calidad del aire, que determina los diferentes índices de calidad propuestos por metodologías alternativas como el ICA, el IBUCA, el índice de calidad del aire para Chile, México y el AQI propuesto por la EPA. Además de esto, permite el análisis estadístico y comparativo de los datos y la estimación de tendencias matemáticas anuales para cada uno de los contaminantes y datos meteorológicos.
- Se estimó cierto grado de proporcionalidad entre las diferentes metodologías de cómputo para los índices de calidad del aire para los contaminantes O_3 , CO , NO_x y se observó desproporción para el PM_{10} .
- Las diferentes metodologías para el cálculo del índice de calidad del aire propuestas a nivel nacional e internacional presentan un buen grado de concordancia, de lo cual se puede inferir que la metodología de cómputo utilizada a nivel local es coherente con las propuestas internacionalmente.
- Se obtuvo una correlación matemática, utilizando la herramienta informática para ingeniería Matlab®, que permite inferir la composición atmosférica durante el día para los diferentes contaminantes monitoreados por la red de calidad de aire y con un grado de representatividad anual. Estas tendencias matemáticas se establecieron con su respectivo intervalo de confianza estadístico y los diferentes estadístico, necesarios para un buen análisis de la información.
- Es posible inferir a partir de las correlaciones matemáticas obtenidas para los diferentes contaminantes, la tendencia de las concentraciones de estos con el tiempo y evaluar el efecto de políticas ambientales dispuestas para periodos específicos de tiempo por medio de la comparación de las composiciones obtenidas por la red de calidad de aire y las composiciones dadas por el modelo.

BIBLIOGRAFÍA

AIR POLLUTION AND CHILDREN'S HEALTH. A fact sheet by Cal/EPA's Office of Environmental Health Hazard Assessment and The American Lung Association of California. November 2003.

ALBERDI JC, Díaz J, Montero JC, Mirón IJ, Pajares MS, Ribera P. Air pollution and mortality in Madrid, Spain: a time-series analysis. *Int Arch Occup Environ Health* 71: 543-549, 1998.

ARGUEDAS Gourzong, Cinthya. Análisis de las Normas de Calidad de Aire en Chile, Estados Unidos, México y la Comunidad Europea. Chile, 2002

CORPORACIÓN DE DEFENSA DE LA MESETA DE BUCARAMANGA, CDMB. Grupo de Seguimiento y Monitoreo Ambiental. Actividades de Mejoramiento de la Calidad del Aire en el Área Metropolitana de Bucaramanga. Bucaramanga. Colombia, 2003.

COHEN AJ, Anderson HR, Ostro B, Pandey KD, Kryzanowsky M, Kuenzly N, et al. Mortality impacts of Urban Air Pollution. En: Ezzat M, Lopez AD, Rodgers A, Murray CJL (editores). *Comparative Quantification of Health Risks: Global and Regional Burden of Disease Attributable to Selected Major Risk Factors*. Ginebra: Organización Mundial de la Salud, 2003.

DOCKERY DW, SCHWARTZ J. The authors reply to particulate air pollution and mortality (letter). *Epidemiology* 7: 213-214, 1996.

KÜNZLI N, Kaiser R, MEDINA S, Studnicka M, Chanel O, Filliger P, Herry M, Horak F Jr, et al. *Lancet* , 356: 795-801, 2000.

MARTÍNEZ, Alvaro. Contaminación del Aire. Especialización en Ingeniería Ambiental. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Colombia, 2002.

WARK, Kenneth. WARNER, Cecil. Contaminación del Aire, Origen y Control. Limusa Noriega Editores. México. 1998.

WORLD HEALTH ORGANITATION. Health and environment in sustainable development: 5 years after the Earth summit (press release). Available at: <http://www.who.int/archives/inf-pr-1997/en/pr97-47.html>. Accessed April 2, 2002