

# Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos por fuentes puntuales en la zona Cali-Yumbo (Colombia)\*

Mauricio Jaramillo\*\*, María Núñez Cabrera\*\*\*,  
William Ocampo Duque\*\*\*\*, Diego Darío Pérez Ruiz\*\*\*\*\*,  
Gloria Portilla\*\*\*\*\*

Grupo de Producción Más Limpia  
Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana, Cali (Colombia)

---

## Resumen

*En este trabajo se calculan las emisiones de contaminantes atmosféricos convencionales ( $COV$ ,  $MP_{10}$ ,  $CO$ ,  $NO_x$  y  $SO_x$ ) por fuentes puntuales para el año 1997 en Cali-Yumbo (Colombia). La información se obtuvo de 108 declaraciones entregadas a las autoridades ambientales. La metodología utiliza factores de emisión para la mayoría de las fuentes que no realizaron mediciones directas y reportaron tipo y cantidad de combustible utilizado. Se encontró que las industrias del papel y artes gráficas son las que más generan emisiones totales, seguidas de la industria de minerales no metálicos y del sector de textiles y confecciones. Mientras las empresas analizadas en la ciudad de Cali son responsables de gran parte de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles ( $COV$ ), las emisiones de óxidos de azufre y material particulado son aportadas mayoritariamente por las industrias localizadas en el municipio de Yumbo.*

**Palabras claves:** Calidad del aire, contaminación atmosférica, inventarios de emisiones, factores de emisión.

Fecha de recepción: 7 de agosto de 2003  
Fecha de aceptación: 20 de febrero de 2005

---

\* Investigación financiada por la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana, Cali (Colombia).

\*\* Físico, Ph.D. en Física. Profesor investigador de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana, Cali (Colombia). [mjaramil@puj.edu.co](mailto:mjaramil@puj.edu.co).

\*\*\* Química, Magister en Química. Profesora investigadora de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana, Cali (Colombia). [mnunez@puj.edu.co](mailto:mnunez@puj.edu.co).

\*\*\*\* Ingeniero Químico, Magister en Ingeniería Química. Profesor investigador de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana, Cali (Colombia). [willocam@puj.edu.co](mailto:willocam@puj.edu.co)

\*\*\*\*\* Ingeniero Civil, M.Sc. en Ingeniería Civil. Profesor investigador de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana, Cali (Colombia). [diegoperez@yahoo.com](mailto:diegoperez@yahoo.com).

\*\*\*\*\* Ingeniero Químico, Magister en Educación. Profesora investigadora de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana, Cali (Colombia). [gportilla@puj.edu.co](mailto:gportilla@puj.edu.co). Dirección postal: A.A. 26239; Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana, Calle 18 N° 118-250, Cali (Colombia).

## Abstract

*We calculate emissions of criteria pollutants (VOC's, PM<sub>10</sub>, CO, NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub>) from point sources for the year 1997 in Cali-Yumbo (Colombia). Data were obtained from 108 emission declarations to environmental authorities. We applied the method of emission factors for most of the sources which had no direct measurements and reported type and amount of fuel used. We find that paper manufacturing and printing/publishing industries generate the most pollutants overall, followed by non-metallic minerals and textile/apparel industries. While the sources in the city of Cali were responsible for most of the volatile organic compounds (VOC's), emissions of sulfur oxides and particulate matter originate mostly from sources in the industrial town of Yumbo.*

**Key words:** Air quality, Air pollution, Emission inventories, Emission factors.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

La calidad del aire en las zonas urbanas es uno de los factores ambientales críticos para sus habitantes. Los vehículos automotores, las instalaciones industriales y otras fuentes emiten a la atmósfera diversas sustancias contaminantes que inciden, por lo general de forma negativa, en la composición del aire que se respira. Si bien las concentraciones de los diferentes contaminantes dependen también de factores meteorológicos y geográficos, el punto de partida para el estudio de la calidad del aire en una región particular es la cuantificación de las emisiones a la atmósfera por las diferentes fuentes. Estas fuentes se clasifican en móviles (vehiculares) y fijas, las cuales incluyen las llamadas fuentes de área y las fuentes puntuales.

El estudio de fuentes puntuales que se presenta en este trabajo constituye un resultado parcial del proyecto "Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos convencionales en la zona metropolitana de Cali-Yumbo" [1], dentro del cual también se consideraron las fuentes de área [2] y fuentes móviles [3] en esta región urbana industrial del departamento del Valle del Cauca (Colombia). El año de referencia para el estudio es 1997.

Las fuentes puntuales corresponden por lo general a chimeneas, en las cuales se originan los contaminantes y según las características de las operaciones y procesos y del tipo de combustible que utilizan en ellas, emiten diferentes tipos y cantidades de contaminantes. En teoría están sujetas a inspecciones periódicas de las autoridades ambientales y deben reportar regularmente los niveles de emisiones de contaminantes.

El objetivo principal del inventario de fuentes puntuales es:

- Identificar y cuantificar las emisiones de diferentes tipos de contaminantes.
- Determinar la tasa de descarga en plantas industriales.
- Evaluar la contaminación en un área geográfica específica, en nuestro caso el área urbana Cali-Yumbo.
- Cuantificar el nivel de emisiones por sector industrial
- Verificar tipos de procesos y de tecnologías existentes en el área.
- Ayudar a tomar decisiones y planear estrategias a utilizar en el caso de presentarse problemas ambientales.

Los contaminantes considerados, también llamados contaminantes críticos o criterio, son: compuestos orgánicos volátiles [COV], material particulado con diámetros menores que  $10 \mu\text{m}$  [ $\text{MP}_{10}$ ], monóxido de carbono [CO], óxidos de nitrógeno [ $\text{NO}_x$ ] y óxidos de azufre [ $\text{SO}_x$ ].

## 2. METODOLOGÍA

Las emisiones de fuentes puntuales corresponden casi en su totalidad a industrias grandes y medianas que por ley deben reportar sus emisiones atmosféricas a la autoridad ambiental correspondiente mediante declaraciones ambientales anuales. Dado que muy pocas de estas empresas realizan mediciones directas de contaminantes, la metodología utilizada en este estudio se basó en la cuantificación de los combustibles empleados, según el tipo y cantidad reportada por la empresa, y los controles existentes (si los hay), junto con los factores de emisión correspondientes a los procesos y operaciones llevados a cabo en cada una de las empresas estudiadas.

En el inventario de emisiones de fuentes puntuales para 1997 se realizó la evaluación de las emisiones producidas por 50 industrias en el área de Yumbo, el 46% del total, y a 58 industrias en el área de Cali, correspondientes al 54% del total. Este número representa a las declaraciones ambientales disponibles en las autoridades ambientales correspondientes.

El procedimiento utilizado en la estimación de emisiones de las fuentes puntuales siguió los siguientes pasos:

1. Recepción de los formularios de declaración de las autoridades ambientales
2. Análisis de la información

3. Cálculo de emisiones
4. Codificación y análisis de resultados

### *2.1. Recepción de los formularios de declaración*

El primer paso fue la recepción y revisión de la encuesta industrial conforme al formato de declaración presentado por las empresas a la autoridad ambiental donde está localizada la fuente. La jurisdicción del municipio de Yumbo corresponde a la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), y la del municipio de Cali al Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA).

### *2.2. Análisis de la información*

Este segundo paso consistió en un estudio detallado de la información presentada en cada uno de los puntos que estructuran el formato exigido por ley. La finalidad es verificar que la información esté completa y que además permita validarla y procesarla sistemáticamente.

Una parte fundamental del análisis es la revisión de la información general (localización, actividad) y la información técnica: descripción de procesos, materias primas, consumo energético, cantidad y tipo de combustible, equipos de proceso, equipos de control y contaminantes generados. Menos del 10% de las empresas manifestó que utiliza equipos de control de emisiones. Sólo en contados casos se reportaron mediciones isocinéticas directas en chimeneas. Éstas son por lo general contratadas una vez al año con firmas consultoras. Alrededor del 80% de las declaraciones sólo reportó combustible empleado sin especificar emisiones.

Para algunas industrias que no diligenciaron adecuadamente el formato, el cálculo de emisiones se realizó consultando telefónicamente a la empresa sobre el consumo y tipo de combustible empleado.

Los datos de fuentes puntuales disponibles por parte de las autoridades ambientales fueron del período entre 1996 a 2000, por lo que estrictamente no correspondían al año nominal escogido para el inventario (1997). Sin embargo, el bajo crecimiento económico en el país y en la región en el período en cuestión reduce la incertidumbre asociada con esta dificultad. Un aspecto en el cual ha habido un cambio significativo desde 1997 hasta el presente es la reconversión industrial hacia el gas natural a raíz de la puesta en marcha de la red de distribución de este combustible, que en la actualidad ha comenzado a

reemplazar en gran medida a combustibles más contaminantes, como el carbón y el crudo de castilla [4].

### 2.3 Cálculo de emisiones

A partir de la información obtenida sobre procesos y controles, consumo de materias primas, consumo de combustibles y productos, se calcularon las emisiones generadas en la fuente puntual por medio de factores de emisión. Éstos fueron extraídos de la base de datos AP-42 (*Compilation of Air Pollutant Emission Factors* [5], publicada por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de Estados Unidos, con los cuales se pueden obtener estimaciones de emisiones contaminantes por tipo de proceso. Para las empresas que cuentan con equipo de combustión (típicamente calderas) es necesario revisar la capacidad del equipo, el consumo y clase de combustible utilizado, y si cuenta o no con equipo o sistema de control para los subproductos de la combustión.

La información evaluada y analizada es usada junto con los factores de emisión en la ecuación

$E = A \times FE$ , donde

E = emisión de contaminantes (generalmente expresado en toneladas métricas por año)

A = tasa activada (por ejemplo, consumo de combustibles, cantidad y tipo de materia prima procesada por año)

FE = factor de emisiones (por ejemplo, kilogramos de contaminante emitido por metros cúbicos de combustible consumido)

Las fuentes son clasificadas de acuerdo al tipo de operación, equipos de control y clase de combustible. Los combustibles más utilizados por las industrias de la región son:

- Fuel oil N° 6
- Gas licuado de petróleo (GLP) (conocido frecuentemente como gas propano, aunque contiene otros hidrocarburos)
- Gas natural
- Crudo de Castilla
- Licor negro
- ACPM (Fuel oil N° 4)
- Aserrín y madera
- Carbón (granulado, bituminoso)

De acuerdo con el AP-42, los combustibles se pueden agrupar en las siguientes categorías:

*Destilados de petróleo.* Los combustibles destilados son más volátiles y menos viscosos que los residuales, tienen cantidades despreciables de nitrógeno y cenizas, y usualmente contienen menos del 0.3% en peso de azufre. Ejemplos: gasolina, gas natural y GLP.

*Residuales.* Los combustibles residuales son más viscosos y menos volátiles, son producto de los remanentes del fraccionamiento de productos más ligeros que han sido removidos del petróleo crudo, y por lo tanto tienen cantidades significativas de cenizas, nitrógeno y azufre. Ejemplos: diesel, combustóleo y gasóleo.

Las emisiones de óxidos de azufre ( $SO_x$ ) de la combustión son generadas por la oxidación del azufre contenido en el combustible. En promedio, más del 95% del azufre en el combustible es convertido en  $SO_2$ , entre el 1 y el 5% es posteriormente oxidado a  $SO_3$  y alrededor del 1 al 3% es emitido como partículas sulfatadas.

Los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) formados en los procesos de combustión, conocidos como  $NO_x$  térmico, se deben a la fijación térmica del nitrógeno atmosférico. Este proceso depende de la temperatura máxima, la presión, la concentración de nitrógeno, la concentración de oxígeno y el tiempo de exposición a las altas temperaturas. Se estima que el 95% del  $NO_x$  térmico lo constituye el NO [6].

Pequeñas cantidades de compuestos orgánicos totales son emitidos durante la combustión. Al igual que en las emisiones de monóxido de carbono (CO), la emisión de los compuestos orgánicos depende de la eficiencia de combustión del equipo [7].

La emisión de partículas provenientes de los procesos de combustión, en donde principalmente se utilicen combustibles líquidos, depende, entre otros factores, de la densidad y contenido de cenizas del combustible, de la eficiencia de combustión, de su contenido de azufre y de las condiciones de operación del equipo.

Para el caso del combustible denominado "crudo de Castilla" se adaptaron los factores teniendo en cuenta su composición, y para al carbón se ajustó el factor de emisión de  $SO_x$  ( $SO_2 + SO_3$ ) según el contenido de azufre cuando éste

se reporta en el informe, o en caso contrario, con un valor promedio para el carbón utilizado en la región.

#### 2.4. Codificación y análisis de los resultados

Una vez que toda la información fue verificada y validada, y las tasas de emisiones contaminantes determinadas, se procedió a la compilación en un formato común, expresándolas en toneladas métricas por año.

### 3. RESULTADOS

Del total de fuentes puntuales analizadas, 50 se encuentran en Yumbo, principalmente al sur de este municipio, y las 58 restantes en Cali, principalmente en las comunas en las comunas 4, 5, 8, y 9 al norte de la ciudad [8], como se muestra en la figura 1, donde las 108 fuentes se han referenciado geográficamente.

Según la actividad industrial, las empresas analizadas se clasificaron en la tabla 1:

**Tabla 1**  
Empresas analizadas por sector productivo (*Los autores*)

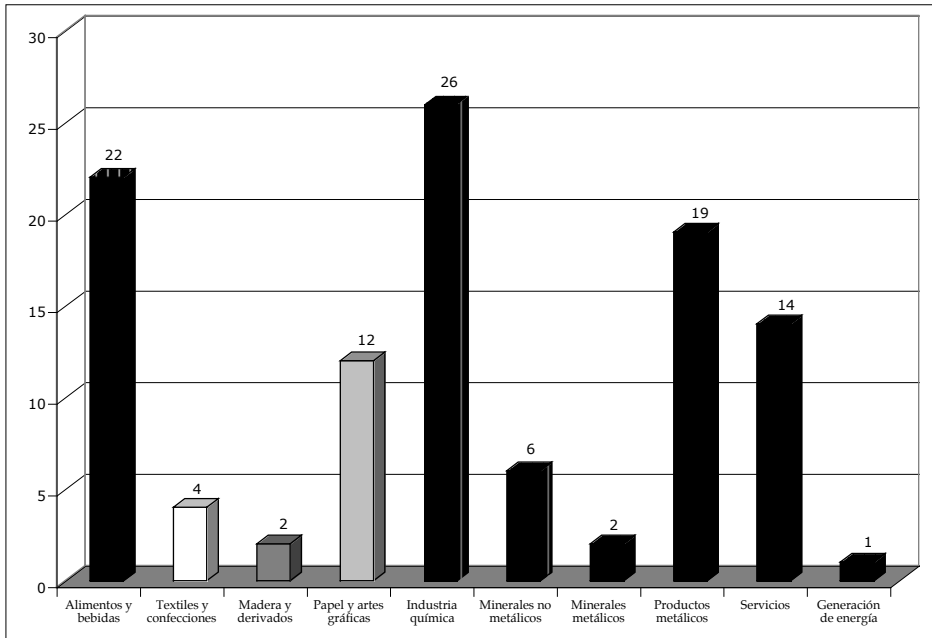
Actividad	Número de empresas
Alimentos y bebidas	22
Textiles y confecciones	4
Madera y derivados	2
Papel y artes gráficas	12
Industria química	26
Minerales no metálicos	6
Minerales metálicos	2
Productos metálicos	19
Servicios	14
Generación de energía	1
<b>Total empresas</b>	<b>108</b>

La figura 2 muestra la participación relativa en cuanto al número de empresas, de cada sector en el total de entidades analizadas.

La tabla 2 muestra las emisiones totales, así como el consolidado de toda la Zona Metropolitana, para cada contaminante. El total está expresado en toneladas métricas por año, correspondiente a 1997.

**Tabla 2**  
 Emisiones totales de cada contaminante por sector municipal urbano  
 (Los autores)

Áreas	Emisiones (toneladas por año )				
	SO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	COV	MP <sub>10</sub>
TOTALES CALI	1.503	1.261	799	105	566
TOTALES YUMBO	14.882	2.523	489	11	10.899
<b>TOTALES Cali-Yumbo</b>	<b>16.385</b>	<b>3.784</b>	<b>1.288</b>	<b>116</b>	<b>11.465</b>



**Figura 2.** Empresas analizadas por sector (Los autores)

Puede observarse que el contaminante con mayor contribución son los óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), que en su mayoría se deben al uso de carbón (ver tabla 5 más adelante) En los años recientes, sin embargo, muchas empresas han comenzado a reconvertir sus equipos para sustituir este combustible altamente contaminante por gas natural. Con objeto de mostrar la contribución de cada municipio a la contaminación, en la tabla 2 y la figura 3 se presentan los porcentajes de contaminantes emitidos en cada uno de ellos. Se puede ver que mientras las empresas analizadas en Cali son responsables de gran parte de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV), las emisiones de



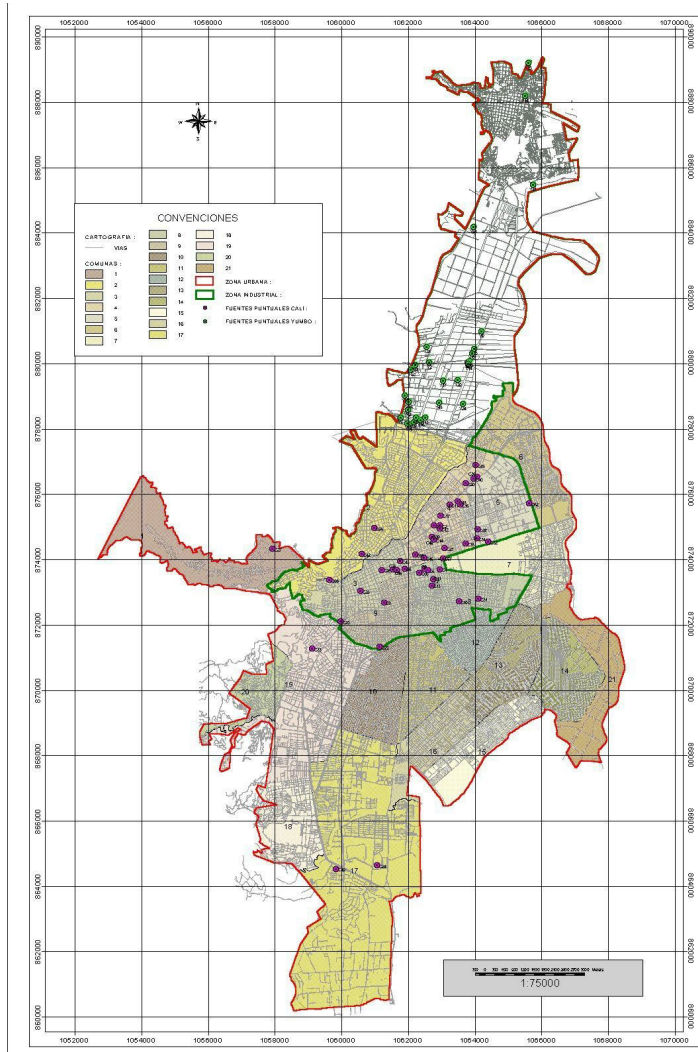
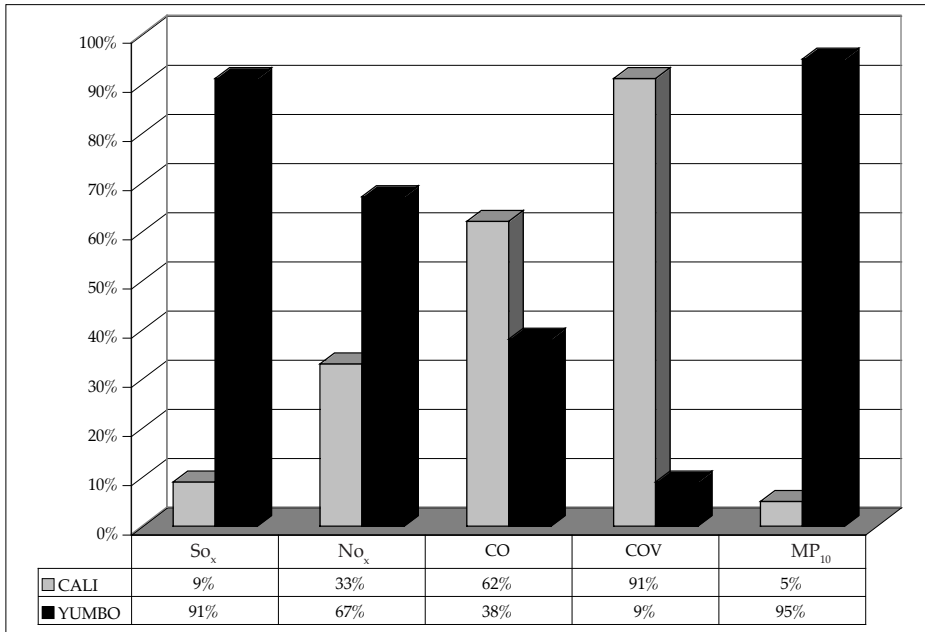


Figura 1. Distribución de fuentes puntuales en Cali y Yumbo (Los autores)

óxidos de azufre y material particulado son aportadas mayoritariamente por las industrias localizadas en el municipio de Yumbo.

En la tabla 3 se presentan las emisiones por contaminante correspondientes a cada sector industrial, expresadas en toneladas métricas por año.



**Figura 3.** Contribución porcentual por municipio a cada contaminante  
(Los autores)

**Tabla 3**

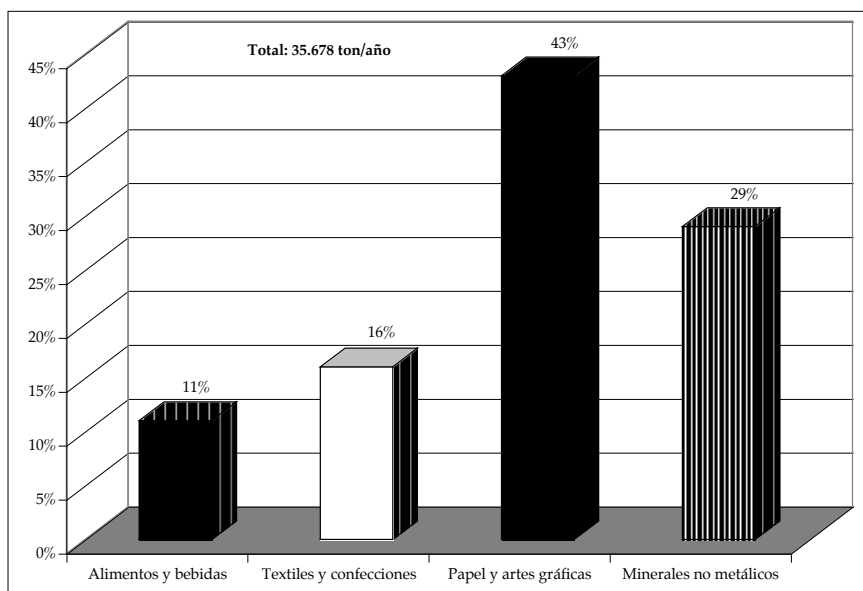
Emissiones de cada contaminante por sector industrial (Los autores)

Sector industrial	Emisiones (t/año)				
	SO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	COV	MP <sub>10</sub>
Alimentos y bebidas	1.741,13	301,43	33,06	5,81	490,36
Textiles y confecciones	2.685,46	337,77	15,56	0,69	1408,36
Madera y derivados	0,29	4,00	60,33	1,54	134,56
Papel y artes gráficas	7.057,35	1471,04	369,62	5,28	6378,12
Industria química	41,48	765,40	625,42	81,61	59,78
Minerales no metálicos	4.784,20	582,49	28,38	0,36	2548,54
Minerales metálicos	0,61	0,39	0,09	0,01	407,89
Productos metálicos	12,27	124,82	101,40	13,27	10,25
Servicios	10,06	192,43	54,00	7,80	8,45
Generación de energía	51,92	4,20	0,18	0,00	19,11
<b>Total de empresas</b>	<b>16.835</b>	<b>3.784</b>	<b>1.288</b>	<b>116</b>	<b>11.465</b>

La tabla 4 muestra la contribución porcentual de cada sector a las emisiones totales de cada contaminante. Puede verse que las industrias productoras de papel y derivados contribuyen como sector con la mayor emisión de  $SO_x$ ,  $NO_x$  y material particulado ( $MP_{10}$ ).

**Tabla 4**  
Contribución porcentual de cada sector a las emisiones totales de cada contaminante (Los autores)

Sector industrial / Contaminantes	Emisiones (%)				
	$SO_x$	$NO_x$	CO	COV	$MP_{10}$
Alimentos y bebidas	10,63%	7,97%	2,57%	5,00%	4,28%
Textiles y confecciones	16,39%	8,93%	1,21%	0,59%	12,28%
Madera y derivados	0,00%	0,11%	4,68%	1,32%	1,17%
Papel y artes gráficas	43,07%	38,88%	28,70%	4,54%	55,63%
Industria química	0,25%	20,23%	48,56%	70,13%	0,52%
Minerales no metálicos	29,20%	15,39%	2,20%	0,31%	22,23%
Minerales metálicos	0,00%	0,01%	0,01%	0,00%	3,56%
Productos metálicos	0,07%	3,30%	7,87%	11,40%	0,09%
Servicios	0,06%	5,09%	4,19%	6,70%	0,07%
Generación de energía	0,32%	0,11%	0,01%	0,00%	0,17%
<b>Total de empresas</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>



**Figura 4.** Principales contribuciones a la emisión de  $SO_x$  por sector (Los autores)

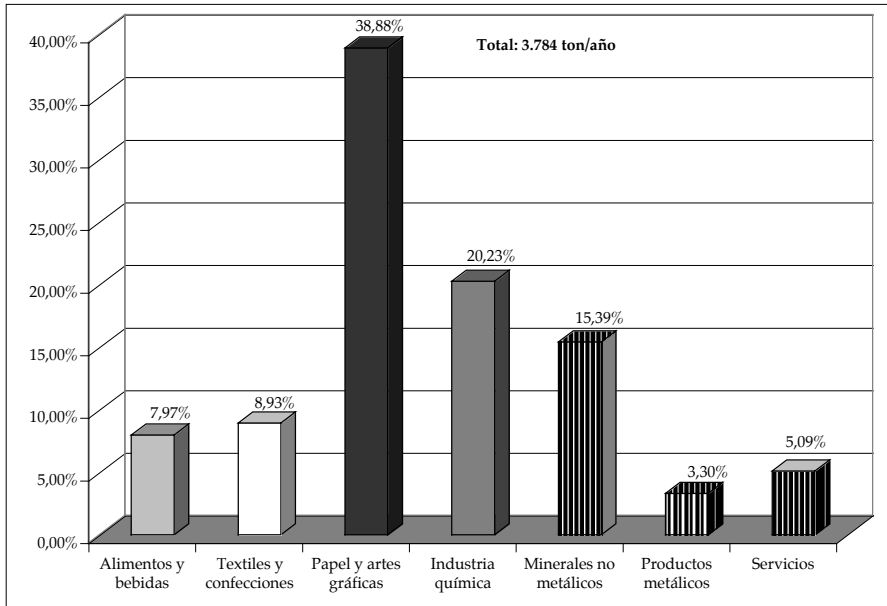


Figura 5. Principales contribuciones a la emisión de  $\text{NO}_x$  por sector (Los autores)

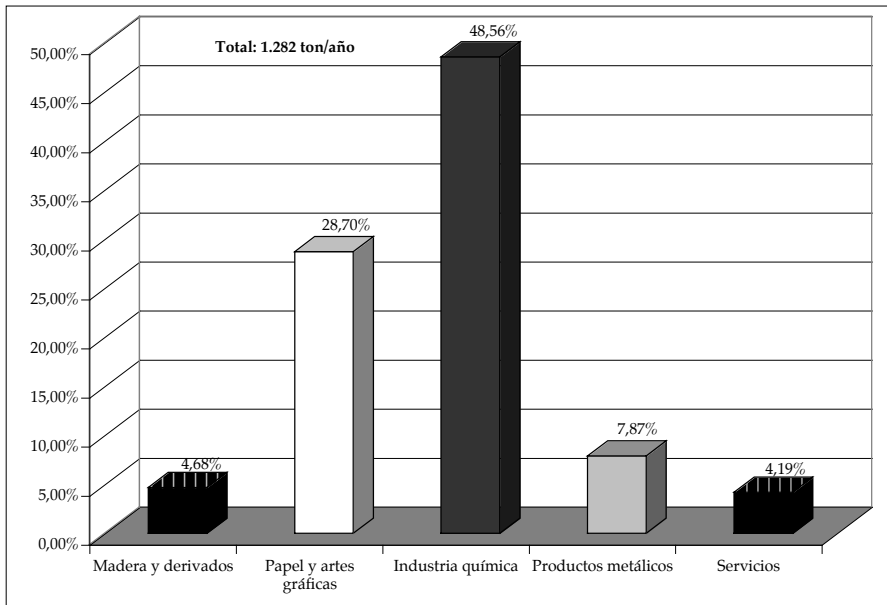


Figura 6. Principales contribuciones a la emisión de CO por sector (Los autores)

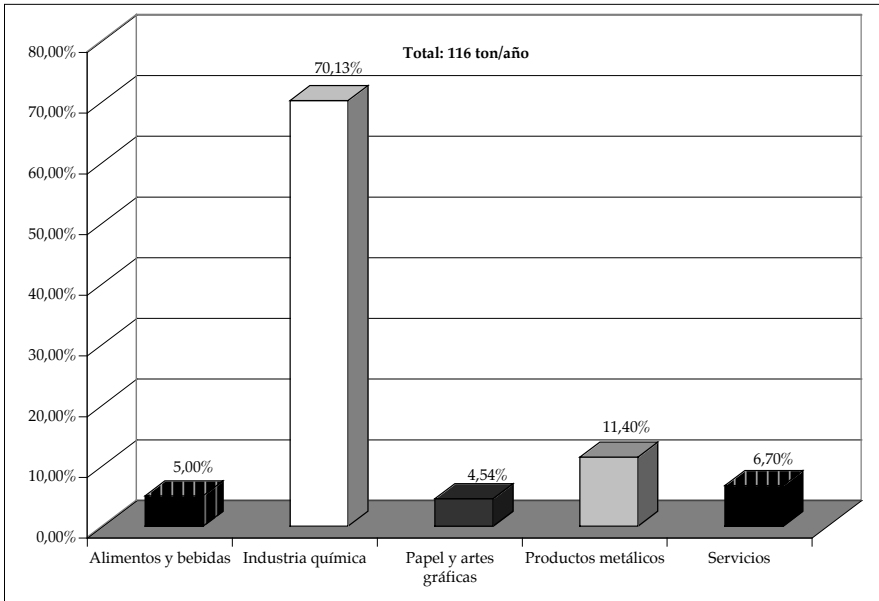


Figura 7. Principales contribuciones a la emisión de COV's por sector  
(Los autores)

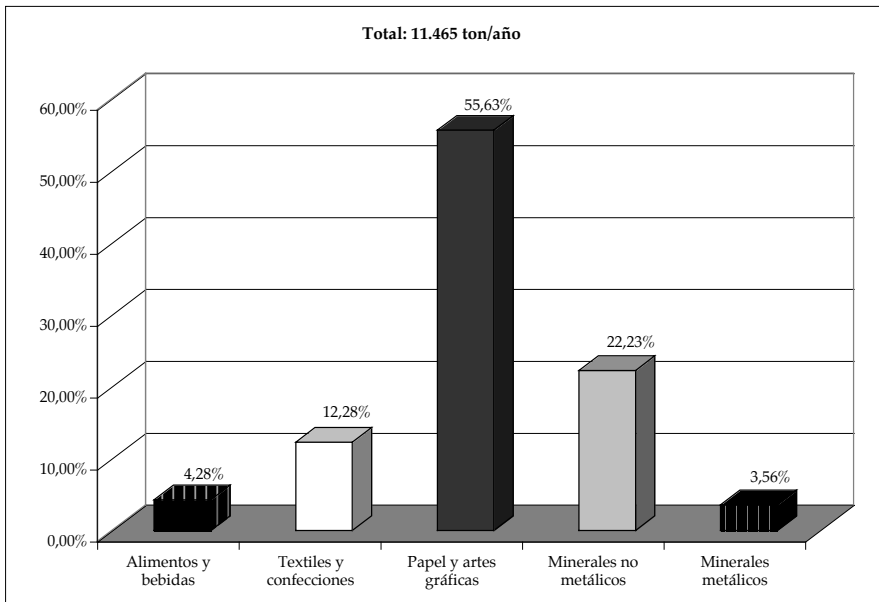


Figura 8. Principales contribuciones a la emisión de MP<sub>10</sub> por sector  
(Los autores)

Dado que la emisión total por combustión de carbón y GLP fue analizada como fuentes de área en el artículo correspondiente [2], éstas deben calcularse por separado en esta compilación para ser luego restadas al consolidar los totales. La tabla 5 muestra las emisiones por carbón y GLP, en toneladas métricas por año, correspondientes a las 108 fuentes puntuales analizadas.

**Tabla 5**  
Emisiones por carbón y GLP (*Los autores*)

Contaminantes Combustibles	Emisiones (ton/año)				
	SO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	COV	MP <sub>10</sub>
Carbón	13.971,00	1993,39	83,06	0,00	9073,32
GLP	0,00	159,19	27,01	4,34	4,82

## CONCLUSIONES

El sector de industria química es el de mayor participación en la zona Cali-Yumbo (23%) y genera el mayor grado de las emisiones de COV (70%) y CO (49%).

El sector industrial de papel y artes gráficas, aunque representa sólo el 11% del total de las empresas estudiadas (108), en la zona Cali-Yumbo genera el 56% de MP<sub>10</sub>, 43% de SO<sub>x</sub> y 39% de NO<sub>x</sub>.

Cabe destacar que la industria del papel, artes gráficas y la industria química emiten el 77% de CO y el 75% de COV en toda la zona de estudio. De estos contaminantes, la ciudad de Cali contribuye con el 62% de CO y con el 91% de COV, lo que lleva a recomendar desde ahora la implementación de programas que permitan en un futuro inmediato pronosticar, de acuerdo al crecimiento industrial, poblacional y vehicular, así como al uso de combustibles alternos, los escenarios de formación de ozono en la región Cali-Yumbo.

El grado de incertidumbre en el inventario de emisiones podría disminuir si fuese posible contar con mayor información y con una buena calidad de los datos suministrados por las empresas de la región a las autoridades ambientales.

A la fecha, el notable incremento en el uso de gas natural, así como la sustitución de carbón, kerosén y crudo de Castilla, podría lograr la reducción en los porcentajes de emisiones estimadas para las fuentes puntuales.

Se puede observar que aquellas industrias que generan mayor emisión de  $SO_x$  también son las que generan mayor cantidad de material particulado [9]. Esto es consecuencia del combustible utilizado y la falta de sistemas de control.

Industrias como la de la madera y minerales metálicos presentan problemas principalmente en la emisión de material particulado.

Considerando el total de contaminantes emitidos por sector se observa que, en su orden, las industrias del papel y artes gráficas son las que más generan emisiones, seguidas del sector industrial de minerales no metálicos y del sector de textiles y confecciones.

### Referencias

- [1] JARAMILLO, M., NÚÑEZ, M.E. OCAMPO, W. PÉREZ, D. & PORTILLA, G. (2004). Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos convencionales en la zona de Cali-Yumbo. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, N° 31, 38-48.
- [2] JARAMILLO, M., NÚÑEZ, M.E., Ocampo, W.A. & Portilla, G. (2002). Emisiones de contaminantes atmosféricos convencionales por fuentes de área en el sector urbano de Cali-Yumbo. *Epiciclos* (Revista de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana Cali), vol. 1 (2), 53-66.
- [3] JARAMILLO, M., NÚÑEZ, M.E., PORTILLA, G., OCAMPO, W.A. & PÉREZ, D. (2003). Emisiones de contaminantes atmosféricos convencionales por fuentes móviles en el sector urbano de Cali. *Epiciclos*, Vol. 2 (1), 73-90.
- [4] DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística) (2001). *Anuario de Industria Manufacturera 1997*. Bogotá.
- [5] EPA (U.S. Environmental Protection Agency) (1998). *Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1: Stationary Point Area Sources*. Fifth Edition and Supplements AP-42. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina.
- [6] BARROTO, A.E. & BARROTO, A.J. (1999). *Ahorro de energía en calderas de vapor*. Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos.
- [7] HIMMELBLAU, D.M. (1982). *Balances de Materia y Energía* (4 ed.). México: Prentice Hall Hispanoamericana.
- [8] DEPARTAMENTO Administrativo de Planeación Municipal (1999). *Cali en cifras*. Cali.
- [9] BOUBEL, R.W., FOX, D.L., TURNER, D.B. & STERN, A.C. (1994). *Fundamentals of Air Pollution*. (3ª ed). Nueva York: Academic Press.