

**ANÁLISIS DE LA SENSIBILIDAD A LA LLUVIA ÁCIDA  
EN UNA CIUDAD INTERMEDIA TROPICAL, POPAYÁN, COLOMBIA**

MARTHA LUCIA BURBANO GARCÉS

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN  
DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA  
POPAYÁN  
Agosto 2003**

**ANÁLISIS DE LA SENSIBILIDAD A LA LLUVIA ÁCIDA  
EN UNA CIUDAD INTERMEDIA TROPICAL, POPAYÁN, COLOMBIA**

MARTHA LUCIA BURBANO GARCES

Trabajo de grado para optar  
al título de Biólogo

Director  
APOLINAR FIGUEROA CASAS. (Ph. D)

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN  
DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA  
POPAYÁN  
Agosto 2003**

Nota de aceptación

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Director \_\_\_\_\_  
Apolinar Figueroa Casas

Jurado \_\_\_\_\_  
Efrén Giraldo

Jurado \_\_\_\_\_  
Edier Humberto Pérez

Popayán, Agosto de 2003

*A mi Dios Eterno y Bueno, porque cada paso dado haya sido en favor de un buen objetivo: alcanzar un sueño y disfrutar cumpliéndolo, por darme fuerza cuando no la tuve, y por haberme guiado con enormes enseñanzas hacia la culmen de este escalón.*

*A mis queridos padres, por su amor, apoyo, entrega y por darme la mano cuando más necesité de alguien que me comprendiera.*

*A mis profesores por su paciencia y colaboración constante.*

*A mis familiares por su permanente motivación.*

*A mis amigos por su invaluable apoyo y ayuda en cada momento.*

## **AGRADECIMIENTOS**

La autora expresa sus agradecimientos a:

**Apolinar Figueroa Casas.** Ph.D. En Ciencias Biológicas. Docente del programa de Biología, Facultad de Ciencias Naturales Exactas y de la Educación, Universidad del Cauca. Director del trabajo, por su paciencia, dedicación, consejos valiosos y oportunos, por confiar en mis capacidades y por permitir la financiación de este proyecto.

**Fabio Cabezas Fajardo.** Ph.D. En Ciencias Químicas. Docente del Departamento de Química, Facultad de Ciencias Naturales Exactas y de la Educación, Universidad del Cauca. Asesor del trabajo, por su paciencia, dedicación, ejemplo e incesante apoyo.

**Antonio José Valverde.** Magíster en Recursos Hidrobiológicos Continentales. Docente del Departamento de Biología, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación, Universidad del Cauca. Asesor del trabajo, por sus valiosas y oportunas orientaciones al trabajo.

**Leonidas Zambrano.** Magíster. Docente del Departamento de Biología, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación, Universidad del Cauca. Asesor del trabajo, por sus contribuciones pertinentes al trabajo.

**Profesor Silvio Carvajal.** Magíster. Docente del Departamento de Biología, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación, Universidad del Cauca. Asesor del trabajo, por su colaboración en los procedimientos estadísticos.

**Profesor Nelson Rojas.** Ph. D. Docente del Departamento de Biología, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación, Universidad del Cauca. Director del Laboratorio de Biología Celular, por su confianza y colaboración decidida en la realización de los análisis de laboratorio.

**Claudia Valencia.** Experta en Sistemas de Información Geográfica (SIG) del Grupo de Estudios Ambientales, Universidad del Cauca, por su dedicación y desinteresada colaboración en la producción cartográfica del trabajo.

**Diana María Arce Burbano.** Ingeniera Química, Universidad del Valle, por su valiosa y oportuna colaboración bibliográfica en el trabajo.

**Miembros del Grupo de Estudios Ambientales.** Universidad del Cauca, por la sincera amistad, diligencia, colaboración e incesante lucha hacia la realización de este objetivo.

**Miembros del Grupo de Agroquímica.** Universidad del Cauca, por su paciencia y tan valiosa colaboración en los análisis químicos del trabajo.

**Anacleto Burbano Daza, Martha Garcés Robles, Héctor Fabio Burbano Garcés y Margoth Garcés Robles,** por su apoyo constante e infatigable, por su compañía y comprensión en la realización de este trabajo.

**SENA, Nelly Burbano Daza y Ximena Garcés Robles, Hermanas Betlehemitas, familia Samboní Bermeo, familia Daza Timaná, familia López, Patricia Daza Garcés, familia Beltrán Zúñiga, familia Martínez Daza y familia Rendón Zúñiga,** por prestar un espacio en su casa o instalaciones, para el montaje de las estaciones de muestreo.

**Aeropuerto Guillermo León Valencia,** por facilitar los registros de precipitación de los meses de muestreo.

Mis amigos y compañeros, **Ximena Ruiz Gómez, Luisa Fernanda Burbano Bravo, Samir Joaquí, Juan Pablo Martínez, Alex Erazo,** por su paciencia, apoyo incondicional, el tiempo que me prestaron y la ayuda en los momentos más difíciles.

Familiares, amigos y compañeros a quienes no menciono, pero que de una u otra forma me colaboraron y apoyaron a lo largo de este trabajo.

Y aunque los nombre de últimos, no dejan de ser los más importante, **Dios y la Virgen María,** por la oportunidad de disfrutar haciendo mi trabajo, por los obstáculos que me hicieron más fuerte al derribarlos, por poner en mi camino a las personas más indicadas y así poder cumplir con éxito mi trabajo.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	20
2. JUSTIFICACION	22
3. OBJETIVOS	23
3. 1. OBJETIVO GENERAL	23
3. 2. OBJETIVOS ESPECIFICOS:	23
4. HIPOTESIS	24
5. MARCO TEORICO	25
5. 1 CONTAMINACION ATMOSFERICA	25
5.1.1 Partículas atmosféricas	25
5.1.2 Meteorología y Contaminación del Aire.	26
5.1.3 Contaminantes Atmosféricos	29
5.1.3.1 Contaminantes Inorgánicos del Aire.	29
5.1.3.2. Contaminantes Orgánicos del Aire.	29
5.1.3.3 Contaminantes primarios	30
5.1.4 Contaminantes secundarios	35
5. 2 LLUVIA ACIDA	36
5. 2. 1 Génesis de la lluvia ácida	38
5.2.2. Azufre	39
5.2.2.1. <i>Ciclo Natural</i>	39
5.2.2.2 <i>El azufre en la atmósfera</i>	40
5.2.3 <i>Nitrógeno</i>	42
5.2.3.1. <i>Ciclo Natural</i>	42
5.2.3.2 <i>El nitrógeno en la atmósfera</i>	43
5.2.4 <i>Cloro</i>	45
5.2.4.1 <i>Ciclo natural</i>	45
5.2.4.2 <i>El cloro en la atmósfera</i>	47
5. 3 EFECTOS DE LA LLUVIA ÁCIDA	49
6. ANTECEDENTES	52
7. AREA DE ESTUDIO	59
7.1. CARACTERÍSTICAS GEOGRAFICAS Y CLIMÁTICAS	59
7.1.1 Ubicación geográfica.	59
7.1.2 Población y acceso	59
7.1.3 Precipitación	59
7.1.4 Temperatura	59
7.1.5 Humedad relativa	60
7.1.6 Brillo solar	60
7.1.7 Vientos	60
7.1.8 Zonas de vida	60

8. SITIOS DE ESTUDIO	61
9. METODOLOGIA	63
9.1 MÉTODOS DE MUESTREO	63
9.1.1 Técnica de recolección de muestras tipo “bulk”	63
9.1.2 Período de Muestreo y frecuencia de recolección	64
9.1.3 Procedimiento de muestreo	65
9.2 PROCEDIMIENTOS ANALITICOS	65
9.3 MÉTODOS DE ANÁLISIS DE RESULTADOS	67
9.3.1 Métodos Estadísticos	67
9.3.1.1 Medidas Estadísticas	67
9.3.1.2 Gráficos	67
9.3.2 Comportamiento Espacial	68
9.3.3 Comportamiento Temporal	68
9.3.4 Mapas de Distribución Espacial de las Variables y Áreas de Influencia	68
9.3.5 Cálculo del Depósito Húmedo	68
10. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	71
10.1 VOLUMEN DE CAPTACIÓN	71
10.1.1 Comportamiento Espacial	71
10.1.2. Comportamiento Temporal	74
10.1. pH	75
10.1.2 Comportamiento espacial	75
10.2.2 Comportamiento Temporal	81
10.3 CONDUCTIVIDAD	89
10.3.1 Comportamiento Espacial	89
10.3.2. Comportamiento Temporal	93
10.4. SULFATOS (SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> )	97
10.4.1. Comportamiento Espacial	97
10.4.2. Comportamiento Temporal	105
10.5. CLORUROS (Cl <sup>-</sup> )	109
10.5.1. Comportamiento Espacial	109
10.5.2 Comportamiento Temporal	114
10.6. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN	118
10.7. DEPOSITACIÓN TOTAL	120
10.8 COMPARACION DE LA ACIDEZ, CONDUCTIVIDAD, SULFATO (SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> ) Y CLORURO (Cl <sup>-</sup> ) DEL AGUA DE LLUVIA EN POPAYÁN CON OTROS LUGARES DE COLOMBIA Y EL MUNDO.	123
10.8.1 Acidez	123
10.8.2 Conductividad	127
10.8.3 Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> )	128
10.8.4 Cloruros (Cl <sup>-</sup> )	130
11. CONCLUSIONES	131
12. RECOMENDACIONES	133
BIBLIOGRAFIA	134
ANEXOS	142



## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Procesos Meteorológicos y su influencia en la contaminación atmosférica	28
Tabla 2. Condiciones Geográficas y Urbanísticas que inciden en la contaminación atmosférica urbana	29
Tabla 3 Contaminantes Primarios Atmosféricos que causan alteraciones a la atmósfera	31
Tabla 4 Contaminantes Primario encontrados con menos frecuencia en la atmósfera.	33
Tabla 5 Contaminantes naturales del aire	34
Tabla 6 Principales focos antropogénicos de emisiones primarias	34
Tabla 7 Distribución espacial de la emisión de contaminantes	35
Tabla 8 Principales alteraciones atmosféricas producidas por los contaminantes secundarios	36
Tabla 9. Datos de contaminantes con azufre	41
Tabla 10 Datos de contaminantes con nitrógeno	44
Tabla 11 Efectos de la lluvia ácida sobre la salud humana, los animales, la vegetación, los sistemas acuáticos, los suelos y los materiales	50
Tabla 12. Estaciones de Muestreo en la ciudad de Popayán	61
Tabla 13. Procedimientos Analíticos	66
Tabla 14. Descriptivos de la Variable Volumen en los sitios de muestreo.	71
Tabla 15. Descriptivos para la Variable Volumen de Captación. Septiembre de 2001 a Febrero de 2002.	74
Tabla 16 Estadística Descriptiva para la variable pH en los sitios de muestreo.	76
Tabla 17 ANOVA para la variable pH en los sitios de muestreo	81
Tabla 18 Prueba “post hoc de Tukey” para la variable pH en los sitios de muestreo	81
Tabla 19 Estadística Descriptiva para la variable pH, Septiembre de 2001 a Febrero de 2002	82
Tabla 20 ANOVA para la variable pH. Septiembre de 2001 a Febrero de 2002.	88
Tabla 21 Prueba “Post Hoc de Tukey” para la variable pH. Septiembre de 2001 a Febrero de 2002.	88
Tabla 22 Descriptivos para la variable Conductividad en los sitios de muestreo.	89
Tabla 23 ANOVA para la variable Conductividad en los sitios de muestreo.	93
Tabla 24 Prueba “Post Hoc de Tukey” para Conductividad en los sitios de muestreo.	93

Tabla 25	Estadística Descriptiva para Conductividad en los sitios de muestreo.	94
Tabla 26	Tabla de ANOVA para la variable Conductividad. Septiembre de 2001 a Febrero de 2002.	96
Tabla 27	Prueba "Post Hoc de Tukey" para la variable Conductividad. Septiembre de 2001 a Febrero de 2002.	97
Tabla 28	Estadística Descriptiva para $\text{SO}_4^-$ en los sitios de muestreo.	98
Tabla 29	ANOVA para $\text{SO}_4^-$ en los sitios de muestreo.	104
Tabla 30	Prueba "Post Hoc de Tukey" para la variable $\text{SO}_4^-$ en los sitios de muestreo.	105
Tabla 31	Estadística Descriptiva para la variable $\text{SO}_4^-$ . Septiembre de 2001 a Febrero de 2002.	106
Tabla 32	ANOVA para $\text{SO}_4^-$ . Septiembre de 2001 a Febrero de 2002.	108
Tabla 33	Prueba "Post Hoc de Tukey" para la variable $\text{SO}_4^-$ , de Septiembre de 2001 a Febrero de 2002.	109
Tabla 34	Descriptivos de la variable $\text{Cl}^-$ en los sitios de muestreo.	110
Tabla 35	ANOVA para la variable $\text{Cl}^-$ en los sitios de muestreo.	114
Tabla 36	Prueba "Post Hoc de Tukey" para la variable $\text{Cl}^-$ en los sitios de muestreo.	114
Tabla 37	Descriptivos de la variable $\text{Cl}^-$ . Septiembre de 2001 a Febrero de 2002	115
Tabla 38	ANOVA para la variable $\text{Cl}^-$ . Septiembre de 2001 a Febrero de 2002	117
Tabla 39	Prueba "Post Hoc de Tukey" para la variable $\text{Cl}^-$ . Septiembre de 2001 a Febrero de 2002.	118
Tabla 40	Matriz de Correlación Paramétrica de Pearson	119
Tabla 41	Depósito Total de $\text{SO}_4^-$ y $\text{Cl}^-$ en el agua de lluvia de algunas ciudades del mundo	121
Tabla 42	Valores de pH del agua de lluvia en algunas regiones remotas y ciudades de países menos desarrollados e industrializados.	125

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Procesos que las partículas experimentan en la atmósfera	25
Figura 2 Problema Global de contaminación del aire	26
Figura 3 Intercambio de contaminantes entre los ambientes biótico, terrestre, atmosférico y acuático	27
Figura 4 Contaminación Primaria y Secundaria.	30
Figura 5 Mecanismos de Depositación Seca y Húmeda.	37
Figura 6 Algunos elementos que intervienen en la formación de la lluvia ácida	38
Figura 7 Ciclo del azufre.	39
Figura 8 Ciclo del Nitrógeno.	42
Figura 9 Principales Reacciones entre el NO, NO <sub>2</sub> , y el HNO <sub>3</sub> en la Atmósfera. ROO· representa un radical peroxilorgánico, tal como el radical metilperoxil, CH <sub>3</sub> OO·.	44
Figura 10 Ciclo del Cloro	46
Figura 11. Polivinilclorado	47
Figura 12 Efectos de la lluvia ácida	49
Figura 13 Localización de las Estaciones de Muestreo y su Área de Influencia	62
Figura 14 Colector de Depósito Total.	64
Figura 15 Representación de un Diagrama de Caja	68
Figura 16 Valor Medio de Volumen los sitios de Muestreo.	72
Figura 17 Distribución Espacial del Volumen de Captación del agua de lluvia en la ciudad de Popayán	73
Figura 18 Relación entre el Volumen y la Precipitación Media Mensual. Septiembre de 2001 a Febrero de 2002	75
Figura 19 Valores Medios de pH de los Sitios de Muestreo.	78
Figura 20 Diagrama de Caja para la Variable pH en los Sitios de Muestreo.	79
Figura 21 Distribución Espacial del pH en el agua de lluvia de la ciudad de Popayán	80
Figura 22 Relación entre el pH y la Precipitación Media Mensual. Septiembre de 2001 a Febrero de 2002	83
Figura 23 Diagrama de Caja para la Variable pH. Septiembre de 2001 a Febrero de 200	84
Figura 24 Rosa de los Vientos para la ciudad de Popayán	86
Figura 25 Proporción de sales disueltas en los océanos	87
Figura 26 Valor medio de la variable Conductividad en los sitios de muestreo.	90

Figura 27 Distribución Espacial de la conductividad en el agua de lluvia de la ciudad de Popayán	91
Figura 28 Diagrama de Caja para la Variable Conductividad <sup>-</sup> . Septiembre de 2001 a Febrero de 2002	92
Figura 29 Relación entre la Conductividad y la Precipitación Media Mensual. Septiembre de 2001 a Febrero de 2002.	95
Figura 30 Diagrama de Caja para la Variable Conductividad. Septiembre de 2001 a Febrero de 2002.	96
Figura 31 Valor medio de SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> en la ciudad de Popayán en los sitios de muestreo.	99
Figura 32 Distribución Espacial del ión SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> en el agua de lluvia de la ciudad de Popayán	101
Figura 33 Nivel de Contaminante de SO <sub>2</sub> en la ciudad de Popayán	102
Figura 34 Diagrama de Caja para la Variable SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> en los sitios de muestreo.	103
Figura 35 Relación entre SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> y la precipitación media mensual. Septiembre de 2001 a Febrero de 2002.	107
Figura 36 Diagrama de Caja para la Variable SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> . Septiembre de 2001 a Febrero de 2002.	108
Figura 37 Valor Medio de la variable Cl <sup>-</sup> en los sitios de muestreo.	111
Figura 38 Distribución Espacial del ión Cl <sup>-</sup> en el agua de lluvia de la ciudad de Popayán	112
Figura 39 Diagrama de Caja para la Variable Cl en los sitios de muestreo.	113
Figura 40 Relación entre Cl <sup>-</sup> y la precipitación media mensual en Popayán. Septiembre de 2001 a Febrero de 2002	115
Figura 41 Diagrama de Caja para la Variable Cl <sup>-</sup> . Septiembre de 2001 a Febrero de 2002	116
Figura 42 Depósito Total de SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> y Cl <sup>-</sup> en el agua de lluvia en varias ciudades del mundo	122
Figura 43 El pH del agua de lluvia en varias ciudades colombianas.	124
Figura 44 El pH del agua de lluvia en varios lugares del mundo.	126
Figura 45 Conductividad en el agua de lluvia de varias ciudades colombianas	128
Figura 46 SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> en el agua de lluvia de varias ciudades del mundo	129
Figura 47 Cl <sup>-</sup> en el agua de lluvia de varias ciudades del mundo	130

## GLOSARIO

**Acidificación.** Descenso del pH en un compartimiento ambiental debido a la adición de hidrogeniones ( $H^+$ ) en cantidad suficiente para que su pH descienda por debajo del nivel natural.

**Aerosoles.** Dispersiones de sustancias sólidas o líquidas en el aire, con un diámetro inferior a 100  $\mu m$ .

**Alcalinidad.** Capacidad de una sustancia química en solución acuosa para ceder iones  $OH^-$ . La alcalinidad de un agua se expresa en equivalentes de base por litro o en equivalente de carbonato cálcico.

**Anión nitrato ( $NO_3^-$ ).** Se forma a partir de la oxidación de los óxidos de nitrógeno ( $NO$  y  $NO_2$ ). Los vertidos con nitratos favorecen la eutrofización de las aguas..

**Azufre (S).** Es producido durante la combustión de los combustibles fósiles. Puede encontrarse en forma nativa o combinado con otros elementos.

**Calcio (Ca).** Metal blanco, muy alterable al aire y al agua, No existe libre en la naturaleza. Combinado se encuentra en gran abundancia como catión de los ácidos sulfúrico y carbónico principalmente. Como carbonato cálcico se encuentra entre otras rocas en las calizas y el mármol. Como sulfato cálcico en la anhidrita y el yeso.

**Cartografía.** Ciencia que tiene por objeto la realización de mapas, y comprende el conjunto de estudios y técnicas que intervienen en su establecimiento.

**Cloro (Cl).** Gas amarillo verdoso, irritante y venenoso, que no existe libre en la naturaleza, aunque algunos de sus compuestos, como los cloruros, son muy abundantes. Tiene multitud de aplicaciones, entre las que destacan la cloración de aguas potables, el uso como decolorante y la fabricación de productos químicos orgánicos.

**Clorofluorocarbonos.** Derivados de hidrocarburos volátiles que contienen cloro y flúor, y que tienen varios usos industriales (refrigeración, propelentes en nebulizadores). La emisión de CFCs a la atmósfera provoca daños en la capa de ozono, ya que los CFCs se descomponen por la radiación solar ultravioleta y producen cloro libre que destruye el ozono.

**Cloruro (Cl).** Ión que resulta de la combinación del cloro con una sustancia simple o compuesta (excepto hidrógeno u oxígeno). Los cloruros son altamente

solubles, por lo que contaminan fácilmente el agua. Puede producir o facilitar enfermedades, por lo que su concentración en el agua es considerada un importante parámetro definitorio de la contaminación del agua.

**Combustibles fósiles.** Carbón, petróleo y gas natural. Son materiales de origen orgánico, producidos a partir de restos de seres vivos en épocas geológicas anteriores. Constituyen la mayor parte de las fuentes de energía consumidas en los países industriales. Son recursos no renovables y su utilización es la principal responsable de las emisiones contaminantes a la atmósfera.

**Combustión.** Proceso químico en el que se produce desprendimiento de calor y en algún caso, luz y ruido. Comúnmente se refiere a la combinación de oxígeno con una sustancia.

**Compuestos orgánicos volátiles (COV).** Compuestos orgánicos que se evaporan a temperatura ambiente, incluyendo varios hidrocarburos, compuestos oxigenados y compuestos con contenido de azufre. Por convención, el metano se considera por separado. Los COV contribuyen a la formación de ozono troposférico mediante una reacción fotoquímica con los óxidos de nitrógeno.

**Concentración.** Contenido de soluto en una disolución.

**Conductividad eléctrica.** Inversa de la resistividad específica. Se mide en  $\text{ohm}^{-1}\text{m}^{-1}$  o  $\mu\text{Siemens/cm}$  ( $\mu\text{S/cm}$ ). La conductividad depende de la migración de cargas eléctricas (electrones o iones).

**Contaminación.** En sentido amplio, cualquier tipo de impureza, materia o influencias físicas (ruidos y radiación), en un determinado medio y en niveles más altos de lo normal. En sentido más restrictivo se refiere a aquellas impurezas que, por su cantidad o intensidad, pueden ocasionar peligro o daño en el sistema ecológico.

**Corrosión.** Ataque químico de las sustancias sobre un metal. Es el proceso de oxidación química sobre un metal y depende de la actividad química de las sustancias participantes.

**Destrucción de la capa de ozono.** Problema ecológico que afecta a la capa de la estratosfera, entre los 20 y 50 Km. de altura, que contiene una cantidad relativamente pequeña de ozono que nos protege de los nocivos rayos ultravioletas del sol.

**Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>).** Gas incoloro, irritante para los ojos, las mucosas y las vías respiratorias. Es un contaminante que se produce en procesos industriales de combustión. En la atmósfera es capaz de oxidarse a SO<sub>3</sub> (trióxido de azufre o

anhídrido sulfúrico) que a su vez puede reaccionar con el agua para dar ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), uno de los componentes de la lluvia ácida.

**Dióxido de carbono ( $CO_2$ ).** Anhídrido carbónico. Gas incoloro e incombustible. Es un componente normal de la atmósfera (0.03%). Las plantas verdes utilizan el dióxido de carbono de la atmósfera en la fotosíntesis como fuente de carbono. Tanto plantas como animales y microorganismos lo liberan a la atmósfera como resultado de la respiración y las fermentaciones. Es también un contaminante atmosférico producido por las combustiones. Es uno de los gases responsables del efecto invernadero.

**Dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ).** Gas de color rojo oscuro que se produce en las combustiones por oxidación del nitrógeno de la atmósfera. Es muy tóxico y uno de los gases generadores de lluvia ácida.

**Efecto Invernadero.** Calentamiento de la atmósfera producido por la alteración del balance térmico debido al aumento de la concentración de gases,  $CO_2$ , metano, CFCs y  $NO_x$ .

**Emisión.** Liberación de contaminantes (partículas sólidas, líquidas o gases) al medio, procedentes de una fuente productora. El nivel de emisión de una fuente se mide por las cantidades emitidas por unidad de tiempo. En el caso de las emisiones acústicas se miden características del ruido como la intensidad.

**Erosión.** Destrucción de los materiales de la superficie terrestre (rocas y suelo) por separación física de partículas de cualquier tamaño debido a la acción de los agentes externos (viento, agua, hielo). La intensidad de la erosión depende de la energía del agente erosivo, la naturaleza de los materiales (litología), el grado de meteorización, la pendiente del terreno, y en el caso del suelo, del grado de cobertura vegetal y del enraizamiento, por lo que las acciones humanas sobre la vegetación y el suelo pueden favorecer la erosión.

**Gases De Efecto Invernadero (GEI).** Gases que contribuyen a la formación de una cubierta térmicamente aislante alrededor de la Tierra. Los principales son: vapor de agua, bióxido de carbono, metano, óxido nitroso e hidrocarburos halogenados.

**Gasolina.** Mezcla de hidrocarburos ligeros. Volátil, inflamable, de olor característico, se utiliza como combustible en motores de explosión y tiene aplicaciones industriales como desengrasante, disolvente y materia prima de síntesis. Se obtiene por destilación del petróleo, por hidrogenación de carbón o dióxido de carbono, por cracking o rotura de compuestos hidrocarbonados de cadena larga y por polimerización e hidrogenación de hidrocarburos de cadena corta.

**Georreferenciación.** Proceso mediante el cual se logra una definición geográfica precisa de la ubicación de puntos, líneas y polígonos presentes en un mapa o foto, gracias a la correlación de estos y sus respectivos representados en un sistema de coordenadas reales.

**Hidrocarburos.** Compuestos orgánicos formados por carbono e hidrógeno. Pueden estar formados por cadenas hidrocarbonadas abiertas (hidrocarburos alifáticos) o cerradas formando ciclos o anillos (hidrocarburos cíclicos, por el ejemplo el ciclohexano). Los hidrocarburos cuyos anillos contienen dobles enlaces conjugados son los hidrocarburos aromáticos. Existen numerosos derivados de los hidrocarburos, por ejemplo los clorados y fluorados.

**Impacto Ambiental.** Se entiende por tal el efecto que una determinada actuación inducida por el hombre produce en el medio ambiente.

**Lixiviación.** Separación de los componentes de una mezcla sólida por la acción de un disolvente adecuado.

**Lluvia ácida.** Precipitaciones en las que el agua contiene ácidos disueltos. Estos ácidos se producen a partir de óxidos de azufre y nitrógeno ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ) emitidos a la atmósfera como contaminantes, en su mayoría procedentes de combustiones industriales y en menor proporción de procesos naturales. La lluvia ácida causa daños ambientales importantes en los bosques y en el suelo.

**Medio Ambiente.** Conjunto, en un momento dado, de agentes físicos, químicos, biológicos y de factores sociales susceptibles de tener un efecto directo e indirecto, mediato o aplazado sobre los seres vivos y las actividades humanas.

**Metales Pesados.** Son aquellos que, en concentraciones por encima de determinados límites, pueden producir efectos negativos en la salud humana, flora o fauna.

**Nitrógeno (N).** Su molécula diatómica es un gas químicamente inerte que constituye el 80% en peso de la atmósfera. Es uno de los cinco macroelementos que se encuentran en la materia orgánica. Es un componente esencial en los fertilizantes nitrogenados.

**Nitratos( $\text{NO}_3^-$ ).** Ión  $\text{NO}_3^-$  y sus sales o sales del ácido nítrico,  $\text{HNO}_3$ . Son nutrientes fácilmente asimilables por las plantas, por lo que son utilizadas como fertilizantes.

**Óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ).** Productos de combustión del nitrógeno, de color rojo parduzco ( $\text{NO}$  y  $\text{NO}_2$ ).



**Material particulado en suspensión (SPM).** Materia sólida o líquida dispersa en el aire, de diámetro inferior a 10 micras. Puede proceder de fuentes naturales (erupciones volcánicas) o artificiales. Dependiendo de su tamaño, pueden permanecer en suspensión en la atmósfera desde unos segundos a varios meses.

**Partículas Suspendidas Totales (PST).** Término utilizado para designar la materia particulada en el aire.

**pH.** Medida de la acidez o basicidad de una disolución. Se define como el menos logaritmo de la concentración de iones de hidrógeno, expresada en moles por litro. La escala de pH varía de 0 a 14.

**Precipitación.** Total de agua aportada a una superficie determinada en forma de lluvia, nieve, granizo u otro hidrometeoro, normalmente expresada en milímetros o, lo que es equivalente, litros por metro cuadrado.

**Residuos Tóxicos Y Peligrosos.** Materiales sólidos, pastosos, líquidos o gaseosos contenidos en recipientes que siendo el resultado de un proceso de producción, transformación, utilización o consumo, su productor destine al abandono y contengan en su composición alguna de las sustancias y materias en cantidades o concentraciones tales que representen un riesgo para la salud humana, recursos naturales y medio ambiente.

**Sistema de Información Geográfica (SIG).** Es un sistema computacional orientado a capturar, almacenar, administrar, integrar, manipular, analizar y presentar datos relacionados a elementos dispuestos sobre el superficie de la Tierra y su posición en ella; típicamente, se utiliza para el manejo de mapas, representados dentro del sistema como una o más capas diferentes, cada una de las cuales contiene información geográfica (posición de cada elemento en la Tierra), topológica (relaciones existentes entre los elementos de la capa) y temática (tema que busca representar, contenido) sobre algún aspecto particular.

**Sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ).** Sales sulfatadas o sales del ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Estos se incorporan al ecosistema por medio de la lluvia y por la solución de rocas que están formadas por compuestos como  $[\text{CaSO}_4]$  y  $[\text{FeS}_2]$ .

**Sulfuros ( $\text{S}^{2-}$ ).** Sus sales o sales del ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ). En la naturaleza se presentan en forma de sales de metales como el plomo (galena), arsénico (rejalgar), antimonio (estibina), zinc (blenda), hierro (pirita), entre otros.

**Vertedero.** Lugar donde se depositan residuos de origen urbano o industrial. Puede tratarse de una acumulación incontrolada, con los consiguientes riesgos de incendio, sanitarios y ambientales, o de una instalación o vertedero controlado donde los residuos reciben algún tipo de tratamiento o almacenamiento.

## ABSTRACT

In this work is discuss the results of physical and chemical variables:  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{Cl}^-$ , pH and conductivity in the rainfall, in ten places, of the Popayán city, Colombia, determined through of bulk precipitation (rainfall total deposition collected by funnels) during a period of seven months, it was began in September of 2001 and it was finalized in February of 2002, with the objective to analyze the sensitivity to the acid rain formation, besides to discuss the possible sources of determined ions, contributing with elements for the posterior formulation of Nutrient Flow Model. The datas were analyzed according to a space and temporary behavior. The pH varied between 3,68 and 6.61. The smaller value could be due to a greater concentration of acid ions or to reactions of decomposition of organic matter to inside of bottles. The pH average (5.44) was located within the normal range of the rainwater, which explains the presence of the alkaline ions in atmosphere like carbonates, able to neutralize the acid compounds. The average of conductivity was of  $14.44\mu\text{S}/\text{cm}$ , which can be attributed mainly to the presence of particle, wich were dragged from the atmosphere by action of winds, what originated of some unprotected soil or eroded lands, construction places, the presence of quarries and in addition, the aerosols contributed from exudates of the vegetation near the sites. The concentrations of  $\text{SO}_4^-$  (of 1,07mg/L to 7.32 mg/L) and of  $\text{Cl}^-$  (1.15mg/L to 24.26mg/L), can be attributed mainly to natural sources, as the possible influence of volcanic activity due to the dispersion of that contain these originating ions from the Cadena Volcánica De Los Coconucos, to dusts emitted from the ground and mainly the drag originating marine salts of the Pacific Ocean, without discarding the influence of the contributions of antropic origin, like the emissions vehiculares and domestic.

## RESUMEN

En este trabajo se discuten los resultados de las variables físicas y químicas:  $\text{SO}_4^-$ , Cl, pH y conductividad del agua de lluvia, en diez sitios de la ciudad de Popayán, Colombia, determinados a través de la técnica de depósito total, durante un periodo de siete meses, comenzando en Septiembre de 2001 y finalizando en Febrero de 2002, con el objetivo de analizar la sensibilidad a la formación de lluvia ácida, además de discutir las posibles fuentes de los iones determinados, con el fin de aportar elementos para la formulación inicial de un Modelo de Flujo de Nutrientes. Los datos se analizaron de acuerdo a un comportamiento espacial y temporal. El pH varió entre 3.68 y 6.61. El menor valor pudo deberse a una mayor concentración de iones acidificantes o a reacciones de descomposición de materia orgánica al interior del reservorio. El pH promedio (5.44) se ubicó dentro del rango normal del agua de lluvia, lo que explica la presencia en la atmósfera de iones alcalinos como carbonatos, capaces de neutralizar los compuestos ácidos. El promedio de conductividad fue de 14,44  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , lo que se puede atribuir principalmente a la presencia de partículas arrastradas hasta la atmósfera por acción de los vientos, provenientes de algunos terrenos desprotegidos de vegetación o erosionados, obras de construcción, la presencia de canteras y además, los aerosoles aportados a partir de los exudados de la vegetación cercana a los sitios. Las concentraciones de  $\text{SO}_4^-$  (de 1,07mg/L a 7,32 mg/L) y de Cl<sup>-</sup> (de 1,15 mg/L a 24,16 mg/l), pueden atribuirse principalmente a fuentes naturales, como la posible influencia volcánica debida a la dispersión de compuestos que contienen estos iones provenientes desde la Cadena Volcánica de los Coconucos, los polvos emitidos desde el suelo y principalmente el arrastre de sales marinas provenientes del Océano Pacífico, sin descartar la influencia de los aportes de origen antrópico, como las emisiones vehiculares y domésticas.

## INTRODUCCIÓN

La gran mayoría de los países latinoamericanos no son solamente países con tasas de urbanización muy altas, sino que también presentan un crecimiento relativo que en las últimas dos décadas ha sido más importante en las ciudades intermedias, es decir, cuyo tamaño demográfico se encuentra en el rango entre los 50 mil y 1 millón de habitantes, de acuerdo a Rodríguez, J & M, Villa<sup>1</sup>. Al parecer este proceso de expansión urbana es irreversible y en la mayoría de los casos carece de información acerca de las implicaciones ambientales, la cual se obtiene con la investigación de las causas y los efectos de la degradación ambiental como consecuencia del crecimiento urbano, con el fin de enfocar esfuerzos hacia la regulación de la actividad humana, mediante la implementación de medidas de control de la calidad ambiental y el desarrollo de prácticas y valores positivos dentro de la población urbana.

La ciudad de Popayán, como la mayoría de las ciudades intermedias en América Latina, soporta un crecimiento demográfico progresivo, determinado por causas, tanto sociales como económicas, lo cual podría estar acentuando la contaminación ambiental de la ciudad, como resultado de la dinámica urbana, que desencadena vectores de contaminación, que comprenden según el Plan de Acción Municipal de Popayán<sup>2</sup>: elevado flujo vehicular, residuos sólidos, depósitos de escombros en lugares no permitidos, vertimientos industriales, aguas residuales domésticas, basuras en las galerías, corrales y porquerizas, relleno sanitario, alteración y agotamiento de causas, inundaciones, quemaduras, degradación del suelo y de la cobertura vegetal, entre otros.

En el presente trabajo de investigación se determinaron los parámetros físicos y químicos pH, conductividad, volumen de captación,  $\text{SO}_4^-$  y  $\text{Cl}^-$  en el agua de lluvia de la ciudad de Popayán, mediante el método de depósito total. Con el propósito de aproximarse al análisis de la sensibilidad a la formación de lluvia ácida en la ciudad y establecer los puntos críticos de estas mediciones, los datos obtenidos se relacionaron con posibles fuentes de contaminación. Entre las fuentes antrópicas, se citan las industriales, la combustión vehicular y las emisiones domésticas (las dos últimas de carácter permanente). Y como fuentes naturales de gran influencia

---

<sup>1</sup> RODRIGUEZ, J & M, VILLA. Distribución Espacial De La Población, Urbanización Y Ciudades Intermedias: Hechos En Su Contexto. En: Ciudades Intermedias De América Latina Y El Caribe: Propuestas Para La Gestión Urbana. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Ministero degli Affari Esteri Cooperazione Italiana. (1998); p. 107 – 126.

<sup>2</sup> ALCALDIA MAYOR DE POPAYAN. SECRETARIA DE PLANEACIÓN MUNUCIPAL. PLAN DE DESARROLLO RURAL. Diagnóstico para la Implementación del Plan Ambiental Municipal. Popayán: La Secretaría, 1999.

por su cercanía, origen geológico, acción de los viento, entre otros: el océano Pacífico y la Cadena Volcánica de los Coconucos.

Con los resultados se generaron bases de información local, como mapas de distribución espacial de las variables, valores promedios, máximos y mínimos, entre otros, de las variables físicas y químicas: pH, conductividad, volumen de captación,  $\text{SO}_4^-$  y  $\text{Cl}^-$  en el agua de lluvia de la ciudad de Popayán. Mediante el análisis de esta información se obtuvieron algunas evidencias de problemas presentes y potenciales. Además, este estudio puede servir como marco de referencia para la modelación posterior del flujo de nutrientes en un entorno urbano y la generación de propuestas de corrección y control de la calidad ambiental urbana.

Esta investigación se desarrolló dentro del Proyecto de Modelización del Flujo de Nutrientes en ecosistemas altoandinos, formulado por el Grupo de Estudios Ambientales (GEA) de la Universidad del Cauca.

## 2. JUSTIFICACION

El estudio de la sensibilidad a la acidificación de la lluvia es hoy en día de gran importancia al ser uno de los problemas ambientales que más afecta no solamente a las zonas emisoras de contaminantes, sino a poblaciones pequeñas y áreas remotas. El análisis de los parámetros físicos y químicos más relevantes como son el pH, conductividad,  $\text{SO}_4^-$  y  $\text{Cl}^-$ , permiten conocer mejor el funcionamiento del proceso de acidificación en un área determinada, definir los posibles centros de contaminación, los agentes contaminantes y posibles factores ambientales, antrópicos, climatológicos y topográficos, entre otros, que participan en ello. Con este interés y con el de contribuir al conocimiento de la situación ambiental actual de la ciudad de Popayán, impulsar campañas de gestión ambiental y dar pie a futuras investigaciones de mayor profundización en los procesos implicados en la formación de lluvia ácida, se realizó esta investigación a manera de estudio preliminar acerca de la sensibilidad a la acidificación de la lluvia ácida en la ciudad de Popayán.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3. 1. OBJETIVO GENERAL**

Realizar una aproximación al análisis de la sensibilidad a la formación de lluvia ácida mediante la determinación de la depositación total de  $\text{SO}_4^-$  y  $\text{Cl}^-$ , durante el periodo de lluvias, tendiente a aportar algunos elementos para la posterior formulación de un Modelo de Flujo de Nutrientes, en una ciudad intermedia tropical, Popayán, Colombia.

#### **3. 2. OBJETIVOS ESPECIFICOS:**

- Aportar algunos elementos para la posterior formulación de un Modelo de Flujo de Nutrientes, mediante el cálculo del depósito total de los iones  $\text{SO}_4^-$  y  $\text{Cl}^-$ , presentes en el agua de lluvia.
- Determinar el comportamiento espacial y temporal de los parámetros físicos y químicos: volumen de captación, pH, conductividad,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$ , en el agua de lluvia de la ciudad de Popayán.
- Determinar la distribución espacial de los principales parámetros físicos y químicos del agua de lluvia, mediante un Sistema de información Geográfica.
- Identificar las posibles fuentes naturales y antrópicas de emisión de precursores primarios y establecer su relación con los parámetros físicos y químicos.
- Comparar los parámetros físicos y químicos del agua de lluvia de la ciudad de Popayán, con otras ciudades de Colombia y del mundo, permitiendo deducir comparativamente el estado de la calidad del aire en esta ciudad.

#### **4. HIPOTESIS**

Al finalizar el presente estudio se acepta la posibilidad que la ciudad de Popayán es sensible a la formación de lluvia ácida debido probablemente a la influencia volcánica y marina que existe sobre esta ciudad. Sin embargo, y analizando los valores promedios de pH, conductividad,  $\text{SO}_4^-$  y  $\text{Cl}^-$ , se encontró que las condiciones de calidad del aire en esta ciudad son favorables, y si en efecto las fuentes principales son las naturales, esto facilitaría el control de las emisiones de origen antrópico



## 5. MARCO TEORICO

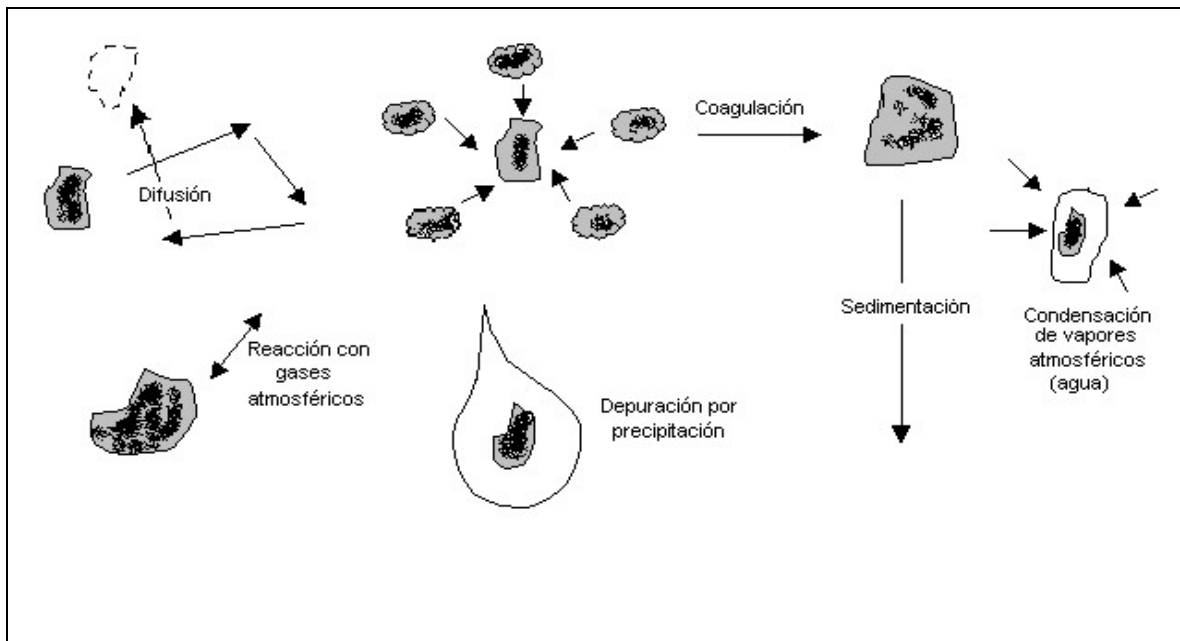
### 5.1 CONTAMINACION ATMOSFERICA

De acuerdo a Henry y Heynke<sup>3</sup>, la *contaminación del aire* hace referencia a la presencia en la atmósfera de sustancias que afectan de manera adversa la salud humana, animal, vegetal o la vida microbiana, dañan materiales o interfieren con el disfrute de la vida y el uso de los bienes materiales.

**5.1.1 Partículas atmosféricas.** Las partículas son algunos de los componentes más importantes de la atmósfera, particularmente de la tropósfera, y provienen de fuentes naturales y antrópicas: espuma de mar, humos, polvo, evaporación de materiales orgánicos de la vegetación, cenizas volcánicas, bacterias, granos de polen.

Como se muestra en la Figura 1, las partículas atmosféricas experimentan una serie de procesos en la atmósfera.

**Figura 1. Procesos que las partículas experimentan en la atmósfera**



Fuente: MANAHAN, Stanley., Fundamentals Of Environmental Chemistry. New York: Lewis Publisher, 1993. 840 p.

<sup>3</sup> HENRY, Glynn., & HEINKE, Gary W. Ingeniería Ambiental. 2ª ed. México: Prentice Hall, 1999. 778 p.

Las partículas coloidales pequeñas, están sujetas a *procesos de difusión* y las más diminutas *coagulan* junto a las partículas más grandes. De acuerdo a Manahan <sup>4</sup>, los principales mecanismos para remover partículas desde la atmósfera son la *sedimentación* y la *depuración*. Para Dómenech<sup>5</sup> el primer mecanismo, si se encuentra en fase sólida (*deposición seca*), y el segundo, incorporado en el agua de lluvia y otros tipos de precipitación (*deposición húmeda*).

Algunos de los más importantes fenómenos atmosféricos involucran a las partículas: electrificación, formación de nubes y formación de niebla. Además, las partículas participan en el balance calórico de la atmósfera terrestre mediante la reflexión de la luz. La función más importante de las partículas en la atmósfera es su intervención como núcleo para la formación de cristales de hielo y gotas de lluvia<sup>6</sup>. Por otra parte, las partículas están involucradas en muchas reacciones químicas de la atmósfera, tales como, reacciones de neutralización y de oxidación.

**5.1.2 Meteorología y Contaminación del Aire.** De acuerdo a Noel de Nevers<sup>7</sup>, a escala global (Figura 2), la contaminación atmosférica se produce cuando los contaminantes son emitidos a la atmósfera desde una fuente de contaminación. Ya en la atmósfera los contaminantes se someten a fenómenos de acarreo, dilución y modificación, tanto física como química.

**Figura 2. Problema Global de contaminación del aire**



Fuente: NOEL DE NEVERS, Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire. McGraw-Hill. Mexico. (1997); p. 546

<sup>4</sup> MANAHAN, Stanley., Fundamentals Of Environmental Chemistry. New York: Lewis Publisher, 1993. 840 p.

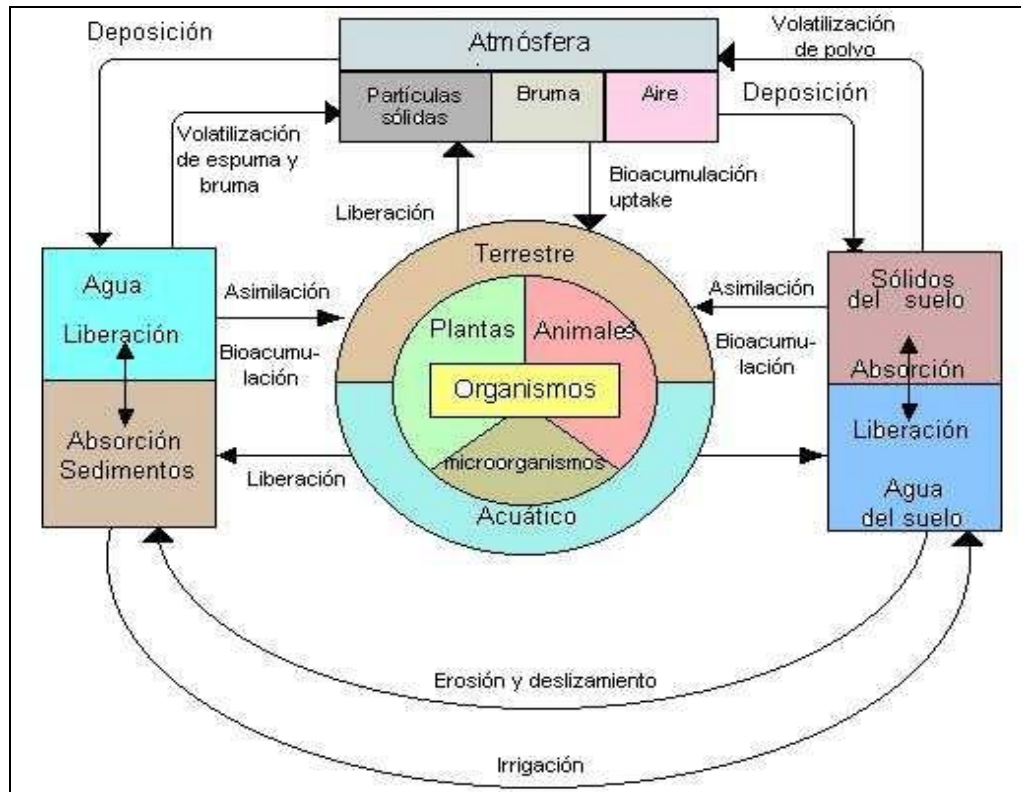
<sup>5</sup> DOMENECH, X. Química Ambiental: El impacto de los residuos. Madrid: Miraguano Ediciones, 1993.

<sup>6</sup> MANAHAN, Op. cit., 840 p.

<sup>7</sup> NOEL DE NEVERS, Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire. McGraw-Hill. Mexico. (1997); p. 546

Manahan<sup>8</sup> dice que una parte de los contaminantes es extraída de la atmósfera por mecanismos naturales de limpieza, mientras que el resto se acumula en concentraciones peligrosas para la biota. Esto se debe a que en ciertos casos no hay control adecuado de las emisiones de contaminantes de manera apropiada, con lo cual se rebasa la capacidad de la naturaleza para deshacerse de ellos. Henry y Heynke<sup>9</sup>, hablan de que esto crea una dependencia de la dispersión y de los subsecuentes procesos naturales de limpieza de la atmósfera para evitar concentraciones excesivas de contaminantes, posibilitando los efectos indeseables y favoreciendo los mecanismos de intercambio entre los sistemas terrestre, aéreo y acuático (Figura 3). Lamentablemente, numerosos problemas de contaminación ambiental como la lluvia ácida, no están confinados a un solo sistema, sino que implican interacciones entre ellos.

**Figura 3. Intercambio de contaminantes entre los ambientes biótico, terrestre, atmosférico y acuático**



Fuente: MANAHAN, Stanley. Fundamentals Of Environmental Chemistry. New York: Lewis Publisher, 1993. 840 p.

<sup>8</sup> Manahan, Op. cit. 840 p.

<sup>9</sup> HENRY Y HEINKE, Op. cit., 778 p.

Los procesos meteorológicos ejercen gran influencia en la contaminación atmosférica, dada la relación de fuerzas entre las fuentes contaminantes y las condiciones de autodepuración atmosférica. De acuerdo a lo mencionado por Marcano<sup>10</sup>, las principales variables meteorológicas a considerar por su influencia son (Tabla 1):

**Tabla 1. Procesos Meteorológicos y su influencia en la contaminación atmosférica**

<p><b>Transporte Convectivo Horizontal</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El viento, al transportar los contaminantes, produce su dispersión horizontal y determina la zona que va a estar expuesta a los mismos:</li> <li>• Generalmente, una mayor velocidad del viento reduce las concentraciones de contaminantes al nivel del suelo, ya que se produce una mayor dilución y mezcla.</li> <li>• En las circulaciones cerradas de viento (Ejemplo: las brisas del mar y las de valle y montaña), los contaminantes lanzados a la atmósfera se incorporan a la circulación del viento produciendo la acumulación progresiva de contaminantes.</li> <li>• La incidencia perpendicular de los vientos fuertes sobre las crestas montañosas, un valle o los edificios altos, los efectos aerodinámicos de estos obstáculos pueden impedir la dispersión de contaminantes, acumulándolos en determinadas zonas.</li> </ul>
<p><b>Transporte Convectivo Vertical</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El principal factor que determina el grado de difusión vertical de contaminantes es la variación vertical de temperaturas en la atmósfera:</li> <li>• Si en la capa de aire la temperatura desciende con la altura bastante menos de 1°C cada 100 metros, los movimientos verticales del aire se limitan por lo que hay poca o nula dispersión vertical de contaminantes, con lo cual, la clase de estabilidad atmosférica es del <i>tipo estable</i>.</li> <li>• Cuando la temperatura del estrato desciende con la altura más de 1°C cada 100 metros de altura, la estabilidad atmosférica es del <i>tipo inestable</i> y los movimientos verticales del aire están muy favorecidos difundiéndose los contaminantes verticalmente hasta donde alcance la inestabilidad.</li> <li>• En la <i>estratificación indiferente o nula</i>, la variación de temperatura del estrato coincide con el gradiente vertical adiabático. Bajo estas condiciones la dispersión vertical de contaminantes no está limitada.</li> <li>• El aumento de la temperatura del aire con la altura, origina el fenómeno de la inversión térmica, limitando la dispersión de contaminantes.</li> </ul>

Fuente: MARCANO, José. La Contaminación Atmosférica [Online]. Netscape. República Dominicana: República Dominicana, 17 de mayo de 2001 [Actualizado en Mayo de 2001]. Disponible en internet: <<http://jmarcano.com/recursos/contamin/catmosf.html>>

Los contaminantes pueden ser arrastrados por los vientos predominantes a lo largo de cientos, e incluso miles de kilómetros, fenómeno referido por Henry y Heynke<sup>11</sup> como el *transporte de largo alcance de contaminantes aéreos (TLACA)*.

<sup>10</sup> Marcano, Op. cit.

<sup>11</sup> Henry y Heynke, Op. cit., 778 p.

Las características físicas de una zona, como las condiciones geográficas y urbanísticas (ver Tabla 5), son determinantes para que los contaminantes se concentren, se transformen o se dispersen en la atmósfera:

**Tabla 2. Condiciones Geográficas y Urbanísticas que inciden en la contaminación atmosférica urbana**

<b>Geográficas</b>	Altitud a la cual se halla una ciudad respecto del nivel del mar y los accidentes geográficos (planicies, hondonadas, montañas) de la región en que se asienta.
<b>Urbanísticas</b>	El clima urbano puede llegar a ser muy diferente del que impera a su alrededor. Hay un relieve más abrupto, formado por edificios de diferentes alturas, lo que provoca una mayor resistencia en el transporte de contaminantes (Dómenech, X., 1993). Corresponde a la distribución de calles, casas habitación industrias y parques, que son muy importantes para una ciudad, y determinan en gran medida la cantidad de contaminantes vertidos a la atmósfera.

Fuente: Centro de Información Ambiental de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal. Preguntas Frecuente: Contaminación del Aire [Online]. Texinfo 2 el. (México D. F., México), Coordinación Técnica, 2001 (Actualizado en noviembre de 2001). Gobierno del Distrito Federal de México. Web: <[http://148.243.232.98/preguntas\\_frecuentes/contaminacion\\_aire.htm](http://148.243.232.98/preguntas_frecuentes/contaminacion_aire.htm)>

**5.1.3 Contaminantes Atmosféricos.** De acuerdo a Marcano<sup>12</sup>, sí los contaminantes atmosféricos son inorgánicos u orgánicos, se pueden clasificar en:

**5.1.3.1 Contaminantes Inorgánicos del Aire.** Contaminantes inorgánicos gaseosos que entran a la atmósfera como resultado de las actividades humanas. Entre los más abundantes: CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, H<sub>2</sub>S, Cl<sub>2</sub>, HCl y HF.

En general, las proporciones de los elementos del material particulado atmosférico, refleja la abundancia relativa de los elementos en el material original. La fuente del material particulado se refleja en su composición elemental, tomando en consideración las reacciones químicas que pueden cambiar dicha composición. Es así como la composición química del material particulado atmosférico es absolutamente diversa. Entre los integrantes del material particulado atmosférico, se encuentran sales, óxidos, compuestos nitrogenados, compuestos azufrados, metales diversos y radionúclidos.

**5.1.3.2. Contaminantes Orgánicos del Aire.** Los contaminantes orgánicos atmosféricos, pueden tener serios efectos sobre la calidad atmosférica. Tales

---

<sup>12</sup> Marcano, Op. cit.

contaminantes pueden provenir tanto de fuentes naturales como artificiales. En algunos casos, hay interacción entre los contaminantes de ambas fuentes para producir efectos contaminantes. Esto ocurre por ejemplo, cuando los hidrocarburos y la materia orgánica presente en las partículas en suspensión y los producidos en los árboles de citro y conífera, interactúan con los óxidos de nitrógeno de los automóviles para producir smog fotoquímico.

Teniendo en cuenta la formación de los compuestos contaminantes de la atmósfera, estos se pueden catalogar en *contaminantes primarios* y *contaminantes secundarios* (Figura 4).

**Figura 4. Contaminación Primaria y Secundaria.**



Fuente: Global Air Pollution. Tabla de datos de contaminantes con Nitrógeno [Online]. Mozilla/4.5 en Win95. España: Libro electrónico: Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, 2001 [rev. 1984 y 1988]. Disponible en internet: <Http://www1.ceit.es/asignaturas/ecologia/Hipertexto/10CAtm1/231DatosCompN.htm>

**5.1.3.3 Contaminantes primarios.** De acuerdo a Marcano<sup>13</sup>, los contaminantes primarios (Tabla 3) son aquellas sustancias vertidas directamente a la atmósfera que provienen de muy diversas fuentes, dando lugar a la llamada contaminación convencional. Su naturaleza física y su composición química son muy variadas.

<sup>13</sup> Marcano, Op. Cit.

**Tabla 3 Contaminantes Primarios Atmosféricos que causan alteraciones a la atmósfera**

Contaminante	Características
Aerosoles	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dispersiones de sustancias sólidas o líquidas en el aire, con un diámetro inferior a 100 µm. Entre las que se cuentan Núcleos de Aitken, partículas medias en suspensión, partículas sedimentables, polvos, humos industriales, humos de combustión.</li> <li>• Entre las propiedades de los aerosoles que más afectan los procesos de contaminación atmosférica están: la forma, la composición química y el tamaño de sus partículas (dado que establece su tiempo de permanencia en la atmósfera y la facilidad con que se introducen en las vías respiratorias profundas).</li> </ul>
Óxidos de azufre, SOx	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SO<sub>2</sub>: gas incoloro, de olor picante e irritante en concentraciones superiores a 3 ppm. Es 2.2 veces más pesado que el aire, y se desplaza rápidamente en la atmósfera y es un gas bastante estable.</li> <li>• El SO<sub>3</sub>: gas incoloro y muy reactivo que condensa fácilmente. En condiciones normales, no se encuentra en la atmósfera, ya que reacciona rápidamente con el agua atmosférica, formando ácido sulfúrico.</li> <li>• La combustión de cualquier sustancia que contenga azufre produce emisiones de SO<sub>2</sub> y SO<sub>3</sub>. La cantidad de SO<sub>3</sub> producida depende de las condiciones de la reacción, como: la temperatura, oscilando entre 1 y 10% de los SOx producidos. Las reacciones para la formación de SOx pueden ser<sup>14</sup>: <ul style="list-style-type: none"> <li style="text-align: center;"><math>S + O_2 \rightarrow SO_2 \dots\dots(Rx.1)</math></li> <li style="text-align: center;"><math>2SO_2 + O_2 \rightarrow 2SO_3 \dots\dots(Rx.2)</math></li> </ul> </li> <li>• La [Rx. 5] se produce a pequeña escala y tiene lugar muy lentamente a la temperatura de la atmósfera, siendo favorecida por la acción de catalizadores. El efecto neto es que la emisión de los SOx se realiza fundamentalmente en forma de SO<sub>2</sub>.</li> </ul>
Monóxido de carbono (CO)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es el contaminante del aire más abundante en la capa inferior de la atmósfera, sobre todo en el entorno de las grandes ciudades.</li> <li>• Es un gas incoloro, inodoro e insípido, con un punto de ebullición de -192° C. Su densidad es de 96.5% de la del aire, siendo un gas muy ligero que no es apreciablemente soluble en agua. Es inflamable y arde con llama azul, aunque no mantiene la combustión.</li> <li>• El CO se produce generalmente a partir de alguno de los siguientes procesos químicos: 1) combustión incompleta del carbono, 2) reacción a elevada temperatura entre el CO<sub>2</sub> y materiales que tienen carbono, 3) disociación del CO<sub>2</sub> a altas temperaturas, 4) oxidación atmosférica del metano (CH<sub>4</sub>) procedente de la fermentación anaerobia de la materia orgánica, y 4) procesos de producción y degradación de la clorofila en las plantas.</li> <li>• Los principales problemas de contaminación atmosférica por CO son debidos a la combustión incompleta de carburantes en los automóviles.</li> </ul>

<sup>14</sup> Marcano, Op. Cit.

<p>Los óxidos de nitrógeno (NOx)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se conocen ocho óxidos de nitrógeno distintos, pero normalmente sólo tienen interés como contaminantes dos de ellos: el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>). El resto se encuentra en equilibrio con estos dos, pero en concentraciones tan extraordinariamente bajas que carecen de importancia. El óxido nítrico (NO) es un gas incoloro y no inflamable, inodoro y tóxico. El dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) es un gas pardo-rojizo, no inflamable, tóxico y de olor muy asfijante.</li> <li>• 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 NO<sub>2</sub>. La mayor parte de los NOx emitidos a la atmósfera lo son en la forma NO (Rx. 3 y Rx. 4).</li> </ul> $N_2 + O_2 \rightarrow 2NO \dots\dots(Rx.3)$ $2NO + O_2 \rightarrow 2NO_2 \dots\dots(Rx.4)$
<p>Hidrocarburos (HC).</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En la combustión, los hidrocarburos son los contaminantes atmosféricos predominantes.</li> <li>• Los derivados del petróleo, principalmente la gasolina, son las mayores fuentes de hidrocarburos contaminantes originados en las actividades humanas, y pueden entrar a la atmósfera directamente o por productos de la combustión parcial de otros hidrocarburos.</li> <li>• Los hidrocarburos que contienen de uno a cuatro átomos de carbono son gases a la temperatura ordinaria, siendo estos los más importantes desde el punto de vista de la contaminación atmosférica, ya que favorecen la formación de las reacciones fotoquímicas.</li> </ul>
<p>Ozono (O<sub>3</sub>)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es una forma alotrópica del oxígeno. En condiciones normales es un gas incoloro de olor picante. Posee un gran poder oxidante y gran tendencia a transformarse en oxígeno.</li> <li>• Las concentraciones de ozono a nivel del suelo son muy pequeñas, incrementándose rápidamente con la altura. Su presencia en la parte baja de la atmósfera se debe, sobre todo, a la acción fotoquímica de las radiaciones solares, en presencia de NOx y HC.</li> </ul>
<p>Anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gas incoloro e inodoro, no tóxico, más denso que el aire, presente en la atmósfera en concentraciones que oscilan entre 250 y 400 ppm. No puede considerarse como contaminante en sentido estricto ya que no es tóxico, y se halla en atmósferas puras de modo natural.</li> <li>• Por los posibles riesgos que entraña su acumulación en la atmósfera, como consecuencia de las alteraciones producidas en su ciclo por las actividades humanas que pudieran dar lugar a una modificación del clima de la Tierra, se lo considera como sustancia contaminante</li> </ul>

Además de estas sustancias, en la atmósfera se encuentran una serie de contaminantes descritos a continuación (Tabla 4),, los cuales se presentan más raramente pero que pueden producir efectos negativos sobre determinadas zonas por ser su emisión muy localizada a la atmósfera.



**Tabla 4 Contaminantes Primario encontrados con menos frecuencia en la atmósfera.**

Contami- nantes	Característica
Compuestos halogenados	<ul style="list-style-type: none"> <li>Entre los productos químicos que contienen halógenos en su molécula, son contaminantes de la atmósfera: el cloro, el fluoruro de hidrógeno, el cloruro de hidrógeno y ciertos haluros. Entre estos se destaca la acción tóxica del flúor y sus derivados sobre los vegetales.</li> </ul>
Metales tóxicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>Generalmente se hallan presentes en la atmósfera en muy bajas concentraciones.</li> <li>Una de las consecuencias más graves de la presencia de metales tóxicos en el ambiente es que no son degradados, ni química ni biológicamente por la naturaleza, lo cual origina su persistencia en ella, llevando a la amplificación biológica de los metales en las cadenas tróficas, por lo tanto, las concentraciones de metales en los miembros superiores de la cadena pueden alcanzar valores muy superiores a los encontrados en la atmósfera. Entre los metales tóxicos más importantes por sus efectos sobre la salud están el mercurio (Hg) y el plomo (Pb).</li> <li>La cantidad de plomo en el aire ha experimentado un marcado aumento como consecuencia de las actividades humanas, siendo las concentraciones de plomo en las áreas urbanas de 5 a 50 veces superiores que en las áreas rurales.</li> </ul>
Sustancias radiactivas	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estas sustancias emiten radiaciones ionizantes que pueden provocar efectos nocivos cuando interactúan con los seres vivos</li> </ul>
Otros derivados del azufre	<ul style="list-style-type: none"> <li>De acuerdo al Servicio de Salud Metropolitana del Ambiente de Santiago de Chile<sup>15</sup>, los derivados del azufre principalmente provienen de las emisiones vehiculares y fundiciones, a razón de la combustión del azufre contenido en los combustibles fósiles (petróleos combustibles, gasolina, petróleo diesel, carbón, etc), de la fundición de minerales que contienen azufre y de otros procesos industriales. La exposición a los ácidos derivados del dióxido de azufre afectan la salud debido a que ingresan directamente al sistema circulatorio humano a través de las vías respiratorias. En concentraciones altas puede provocar broncoconstricción y bronquitis. Aumenta morbilidad y mortalidad en personas mayores y morbilidad en niños.</li> </ul>
Arsénico y sus derivados	<ul style="list-style-type: none"> <li>El arsénico es un contaminante ampliamente distribuido en el medio ambiente. Se obtiene como producto secundario en la producción y refinación de cobre, plomo, zinc, estaño y oro. Se utiliza en la fabricación de insecticidas, herbicidas y fungicidas, aunque cada vez menos para estos fines. Además, se producen algunos colorantes a base de arsénico. Con el plomo se fabrican perdigones y emplea en e. tratamiento de algunas enfermedades.</li> <li>Los compuestos arsenicales inorgánicos solubles -arsenito de sodio, ácido arsenioso- son muy tóxicos, considerándose como un carcinogénico, el cual puede indirectamente dañar el material genético.</li> </ul>

<sup>15</sup> Servicio de Salud Metropolitana del Ambiente. Compuestos [Online]. Microsoft FrontPage 3.0. Santiago de Chile: Sesma, 2000 [rev. 2000]. Disponible en internet: <<http://www.sesma.cl/macam2rm/pag/p00mpccomp.htm>>

Componentes orgánicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aquellos de larga vida que se presentan cada vez más concentrados a medida que ascienden en la cadena alimenticia, son capaces de viajar miles de kilómetros a partir del punto en el que fueron liberados.</li> <li>• Una buena parte incluyen los PCB industriales, las dioxinas policlorinadas y los furanos (productos residuales desechables de procesos diversos), y algunos pesticidas (DDT, clordano y el heptacloro).</li> <li>• Aunque su uso está restringido en la mayoría de los países desarrollados, muchos de estos aún se fabrican en Estados Unidos y en otras naciones industrializadas para su exportación y uso generalizado en países en vías de desarrollo .</li> </ul>
Partículas de sustancias minerales (amianto y asbestos)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para el caso del amianto, se caracteriza por su peligrosidad y su enorme difusión (se utilizaba en la construcción sobre todo como material de relleno). Desde mediados de los años 80 se ha prohibido utilizar el amianto, debido a sus efectos cancerígeno demostrados (asbestosis pulmonar, cáncer pulmonar, tumores pléuricos y peritoneales).</li> </ul>

Las emisiones primarias originadas por los focos naturales (ver Tabla 5) provienen fundamentalmente de:

**Tabla 5. Contaminantes naturales del aire**

Fuente	Contaminantes
Volcanes	Óxidos de azufre, partículas
Fuegos forestales	Monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, partículas
Vendavales	Polvo
Plantas (vivas)	Hidrocarburos, polen
Plantas (en descomposición)	Metano, sulfuro de hidrógeno
Suelo	Virus, polvo
Mar	Partículas de sal

Fuente: MARCANO, José<sup>16</sup>

Entre las principales fuentes antropogénicas de emisiones primarias están:

**Tabla 6. Principales focos antropogénicos de emisiones primarias**

<b>Focos fijos</b>	Industriales	Procesos industriales, Instalaciones fijas de combustión, Instalaciones de calefacción
	Domésticos	
<b>Focos móviles</b>	Vehículos automóbiles	
	Aeronaves	
	Buques	
<b>Focos compuestos</b>	Aglomeraciones industriales	
	Áreas urbanas	

Fuente: MARCANO, José<sup>17</sup>

<sup>16</sup> Ibid.

<sup>17</sup> Ibid.

Con frecuencia, los contaminantes naturales se difunden en cantidades mayores que los productos de las actividades humanas. Sin embargo, los contaminantes antropogénicos presentan la amenaza más significativa a largo plazo para la biosfera.

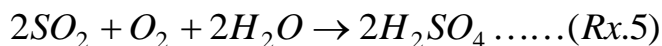
Considerando la distribución espacial de la emisión de contaminantes (Tabla 7), éstos se pueden catalogar en:

**Tabla 7. Distribución espacial de la emisión de contaminantes**

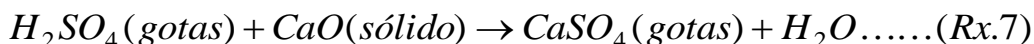
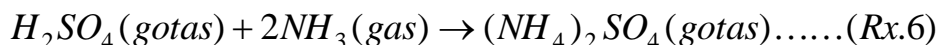
<b><i>Puntuales</i></b>	Chimeneas industriales aisladas
<b><i>Lineales</i></b>	Calles de una ciudad, carreteras y autopistas
<b><i>Planos</i></b>	Aglomeraciones industriales y áreas urbanas.

Fuente: MARCANO, José<sup>18</sup>

Manahan<sup>19</sup> hace referencia a un proceso común para la formación de brumas de aerosol involucra la oxidación del dióxido de azufre a ácido sulfúrico (Rx. 5):



En presencia de contaminantes básicos del aire, tales como el óxido de amonio u óxido de calcio, reacciona para formar sales (Rx. 6 y Rx. 7):



En condiciones de baja humedad el agua se pierde de estas gotas y se forma un aerosol sólido. Estas reacciones constituyen un importante proceso general para la formación de aerosoles, particularmente de partículas diminutas.

**5.1.4 Contaminantes secundarios.** Los contaminantes atmosféricos secundarios se producen como consecuencia de las transformaciones y reacciones químicas y fotoquímicas que sufren los contaminantes primarios en la atmósfera, generando alteraciones atmosféricas (Tabla 8).

---

<sup>18</sup> MARCANO, José, Ibid.

<sup>19</sup> Manahan, Op. cit., 840p.

**Tabla 8 Principales alteraciones atmosféricas producidas por los contaminantes secundarios**

Alteración	Características
Contaminación fotoquímica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los hidrocarburos se difunden en la atmósfera a través de la combustión incompleta de combustibles. Una gran parte proviene de la evaporación de las fracciones volátiles de la gasolina de los automóviles que no podrán eliminarse del combustible a no ser que se encuentre un procedimiento para arrancar en frío el motor sin depender de esta evaporación espontánea. Por otra parte, se da la paradoja que la gasolina verde, sin plomo, desprende benceno por evaporación, que es un compuesto cancerígeno.</li> <li>• El tolueno es otro hidrocarburo muy frecuente en el ambiente de las ciudades por la radiación ultravioleta, que da origen a la formación de ozono y de los radicales libres, que atacan las mucosas del cuerpo humano, especialmente la de los ojos y la piel.</li> </ul>
Disminución del espesor de la capa de ozono	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los halocarbonos hechos por el hombre, como los CFCs, tetracloruro de carbono (CCl<sub>4</sub>) y metil cloroformo (CH<sub>3</sub>.CCl<sub>3</sub>) no son solubles en el agua, por lo cual no caen con la lluvia o nieve y alcanzan la estratósfera, donde se localiza la capa de ozono. Es entonces cuando la radiación UV arranca el cloro de una molécula de clorofluorocarbono (CFC). Este átomo de cloro, al combinarse con una molécula de ozono la destruye, para luego combinarse con otras moléculas de ozono y eliminarlas. El proceso es altamente dañino, ya que en promedio un átomo de cloro es capaz de destruir hasta 100.000 moléculas de ozono. Este proceso se detiene finalmente cuando este átomo de cloro se mezcla con algún compuesto químico que lo neutraliza. Al debilitarse la capa de ozono, los rayos UV inciden más directamente sobre la superficie de la tierra, causando serios problemas sobre la salud humana y los ecosistemas.</li> </ul>
Acidificación del medio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entre los efectos de la acidificación están: la sensibilidad de los suelos y de las aguas a la acidez y la concentración de partículas contaminantes, donde el nivel de deposición acidificante excede la capacidad tampón del medio, los problemas de acidificación surgen tarde o temprano. De aquí el concepto de <i>carga crítica</i>, definida como aquella exposición por debajo de la cual los efectos dañinos significativos sobre los elementos sensibles del ambiente no ocurren según el conocimiento actual. Las partículas contaminantes pueden ser transportadas a largas distancias<sup>20</sup>.</li> </ul>

## 5. 2 LLUVIA ACIDA

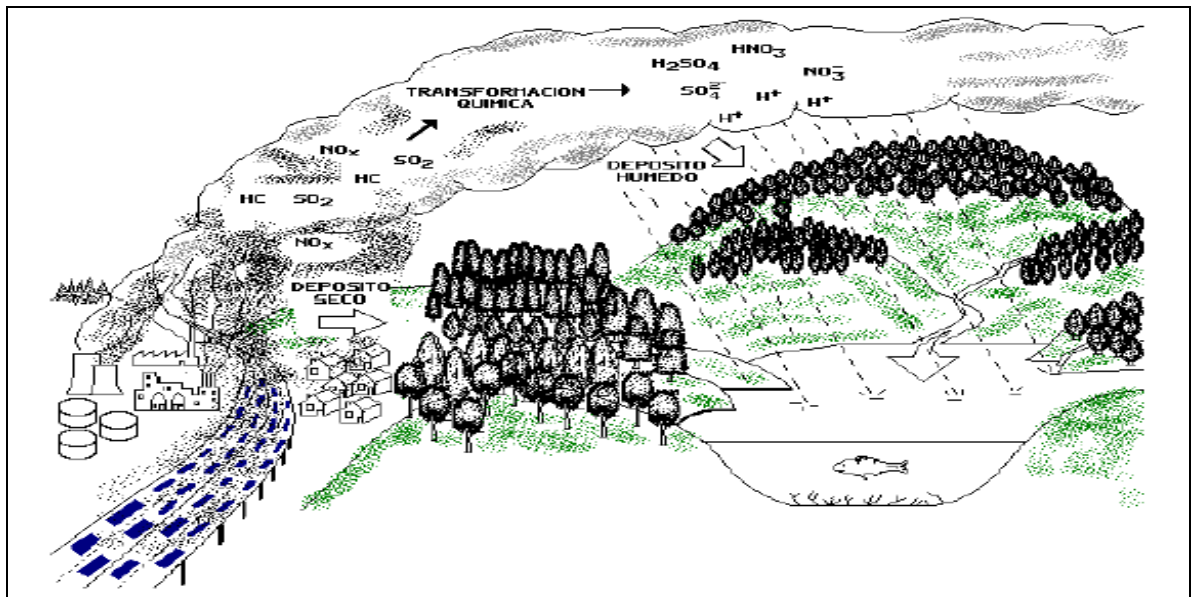
Henry y Heynke<sup>21</sup> se refieren a la precipitación pluvial como ligeramente ácida, con un pH aproximadamente de 5.6, lo cual se debe al equilibrio entre el agua de lluvia y el CO<sub>2</sub> del aire, el cual se disuelve lo suficiente para dar una solución diluida de ácido carbónico, pero se acidifica debido a la presencia de ácidos más fuertes que

<sup>20</sup> Infoagro. Atmósfera, contaminación y lluvia ácida [Online]. Microsoft FrontPage 4.0. España: Infoagro, 2001 [rev. 2001]. Disponible en internet: <[http://www.nortecastilla.es/canalagro/datos/agricultura\\_ecologica/lluvia\\_acida.htm](http://www.nortecastilla.es/canalagro/datos/agricultura_ecologica/lluvia_acida.htm)>

<sup>21</sup> HENRY y HEYNKE, Op. cit., 778 p.

el  $\text{CO}_2$ , generando la formación de *lluvia ácida*. Las sustancias emitidas a la atmósfera pueden retornar a la superficie químicamente transformadas, por medio de procesos de *deposición húmeda* o *deposición seca* (Figura 5). La lluvia ácida tiene su origen en la emisión de dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno gaseosos a la atmósfera por las chimeneas de estaciones generadoras, fundiciones y escapes de automóviles. Estos gases son transportados por corrientes aéreas sobre amplias regiones. La precipitación pluvial los lava y origina la lluvia ácida, dañina para la vida acuática, los bosques y los cultivos.

**Figura 5. Mecanismos de Deposición Seca y Húmeda.**



Fuente: Acidification and Pollution. A Brief Guide. National Protection Board, 1983, citado por: Dirección General De Prevención Y Control De La Contaminación, 1994.

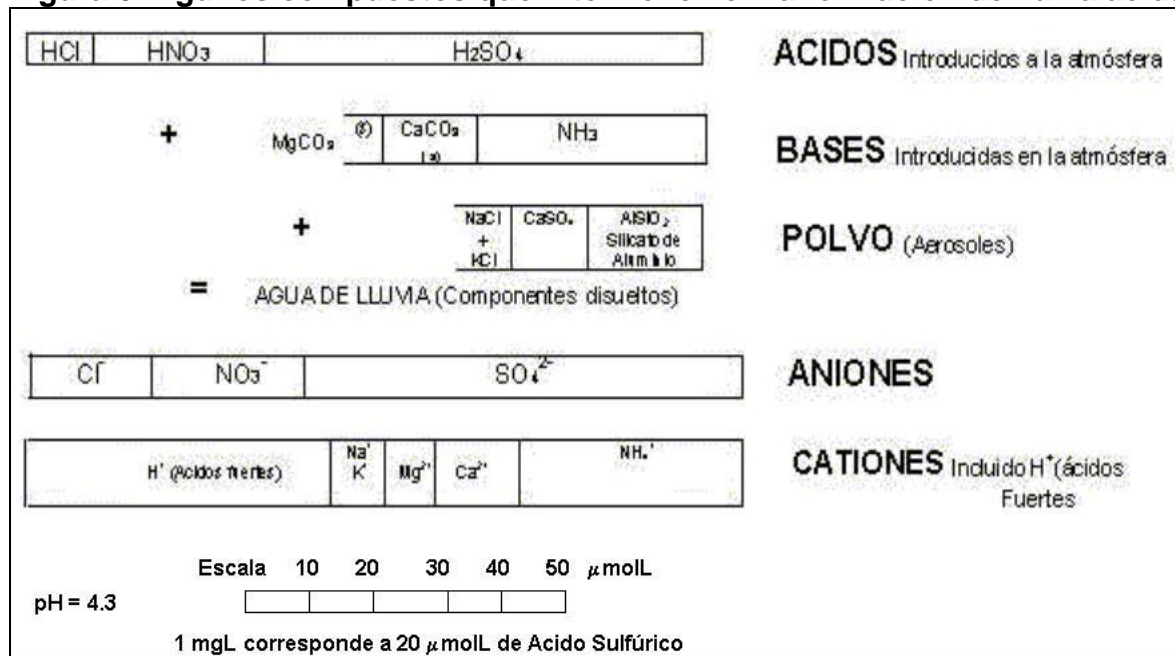
El material contaminante que desciende con la lluvia es conocido como *deposición húmeda*, el cual incluye partículas y gases barridos del aire por las gotas de lluvia. Además, el material que llega al suelo por gravedad durante los intervalos secos se denomina deposición seca, e incluye partículas, gases y aerosoles.

En los procesos naturales, el bióxido de carbono [ $\text{CO}_2$ ], al disolverse en las gotas de agua produce una solución ligeramente ácida que disuelve con facilidad algunos minerales, y cuyo valor natural de pH es de 5.6. No obstante, en la actualidad la esta acidez normal de la lluvia es muy baja en relación con la que le imparten los ácidos fuertes como el sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y el nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), sobre todo a la lluvia que se origina cerca de las áreas urbanas y/o industrializadas<sup>22</sup>.

<sup>22</sup> ZAMBRANO RAMÍREZ, Alex Roger. Op. Cit.

**5. 2. 1 Génesis de la lluvia ácida**<sup>23</sup>. En los sistemas acuosos algunos ácidos son más fuertes que el  $H_3O^+$  y algunas bases son más fuertes que el  $OH^-$ . Por lo tanto, las soluciones de ácidos más fuertes que  $H_3O^+$  y bases más fuertes que  $OH^-$  no son especies estables, protonadas o desprotonadas, respectivamente. Stumm y Morgan<sup>24</sup> explican que la lluvia ácida se origina (Figura 6) cuando en la atmósfera hay exceso de acidez de algunos minerales (principalmente ácido sulfúrico  $[H_2SO_4]$  y  $[HNO_3]$ , y ocasionalmente  $[HCl]$ ) sobre las bases reactivas de las partículas de polvo (carbonatos de calcio  $[CaCO_3]$  y carbonato de Magnesio  $[MgCO_3]$ ), y otras bases menos reactivas como los silicatos de aluminio (caolín,  $[H_2Al_2(SiO_4)]$ ); feldespato  $[KAlSi_3O_8]$ , óxidos de hierro ( $[FeO]$  y  $[Fe_2O_3]$ ) y otros iones amortiguadores, dando como resultado agua lluvia que contiene un exceso de ácidos fuertes. Entre estos ácidos se encuentran el  $[H_2SO_4]$ ,  $[H_2CO_3]$  (ácido carbónico), y ácidos orgánicos como el acético  $[CH_3COOH]$  y el ácido fórmico  $[HCOOH]$ .

**Figura 6 Algunos compuestos que intervienen en la formación de lluvia ácida**



Fuente: Stumm, W. & J. J. Morgan. Aquatic Chemistry: An Introduction Emphasizing Chemical Equilibria In Natural Waters. United States Of America: John Wiley & Sons, 1981. 780 p.

<sup>23</sup> MANAHAN, Op. cit., 840 p.

<sup>24</sup> STUMM, W. & J. J. MORGAN. Aquatic Chemistry: An Introduction Emphasizing Chemical Equilibria In Natural Waters. United States Of America: John Wiley & Sons, 1981. 780 p.

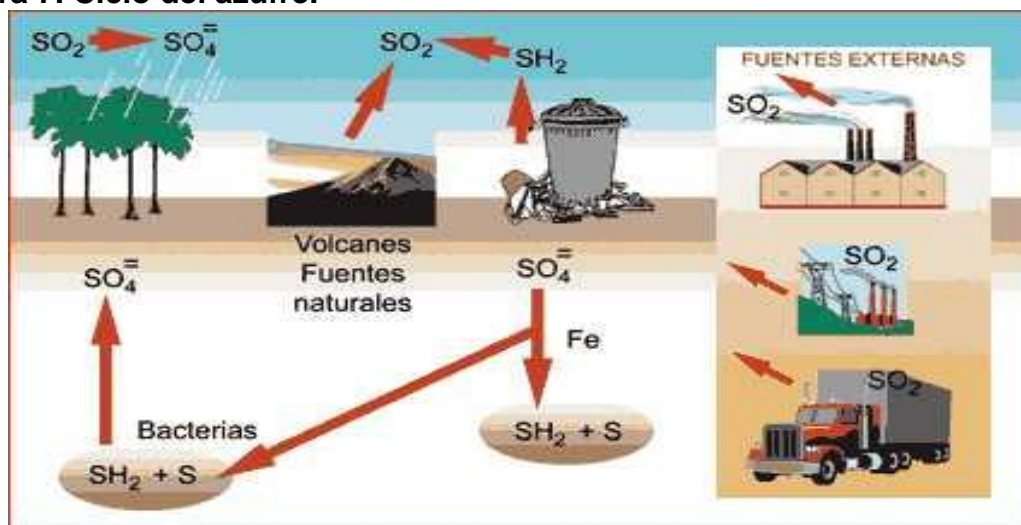
Rocha y Bittencourt<sup>25</sup> dicen que las sustancias ácidas inorgánicas más importantes son el  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y el  $\text{HNO}_3$ , y que los dos ácidos orgánicos, presentes en mayor concentración en el agua de lluvia son el ácido fórmico y el ácido acético. La contribución relativa de los compuestos ácidos en la acidez de la precipitación depende del tipo de fase acuosa. Una contribución de ácidos orgánicos puede dominar las regiones tropicales y ecuatoriales. Las fuentes naturales de estos ácidos y de sus precursores son la vegetación, actividades antrópicas, incluyendo emisiones vehiculares.

Los principales elementos inorgánicos que intervienen en la formación de la lluvia ácida son:

## 5.2.2. Azufre

### 5.2.2.1. Ciclo Natural (Figura 7).

Figura 7. Ciclo del azufre.



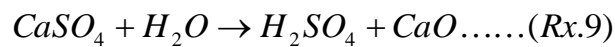
Fuente: Expoindustria. Ciclo del Azufre [Online]. Textinfo. México: Expoindustria. 2001 [2001]. Disponible en internet: <<http://www.expoindustria.net/images/CicloAzufre.gif>>

De acuerdo a Restrepo y Vargas<sup>26</sup>, el azufre aunque no es muy abundante se halla fácilmente disponible en grandes depósitos de tipo volcánico, manantiales

<sup>25</sup> ROCHA, C. & J. BITTENCOURT DE ANDRADE. Química atmosférica do enxofre (IV): Emissões, reações em fase aquosa e impacto ambiental. En: Química Nova. Vol. 25, No. 2 (2002); p. 259-272.

<sup>26</sup> RESTREPO, F. & L. VARGAS. Química Básica: Los Principios Fundamentales De La Química General. 5ª ed. Colombia: Editorial Bedout, 1951. 477p.

minerales y depósitos de yeso. Felix, et al<sup>27</sup> dice que combinado se encuentra en las minas o minerales metálicos, sobre todo en forma de sulfatos y sulfuros; en forma de ácido sulfhídrico [H<sub>2</sub>S] (Rx 8) en las aguas minerales y en las materias orgánicas; en forma de dióxido de azufre [SO<sub>2</sub>] (Rx 9) en las fumarolas de los volcanes; en otras combinaciones en los compuestos orgánicos. Los sulfatos es la forma más común de encontrar el azufre en el agua. Estos compuestos se incorporan al ecosistema por medio de la lluvia y por la solución de rocas que están formadas por compuestos como [CaSO<sub>4</sub>] (Rx 9) y [FeS<sub>2</sub>] (Rx 10).



*5.2.2.2 El azufre en la atmósfera.* Manahan<sup>28</sup> afirma que a escala global, los componentes sulfurosos entran a la atmósfera extensamente a través de las actividades humanas, a razón de 100' ton/m<sup>2</sup>/año, Principalmente como SO<sub>2</sub> desde la combustión de carbón y de residuos de combustibles. El azufre no antropogénico, entra a la atmósfera ampliamente como H<sub>2</sub>S, desde los volcanes y la descomposición de materia orgánica y la reducción de sulfatos. La cantidad proveniente de los procesos biológicos, puede ser tan baja como 1'/ton/m<sup>2</sup>/año. El H<sub>2</sub>S que entra a la atmósfera es convertido rápidamente a SO<sub>2</sub> por procesos que involucran severos pasos intermedios, incluyendo reacciones con radicales hidroxilos.

Stumm y Morgan<sup>29</sup>, explican que el [H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>] se origina principalmente del S de los combustibles fósiles. Muchos factores como la temperatura, la humedad, la intensidad de la luz, el transporte atmosférico y las características del material particulado, pueden influenciar las reacciones químicas del [SO<sub>2</sub>] en la atmósfera. Después de la combustión, el [SO<sub>2</sub>] formado, es oxidado a [SO<sub>3</sub>] el cual con el [H<sub>2</sub>O] da origen al [H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>] (Rx 11, Rx 12 y Rx 13) y sales sulfato (Rx 13)\*, particularmente sulfato de amonio y sulfato hidrógeno de amonio. Estos al precipitarse en la tierra como componentes de la lluvia ácida, causan daños a los árboles y la vida acuática.

---

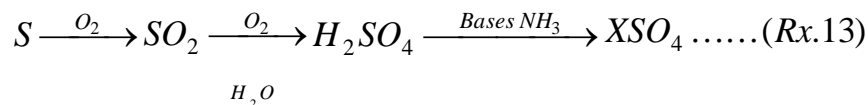
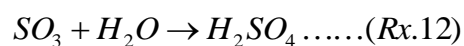
<sup>27</sup> FELIX, C.Et al. Tratado de Química Mineral. Bogotá: Editorial Bedout, 1958. 452 p.

<sup>28</sup> Manahan, Op. cit., 840 p.

<sup>29</sup> Stumm y Morgan, Op. cit., 780 p.

\* La X de la reacción 13, representa el elemento con el que el sulfato forma la sal.





Algunos datos de los contaminantes con azufre se presentan a continuación:

**Tabla 9. Datos de contaminantes con azufre**

Compuesto	Fuentes principales	S Producido (Tg/año)*	Concentración típica		Tiempo de Vida	Sumidero
			Natural	Contaminado		
Sulfuro de carbonilo (COS)	Suelos, marismas, quema de biomasa	4.7	500pptv*	?	44 años	Fotólisis océanos, estratosfera
Disulfuro de carbono (CS <sub>2</sub> )	Océanos, suelos	106	15-30pptv	100-200 pptv	12 días	Por fotólisis produce SO <sub>2</sub>
Disulfuro de dimetilo DMS ((CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> S)	Descomposición de algas en el océano	27-56	<10pptv	100 pptv	0.6 días	Deposición en océano, oxidación a SO <sub>2</sub>
Sulfuro de hidrógeno (H <sub>2</sub> S)	Reducción bacteriana, suelos y humedales	variable	30-100 pptv	330-810 pptv	4.4 días	Fotólisis
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	Origen humano, volcanes, oxidación de H <sub>2</sub> S, Combustión de petróleo	103	24-90 pptv	>5 ppbv***	2-4 días	Deposición seca y húmeda, oxidación a SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>
Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> )	Superficie del mar Oxidación desde SO <sub>2</sub>	38	0.01m/g /m <sup>3</sup>	>2.5m/g/ m <sup>3</sup>	1 semana	Deposición seca y húmeda

Fuente: Global Air Pollution. Datos de artículos de 1984 y 1988.  
<http://www1.ceit.es/asignaturas/ecologia/Hipertexto/10CAtm1/221DatComAz.htm>

\* Tg = 10<sup>12</sup>g

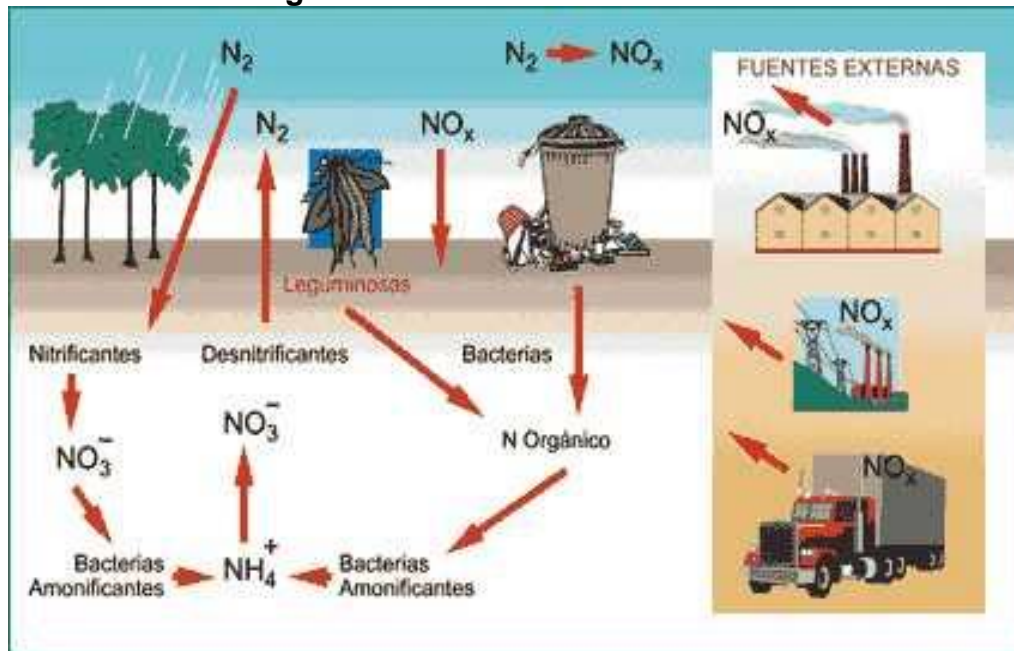
\*\* pptv = parte por trillón en volumen

\*\*\* ppbv = parte por billón en volumen

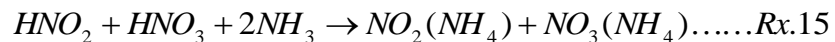
### 5.2.3 Nitrógeno.

5.2.3.1. *Ciclo Natural* (Figura 8). Se encuentra en la naturaleza en forma de sales nitradas. Durante las descargas eléctricas en las tormentas, por la combinación del nitrógeno con el hidrógeno y el oxígeno, se produce amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y óxido nitroso ( $\text{NO}$ ), este último se combina con el oxígeno y el agua de la atmósfera, formando ácido nitroso ( $\text{HNO}_2$ ) y ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) (Rx 14). Celsi y Lacobucci<sup>30</sup> dicen que estos ácidos reaccionan con el amoníaco, dando nitritos y nitratos amónicos (Rx 15). Combinado, el nitrógeno se encuentra en los compuestos orgánicos y en las sales de amonio y en los nitratos naturales de sodio ( $\text{NaNO}_3$ ), potasio ( $\text{KNO}_3$ ), etc.

Figura 8. Ciclo del Nitrógeno.



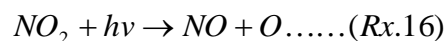
Fuente: Expoindustria. Ciclo del Nitrógeno [Online]. Textinfo. México: Expoindustria. 2001 [2001]. Disponible en internet <<http://www.expoindustria.net/images/CicloNitrogeno.gif>>



<sup>30</sup> CELSI, S.A. & A. D. IACOBUCCI. Química Elemental Moderna. Buenos Aires: Kapalez & Cía, 1939. 366 p.

Restrepo y Vargas<sup>31</sup> afirman que las mayores cantidades de nitrógeno son asimiladas por el ecosistema, gracias a la acción, generalmente de bacterias fijadoras de nitrógeno. Las más eficaces son aquellas que forman simbiosis con las leguminosas, utilizando el molibdeno (Mo) como catalizador, para finalmente formar nitratos que pueden ser asimilados por las plantas. De este modo se aumenta el poder fertilizante del suelo. Cuando los organismos que fijan el nitrógeno son atacados por otras bacterias, los ácidos aminados son metabolizados hasta formar amonio (NH<sub>4</sub>), el cual se transforma a su vez por acción de otras bacterias en nitritos (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) y nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Chiriví y Velásquez<sup>32</sup> explican que el nitrógeno es devuelto constantemente a la atmósfera por acción de bacterias desnitrificantes que descomponen los nitratos y los dejan libres, pasando de nuevo a la atmósfera. Otra manera de salir el nitrógeno del ciclo, es mediante el arrastre producido por el agua de los ríos o de regiones húmedas que los llevan hacia el mar, donde es tomado por los organismos del fitoplancton, ya que éste puede ser aprovechado por consumidores como peces, aves, mamíferos que lo devuelven al medio con la materia fecal.

*5.2.3.2 El nitrógeno en la atmósfera.* Manahan<sup>33</sup> expresa que los tres óxidos de nitrógeno normalmente encontrados en la atmósfera son: el óxido nitroso N<sub>2</sub>O, el óxido nítrico NO, y el dióxido de nitrógeno NO<sub>2</sub>, los cuales en conjunto se denominan NO<sub>x</sub>. Las reacciones químicas convierten al NO<sub>x</sub> en ácido nítrico, sales de nitrato inorgánico, nitrato orgánico, entre otros. Las principales especies reactivas de óxidos de nitrógeno en la tropósfera son el NO, el NO<sub>2</sub> y el HNO<sub>3</sub>. Aunque el NO es la forma primaria en la cual el NO<sub>x</sub> es liberado a la atmósfera, la conversión del NO a NO<sub>2</sub>, es relativamente rápida en la troposfera. El NO<sub>2</sub> es una especie muy reactiva e importante en la atmósfera. Absorbe la luz a través del espectro ultravioleta visible, penetrando la tropósfera. A una longitud de onda inferior a 398 nm, ocurre la disociación a átomos de oxígeno (Rx 16):



A continuación se presentan las diversas reacciones inorgánicas significativas en adición a un patrón de reacciones atmosféricas que involucran especies orgánicas, en presencia de luz solar directa, la vida media del NO<sub>2</sub> es mucho más corta que la de cualquier otro componente atmosférico, lo que evidencia la reactividad del NO<sub>2</sub> a la fotodisociación (Figura 9)

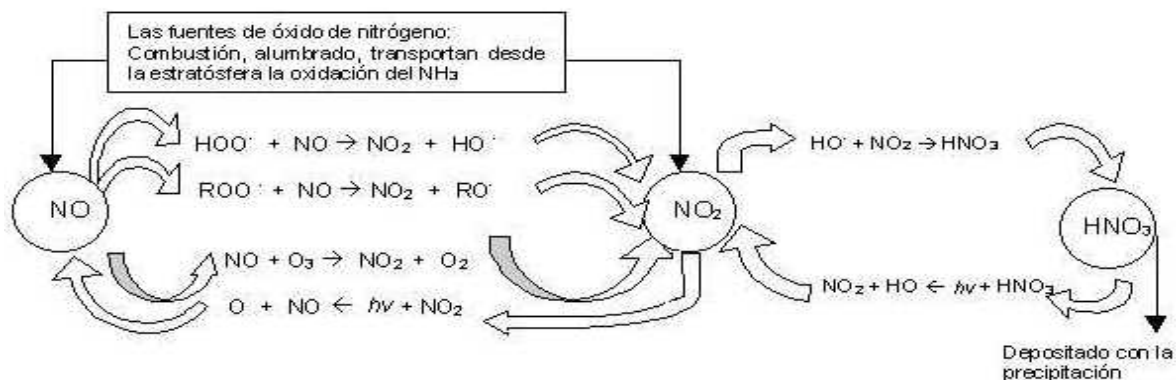
---

<sup>31</sup> RESTREPO y VARGAS, Op. cit., 477 p.

<sup>32</sup> CHIRIVI H. & VELASQUEZ, L.M. Ecobiología. Bogotá: Usta, 1984. 606 p.

<sup>33</sup> Manahan, Op. cit., 840 p.

**Figura 9. Principales Reacciones entre el NO, NO<sub>2</sub>, y el HNO<sub>3</sub> en la Atmósfera\*..**



Fuente: MANAHAN, S., Fundamentals Of Environmental Chemistry. New York: Lewis Publisher, 1993. 840 p.

Algunos datos de los contaminantes con nitrógeno se presentan en la siguiente tabla:

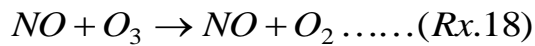
**Tabla 10 Datos de contaminantes con nitrógeno**

Compuesto	Fuentes principales	N Producido (Tg y -1)	Concentración típica		Tiempo de Vida	Sumidero
			Natural	Contaminada		
Amoniaco (NH <sub>3</sub> )	Animales, Suelos, Combustión de biomasa	54	0.1 pptv	>6 pptv	6 Días	Conversión a NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
Ión amonio (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	Conversión desde NH <sub>3</sub>	65 (?)	0.05 μg/m <sup>3</sup>	>1.5 μg/m <sup>3</sup>	5 días	Deposición húmeda y seca
Oxido nitroso (N <sub>2</sub> O)	Suelo, Océano	41	310 ppbv	350 ppbv	170 años	Fotólisis en la estratosfera
Oxido nítrico (NO) y Dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ) = NO <sub>x</sub>	Combustibles fósiles, Iluminación, Incendio de biomasa, Suelos, Oxidación de NO a NO <sub>2</sub>	48	<100 pptv	100 ppbv	<2 días	Oxidación a HNO <sub>3</sub> y NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Fotólisis
Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Secundario desde NO	26	0.5 μg/m <sup>3</sup>	>10 μg/m <sup>3</sup>	5 días	Deposición húmeda y seca

Fuente: Datos de 1983 a 1988 de la Tabla 2.8 de Air Pollution Control. Modificado de: <http://www1.ceit.es/asignaturas/ecologia/Hipertexto/10CAtm1/231DatosCompN.htm>.

\* ROO . representa un radical peroxilorgánico, tal como el radical metilperoxil, CH<sub>3</sub>OO .

Stumm y Morgan<sup>34</sup> afirman que los principales compuestos nitrogenados que contaminan la atmósfera son el monóxido de nitrógeno [NO] y el dióxido de nitrógeno [NO<sub>2</sub>]. Durante la combustión de los combustibles fósiles y con una gran proporción en la combustión de los automóviles, se forma el [HNO<sub>3</sub>], a partir del NO y el NO<sub>2</sub> (Rx 17, Rx 18 y Rx 19).



Manahan<sup>35</sup> se refiere a que los daños importantes a las plantas se observan en áreas que están sometidas a exposiciones elevadas de NO<sub>2</sub>, muchos de estos daños probablemente vienen de los productos secundarios de los óxidos de nitrógeno, tal como el peroxiacetil nitrato [PAN] formado en el smog. La exposición de las plantas a diversas partes por millón de NO<sub>2</sub> en el laboratorio causa manchas y deterioro del tejido foliar. La exposición a 10 ppm de NO causa decrecimiento irreversible en la tasa de fotosíntesis.

Cierto tipo de fertilizantes es fuente de compuestos nitrogenados contaminantes al ser liberados en cantidades importantes de amoníaco el cual causa un aumento en el pH de las lluvias. Pero dicho efecto se elimina cuando los iones amoníaco [NH<sub>4</sub><sup>+</sup>] en la lluvia son convertidos por microorganismos en los suelos o absorbidos por las plantas luego de su contacto con los suelos. Además, las grandes cantidades de contaminantes nitrogenados pueden provocar una sobre fertilización de los suelos. La mayoría de las plantas se adaptan a una deficiencia de nitrógeno, pero cuando se produce el caso contrario, aparecen daños a la vegetación y problemas secundarios sobre la potabilidad del agua. Asimismo, la acidificación de los suelos producida por la reacción de nitratos, origina la liberación de sustancias peligrosas como el aluminio que al pasar a las aguas subterráneas llega a las fuentes de agua depredando las colonias de peces<sup>36</sup>.

## 5.2.4 Cloro

5.2.4.1 *Ciclo natural.* El cloro es muy abundante en la naturaleza (0.19%). Casi todo se encuentra combinado en la forma de cloruros simples [NaCl y KCl] o cloruros dobles (MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O). Cantidades enormes, en pequeñas concentraciones

---

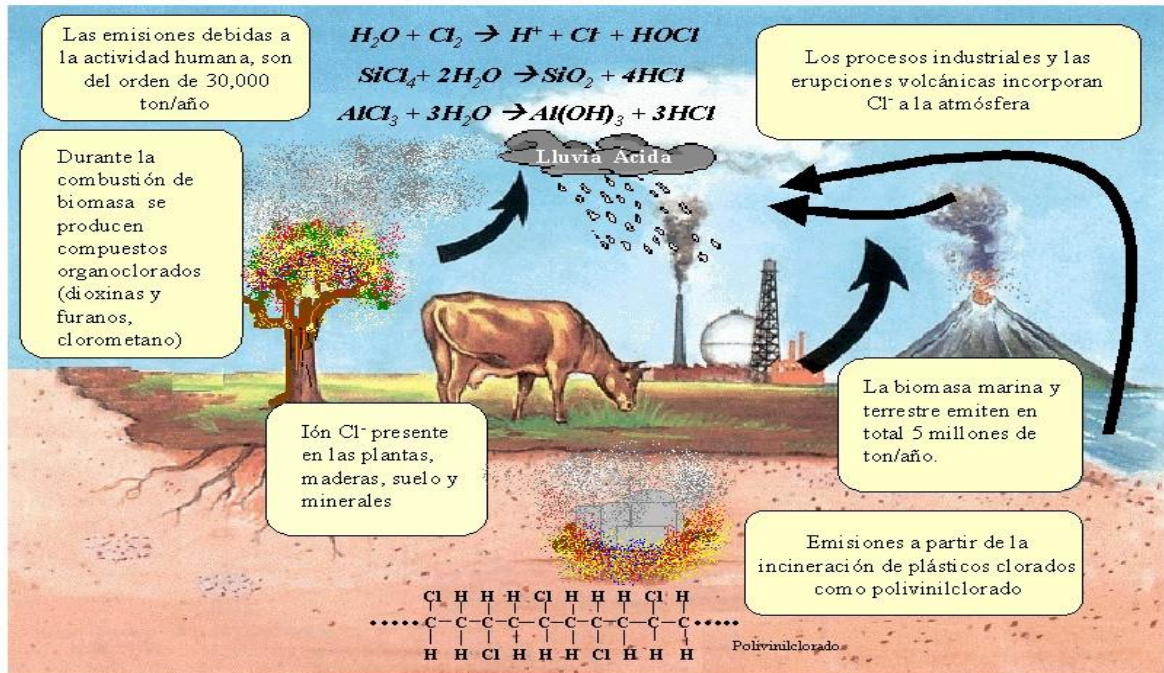
<sup>34</sup> Stumm y Morgan, Op. cit., 780p.

<sup>35</sup> Manahan, Op. cit., 840 p.

<sup>36</sup> ZAMBRANO RAMÍREZ, Alex Roger. Op. Cit.

de cloro combinado (NaCl y HCl) se desplazan con el viento del mar a la tierra. En la tierra se encuentra cloro por todas partes, en el aire y en el suelo<sup>37</sup> (Figura 10).

**Figura 10 Ciclo del Cloro**



La presencia del ion cloruro en las plantas, madera, suelo y minerales hace que durante la combustión se produzcan principalmente compuestos organoclorados (incluyendo dioxinas y furanos). Por consiguiente los incendios forestales, la quema de matorrales y vegetación, así como los volcanes, producen cantidades significativas y en algunos casos, masivas de clorometano. Las biomasa marina y terrestre emiten en total, unas 5 millones de toneladas anuales de dicho compuesto, sobrepasando las emisiones debidas a la actividad humana, que son solamente del orden de 30.000 t/año (La presencia del ion cloruro en las plantas, madera, suelo y minerales hace que su combustión produzca inevitablemente compuestos organoclorados (incluyendo dioxinas y furanos). Por consiguiente los incendios forestales, la quema de matorrales y vegetación, así como los volcanes, producen cantidades significativas y en algunos casos, masivas de clorometano. Las biomasa marina y terrestre emiten, en total, unas 5 millones de toneladas anuales de dicho compuesto, sobrepasando las emisiones debidas a la actividad humana, que son solamente del orden de 30.000 t/año<sup>38</sup>.

<sup>37</sup> Ibid.

<sup>38</sup> Empresas Asociadas del Clorosur. El Cloro en la Naturaleza [Online]. Textinfo. Washington, D.C.: The Bivings Group, 28 de Febrero de 2002 [rev. Enero de 2002]. Disponible en internet: <<http://www.clorosur.com/espanhol/naturaleza.html>>

El cloro como componente de la sal, se encuentra presente en la sangre y tejidos de los mamíferos. Los leucocitos del sistema inmunológico humano usan cloro para destruir a los microorganismos invasores, mediante un mecanismo enzimático (mieloperoxidasa) en el que tiene lugar la liberación de hipoclorito. También forma parte de la molécula del ácido clorhídrico, el cual tiene un papel vital en el proceso digestivo de los mismos (destruye los gérmenes de la comida y asegura que la pepsina rompa las proteínas)<sup>39</sup>.

Los océanos constituyen la mayor fuente de compuestos organoclorados. Estos juegan un papel esencial en la supervivencia de los organismos vivos, cuya capacidad para sintetizar dichas sustancias ha evolucionado con el tiempo bajo la presión de la selección natural.

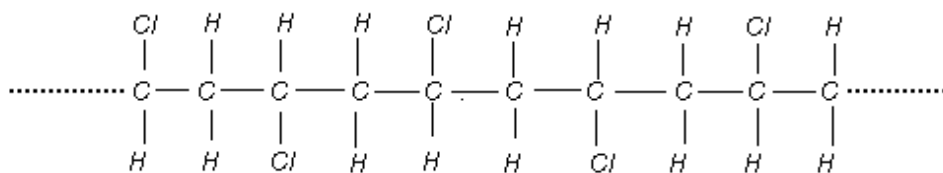
**5.2.4.2 El cloro en la atmósfera:** En cuanto a este elemento Manahan<sup>40</sup> habla ampliamente. El Cl<sub>2</sub>, no es considerado como un contaminante a gran escala, pero puede serlo a escala local. Es ampliamente utilizado en la industria química y en la fabricación de plásticos, por lo tanto, existe la posibilidad de ser emitido. El cloro es tóxico e irritante de la membrana mucosa. Además, es muy reactivo y un poderoso agente oxidante. El cloro se disuelve en las gotas de agua atmosférica, generando ácido clorhídrico y ácido hipocloroso, un agente oxidante (Rx 20). El ácido clorhídrico, HCl, es emitido desde un número determinado de fuentes:



Por otra parte, los derrames de gas cloro han causado fatalidades entre las personas expuestas:

La incineración de los plásticos clorados, como polivinilclorado (Figura 11), liberan HCl como un producto de la combustión.

**Figura 11 Polivinilclorado**

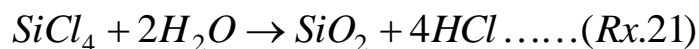


Fuente: MANAHAN, S., Fundamentals Of Environmental Chemistry. New York: Lewis Publisher, 1993. 840 p.

<sup>39</sup> Ibid.

<sup>40</sup> Manahan, Op. cit., 840 p.

Algunos compuestos liberados a la atmósfera como contaminantes del aire hidrolizan a la forma HCl. Por ejemplo, un incidente tal ocurrió en abril 26 de 1974, cuando un tanque cargado que contenía 750.000 galones de tetracloruro de silicio líquido, SiCl<sub>4</sub>, se derramó en el Sur de Chicago, Illinois. Este compuesto reaccionó con el agua de la atmósfera y formó una nube sofocante de gotas de HCl (Rx 21). Mucha gente se enfermó al inhalar el vapor.



En febrero de 1981, en Stroudsburg, Pensylvania, un camión accidentado derramó 12 toneladas de cloruro de aluminio durante una tormenta. Este compuesto produjo gas de HCl cuando humedeció (Rx 22). Más de 1200 habitantes fueron evacuados de sus casas debido al humo generado.



Alrededor del 60% de todas las actividades químicas utilizan cloro, ya sea de manera directa o indirecta, debido a que el cloro actúa como fuente de energía, al posibilitar reacciones que de otro modo utilizarían más energía. Es así como el cloro se emplea para fabricar más de 10.000 productos, es decir, en torno al 95% de todos los productos de consumo. Más de un centenar de compuestos clorados, emitidos a la atmósfera principalmente por emisiones industriales, son cancerígenos comprobados <sup>41</sup>.

Se ha demostrado que se generan dioxinas y furanos en procesos tan corrientes como: hogares domésticos, motores de gasolina, humo de tabaco, incendios, fuegos naturales, producción de "compost" vegetal en la naturaleza, etc. Los resultados obtenidos por diversos investigadores (T.J. Nestruck, L.L. Lamparski, A. Sheffield) muestran que los incendios forestales y de maleza son una de las fuentes importantes de dioxinas y furanos en el medio ambiente <sup>42</sup>.

El gas cloro [Cl<sub>2</sub>] reacciona en el agua para producir una solución fuertemente oxidante. Esta reacción es la responsable de algunos de los daños causados al tejido del tracto respiratorio cuando éste es expuesto al Cl. El tracto respiratorio es rápidamente irritado por exposición de 10 – 20 ppm de gas cloro en el aire,

---

<sup>41</sup> BEDOYA, César. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Cloro y Cáncer [Online]. Texinfo 2 el. (Madrid, España), Informes, Enero 2002 (Actualizado en Mayo de 2002) Departamento de Construcción. Web: <<http://corbu.aq.upm.es/~cbedoya/webacv/informes/infclyca.htm>>.

<sup>42</sup> Empresas Asociadas del Clorosur. Op. Cit.



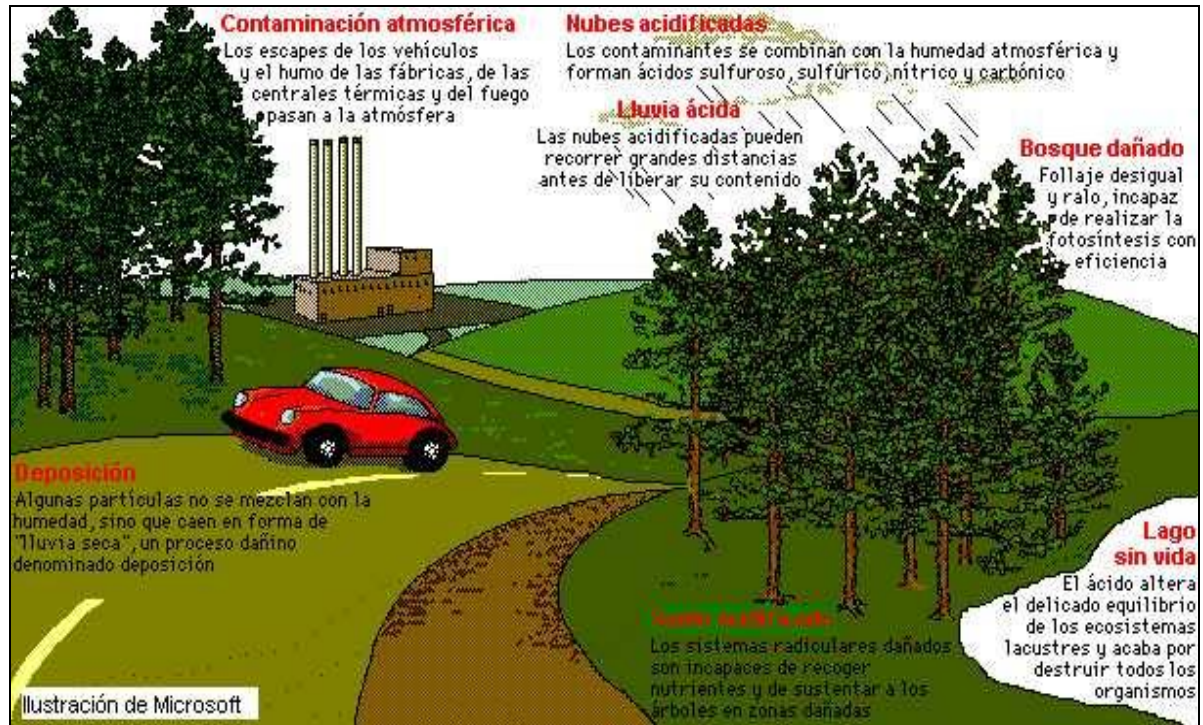
causando una aguda molestia, lo cual advierte de la presencia del tóxico. Incluso, las exposiciones breves de 1000 ppm de Cl, pueden ser fatales (Manahan, S., 1993).

### 5.3 EFECTOS DE LA LLUVIA ÁCIDA

Desde la revolución industrial, se ha incrementado la acidez de las precipitaciones en muchas partes del mundo y actualmente representa uno de los aspectos más preocupantes de la contaminación atmosférica, la cual afecta el medio ambiente directa e indirectamente (Figura 12).

Esta contaminación constituye uno de los problemas más graves que afronta la humanidad y que tiende a adquirir proporciones alarmantes, convirtiéndose en una amenaza para la vida vegetal, animal y para el mismo hombre <sup>43</sup>.

Figura 12 Efectos de la lluvia ácida



Fuente: FUENTEALBA, Maximiliano. Lluvia Acida [Online]. Netscape. Chile: Akiraswars, 1999 [1999]. Disponible en Internet: <<http://www.geocities.com/Athens/Acropolis/5759/acida.html>>

<sup>43</sup> ESTELLANO, Washington. Después del Gasoducto Bolivia-Brasil [Online]. Microsoft FrontPage 2.0. Uruguay: Revista del Sur, Junio de 1999 [citado Mayo de 2001]. Mensual. Disponible en internet: <<http://www.revistadelsur.org.uy/revista092/Ambiente1.html>>

El impacto de la lluvia ácida sobre los ecosistemas depende de la composición química del agua lluvia y de la habilidad de éstos para asimilarla. Las zonas más afectadas por la precipitación ácida son aquellas que contienen más fuentes de acidez, pero solo el transporte de compuestos ácidos por medio de la circulación atmosférica, explica la lluvia ácida en lugares distantes de las fuentes de contaminación.

Los efectos de la lluvia ácida, se aprecian en la siguiente tabla:

**Tabla 11 Efectos de la lluvia ácida sobre la salud humana, los animales, la vegetación, los sistemas acuáticos, los suelos y los materiales**

Efecto	Observación
<i>Sobre la salud humana</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>★ No se ha demostrado aún que la lluvia ácida ocasione efectos directos nocivos en los seres humanos; para que esto sucediera tendrían que presentarse valores de pH muy inferiores a los que actualmente se registran.</li> <li>★ Los riesgos potenciales a la salud se encuentran, en los contaminantes precursores de la lluvia ácida, es decir, en los óxidos de nitrógeno (NOx) y de azufre (SOx), debido a las exposiciones continuas a estos contaminantes, las cuales pueden provocar y agravar enfermedades respiratorias y del corazón <sup>44</sup>.</li> <li>★ Los óxidos de nitrógeno reducen la eficacia de las defensas pulmonares propiciando las infecciones respiratorias en el hombre.</li> <li>★ El dióxido de azufre irrita la mucosa respiratoria, aumentando en algunos casos, los síntomas de los bronquíticos y asmáticos e incrementando las enfermedades en la red de agua potable<sup>45</sup>.</li> <li>★ Los efectos indirectos sobre la salud, se deben a que pueden disolver metales y sustancias tóxicas de los suelos, rocas, conductos y tuberías y posteriormente transportarlos hacia los sistemas de agua potable.</li> </ul>
<i>Sobre los animales</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>★ Al acidificarse los suelos, los metales pesados que contienen las plantas, son ingeridos y acumulados por ellos.</li> <li>★ Los pájaros pequeños que viven cerca de aguas acidificadas se ve afectada se reproducción.</li> <li>★ Los huevos de varias especies de pájaros aparecen con paredes muy delgadas debido al aluminio ingerido a través de los insectos de los cuales se alimentan. Dichos insectos precisamente se desarrollan en aguas acidificadas.</li> </ul>

<sup>44</sup> GALLARDO TORRES, Alfredo y Lilia, GRACIA GALVAN. Op. Cit.

<sup>45</sup> ESTELLANO, Washington. Op. Cit.

<p><i>Sobre la Vegetación</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>★ Ocasiona en algunas especies sensibles, lesiones y caída de las hojas, sin embargo, usualmente la lluvia ácida no acaba con la vegetación directamente sino que actúa de manera gradual, haciendo más lento su crecimiento y favoreciendo el ataque de plagas y enfermedades <sup>46</sup>.</li> <li>★ Afecta la fotosíntesis, haciéndola más lenta y los vegetales pueden morir, reduciendo la productividad de bosques y cultivos, de las diversas especies vegetales <sup>47</sup>.</li> <li>★ Las especies que se ven más afectadas son los líquenes y los musgos que toman directamente el agua a través de sus hojas.</li> </ul>
<p><i>Sobre los sistemas acuáticos</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>★ En ríos y lagos, éste fenómeno ha provocado una acidificación de sus aguas, dañando a plantas y animales que las habitan, y en casos extremos, se produce una aniquilación completa de especies sensibles a la acidez del agua<sup>48</sup>.</li> <li>★ Los lagos y ríos acidificados son incapaces de sostener su población de peces. Además, se ha demostrado que el límite de tolerancia de muchos organismos acuáticos, es un pH ácido de 4.</li> </ul>
<p><i>Sobre los suelos</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>★ La lluvia ácida empobrece los suelos, tanto de bosques, como de zonas de cultivo, ya que a su paso por éstos lo desmineraliza, dejándolo sin los nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, al tiempo que degrada las aguas subterráneas libera elementos tóxicos, como el aluminio y el magnesio, que se acumulan en sus tejidos y acaba con microorganismos útiles en los procesos de formación, descomposición y nutrición del suelo <sup>49</sup>.</li> <li>★ Los suelos pobres en caliza y recubiertos de capas de tierra poco profundas están expuestos a los efectos de la lluvia ácida <sup>50</sup>.</li> </ul>
<p><i>Sobre los materiales</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>★ Los materiales que son atacados por dicho fenómeno, van desde los metales conocidos, pasando por el granito y el concreto hasta los plásticos, textiles y papeles.</li> <li>★ Las estructuras metálicas se corroen (se llegan a disolver metales como el plomo y el cobre).</li> <li>★ Las superficies de los edificios y las estatuas se resquebrajan.</li> <li>★ Los objetos de nylon se rompen</li> </ul>

<sup>46</sup> GALLARDO TORRES, Alfredo y Lilia, GRACIA GALVAN. Op. Cit.

<sup>47</sup> ESTELLANO, Washington. Op. Cit.

<sup>48</sup> GALLARDO TORRES, Alfredo y Lilia, GRACIA GALVAN. Op. Cit.

<sup>49</sup> GALLARDO TORRES, Alfredo y Lilia, GRACIA GALVAN. Lluvia Ácida [Online]. Adobe acrobat. México: Gobierno del Estado de México. Departamento del Distrito Federal. Secretaria del Medio Ambiente, Junio de 1999 [rev. 1994]. Disponible en internet. <[http://www.sma.df.gob.mx/publicaciones/aire/folleto\\_lluvia99/folleto.pdf](http://www.sma.df.gob.mx/publicaciones/aire/folleto_lluvia99/folleto.pdf)>

<sup>50</sup> KAMMS PANIAGUA, Ligia. Fenómenos Atmosféricos [Online]. Adobe PageMill 2.0 Win. México: Universidad Nacional Autónoma de México, 11 de agosto de 2001 [Actualizado en Julio de 2001]. Disponible en internet: <<http://dgenp.unam.mx/chaac/paginas/lluvia.html>>

## 6. ANTECEDENTES

Basado en sus estudios sobre el aire de Manchester, Inglaterra, en 1852, el químico británico Robert Angus Smith<sup>51</sup>, notó en la lluvia un ingrediente inusitado como el H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y lo culpó de los cambios extraños en los materiales, pero a pesar de su descubrimiento en el siglo XVII no se le prestó atención alguna. Este mismo científico, fue el encargado de introducir el término *lluvia ácida*, y no fue sino hasta que se creó una red de vigilancia de la calidad de la lluvia del norte de Europa, en la década de 1950, cuando se reconoció la incidencia generalizada de la lluvia ácida.

De acuerdo a Henry, G. & G. Heinke<sup>52</sup>, en 1968, el científico sueco Svante Oden, demostró que la precipitación sobre los países escandinavos se estaba haciendo más ácida, y que la causa primordial eran los compuestos de azufre de las masas de aire contaminado, provenientes de las emisiones de las áreas industriales de Europa central y Gran Bretaña. La contaminación transfronteriza afecta en la actualidad a grandes zonas de Europa<sup>53</sup>, debido en parte a que el transporte atmosférico de larga distancia fue acelerado al ser introducidas largas chimeneas para dispersar los problemas locales de contaminación.

Henry, G. & G. Heinke<sup>54</sup> reportan que en varios estados de Estados Unidos y Ontario en Canadá, la importante contribución de las plantas generadoras alimentadas con carbón, de los principales estados emisores de azufre es patente en Ohio, Pensilvania, Indiana, Illinois y Kentucky. En todos los casos, estas emisiones de fuentes muy grandes se ha dispersado a la atmósfera como consecuencia del desarrollo de la tecnología de dilución de la contaminación con chimeneas altas, sucedido a finales de los años 60 y durante la década de los 70, lo cual contribuye en la actualidad a los problemas regionales de lluvia ácida en estas regiones.

---

<sup>51</sup> Facultad de Ingeniería. Lluvia ácida [Online]. Texinfo 2 el. (Cali, Colombia): Investigación, Jul. 2001 (Actualizado 13 de Agosto de 2001). Pontificia Universidad Javeriana – Seccional Cali. Web: <<http://atlas.ujavcali.edu.co/ftp/investigacion/conf-23-10-2000.doc>>

<sup>52</sup> HENRY, J. Glynn & HEINKE, Gary W. Ingeniería Ambiental. 2ª ed. México: Prentice Hall, 1999. 778 p.

<sup>53</sup> International Co-operation. Regional Air Pollution In Developing Countries (RAPIDC) [Online]. Text/javascript. Stockholm: Department of Biology, University of York, 2002 [Actualizado 02/03/2003]. Disponible en internet: <<http://www.york.ac.uk/inst/sei/rapidc2/latin/lamerica.html>>

<sup>54</sup> HENRY, J. Glynn & HEINKE, Gary W. Op. Cit.

Uno de los más interesantes hallazgos acerca de la precipitación ácida, fue reportado por Likens y otros científicos en 1972 <sup>55</sup>, quienes encontraron una elevada acidez en la lluvia y en la nieve, dentro del bosque experimental Hubbard Brook, Estados Unidos. El promedio anual de pH registrado desde 1964 a 1965 y 1973 a 1974 fue de 4.03 y 4.21 respectivamente. Ellos atribuyeron el incremento en la acidez de la precipitación a las emisiones antropogénicas de SO<sub>x</sub> y de NO<sub>x</sub>, provenientes de alguna de las áreas urbano – industriales, las cuales se localizaron a más de 100 Km de distancia. Estos científicos enfatizaron que uno de los principales mecanismos para que el hombre deteriore los ecosistemas naturales es a través de la contaminación de la atmósfera, cuyos efectos no se limitan a las áreas adyacentes a las fuentes de emisión, sino que recorren y afectan zonas remotas. Además, afirmaron que las decisiones y actividades económicas realizadas fuera de esta región, pudieron influenciar la dinámica de los sistemas naturales del Hubbard Brook, como los cambios en el consumo de combustible fósil y en la disposición de afluentes gaseosos desde décadas anteriores.

En la India, Ranjit Kumar<sup>56</sup> y otros investigadores, colectaron muestras de agua de lluvia en el año de 1988 y entre 1991 a 1996 en el centro suburbano de Dayalbagh (Agra), ubicado en una región semiárida. Encontraron un pH medio de 7.01 ±1.03 y responsabilizan a las pocas lluvias y al incremento de fuentes locales (flujo vehicular y crecimiento de la población) de la acidez en 1996. Aunque indican que el viento ha sido determinante en la dispersión de partículas que neutralizan la acidez de la precipitación.

En países amenazados por la acidificación, como Estados Unidos, Canadá, Suecia, Alemania, y Japón, entre otros, se han desarrollado intensos programas para entender los procesos que conllevan a la formación de la lluvia ácida y los efectos que está ocasionando sobre los ecosistemas, tanto terrestres como acuáticos, las áreas de cultivo y los materiales de construcción empleados por el hombre.

En Latinoamérica, la acidez en la precipitación tanto en el ámbito urbano como rural, está determinada por causas de contaminación tanto antropogénicas como naturales, dado el marcado crecimiento de fuentes contaminantes de origen industrial, vehicular y doméstico, y el número considerable de volcanes activos a lo largo de la geografía latinoamericana.

---

<sup>55</sup> LIKENS, S.E., F.H. BORMAN, R.S.PIERCE, S. EATON & N.M. JHONSON. Biochemistry of a Forested Ecosystem Springer. New York: Verlag, 1977.

<sup>56</sup> RANJIT, KUMAR, et al. A Long Term Study on Chemical Composition of Rainwater at Dayalbagh, a Suburban Site of Semiarid Region. En: Journal of Atmospheric Chemistry. Vol. 41, 2002. p. 265–279.

Gallardo y García<sup>57</sup> afirman que las regiones más afectadas por las precipitaciones ácidas en Latinoamérica son la Zona Metropolitana de Ciudad de México (ZMCM), y la ciudad de Sao Paulo en Brasil. En la ZMCM, el valor mínimo histórico de pH registrado por el Programa de Precipitaciones Ácidas, se obtuvo en 1997 con un valor de pH de 3.38, el cual tiene diez veces menor acidez que la del jugo de limón. Este valor es 9.5 veces menos ácido que el registrado en Escocia en 1974 (pH 2.74) o 4.8 veces menos ácido que el detectado en Sao Paulo, Brasil en un estudio realizado de 1983 a 1985 (pH= 2.7).

En los análisis de precipitación en áreas de Turrialba, Costa Rica, los científicos Hendry, Berish y Edgerton<sup>58</sup> en 1984, encontraron que el exceso de SO<sub>x</sub> en la precipitación surgió por emisiones volcánicas, debido a su cercanía al volcán Turrialba y al volcán Irazú, ambos con fumarolas activas. De igual manera, en los estudios realizados por Kellman, Hudson y Sanmugadas<sup>59</sup> en Siguatepeque, Honduras, concluyeron que la explicación más probable para el gran flujo de cationes registrados en la estación lluviosa, fue debido a la actividad volcánica de la zona. Por otra parte, el aporte total anual de todos los elementos fue bajo en comparación con los registrados en otros sitios del trópico, lo cual, lo atribuyeron a la baja precipitación del área, su elevación y a lo distante del mar.

En el Informe de la Calidad del Aire en el Valle de México<sup>60</sup> correspondiente al análisis de los datos recopilados por el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal de México, durante el período 1990 a 2000, se reporta que el promedio ponderado anual del pH del agua de lluvia, se ha mantenido en el intervalo considerado como normal para el agua de lluvia. Además, se encontró la influencia de los vientos predominantes en la dispersión de los contaminantes desde zonas principalmente industriales hacia zonas menos industrializadas. El análisis de correlación mostró una asociación positiva entre cationes y pH, ya que al aumentar los cationes, el pH tiende a ser alcalino y cuando disminuyen, el pH tiende a la acidez. Los aniones

---

<sup>57</sup> GALLARDO TORRES, Alfredo y Lilia, GARCIA GALVAN. Op. Cit.

<sup>58</sup> HENDRY, CH., C. BERISH & E. EDGERTON. Precipitation Chemistry at Turrialba, Costa Rica. En: Water Resource Research. Vol. 20, No. 11, 1984. p. 1677 – 1684

<sup>59</sup> KELLMAN, M., J. HUDSON & K. SANMUGADAS. Temporal Variability in Atmospheric Nutrient Influx to a Tropical Ecosystem. En: Biotropica. Vol. 14, No.1. (1982); p. 1 - 9

<sup>60</sup> Dirección General de Gestión Ambiental del Aire. Informe Anual de la Calidad del Aire y Precipitación Ácida en el Valle de México 2000 [Online]. Acrobat Adobe. México: Gobierno del Estado de México, Departamento del Distrito Federal, Secretaria del Medio Ambiente, 2000 [“rev. 2000”]. Anual. Disponible en internet: <[http://www.sma.df.gob.mx/publicaciones/aire/aire\\_lluvia00/directorio.pdf](http://www.sma.df.gob.mx/publicaciones/aire/aire_lluvia00/directorio.pdf)>

tuvieron un comportamiento aparentemente estable, ya que no presentaron una variación temporal importante.

Danelon y Moreira-Nordemann<sup>61</sup> midieron las concentraciones de  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  en el agua de lluvia del Valle del río Quilombo, en la región de Cubatão, Estado de São Paulo en Brasil, con el fin de establecer el balance general de estos iones en la bahía. Los resultados que obtuvieron, los interpretaron en función de los aportes naturales y antrópicos. La baja concentración de estos iones en las aguas del río Quilombo, explica que la entrada iónica en el Valle de Quilombo a través de la atmósfera es mucho muy alta.

En un estudio realizado por Da Silva, Coelho y Brown<sup>62</sup> en el Alto Río Cachoeira, localizado en la vertiente atlántica del macizo de Tijuca, Parque Nacional de Tijuca, dentro del área metropolitana de Río de Janeiro, Brasil, se discuten los resultados del pH del agua de lluvia, con especial enfoque en eventos asociados a bajos volúmenes de lluvia, el cual junto a las sustancias ácidas depositadas, pueden generar severas condiciones de acidez localizada. La media de valores encontrados en el pH desde enero de 1983 a junio de 1984 es de 4,6, con 3,8 y 5,4 como los valores extremos. Los resultados obtenidos por los investigadores, son comparables con otras áreas urbanas citadas en la literatura. Ellos propusieron un modelo hipotético de depositación ácida a partir de la fuerte tendencia observada entre bajos volúmenes de lluvia, asociadas con bajos valores de pH. Se consideran dos hipótesis en relación al origen de la acidez. La primera, en caso de días con poca precipitación la incorporación de gases y aerosoles provenientes del área metropolitana puede ser la fuente dominante. La segunda, los estudios meteorológicos relacionan dos grandes eventos de depositación ácida con la ocurrencia de lluvias frontales.

Moreira y otros investigadores<sup>63</sup>, realizaron un estudio sobre la química de la precipitación atmosférica en la ciudad de Campo Grande, Brasil mediante la determinación del depósito seco y húmedo. Ellos encontraron que en vista de la ausencia de industrias en esta ciudad, las principales fuentes de contaminación para algunos iones son el tránsito vehicular y la quema de biomasa, siendo esta última actividad, la responsable de las altas emisiones de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ . Las carboneras de la región fueron las responsables de las altas emisiones de  $\text{Cl}^-$ .

---

<sup>61</sup> DANELON, O. & L. M. MOREIRA-NORDEMANN. Natural and Anthropogenic Occurrence of  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ; and  $\text{SO}_4^{2-}$  in the Quilombo River Basin (Cubatão - SP). En: Revista Brasileira de Geociências. Vol. 21, No. 1. Marzo de 1991. p. 96-101.

<sup>62</sup> DA SILVA FILHO, E.V., A.R. COELHO OVALLE & I.F. BROWN. Precipitacao ácida no Parque Nacional da Tijuca, Río de Janeiro. En: Ciencia e Cultura. Vol 39, 1987. p. 419-422

<sup>63</sup> L.M. Moreira-Nordemann, P. Girard & N. Ré Poppi. Química da precipitação atmosférica na cidade de Campo Grande – MS. En: Rev. Bras. Geof. Vol. 15, No.1, 1997.

Sanhueza, Graterol y Rondón<sup>64</sup> en su estudio en tres sitios de sabana en Venezuela (Camburito, estado Portuguesa; Joaquín del Tigre, estado de Monagas, y La Paragua, estado Bolívar), los valores promedios del pH pesados en volumen fueron 4.4, 5.1 y 4.8 para Camburito, Joaquín del Tigre y La Paragua respectivamente. Los bajos valores de pH son similares con los reportados para otras áreas rurales de la América Tropical. Fuentes naturales, parecen ser responsables del bajo pH.

En un trabajo llevado a cabo por Sanhueza y Santana<sup>65</sup>, se hace una revisión sobre la composición química de las deposiciones húmedas a escala regional en ambientes naturales y áreas contaminadas de América tropical. Los datos indican que en esta región la emisión antropogénica de óxidos de S y N es baja en comparación con Norte América. De igual manera, las concentraciones de  $\text{SO}_4^-$  y  $\text{NO}_3^-$  en el agua de lluvia es mucho más baja que las observadas en las medias latitudes del hemisferio norte. La acidez regional del agua de lluvia (de aproximadamente pH=5), es principalmente debida a los ácidos orgánicos acético y fórmico. La contribución a la acidez libre de los ácidos acético y fórmico fue de 53% en una región de sabana en Venezuela, de 69% en el bosque Amazónico, 45% en la Guainía Francesa y de 59% en Torres del Paine en Chile. Estos datos contrastan con los de Europa y Norte América donde los ácidos fuertes nítrico y sulfúrico contribuyen con el 90%. La fuente de estos ácidos orgánicos no está bien establecida, sin embargo se sugiere la oxidación de hidrocarburos en la atmósfera emitidos a partir de la quema de vegetación y las emisiones directas como principales fuentes. Varios problemas de acidificación local-regional han sido observados en Venezuela y Brasil y se piensa que en otras áreas urbanas de la América tropical la acidificación antropogénica también está presente, pero no se han tomado medidas.

En el Golfo de México Parungo<sup>66</sup>, otros investigadores efectuaron un estudio con el propósito de investigar la calidad del aire y los problemas de lluvias ácidas durante el verano de 1986, en cooperación bilateral entre México y los Estados Unidos. Se midieron parámetros químicos, físicos, meteorológicos y oceanográficos con el fin de examinar las variaciones temporales y espaciales de las diferentes medidas en el Golfo. Se dio mayor importancia al intercambio de gases y aerosol entre el aire, el mar y la tierra. Los resultados indicaron que aunque prevalecen vientos del este provenientes del mar, el aire es altamente

---

<sup>64</sup> SANHUEZA, E., N. GRATEROL & A. RONDÓN. Rainfall pH in the Venezuelan savannah. En: Tellus. Vol 39 (B), 1987. p. 329-332.

<sup>65</sup> SANHUEZA, E. & M. SANTANA. Atmospheric wet deposition in Tropical America. En: Israel Journal Chemistry. No. 34, 1994. p. 327-334.

<sup>66</sup> PARUNGO, F., C. NAGAMOTO, S. HOYT & H. BRAVO. The investigation of air quality and acid rain over the Gulf of México. En: Atmospheric Environment 24(A), 1990. p.109-123.



contaminado con aerosol continental, probablemente causado por cambios locales de los vientos y oscilación entre la brisa del mar y la brisa de la tierra. El promedio de masa de concentración del aerosol consistió de 60% de partículas insolubles de Si, Al, Fe; 30% de partículas provenientes de sales de mar ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ) y 10% de partículas de sulfato y nitrato antropogénico. Las muestras de lluvia colectadas cerca de la costa tuvieron un pH aproximado de 4, es decir que fueron ácidas. Las concentraciones de dimetilsulfuro correlacionaron con las concentraciones de bio-partículas en la superficie del agua de mar y lo que puede para los investigadores ser un significativo precursor de las partículas de sulfato atmosférico.

En el trabajo llevado a cabo por Baez, Belmont y Padilla<sup>67</sup>, se discuten los resultados de la composición química del volumen total de deposición y específicamente el de la deposición húmeda en dos sitios del centro de México. Las muestras fueron colectadas por un período de 7 años en un área urbana (Ciudad de México) y unos sitios de bosque (Rancho Viejo). El ion sulfato ( $\text{SO}_4^-$ ) fue el más abundante, seguido del amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), en las muestras de lluvia de ambos sitios. Los patrones estacionales de las concentraciones muestran que los mayores valores de  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{NH}_4^+$  fueron medidos en mayo al comienzo de la época de lluvia. Los resultados de un análisis de regresión múltiple indican que en Rancho Viejo, el  $\text{SO}_4^-$  contribuyó con el 41% en la concentración de  $\text{H}^+$ , mientras que en ciudad de México a pesar de que la precipitación tuvo elevados contenidos de este ion, contribuyó con el 0,46% de la acidez. Los cationes básicos como el  $\text{Ca}^{2+}$ , parecen explicar mejor los resultados en este sitio. Finalmente no se observó transporte de larga distancia de los constituyentes químicos de la precipitación

En Colombia, el científico Veneklaas<sup>68</sup>, investigó sobre las diferencias en la composición de la precipitación a dos altitudes diferentes (2550 y 3370 msnm), en el volcán Nevado del Ruiz. La acidez en ambos sitios, estuvo significativamente correlacionada con los excesos de  $\text{SO}_x$ , los que representaron el 97% del volumen de precipitación y fueron vinculado con la presencia del volcán activo Nevado del Ruiz, emisor de grandes cantidades de  $\text{SO}_x$  durante el estudio.

Los científicos Figueroa y Valverde<sup>69</sup>, realizaron sus estudios sobre el aporte de nutrientes por precipitación y a través del follaje en la microcuenca Arrayanales, municipio de Popayán, departamento del Cauca, Colombia, donde observaron que

---

<sup>67</sup> BAEZ, A., R. BELMONT & H. PADILLA. Chemical composition at two sampling sites in México: A 7-year study. *Atmospheric Environment*. Vol. 31, 1997, p. 915-925.

<sup>68</sup> VENKLAAS, E. J. Nutrient Fluxes In Bulk Precipitation And Throughfall In Two Montane Tropical Rain Forests, Colombia. *Journal Ecology*. Vol. 78. (1990); p. 974-992

<sup>69</sup> FIGUEROA C., A. & A. VALVERDE. Análisis del Aporte de Nutrientes por Precipitación y a Través del Follaje en un Ecosistema Altoandino. Universidad del Cauca, 199 . 11 p.

durante los meses secos desde 1994 a 1996, los procesos de depositación seca se encuentran favorecidos por la interacción de aerosoles, polvo y otro tipo de emisiones, los cuales podrían explicar el incremento en la concentración de SO<sub>x</sub>. Además, la baja precipitación no permite los procesos de dilución, y las concentraciones de este ión aumentan. La presencia de SO<sub>x</sub> la relacionaron con las emisiones generadas por la cadena volcánica de los Coconucos y la dirección de los vientos, este-oeste, durante el período seco.

De acuerdo al Conventional Development Scenario<sup>70</sup>, el modelo de transferencia atmosférica para Europa puede ser comparado al de previsiones de deposición en América Latina para el 2025, cuyas estimaciones, usando esta perspectiva, muestran áreas sobre y alrededor de las ciudades más habitadas con deposiciones comparables a las más altas ocurridas en el centro Europa en 1991. Las depositaciones de azufre sobre algunos lugares de América Latina son tan elevadas como los niveles que causaron acidificación en otras partes de Europa en siglo XX. Esas áreas incluyen regiones importantes en la producción de cultivo tales como la costa este de Brasil, Colombia y Venezuela. En 1990 existían pocas zonas de riesgo por acidificación en América Latina, sin embargo, para el 2050, aquellas zonas significativas se encontrarán en peligro. Incluyendo algunas zonas importantes para la agricultura.

---

<sup>70</sup> International Co-operation. Regional Air Pollution In Developing Countries (RAPIDC) [Online]. Text/javascript. Stockholm: Department of Biology, University of York, 2002 [Actualizado 02/03/2003]. Disponible en internet: <<http://www.york.ac.uk/inst/sei/rapidc2/latin/lamerica.html>>

## 7. AREA DE ESTUDIO

### 7.1. CARACTERÍSTICAS GEOGRAFICAS Y CLIMÁTICAS

**7.1.1 Ubicación geográfica**<sup>71</sup>. El trabajo de investigación se realizó en la ciudad de Popayán, Municipio de Popayán, ubicado en el Sur-Occidente de Colombia y en el Nor-Oriente del Departamento del Cauca. Se localiza entre los 2° 27" de latitud Norte y 76° 37" de longitud.

El municipio del Popayán limita por el Norte con los municipios de Cajibío y Totoró, por el Este con los municipios de Totoró y Puracé, por el Sur con los municipios Puracé, La Sierra y Timbío y por el Oeste con Timbío y El Tambo.

**7.1.2 Población y acceso**<sup>72</sup>. La ciudad de Popayán es la cabecera municipal de Popayán y la capital del departamento del Cauca, está conformada por 9 comunas.

**7.1.3 Precipitación**<sup>73</sup>. El patrón de distribución de la precipitación en Popayán, presenta una variación trimestral. El período con mayor concentración de lluvias se inicia en Octubre y concluye en Diciembre, con una precipitación de 651.5 mm que equivalen al 41.20% del total anual de la precipitación. El mes con mayor pluviosidad es Octubre con 273.6 mm que equivale al 17.30%.

El segundo período más lluvioso va de Marzo a Mayo, con un registro de 482.3 mm de precipitación, que equivale al 30.50 % del total anual de la precipitación. El mes de Abril es el más lluvioso durante este período.

La época de menos captación de lluvia abarca los meses de Junio, Julio y agosto, con un total de 108.1 mm de precipitación, lo que equivale al 6.83 % del total anual. El mes que presenta menos precipitación es Agosto con 1.4 mm que equivale al 0.088%. La diferencia de precipitación entre el mes más lluvioso y el más seco es de 272.2 cifra que dobla el promedio mensual.

**7.1.4 Temperatura**<sup>74</sup>. La variación de la temperatura, en el Municipio de Popayán, oscilan entre los 18,2 °C y los 19,3 °C. La temperatura mínima se

---

<sup>71</sup> VIVAS, D. T. & E. MUÑOZ. Informe General Del Estado Actual De Los Recursos Naturales Y Del Medio Ambiente en el Municipio De Popayán. Contraloría Municipal de Popayán, 1999.

<sup>72</sup> Ibid.

<sup>73</sup> Ibid.

registra en el mes de Julio y Agosto y corresponde a 11.5 °C, y la temperatura máxima es de 25.3 °C y se presenta en el mes de Agosto.

**7.1.5 Humedad relativa<sup>75</sup>.** La humedad relativa oscila entre 69 y 82%. La variación anual de estos datos, está relacionada con la presencia en mayor o menor grado de la precipitación, así como también de otros factores meteorológicos, como vientos, nubosidad, temperatura y evapotranspiración, al igual que la cobertura vegetal presente.

**7.1.6 Brillo solar<sup>76</sup>.** El brillo solar registra un rango entre 106 y 180 horas mensuales, presentando mayor concentración del mes de Julio al mes de Agosto con un valor máximo de 180 horas mensuales en Julio. Entre los meses de Septiembre y Noviembre el fenómeno disminuye igual que entre Febrero y Octubre, registrando un valor de 106 horas mensuales.

**7.1.7 Vientos<sup>77</sup>.** En el mes de Agosto se presentan remolinos de fuerte intensidad, ocasionados por la influencia de las corrientes cálidas provenientes del valle del Patía y las corrientes húmedas de la Costa Pacífica.

**7.1.8 Zonas de vida<sup>78</sup>** De acuerdo al sistema de formaciones vegetales de L. R. Holdridge, el municipio de Popayán se encuentra en la zona de vida de bosque muy húmedo premontano bmh-pm, esta formación presenta como límites climáticos una temperatura media entre 18 y 24°C y un promedio anual de lluvias entre 2000 y 4000 mm.

---

<sup>74</sup> ALCALDIA MAYOR DE POPAYAN. SECRETARIA DE PLANEACIÓN MUNUCIPAL. PLAN DE DESARROLLO RURAL. Diagnóstico para la Implementación del Plan Ambiental Municipal. Popayán: La Secretaría, 1999.

<sup>75</sup> Ibid.

<sup>76</sup> Ibid.

<sup>77</sup> VIVAS, D. T. & E. MUÑOZ. Op. Cit.

<sup>78</sup> Alcaldía Mayor de Popayán. Op. Cit.

## 8. SITIOS DE ESTUDIO

Para cumplir con el propósito del presente estudio se ubicaron estaciones manuales de monitoreo de la precipitación en 10 sitios de la ciudad de Popayán (Tabla 12), abarcando los cuatro puntos cardinales, cada una con áreas de influencia directa e indirecta (Figura 13).

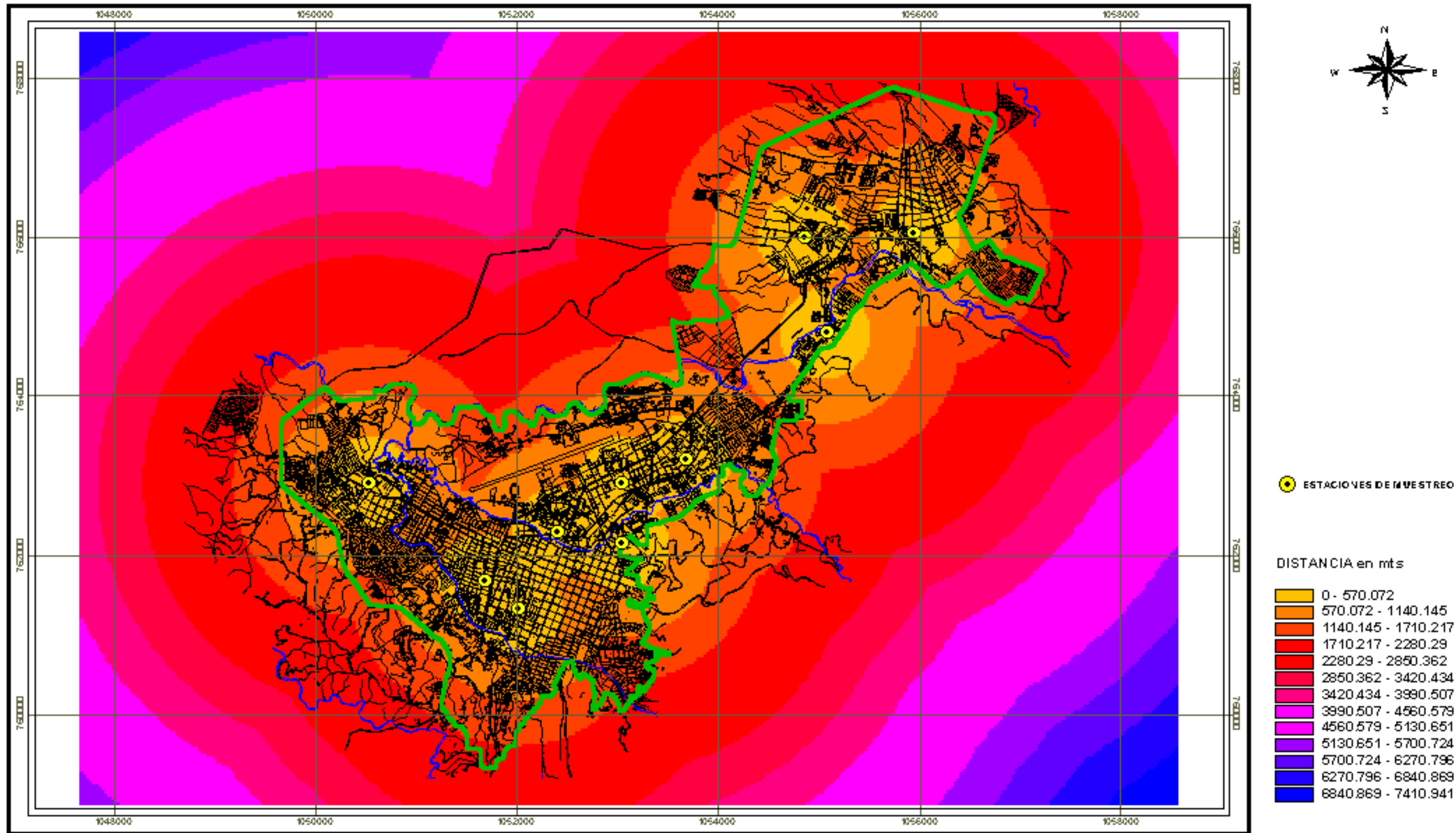
La ubicación de las estaciones se realizó teniendo en cuenta la densidad poblacional, las actividades industriales, el tránsito vehicular, las zonas de sensibilidad poblacional, actividad comercial y de servicios, patrimonio histórico-cultural, así como la seguridad de los implementos y la accesibilidad a los mismos.

**Tabla 12. Estaciones de Muestreo en la ciudad de Popayán**

Estación	Sigla	Altitud (msnm)	Geoposición
SENA	SN	1889	02° 29.06 N y 76° 33.52 W
Villa del Viento	VV	1850	02° 28.58 N y 76° 35.01 W
Hermanas Betlehemitas	HB	1810	02° 28.19 N y 76° 34.52 W
Ciudad Jardín	CJ	1790	02° 27.454 N y 76° 35.817 W
Niño Jesús de Praga	NJP	1780	02° 27.305 N y 76° 36.246 W
Barrio el Liceo	BL	1780	02° 26.876 N y 76° 36.253 W
Barrio Modelo	BM	1765	02° 53.971 N y 76° 36.695 W
Las Américas	LA	1760	02° 26.26 N y 76° 36.58 W
La Esmeralda	LE	1760	02° 26.38 N y 76° 37.11 W
La María	LM	1749	02° 27.18 N y 76° 37.58 W

El área de influencia directa de cada estación abarcó un diámetro de 570,072 metros a la redonda y se consideró como el área en la cual los valores de los parámetros fueron representativos. Las áreas de influencia indirecta para cada estación, se determinaron a partir de los 570,072 metros en adelante. A medida que cada área de influencia indirecta se alejó de la estación, la incidencia de los parámetros disminuyó. Estas áreas permitieron establecer deducciones acerca del comportamiento espacial de los parámetros dentro del perímetro urbano de Popayán.

Las áreas de influencia fueron determinadas utilizando el Programa ARCVIEW (software utilizado en Sistema de Información Geográfica, SIG) mediante las *funciones de distancia y vecindad (o vecino más próximo)*. Estas funciones interpolan los diferentes puntos de muestreo y automáticamente determinan tanto las áreas de influencia directa como indirecta, de tal manera que se solapen lo menos posible.



**Figura 13** Localización de las Estaciones de Muestreo y su Area de Influencia

1 0 1 2 Kilometers

Fuente cartográfica y SIG :  
Grupo de Estudios Ambientales



## 9. METODOLOGIA

### 9.1 MÉTODOS DE MUESTREO

**9.1.1 Técnica de recolección de muestras tipo “bulk”.** Se utilizó la técnica de muestreo por depósito total citada por Likens<sup>79</sup>, que consiste en que el colector capta tanto la precipitación húmeda (lluvia y granizo), como la precipitación seca (polvo, aerosoles, elementos biológicos, etc).

En cada sitio de muestreo se ubicaron dos colectores de precipitación permanentemente abiertos a la atmósfera. Cada colector de precipitación estuvo conformado de un embudo de polietileno (18,5cm de diámetro), conectado a un reservorio de plástico de baja densidad (capacidad de 2 litros) por medio de una manguera transparente organizada a manera de trampa de vapor, para prevenir la evaporación del reservorio y el intercambio de gases entre la atmósfera y la muestra.

Teniendo en cuenta lo sugerido en las investigaciones de Hendry<sup>80</sup>, se colocó un filtro de algodón aséptico en el orificio menor del embudo para prevenir que los insectos, aves o suciedad contaminaran la muestra. De igual manera acatando lo insinuado por Likens<sup>81</sup> de considerar los problemas de contaminación y de transformaciones biogeoquímicas que pudieran ocurrir, cada reservorio contó con un desfogue de agua en la parte superior, para facilitar la renovación constante del agua colectada.

El montaje de cada colector de depósito total se realizó sobre un soporte de madera (Figura 14).

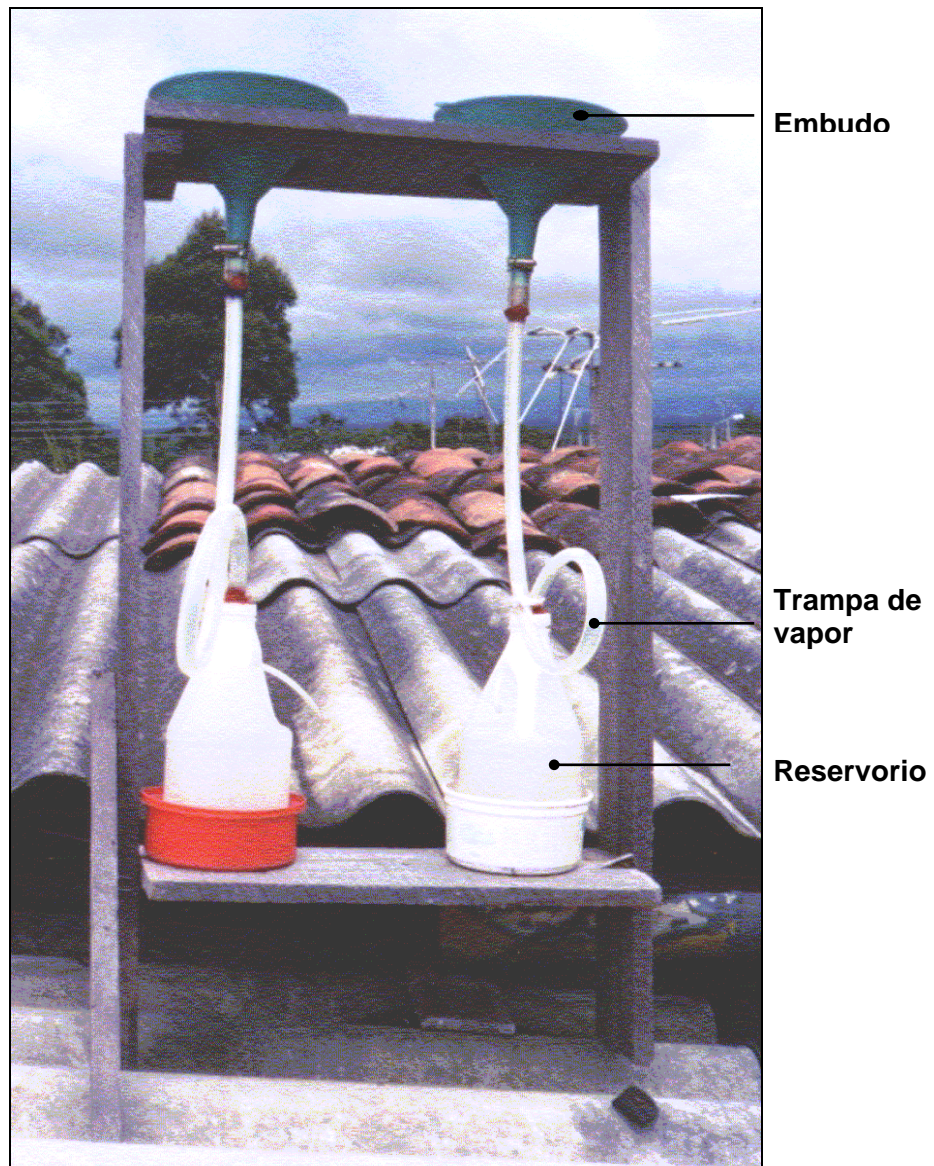
---

<sup>79</sup> LIKENS, S.E., et al. Biochemistry of a Forested Ecosystem Springer. New York: Verlag, 1977.

<sup>80</sup> HENDRY, CH., C. BERISH & E. EDGERTON. Op. Cit. p. 1677 – 1684

<sup>81</sup> LIKENS, S. E., et al. Op. Cit.

**Figura 14 Colector de Depósito Total.**



**9.1.2 Período de Muestreo y frecuencia de recolección.** Las muestras de agua lluvia fueron colectadas cada 20 a 25 días durante el período de seis meses, iniciando en el mes de Septiembre del año 2001 hasta el mes de Febrero del año 2002. Este período de muestreo comprendió los meses que caracterizan la temporada de lluvia en la ciudad de Popayán. En campo se llevaron registros (Anexo 1) del volumen total de muestra encontrado en el reservorio, del volumen colectado (200 ml como mínimo) y de las observaciones realizadas en el momento, acerca del estado del tiempo, condiciones físicas de los colectores,



entre otros. Todas las muestras fueron debidamente rotuladas con código, fecha y hora de recolección. Además, fueron guardadas en una nevera de icopor para conservar sus propiedades y evitar que la luz afectara sus características. Posteriormente, las muestras fueron almacenadas en el congelador del Laboratorio del Grupo de Estudios Ambientales para los respectivos análisis.

**9.1.3 Procedimiento de muestreo.** En cada fecha de recolección de la muestra, se reemplazaron todos los colectores de precipitación. Previamente en el Laboratorio del Grupo de Estudios Ambientales se realizó la asepsia de los colectores, siguiendo el protocolo descrito a continuación:

- Lavado de los instrumentos de trabajo utilizando jabón y agua corrientes.
- Desinfección con jabón bactericida y agua destilada, para eliminar material biológico presente.
- Higienización con una solución de Hipoclorito de Sodio al 0.1N.
- Lavado con agua desionizada (procurando que su conductividad fuera mínima,  $< 0.1 \mu\text{S/cm}$ ), para eliminar los iones que pudieran afectar los resultados finales.
- Verificación de la conductividad (inferior a  $0.1 \mu\text{S/cm}$ ) del material lavado, antes de llevarlo a campo.

## **9.2 PROCEDIMIENTOS ANALITICOS**

El número de muestras con un volumen suficiente para determinar la mayoría de los parámetros del agua de lluvia durante los 6 meses de muestreo fue de 56. Del total de muestras, 4 fueron invalidadas porque se derramaron durante su transporte hasta el Laboratorio del Grupo de Estudios Ambientales.

La determinación del volumen, pH, conductividad y la concentración de los iones  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{NO}_3^-$  (Tabla 13), se efectuaron por métodos químicos de alta sensibilidad de acuerdo a protocolos reportados en la literatura. Los resultados de laboratorio que se obtuvieron, fueron consignados en fichas (Anexo 2), para su posterior análisis.

**Tabla 13 Procedimientos Analíticos**

Parámetro	Descripción del parámetro	Unidades	Métodos	Límite de detección	Equipos	Laboratorio de Análisis**	Fuente
Volumen de captación	Total de agua colectada en los recipientes de muestreo	ml	Probeta de 1000 ml, margen de error de	< 1000 mL	-	-	-
pH	Acidez del agua de lluvia	Unidades de pH	Electrométrico	1 – 14 unidades de pH	pH Meter, marca Metrhom, modelo 744	Agroquímica	APHA, AWWA, WPCF, 1992
Conductividad	Carga de iones presentes en el agua de lluvia	μS/cm	Método de Laboratorio	0-1999mS/cm	Conductímetro marca METROM, modelo 660	Grupo de Estudios Ambientales	(APHA, AWWA, WPCF, 1992)
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Concentración de aniones presentes en el agua de lluvia	mg/L	Fosfato Monocálcico	1-40 mg/L	Espectrómetro marca Spectronic, modelo Génesis 20	Agroquímica	Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2002
**Cl <sup>-</sup>		mg/L	Método Argentométrico	0.15-10mg/L	-	Grupo de Estudios Ambientales, Agroquímica	APHA, AWWA, WPCF, 1992
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> **		mg/L	Método Espectrofotométrico Ultravioleta Selectivo	Valor de corrección menor a l 10% de la lectura a 220 nm.	Espectrofotómetro Ultravioleta, marca Spectronic, modelo Génesis 5	Biología Celular y Molecular	(APHA, AWWA, WPCF, 1992)
		mg/L	Método Nitrospectral	1,0–90,0 mg/L	Spectroquant marca Merck, modelo Nova 60	Grupo de Estudios Ambientales	Kit de Test en cubetas, Ref.1.4773, MERCK
		mg/L	Método analítico de CALS para determinar NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> y NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.1 mg/L	Unidad de destilación Büchi, marca K - 314	Agroquímica	Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2002

\* Todos los análisis fueron llevados a cabo en los mencionados laboratorios de la Universidad del Cauca.

\*\* A pesar que este es uno de los principales parámetros implicados en la acidificación de la precipitación, fue invalidado, debido a que en todas las muestras analizadas mediante los métodos mencionados, se presentaron concentraciones inferiores al límite de detección.

### 9.3 MÉTODOS DE ANÁLISIS DE RESULTADOS

**9.3.1 Métodos Estadísticos.** Los valores obtenidos (Anexo 3) de conductividad, volumen de captación de la lluvia ácida, pH y los iones  $\text{SO}_4^-$  y  $\text{Cl}^-$  presentes en el agua de lluvia, a nivel espacial y temporal fueron procesados mediante el Programa Estadístico SPSS 7.5 para Window<sup>82</sup>. Mediante este paquete se calcularon los estadísticos descriptivos, Análisis de Varianza Multifactorial (ANOVA) de una vía y correlaciones, todos con sus correspondientes gráficos y/o tablas. Los gráficos de los valores medios de las variables y aquellos de la relación de éstas con la precipitación se generaron con el programa Microsoft Excel 2000.

No se establecieron interacciones entre las variables teniendo en cuenta el comportamiento integrado de los indicadores espacio y tiempo debido al tamaño de la muestra por sitio y mes ( $n=1$ ), es así, como los resultados se analizaron independientemente para espacio y para tiempo.

**9.3.1.1 Medidas Estadísticas.** Proporcionan información o tendencias de los parámetros analizados en este estudio. Las medidas de tendencia central \*, utilizadas en la investigación fueron la media y la mediana. En cuanto a las medidas de localización \*\*, se emplearon la mediana, percentiles y cuartiles. Las medidas de dispersión aplicadas fueron el rango intercuartílico, la varianza, la desviación estándar.

**9.3.1.2 Gráficos.** Se generaron con el programa SPSS y Excel, dos clases de gráficos:

- *Gráficos para representar variables discretas o categóricas.* Se generaron Histogramas, empleados para la comparación entre dos de los parámetros.
- *Gráficos para representar variables continuas.* Se produjeron Diagramas de Caja (Figura 15) para realizar comparaciones tanto del comportamiento espacial como temporal de los parámetros analizados:

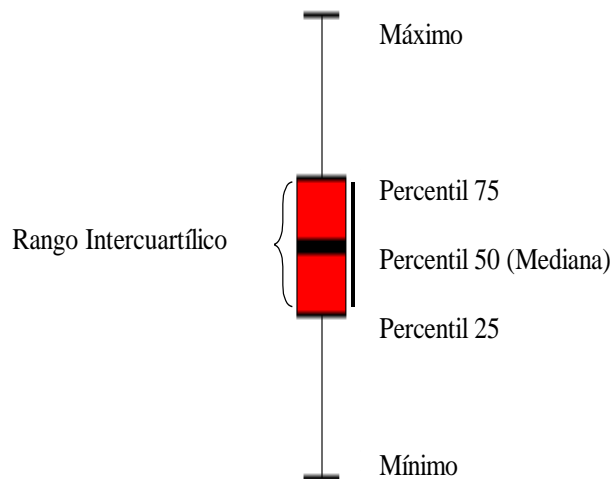
---

<sup>82</sup> SPSS para Window [CD – ROM]. Release 7.5, Standard Version. Noviembre 14 de 1996. Copyright© SPSS Inc., 1989 – 1996.

\* Se usan para saber en torno a qué valor central se distribuyen los valores de una variable

\*\* Indican el valor que ocupa una determinada posición en una distribución.

**Figura 15 Representación de un Diagrama de Caja**



**9.3.2 Comportamiento Espacial.** Se refiere a la variación de la concentración media de los parámetros analizados en los 10 sitios de la ciudad de Popayán. Permitted identificar las posibles fuentes de precursores de lluvia ácida y la generación de mapas de iso – contaminación.

**9.3.3 Comportamiento Temporal.** Se entiende como la variación de la concentración media de los parámetros analizados durante el período de muestreo comprendido entre Septiembre de 2001 a Febrero de 2002 en toda la ciudad de Popayán, es decir, sin discriminar sitios de muestreo.

**9.3.4 Mapas de Distribución Espacial de las Variables y Áreas de Influencia.** Se generaron mediante el Software ArcView, versión 3.1<sup>83</sup>. Este programa de computador generó los mapas de distribución espacial de las variables por interpolación con los valores de los puntos mediante el método de vecindad (“*neighborhood*”) o vecino más cercano o también llamado Polígonos de Thiessen. Para obtener el mapa de áreas de influencia se utilizó la *función de distancia* del mismo software. La cartografía y Sistemas de Información Geográfica (SIG), fueron llevados a cabo en el Grupo de Estudios Ambientales de la Universidad del Cauca.

**9.3.5 Cálculo del Depósito total.** Se utilizó para disminuir la influencia de factores meteorológicos, topográficos, climatológicos, distribución de las fuentes de emisión en el área de influencia, y para normalizar los promedios de lluvias

---

<sup>83</sup> ArcView GIS [CD –ROM]. Versión 3.1. 26 de Febrero de 2003. Licencia autorizada a: Grupo de Estudios Ambientales de la Universidad del Cauca.

debido a que las concentraciones de los solutos son inversamente proporcionales a la cantidad de lluvia que cae durante un aguacero.

El cálculo del depósito total de  $\text{SO}_4^-$  y  $\text{Cl}^-$  para toda la ciudad de Popayán, se obtuvo de acuerdo a la metodología propuesta por Moreira y otros investigadores<sup>84</sup>.

El Valor Medio Ponderado (VMP), para los iones del agua de lluvia analizados en el presente estudio se calculó mediante la siguiente ecuación matemática:

$$VMP = \frac{\sum_{i=1}^n C_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}$$

Donde:

VMP= Valor Medio Ponderado (mg/L)

i= 1, 2, 3, ,n, número de la muestra por cada sitio.

$C_i$ = Concentración promedio de cada sitio de muestreo (mg/L)

$P_i$ = Pluviometría promedio de las muestras por cada sitio de muestreo ( $\text{L}/\text{m}^2$ )

La pluviometría promedio de las muestras se determinó de la siguiente manera:

$$P_i = V/A$$

Donde:

V= volumen de captación promedio del sitio de muestreo (L)

A = Área de la superficie de captación.

Para conocer la pluviometría promedio del periodo considerado se recurrió a la equivalencia:

$$P_i = \frac{\sum_{i=1}^n V/A}{10}$$

---

<sup>84</sup> L.M. Moreira-Nordemann, P. Girard & N. Ré Poppi. Química da precipitação atmosférica na cidade de Campo Grande – MS. En: Rev. Bras. Geof. Vol. 15, No.1, 1997.

Donde:

V= Volumen de captación

A= Área de la superficie de captación

10, correspondiente al número total de sitios de muestreo.

Se tuvo en cuenta el radio de los reservorios de captación, el cual fue de 0.06 m. A partir de este valor se calculó el área de la superficie de captación:

$$A = \Pi * \Gamma^2$$

Donde,

A = área de la superficie de captación

$\Pi = 3.1416$

$\Gamma$  = radio del reservorio de captación

La ponderación del volumen de agua de lluvia precipitada en cada muestra, compensa la correlación inversa que existe entre este volumen con los valores de los iones analizados. Generalmente, las muestras de baja pluviometría son más concentradas al paso de las lluvias intensas por efecto de la dilución.

El VMP obtenido para cada uno de los iones analizados, fue entonces multiplicado por la pluviometría promedio del periodo de estudio y de esta manera se calculó el depósito total para  $\text{SO}_4^-$  y  $\text{Cl}^-$ :

$$D = VMP \times P$$

Donde,

D = Depósito total del ión (Kg/Ha/mes)

VMP= Valor Medio Ponderado

P = Pluviometría promedio ( $\text{L/m}^2$ ).

## 10. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 10.1 VOLUMEN DE CAPTACIÓN

En cada recolección de muestras, se encontró en los recipientes un volumen determinado, el cual se midió como un indicativo del grado de disolución de los iones analizados. La asociación entre el volumen y los demás parámetros se realizará en el análisis de correlaciones. Sólo para esta variable se presentarán únicamente los resultados de la estadística descriptiva, dado que es una variable independiente.

**10.1.1 Comportamiento Espacial.** Las pruebas de normalidad de Kolmogorov – Smirnov y Shapiro – Wilk, dieron como resultado que los datos se acomodan a la distribución normal, por lo tanto, se optó por aplicar pruebas paramétricas (ver Anexo 4).

**Tabla 14 Descriptivos de la Variable Volumen en los Sitios de Muestreo.**

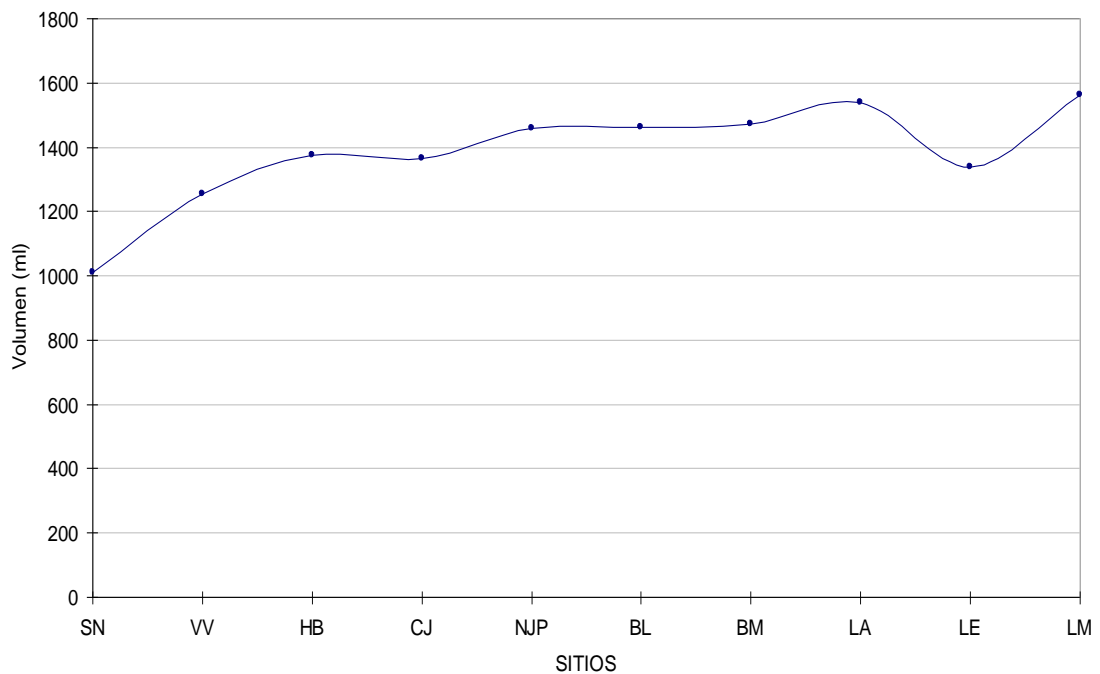
VOLUMEN								
	N	Media (ml)	Desviación Std.	Error Std.	Intervalo de Confianza del 95%		Mínimo	Máximo
					Límite Inferior	Límite Superior		
SN	3	1009.3	94.69	54.67	774.11	1,244.56	900	1,065
VV	6	1255.2	621.62	253.78	602.81	1,907.52	480	1,950
HB	6	1375.5	500.04	204.14	850.74	1,900.26	775	1,950
CJ	6	1366.7	667.14	272.36	666.54	2,066.79	503	1,950
NJP	6	1459.7	491.64	200.71	943.73	1,975.61	755	1,950
BL	6	1462.3	567.74	231.78	866.53	2,058.14	698	1,950
BM	6	1472.2	544.32	222.22	900.93	2,043.40	565	1,950
LA	5	1540.6	636.57	284.68	750.20	2,331.00	500	1,950
LE	6	1339.3	621.94	253.91	686.65	1,992.02	568	1,950
LM	6	1562.2	472.20	192.77	1,066.63	2,057.71	933	1,950
Total	56	1401.6	528.21	70.59	1,260.13	1,543.05	480	1,950

El valor máximo de 1950 ml se encontró en la mayoría de los sitios, excepto en el SN (Vol = 1065 ml). El valor mínimo de volumen se ubicó en el sitio VV con 480 ml. Los promedios máximo y mínimo a partir de la media de los valores en todos

los sitios dio como resultado 1562.17 ml y 1009 ml en los sitios LM y el SN, respectivamente. El promedio del valor de la media en todos los sitios de muestreo reportó 1401.59 ml, el cual se ubica entre el volumen medio de los sitios HB, (Vol = 1375.50 ml) y NJP (Vol = 1459.67 ml) (Tabla 14).

La figura 16 muestra el comportamiento del valor medio del volumen en cada uno de los sitios:

**Figura 16 Valor medio del volumen de captación en los sitios de muestreo.**



Los volúmenes encontrados en los muestreadores indica que las lluvias se distribuyeron de manera diferente en toda la ciudad de Popayán (Figura 17), presentándose los mayores volúmenes en la parte sur – occidente y los menores volúmenes en la nor – oriente.



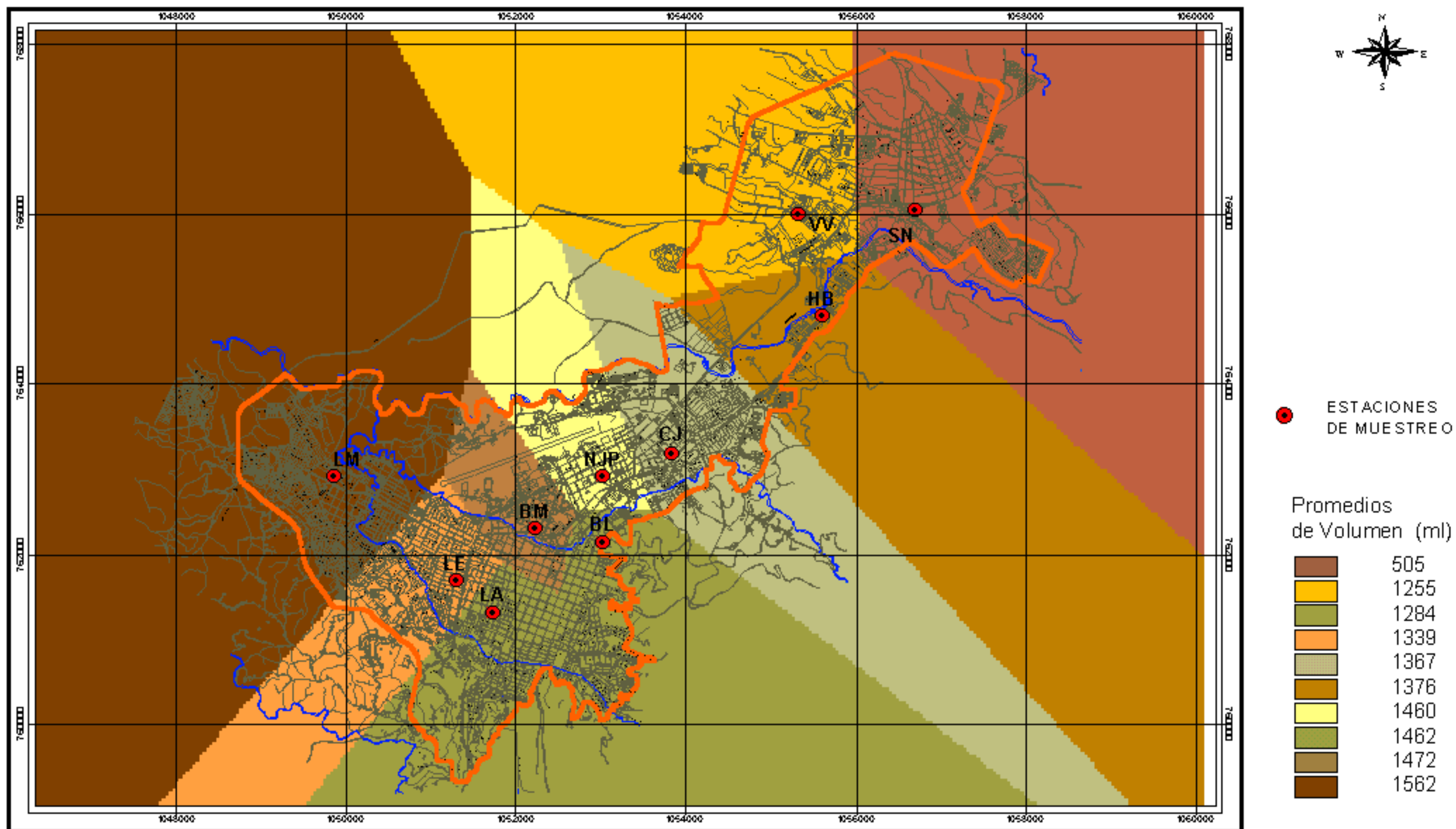


Figura 17 Distribución Espacial del Volumen de Captación en La Ciudad de Popayán

**10.1.2. Comportamiento Temporal.** Las pruebas de normalidad de Kolmogorov – Smirnov y Shapiro – Wilk, dieron como resultado que los datos se acomodan a la distribución normal, por lo tanto, se optó por aplicar pruebas paramétricas (ver Anexo 5).

El volumen máximo de 1950 ml, se registró durante los meses de Noviembre, Diciembre, Enero y Febrero. El volumen mínimo fue de 480 ml en el mes de Febrero. Los promedios máximo y mínimo del valor medio fue de 1950 ml en los meses de Diciembre y Enero y de 724.44 ml en el mes de Septiembre, respectivamente. El promedio del valor medio del volumen fue de 1401.59 ml, el cual se ubicó entre el valor medio del mes de Febrero (Vol = 878 ml) y del mes de Octubre (Vol = 1413.12 ml) (Tabla 15).

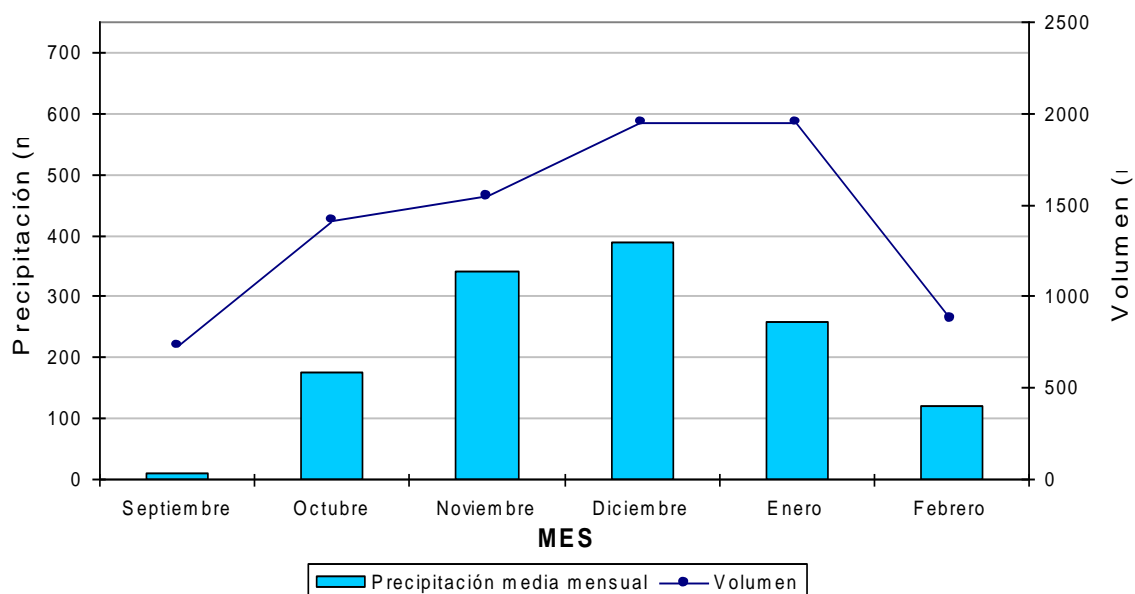
**Tabla 15 Descriptivos para la variable volumen de captación. Septiembre de 2001 a Febrero de 2002.**

VOLUMEN

	N	Media (ml)	Desviación Std.	Error Std.	Intervalo de Confianza del 95%		Mínimo	Máximo
					Límite Inferior	Límite Superior		
Sep	9	724.44	182.69	60.90	584.01	864.87	503	1,065
Oct	10	1,413.20	245.54	77.65	1,237.55	1,588.85	1,045	1,763
Nov	9	1,550.78	207.91	69.30	1,390.96	1,710.59	1,180	1,950
Dic	9	1,950.00	.00	.00	1,950.00	1,950.00	1,950	1,950
Ene	9	1,950.00	.00	.00	1,950.00	1,950.00	1,950	1,950
Feb	10	878.00	435.45	137.70	566.50	1,189.50	480	1,950
Total	56	1,401.59	528.21	70.59	1,260.13	1,543.05	480	1,950

La media de los valores de volumen en cada uno de los meses de muestreo se observa en la Figura 18, donde se relaciona el comportamiento mensual de la precipitación en la ciudad de Popayán. El comportamiento del volumen siguió el mismo patrón de distribución de la precipitación media mensual en la mencionada ciudad.

**Figura 18 Relación entre el volumen de captación y la precipitación media mensual. Septiembre de 2001 a Febrero de 2002.**



## 10.1. pH

**10.1.1 Comportamiento espacial:** De acuerdo a las pruebas de normalidad de Kolmogorov – Smirnov y Shapiro – Wilk, los datos se acoplaron a la distribución normal, por lo tanto, se optó por aplicar pruebas paramétricas (ver Anexo 4).

El valor máximo de pH fue de 6.61 (estación VV) y el mínimo obtenido de 3.68 (estación NJP) unidades de pH (Tabla 16). A excepción de las estaciones BL (pH=5.17), LA (pH=5.05) y LE (pH=4.54), cuyos valores mínimos de pH se ubicaron dentro de los valores normales de pH del agua de lluvia que se encuentran más comúnmente en el rango de 4.5 a 5.6, considerándose el contenido natural de CO<sub>2</sub> de la atmósfera y la contribución de compuestos de azufre, expuesto por Rocha Martins y Bittencourt<sup>85</sup>. Los valores mínimos para el resto de las estaciones se encontraron por debajo de estos valores naturales, pudiendo manifestarse así la presencia de eventos de precipitación pluvial ácidos. Aunque las partículas precursoras de compuestos ácidos no hayan sido lavadas con la lluvia, pueden haber sido transportadas por la acción del viento, adhiriéndose en los embudos y posteriormente arrastradas hacia el interior de los reservorios.

<sup>85</sup> ROCHA, C. & J. BITTENCOURT DE ANDRADE. Química atmosférica do enxofre (IV): Emissões, reações em fase aquosa e impacto ambiental. En: Química Nova. Vol. 25, No. 2, 2002. p. 259-272.

**Tabla 16 Estadística descriptiva para la variable pH en los Sitios de Muestreo.**

PH

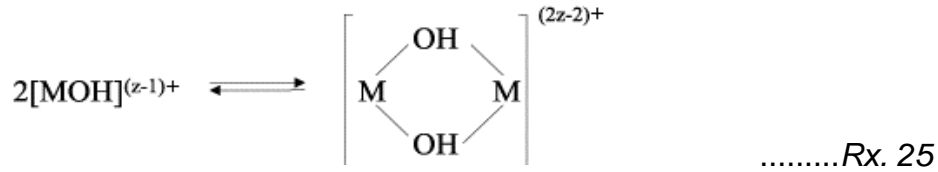
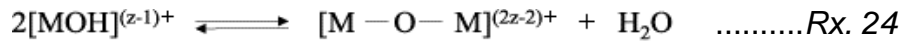
	N	Media	Desviación Std.	Error Std.	Intervalo de Confianza del 95%		Mínimo	Máximo
					Límite Inferior	Límite Superior		
SN	3	5,17	,7663	,4424	3,2664	7,0736	4,3	5,7
VV	6	5,66	,9792	,3998	4,6274	6,6826	4,0	6,6
HB	6	5,31	,9255	,3778	4,3371	6,2796	3,7	6,3
CJ	6	5,42	,8673	,3541	4,5048	6,3252	4,0	6,5
NJP	6	5,21	1,0526	,4297	4,1020	6,3113	3,7	6,0
BL	6	5,84	,4302	,1756	5,3835	6,2865	5,2	6,4
BM	6	5,36	1,0067	,4110	4,3068	6,4198	3,7	6,5
LA	5	5,61	,4254	,1902	5,0858	6,1422	5,1	6,2
LE	6	5,44	,6668	,2722	4,7403	6,1397	4,5	6,2
LM	6	5,28	,5355	,2186	4,7130	5,8370	4,3	5,8
Total	56	5,44	,7645	,1022	5,2340	5,6435	3,7	6,6

Los bajos valores de pH pueden ser explicados mediante las siguientes condiciones:

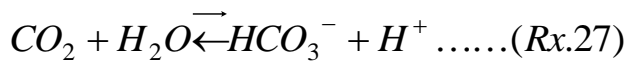
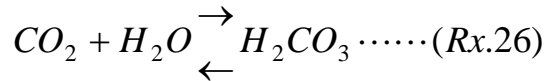
En primer lugar, los aerosoles emitidos por fuentes antropogénicas, generadas por actividades metalúrgicas y procesos de galvanizado, que se realizan en talleres industriales, como los del SENA, están formados principalmente por óxidos metálicos, los cuales no fueron analizados en el estudio. Una vez en la atmósfera, los iones metálicos de transición pueden haber sufrido hidrólisis (Rx. 23), en la que una molécula de agua con fórmula HOH, reacciona con la molécula de una sustancia AB, en donde A<sup>+</sup> representa al catión metálico y B<sup>-</sup> al anión:



El comportamiento de los iones metálicos disueltos en el agua, puede ser descrito en función de la carga del radio iónico y de la estructura electrónica. El complejo acuo-hidroxo-metal puede dimerizar y polimerizar. Dependiendo del pH y de la concentración y las especies resultantes pueden contener puentes de tipo μ-oxo o μ-hidroxo (Rx. 24 y Rx. 25):



En segundo lugar, cabe aclarar que para la primera recolección de muestras, el orificio inferior del embudo, fue taponado con gasa, la cual, debido a su porosidad pudo haber facilitado la entrada de CO<sub>2</sub> hacia el interior del reservorio\*. La acumulación de este gas en concentraciones superiores a las normales\* podría haber generando una baja en el pH debido a la producción de ácido carbónico (Rx. 26) y por aumento en la concentración de H<sup>+</sup> como resultado de su disociación (Rx. 27)

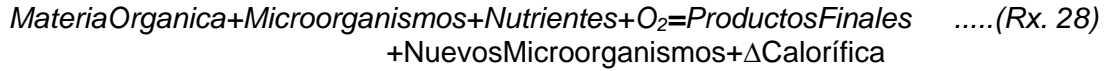


En tercer lugar, la presencia en la atmósfera de elementos biológicos, como hojas, insectos, polen, excrementos de aves, etc, al adherirse y acumularse en las paredes del embudo, podrían haber sido lavados durante los eventos de lluvia hacia el interior del reservorio, pudiendo ocasionar bajas en el pH como consecuencia de la descomposición del material orgánico por parte de los microorganismos. A pesar de las precauciones tomadas al respecto, taponando con algodón estéril el orificio menor del embudo y disponiendo la manguera a manera de trampa de gases, fue indispensable filtrar algunas muestras debido al contenido de partículas. La siguiente ecuación representa el mecanismo mediante el cual se dio la descomposición de la materia orgánica en presencia de oxígeno y nutrientes:

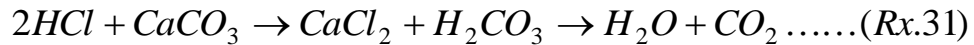
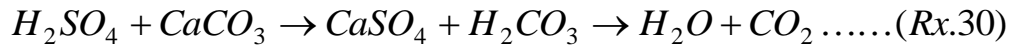
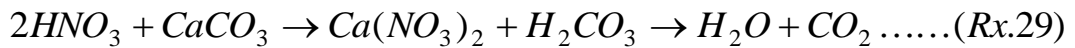
---

\* Por esta razón se decidió cambiar la gasa por algodón antiséptico, el cual tiene una porosidad menor.

\* El valor del [CO<sub>2</sub>(aq)] en agua a 25 °C en equilibrio con el aire que tiene 350 ppm (ó mg/L) de CO<sub>2</sub>, es de 1.146x10<sup>-5</sup> moles/litro, De donde se obtiene un pH normal de 5.65 en el agua de lluvia, de acuerdo a las concentraciones iguales de H<sup>+</sup> y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>

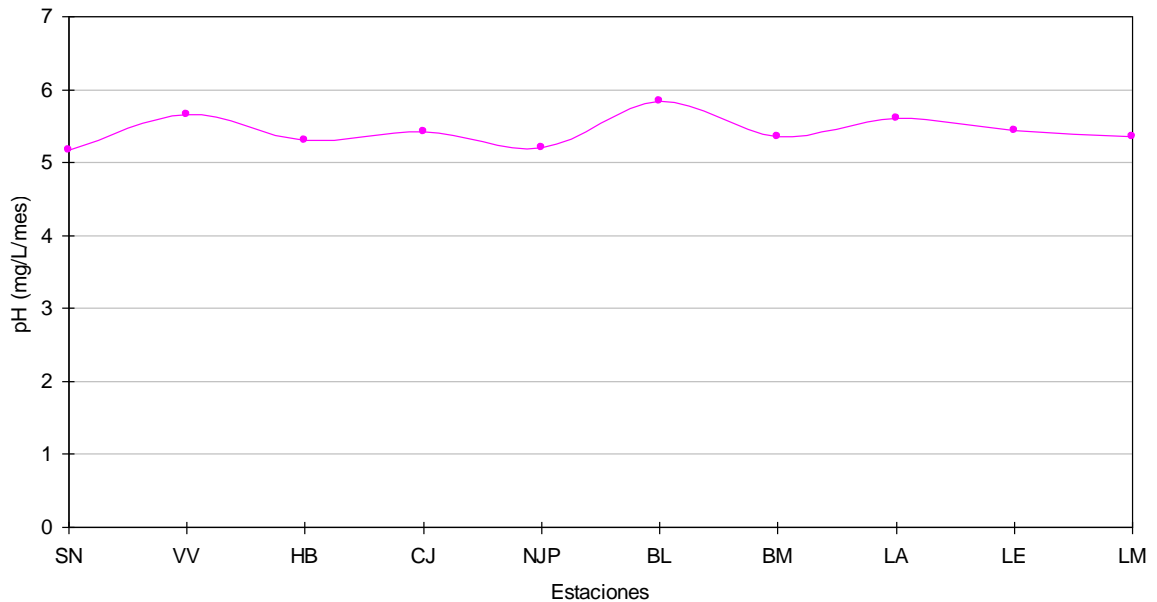


En general, los valores máximos de pH en todas las estaciones de muestreo (ver Tabla 16), superan el pH normal del agua de lluvia entre 4.5 y 5.6, lo que hace suponer que determinados eventos de lluvia se dio en mayor proporción el lavado atmosférico de cationes, como partículas de polvo y carbonatos, principalmente, y en menor grado de aniones precursores de los ácidos fuertes HNO<sub>3</sub> y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Los primeros al ser captados por los colectores de precipitación promovieron reacciones de neutralización de los compuestos ácidos del agua de lluvia contenida en los muestreadores. Algunas reacciones de neutralización entre compuestos ácidos y carbonatos incluyen (Rx. 29, Rx. 30 y Rx.31):



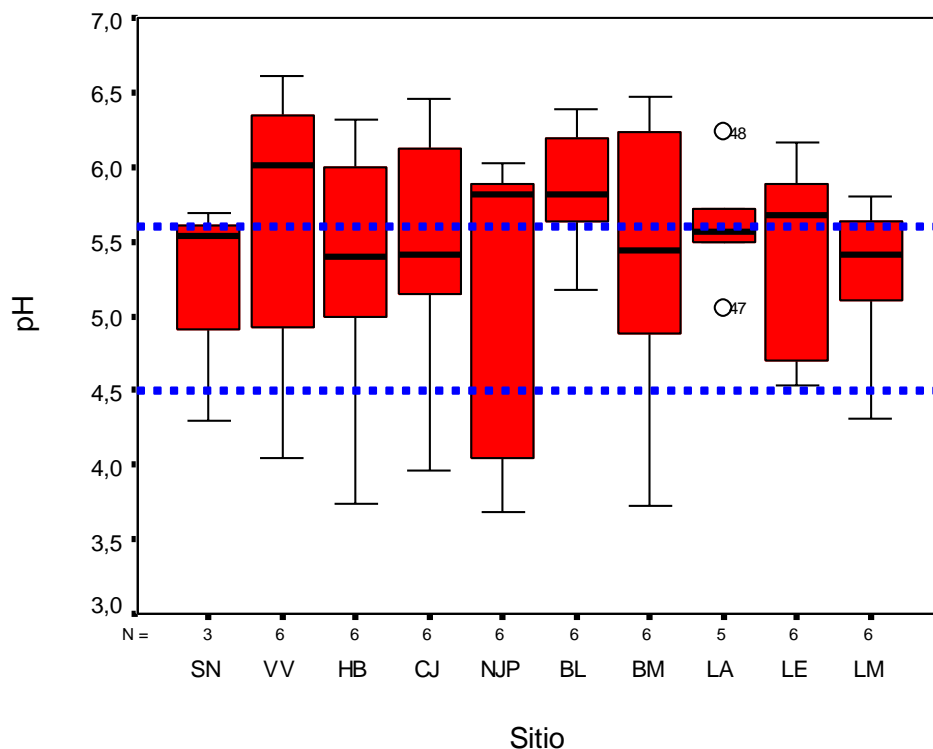
La Figura 19, correspondiente al valor medio de pH para cada uno de los sitios. Expresa que durante todo el período de muestreo en todos los puntos, los valores medios de pH se mantuvieron dentro del rango normal del agua de lluvia, lo que explica la presencia en la atmósfera de iones alcalinos como carbonatos, capaces de neutralizar los compuestos ácidos (ver Rx. 29, Rx. 30 y Rx. 31).

**Figura 19 Valores medios de pH de los sitios de muestreo.**



En el diagrama de caja (Figura 20) se muestran las variaciones en el rango intercuartílico en todos los sitios de muestreo, pero en general los valores permanecieron dentro del rango de 5.6 y 4.5 unidades de pH. La mayoría de los sitios tuvieron valores mínimos por debajo de 4.5 unidades de pH (ver Tabla 16), indicando la presencia de fuentes puntuales de iones acidificantes ubicadas en gran parte de la ciudad, especialmente la zona nor-oriental y central, donde se sitúan los sitios de SN, VV, HB, CJ, NJP, fuertemente influenciados por el tránsito vehicular y actividades de construcción. El percentil 25 del sitio NJP, presentó valores por debajo de dicho límite y como se enseñó en la tabla 16 tuvo el mínimo valor (pH = 3.68) en comparación con los demás sitios. En este punto de muestreo pueden haberse presentado los valores más bajos de pH debido a la influencia de fuentes móviles emisoras de precursores de compuestos acidificantes provenientes de la combustión de los automotores que transitan la autopista Panamericana y la carrera Sexta (frente a la Facultad de Medicina de la Universidad del Cauca), las cuales se constituyen en las vías mas importantes y con mayor flujo vehicular en la ciudad de Popayán.

**Figura 20 Diagrama de Caja para la Variable pH en los Sitios de Muestreo.**



La distribución espacial de pH se puede apreciar en el Figura 21:

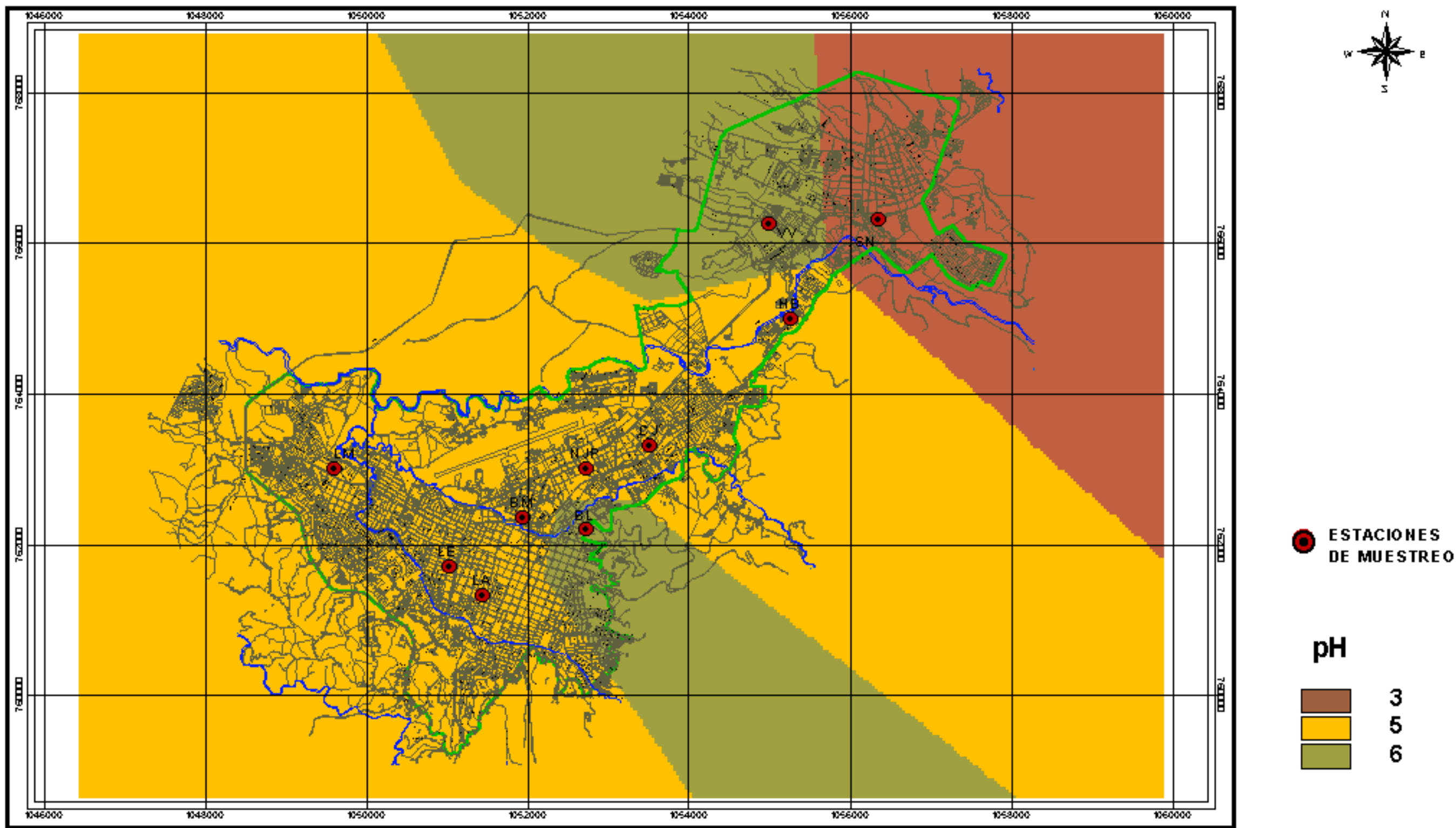


Figura 21 Distribución Espacial del pH en La Ciudad de Popayán

1 0 1 2 Kilometers

Fuente cartográfica y SIG :  
Grupo de Estudios Ambientales





Por medio del Análisis de Varianza de Una Vía (ANOVA) (Tabla 17) se obtuvo una significancia igual a 0.939, por lo cual no se rechazó la igualdad de medias de la variable pH en los diez sitios muestreados durante el período de estudio.

**Tabla 17 ANOVA para la variable pH en los Sitios de muestreo**

pH	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	2,217	9	,246	,379	,939
Intra-grupos	29,926	46	,651		
Total	32,143	55			

De acuerdo a la Tabla 16, no se rechazó la hipótesis nula de igualdad de medias, mediante la prueba post hoc de Tukey (Tabla 18), por lo tanto, las medias de los diez sitios se ubicaron en el mismo subconjunto homogéneo con una significancia del 93.6%.

**Tabla 18 Prueba post hoc de Tukey para la variable pH en los Sitios de muestreo**

Tukey HSD<sup>a,b</sup>

SITIO	N	Subconjunto = .05
		1
SN	3	5,17
NJP	6	5,21
LM	6	5,28
HB	6	5,31
BM	6	5,36
CJ	6	5,42
LE	6	5,44
LA	5	5,61
VV	6	5,66
BL	6	5,84
Sig.		,936

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

- a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 5,357.
- b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

**10.2.2 Comportamiento Temporal.** Las pruebas de normalidad de Kolmogorov – Smirnov y Shapiro – Wilk, dieron como resultado que los datos se acomodan a la distribución normal, por lo tanto, se optó por aplicar pruebas paramétricas (ver Anexo 5).

El máximo valor reportado para pH fue de 6.61 (Febrero), y el mínimo de 3.68 (Octubre). Los valores promedio máximo y mínimo fueron de 6.18 (Febrero) y 4.52 (Octubre) unidades de pH, respectivamente (Tabla 19). El promedio de los valores medios dio como resultado 5.44 unidades de pH, el cual se ubicó entre los meses de Diciembre (pH = 5.46) y Enero (pH = 4.83).

**Tabla 19 Estadística descriptiva para la variable pH, Septiembre de 2001 a Febrero de 2002**

PH	N	Media	Desviación Std.	Error Std.	Intervalo de Confianza del 95%		Mínimo	Máximo
					Límite Inferior	Límite Superior		
					Sep	9		
Oct	10	4,52	,8865	,2803	3,8858	5,1542	3,7	5,9
Nov	9	5,84	,2974	1,E-01	5,6114	6,0686	5,4	6,4
Dic	9	5,46	,3418	,1139	5,1939	5,7194	5,1	6,0
Ene	9	4,83	,4276	,1425	4,5035	5,1609	4,0	5,4
Feb	10	6,13	,4379	,1385	5,8187	6,4453	5,3	6,6
Total	56	5,44	,7645	,1022	5,2340	5,6435	3,7	6,6

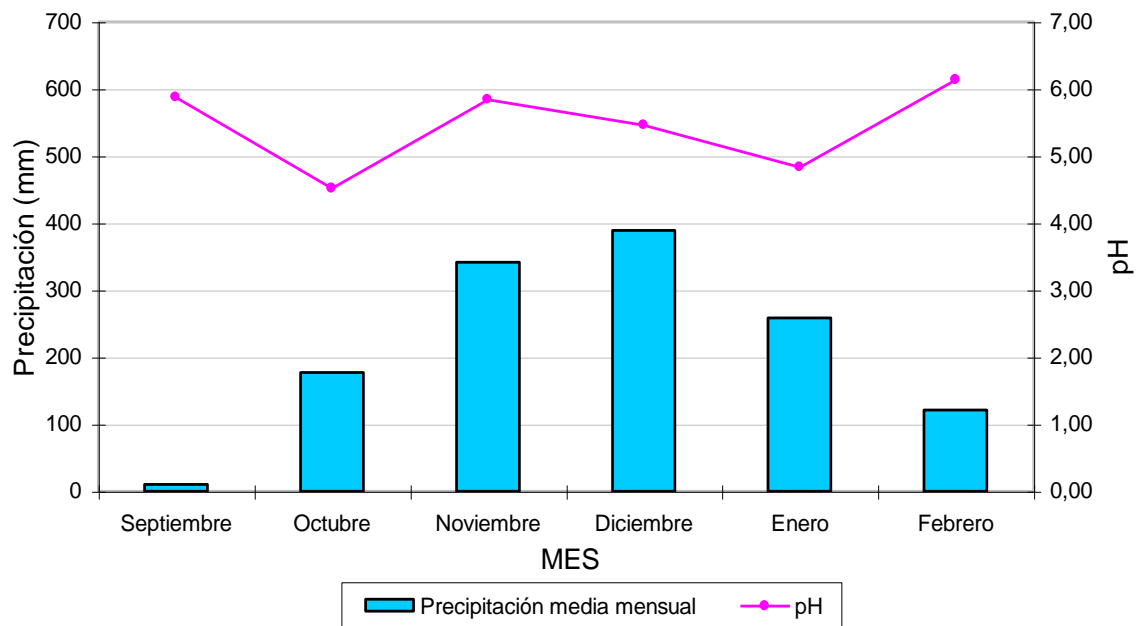
En general, la mayoría de los valores promedio de pH se ubicaron dentro del rango normal para el agua de lluvia (pH entre 4.5 y 5.6 unidades de pH), lo que indica la presencia en la atmósfera de compuestos básicos que neutralizaron a los compuestos ácidos. (ver Rx. 29, Rx. 30 y Rx. 31). En el mes de Septiembre el valor medio de pH fue de 5.88. En el mes de Octubre, se reportaron los valores más bajos de pH en comparación con todos los sitios de muestreo, aún así la mayoría de las muestras tuvieron valores de pH por encima del mínimo normal aceptable. Durante el mes de Noviembre el valor medio de pH fue de 5.84. Para el mes de Diciembre se presentaron valores dentro del rango normal de pH. El valor medio de pH para el mes de Enero fue de 4.83 y en la mayoría de las muestras los valores estuvieron por encima del valor normal mínimo aceptable. En el mes de Febrero la media del pH fue de 6.13. Este mes se caracterizó porque todas las muestras tuvieron valores de pH superiores a 5.27.

Durante el mes de septiembre de 2001, cuando el volumen de precipitación fue bajo (10 mm) (Figura 22)\*, los valores de pH aumentaron, manteniéndose por encima del rango normal para el agua de lluvia (pH entre 4.5 y 5.6); contrario a lo esperado, si se tiene en cuenta que en los procesos de dilución, por lo general, la concentración de los iones se relaciona inversamente con el volumen del agua de lluvia que precipita. De ser así, el pH encontrado durante este mes hubiese sido

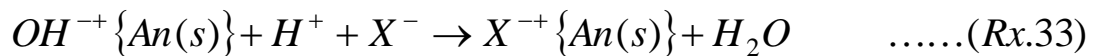
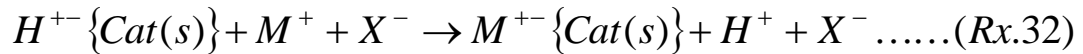
\* Los datos de precipitación de los meses de Septiembre a Febrero fueron suministrados por la Estación Meteorológica del Aeropuerto Guillermo León Valencia de la ciudad de Popayán.

bajo, debido a la mayor acumulación de iones en la atmósfera, que se esperaba fueran en su mayoría  $\text{SO}_4^-$  y  $\text{Cl}^-$ , dada la influencia marina y volcánica sobre Popayán. Pero el pH estuvo dentro del rango normal, lo cual, puede estar muy relacionado con la intensidad, duración y frecuencia de los eventos de lluvia, ya que por lo general, durante la temporada de menos lluvias, estas duran poco, son de baja intensidad y escasas, dando como resultado menos lavado atmosférico de los iones, baja concentración de estos en el agua de lluvia y un pH dentro de lo normal. Durante el mes de Octubre, cuando comienza el periodo de lluvias abundantes en Popayán, los eventos de pluviosidad, normalmente se caracterizan por ser intensos, de duraciones prolongadas y frecuentes. Esto pudo contribuir con un mayor lavado atmosférico de los iones arrastrados por los vientos durante la temporada seca o de menos lluvias en la ciudad; también la dilución pudo facilitarse y de esta manera aumentar la concentración de protones  $[\text{H}^+]$  y disminuir el pH. A medida que aumentaron las precipitaciones en los meses de Noviembre, Diciembre y Febrero, los valores de pH fueron disminuyendo progresivamente, manteniéndose dentro del rango normal, posiblemente por las mismas razones expuestas para el mes de Octubre. En Enero, cuando comienza la segunda temporada de menos lluvias (no tan marcada como el periodo comprendido entre Julio y Septiembre), el aumento en el pH, posiblemente, se deba a una menor acumulación de protones  $[\text{H}^+]$  en el agua de lluvia, lo que se explica de manera similar que para el mes de Septiembre.

**Figura 22 Relación entre el pH y la precipitación media mensual. Septiembre de 2001 a Febrero de 2002**

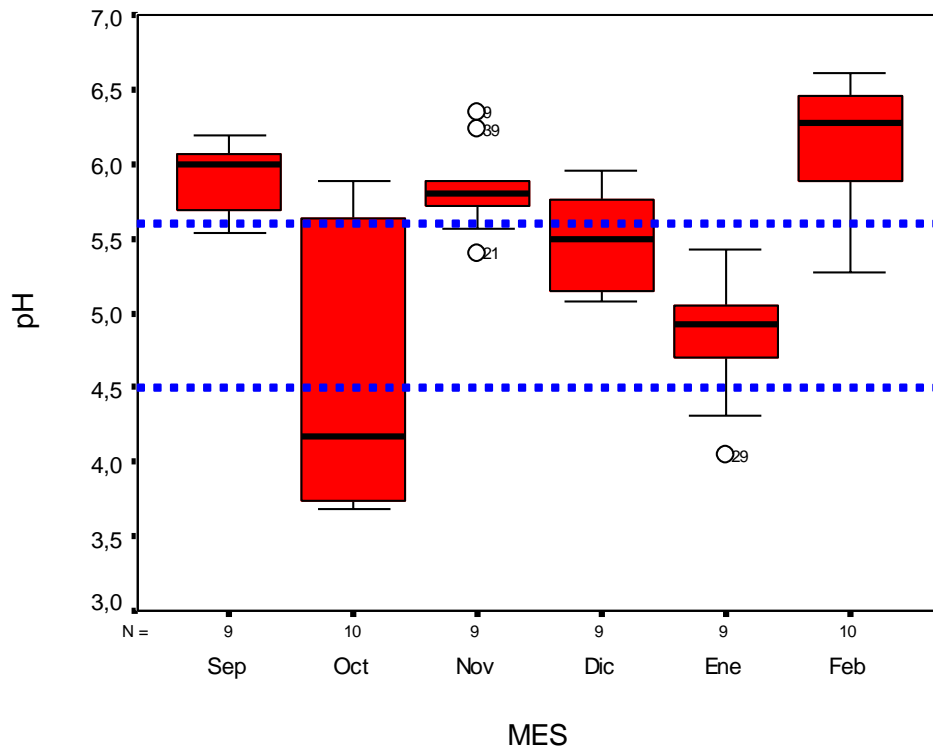


La reacción 31, de intercambio iónico (Rx. 32), puede explicar el leve descenso de pH en los meses de Octubre y Enero, debido a una mayor concentración de aniones. La reacción 33 justifica el aumento del pH por el aumento de cationes en el agua de lluvia. En este proceso los cationes y los aniones reemplazan al ion hidrógeno y al ion hidróxido, respectivamente. El resultado en red da que cada equivalente de la sal es reemplazado por una mol de agua. Para la sal iónica hipotética MX, las reacciones son:



Los valores más bajos de pH se ubicaron en el mes de Octubre (Figura 23). En este mes un poco más del 50% de las muestras tomadas tuvieron valores de pH por debajo de 4.5.

**Figura 23 Diagrama de Caja para la Variable pH. Septiembre de 2001 a Febrero de 2002\***



\* En el diagrama de caja, el círculo pequeño (o un asterisco) con un número al lado, ubicado en los extremos de algunas cajas, indican el número del dato de la variable que se sale de la agrupación normal.

Una posible explicación es que en los eventos de lluvia de este mes se dio el lavado de iones acumulados en la atmósfera durante la temporada de menos lluvias que duró hasta Septiembre (mes en el que se inició el estudio), periodo en el cual, al parecer se presentó una menor concentración de protones, por lo tanto, el pH del agua de lluvia estuvo dentro del rango normal. En el mes de Octubre se observa que la mayoría de los datos registraron valores de pH por debajo del límite inferior del rango normal (pH=4,5), posiblemente, por una mayor acumulación de protones en el agua de lluvia. Los iones precursores de acidez en el agua de lluvia, pueden haber sido arrastrados principalmente de fuentes naturales como el océano Pacífico, por acción de los vientos predominantes del SW y la Cadena Volcánica de los Coconucos, cuyos vientos llevan una dirección SE hacia Popayán (Figura 24). En Enero se reportaron pocos valores de pH por debajo de 4.5 en los datos situados dentro del primer cuartil, pero en general, la mayoría de los datos en este mes se situaron dentro del rango normal para el pH del agua de lluvia. En los meses restantes, todos los datos tuvieron valores de pH por encima de 4.5. Se observaron diferencias en la dispersión de los datos de pH en cada mes, lo que indicó el particular comportamiento de éste a lo largo del período de muestreo. Lo anterior se puede asociar con algunas características climáticas como la duración, intensidad y frecuencia de la precipitación, y la acción de los vientos predominantes durante los meses de Septiembre de 2001 a Febrero de 2002, influenciando en la dispersión atmosférica de compuestos precursores y en la posterior disolución y formación de compuestos ácidos y básicos encargados de generar las características químicas al agua de lluvia.

En este estudio se tomó en cuenta la dirección de los vientos que han sido registrados para Popayán durante un período de 19 años, por parte del IDEAM<sup>86</sup>. El análisis de la Rosa de los Vientos para esta ciudad (Figura 24), señala que los vientos predominantes llevan una dirección SW y W, advirtiendo que los precursores de los compuestos ácidos contenidos en el agua de lluvia de la ciudad de Popayán proceden principalmente del Océano Pacífico donde se generan iones  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$ , entre otros, de los exudados producidos por la selva del Pacífico\* y de los compuestos azufrados y clorados emanados desde la Cadena Volcánica de los Coconucos.

---

<sup>86</sup> Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Régimen anual de viento, Popayán [Online]. text/html; charset=windows-1252. Bogotá, Colombia: IDEAM, 2001 [rev. 2001]. Disponible en internet: <<http://www.ideam.gov.co/sectores/aero/climat/vienpopayan.htm>>

\* Crozat (1979) ha demostrado la importancia de los exudados de la vegetación tropical como fuente de aerosol", citado por Hendry, Ch., C., Berish & E. Edgerton, 1984.

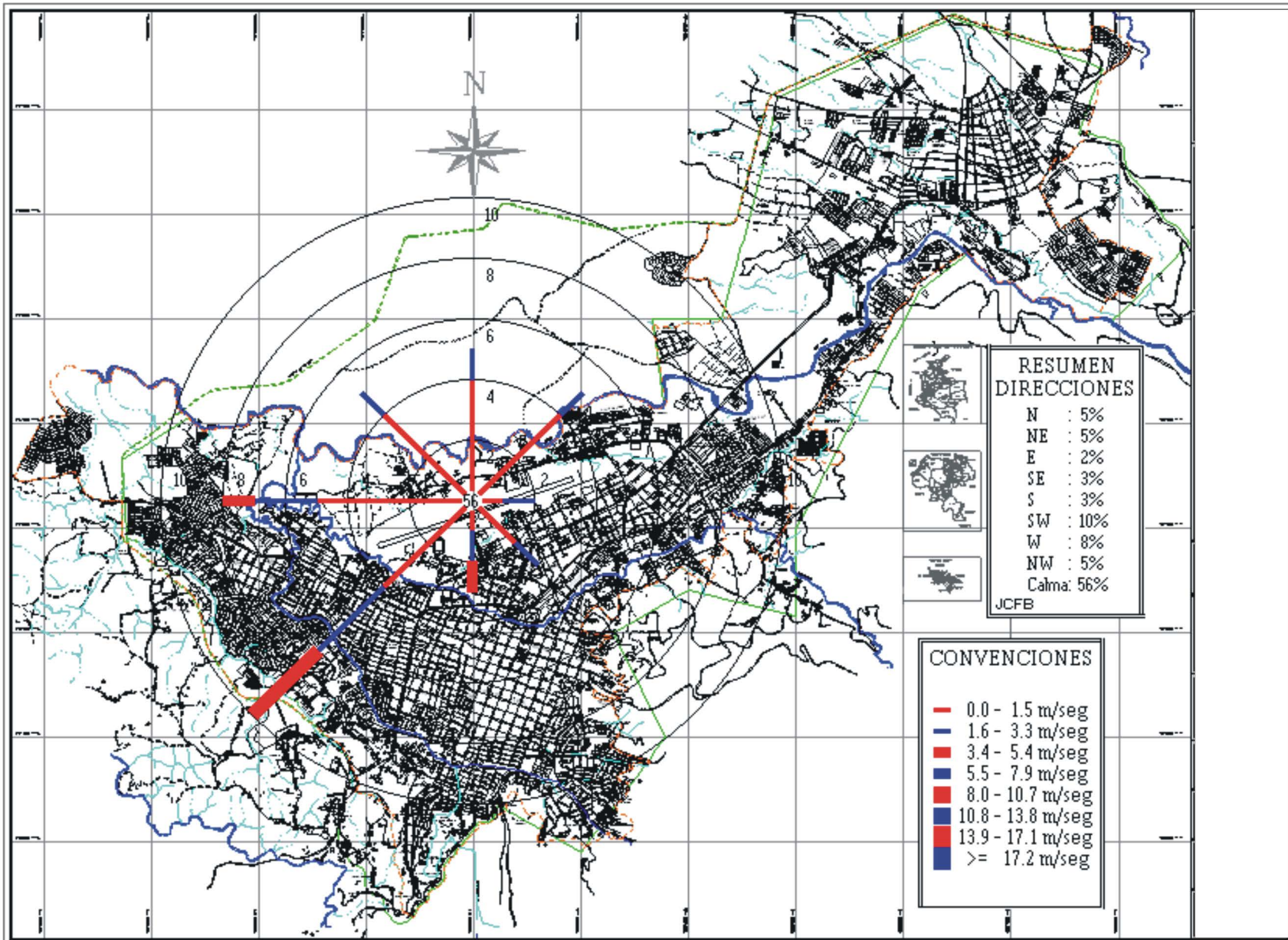
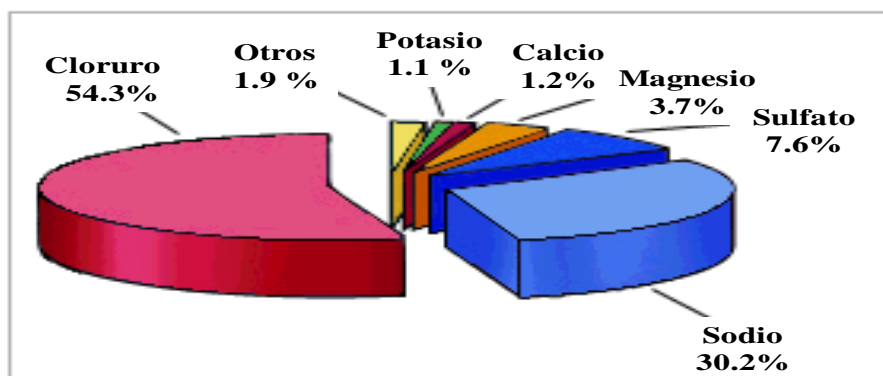


Figura 24 Rosa de los Vientos para la Ciudad de Popayán



Para entender mejor el papel del Océano Pacífico como fuente de aerosoles atmosféricos, es importante tener en cuenta que el océano está formado por una compleja solución salina con una concentración constante, constituida por un gran número de elementos químicos, gases disueltos y nutrientes. Las principales sales del agua de mar se representan en la siguiente figura:

**Figura 25 Proporción de sales disueltas en los océanos**



Fuente: Instituto de Geografía, el Centro de Percepción Remota y el Departamento de Desarrollo Académico de SECICO. Curso Geografía del Mar: Propiedades del Agua de Mar [Online]. Text/html. Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile, 2001 [Rev. 2001]. Disponible en internet: <[http://www.puc.cl/sw\\_educ/geo\\_mar/html/h32.html](http://www.puc.cl/sw_educ/geo_mar/html/h32.html)>

En la figura 25 se observa que la proporción de iones precursores de compuestos ácidos en el agua de lluvia disueltos en el agua de mar, como son el  $\text{Cl}^-$  y el  $\text{SO}_4^{2-}$ , tienen una proporción del 61.9%, mientras que los cationes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$ , tienen una proporción de 36.2%. Esto da una idea de la importancia del océano como fuente de aerosoles.

La Cadena Volcánica de Los Coconucos (CVLC), en la Cordillera Central de Colombia, se localiza al SE de Popayán. Es un conjunto de 15 centros eruptivos alineados en dirección  $\text{N}39^\circ\text{W}$ . En el extremo NW de esta cadena volcánica se localiza el volcán Puracé. Este volcán se ubica a 30 Km al SE de Popayán y cuenta con una altura de 4.646 msnm\*. Es un estratovolcán compuesto, con predominio de actividad explosiva de composición andesítica\*. Su última erupción, con emisión de cenizas se registró en 1977. El volcán Sotará, otro de los volcanes pertenecientes a la Cadena Volcánica de los Coconucos, está localizado a 35 Km al SW de la ciudad de Popayán, con una elevación de 4.580 msnm, es un estratovolcán compuesto (caldérico) activo, predominantemente efusivo<sup>87</sup>.

\* msnm = metros sobre el nivel del mar.

\* Andesita: roca volcánica cuyo contenido de  $\text{SiO}_2$  se encuentra entre 52 y 63%.

<sup>87</sup> Arcila M.M., et al. 10 años del Observatorio Vulcanológico y Sismológico Ingeominas - Centro Operativo Regional Popayán. [Online]. Acrobat PDF Writer 4,0 para Windows. Colombia: Instituto Geofísico Universidad Javeriana, 6 de Octubre de 2002 sin fecha de actualización] Disponible en internet:<<http://ainsuca.javeriana.edu.co/geofisico/simposio2002/Instrumentacion/10%20A%D1OS%20DEL%20%20OVSP.PDF>>



En la tabla del análisis de varianza de ANOVA (Tabla 20), la significancia fue altísima, igual a 0.000, por lo que se rechazó la igualdad de medias de la variable pH en los seis meses de muestreo.

**Tabla 20 ANOVA para la variable pH. Septiembre de 2001 a Febrero de 2002.**

pH	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	19,732	5	3,946	15,899	,000
Intra-grupos	12,411	50	,248		
Total	32,143	55			

Mediante el ANOVA se pudo determinar que existen diferencias entre las medias, es decir que se rechazó la hipótesis nula de igualdad de medias. Mediante la pruebas de rango post hoc de Tukey (Tabla 21) se determinaron aquellas medias que difieren.

**Tabla 21 Prueba Post Hoc de Tukey para la variable pH. Septiembre de 2001 a Febrero de 2002.**

pH

Tukey HSD<sup>a,b</sup>

MES	N	Subconjuntos para alpha = .05		
		1	2	3
Oct	10	4,52		
Ene	9	4,83	4,83	
Dic	9		5,46	5,46
Nov	9			5,84
Sep	9			5,88
Feb	10			6,13
Sig.		,755	,092	,055

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 9,310.

b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

La prueba post hoc de Tukey arrojó como resultado tres subconjuntos homogéneos de las medias de pH. El subconjunto 1, indicó que las medias fueron similares en los meses de Octubre y Enero, con un grado de significancia del 75,5%. En el subconjunto 2, la uniformidad se presentó entre las medias de los meses de Enero y Diciembre, con una significancia de 9,2%. Finalmente, el subconjunto 3 señaló homogeneidad para las medias de los meses de Diciembre, Noviembre, Septiembre y Febrero, con un grado de significancia de 5,5%.



Posiblemente hubo factores similares entre los meses que conforman cada uno de los subconjuntos, entre los que se pueden contar, presencia de concentraciones similares de compuestos ácidos y básicos en la atmósfera, procesos de disolución y neutralización de estos compuestos bajo condiciones semejantes, entre otros. En general, todos los subgrupos ponen de manifiesto que la media de los valores de pH, en todos los meses se ubicó por encima del valor mínimo aceptable para el agua de lluvia.

### 10.3 CONDUCTIVIDAD

**10.3.1 Comportamiento Espacial:** Las pruebas de normalidad de Kolmogorov – Smirnov y Shapiro – Wilk, dieron como resultado que los datos se acomodan a la distribución normal. Se optó por aplicar pruebas paramétricas (ver Anexo 4).

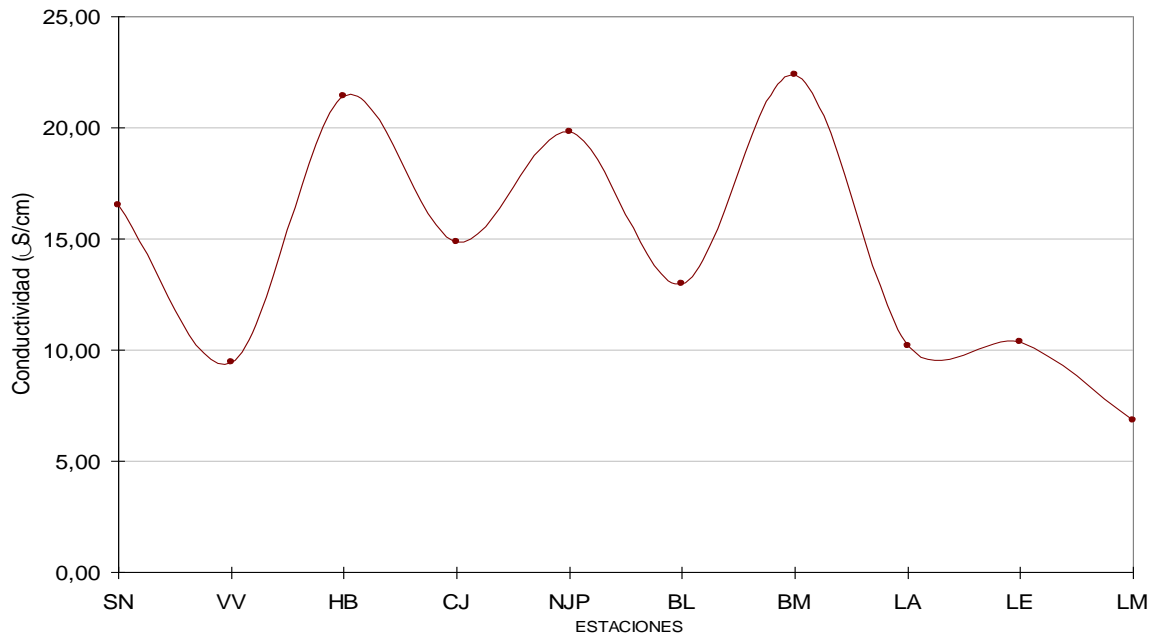
Los valores máximos y mínimos durante el período de muestreo fueron 75.10  $\mu\text{S/cm}$  y 2.80  $\mu\text{S/cm}$ , correspondiente a los sitios NJP y BL, respectivamente. El máximo de la media de los valores fue 22.37  $\mu\text{S/cm}$  en el sitio BM y el mínimo de 6.84  $\mu\text{S/cm}$  en el sitio LM. El promedio de los valores medios fue de 14.45  $\mu\text{S/cm}$  y se ubicó entre los valores de los sitios BL (12.98  $\mu\text{S/cm}$ ) y CJ (14.85  $\mu\text{S/cm}$ ) (Tabla 22).

**Tabla 22 Descriptivos para la variable conductividad en los sitios de muestreo.**

CONDUCTI								
	N	Media ( $\mu\text{S/cm}$ )	Desviación Std.	Error Std.	Intervalo de Confianza del 95%		Mínimo	Máximo
					Límite Inferior	Límite Superior		
SN	3	16,50	3,2365	1,8686	8,4566	24,5367	14,21	20,20
VV	6	9,460	5,1624	2,1075	4,0457	14,8809	4,11	16,91
HB	6	21,40	22,8269	9,3190	-2,5537	45,3570	2,90	65,70
CJ	6	14,85	12,0796	4,9315	2,1766	27,5301	3,90	34,80
NJP	6	19,83	27,4359	11,2007	-8,9605	48,6239	3,59	75,10
BL	6	12,98	9,6671	3,9466	2,8350	23,1250	2,80	30,10
BM	6	22,37	26,0816	10,6478	-4,9993	49,7427	2,85	72,80
LA	5	10,18	6,5933	2,9486	1,9914	18,3646	4,10	21,10
LE	6	10,36	5,4572	2,2279	4,6363	16,0904	4,17	18,82
LM	6	6,840	2,5151	1,0268	4,2005	9,4795	4,53	11,05
Total	56	14,45	15,3922	2,0569	10,3246	18,5687	2,80	75,10

En la figura 26 se observa el comportamiento del valor medio de la conductividad en cada uno de los sitios:

**Figura 26** Valor medio de la variable Conductividad en los sitios de muestreo.



En toda la ciudad, los valores de conductividad pueden atribuirse a la presencia de partículas provenientes de fuentes de emisión natural como la Cadena Volcánica de los Coconucos y el Océano Pacífico. Además, de las emisiones vehiculares y doméstica que son consideradas como fuentes permanentes de contaminación en toda la ciudad.

En los sitios NJP (75.10 µS/cm), BM (72.80 µS/cm) y HB (65.70µS/cm) (Tabla 22), los valores de conductividad fueron los más elevados. Esto puede estar relacionados con fuentes puntuales de emisión.

En el sitio BM, el cual tiene la mayor conductividad, puede estar relacionada con las obras de construcción de los alrededores que emiten material particulado a la atmósfera. En el sitio HB la conductividad estaría asociada con las partículas que pueden ser arrastradas desde las laderas desprotegidas y erosionadas ubicadas en la vía al Centro Recreativo de Comfacauca, a las partículas derivadas desde las obras de construcción que se realizaban en esta zona y la presencia de la cantera que se ubica cerca al Club Campestre y la fábrica de productos lácteos Friesland que emite contaminantes a la atmósfera producto de la combustión de sus máquinas.

La figura 27 enseña la distribución espacial de la conductividad en cada uno de los sitios de muestreo de la ciudad de Popayán.

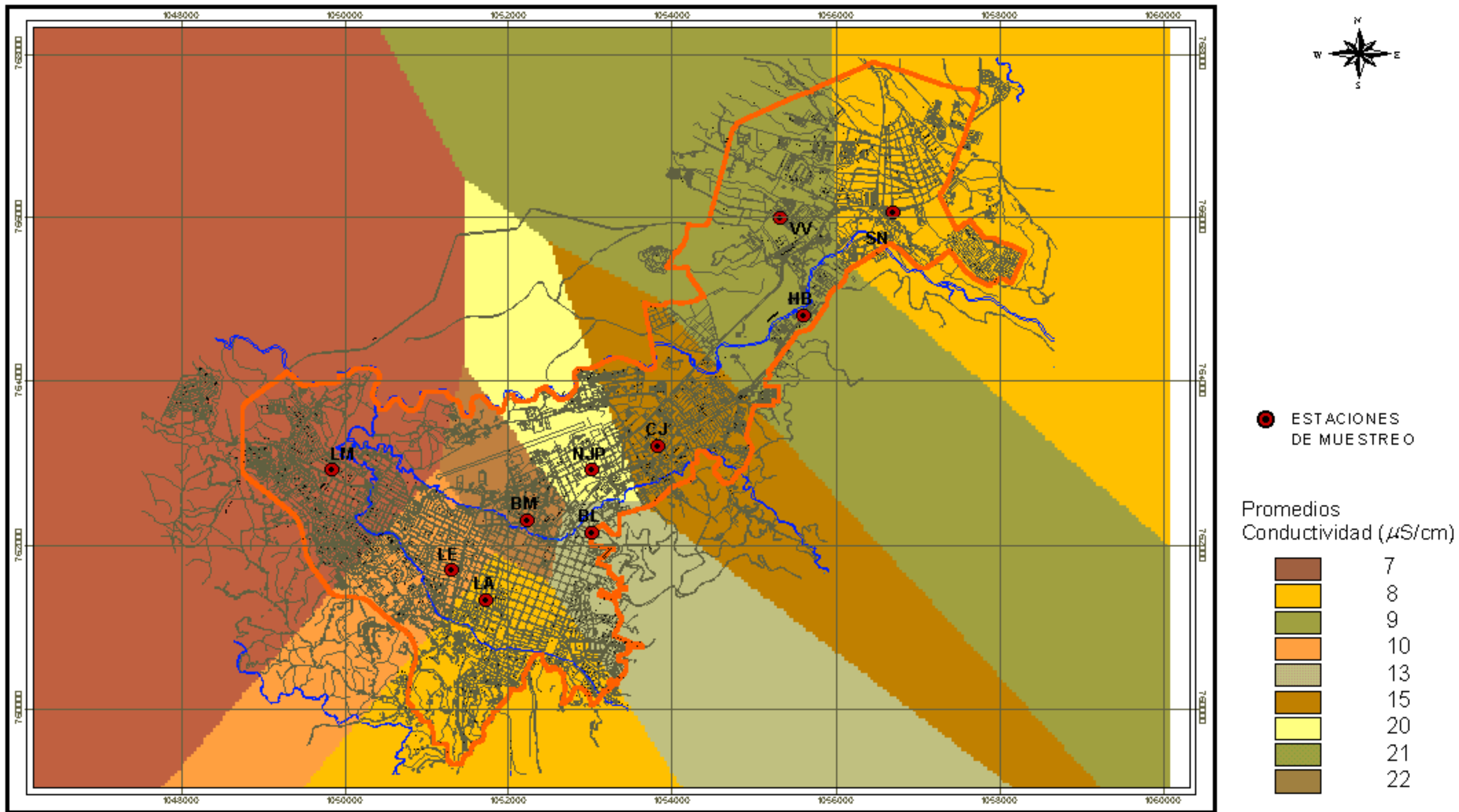


Figura 27 Distribución Espacial de la Conductividad en La Ciudad de Popayán

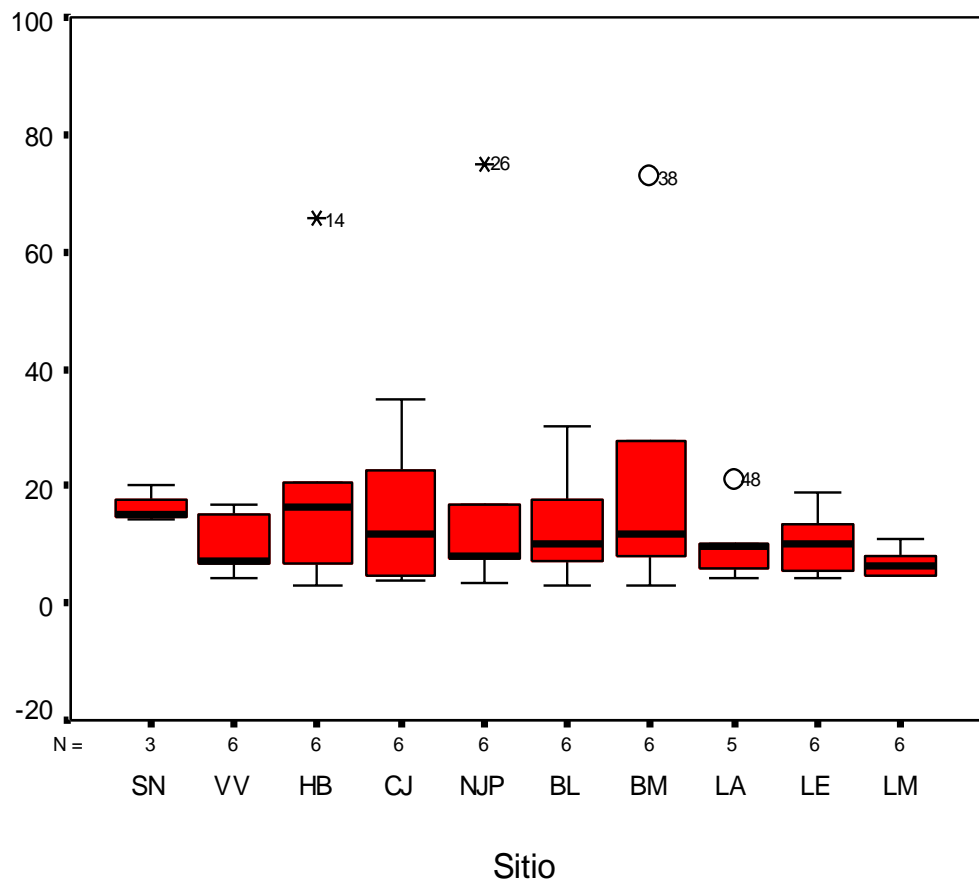
1 0 1 2 Kilometers

Fuente cartográfica y SIG :  
Grupo de Estudios Ambientales



En el diagrama de caja (Figura 28) se presentan fluctuaciones en los datos de conductividad en el rango intercuartílico. La mayoría de los sitios mostró una agrupación de datos hacia el tercer cuartil lo que supone la entrada de iones responsables de la conductividad, especialmente en los sitios SN (SENA), VV, CJ (Ciudad Jardín), NJP (Niño Jesús de Praga), BL (Barrio Liceo) y BM (Barrio Modelo), en los cuales se desarrollan actividades de urbanización. Para el caso de VV, la cercanía al bosque de la variante, le podría haber aportado aerosoles a la atmósfera<sup>88</sup>.

**Figura 28 Diagrama de Caja para la Variable Conductividad en los Sitios de Muestreo**



Mediante el Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía (Tabla 23), se obtuvo una significancia igual a 0.712, por lo cual no se rechazó la igualdad de medias de la variable conductividad en los diez sitios muestreados durante el período de estudio.

<sup>88</sup> Crozat, 1979, citado por Hendry, Ch., C., Berish & E. Edgerton, 1984.

**Tabla 23 ANOVA para la variable Conductividad en los Sitios de muestreo.**

Conductividad	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	1554,881	9	172,765	,693	,712
Intra-grupos	11475,699	46	249,472		
Total	13030,579	55			

Al no rechazarse la hipótesis nula de igualdad de medias presentada en la tabla de ANOVA (Tabla 24), mediante la prueba post hoc de Tukey (Tabla 23), las medias de los diez sitios se ubicaron en el mismo subconjunto homogéneo con una significancia del 83.7%.

**Tabla 24 Prueba post hoc de Tukey para Conductividad en los Sitios de muestreo.**

**Conductividad**

Tukey HSD<sup>a,b</sup>

SITIO	N	Subconjunto =
		.05
LM	6	6,840
VV	6	9,463
LA	5	10,18
LE	6	10,36
BL	6	12,98
CJ	6	14,85
SN	3	16,50
NJP	6	19,83
HB	6	21,40
BM	6	22,37
Sig.		,837

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

- a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 5,357.
- b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

**10.3.2. Comportamiento Temporal.** Las pruebas de normalidad de Kolmogorov – Smirnov y Shapiro – Wilk, dieron como resultado que los datos se acomodan a la distribución normal. Se optó por aplicar pruebas paramétricas (ver Anexo 5).

La conductividad registró su mayor valor en el mes de Octubre con 75.10  $\mu\text{S/cm}$  y el menor valor en el mes de Enero con 2.80  $\mu\text{S/cm}$ . La media de mayor valor fue 32.55  $\mu\text{S/cm}$  en el mes de Octubre y 4.18  $\mu\text{S/cm}$  en Enero. El valor promedio

obtenido a partir de la media de cada uno de los meses correspondió a 14.45  $\mu\text{S/cm}$  y se ubicó entre el valor de la media de los meses Diciembre (9.55  $\mu\text{S/cm}$ ) y Febrero (14.80  $\mu\text{S/cm}$ ) (Tabla 25).

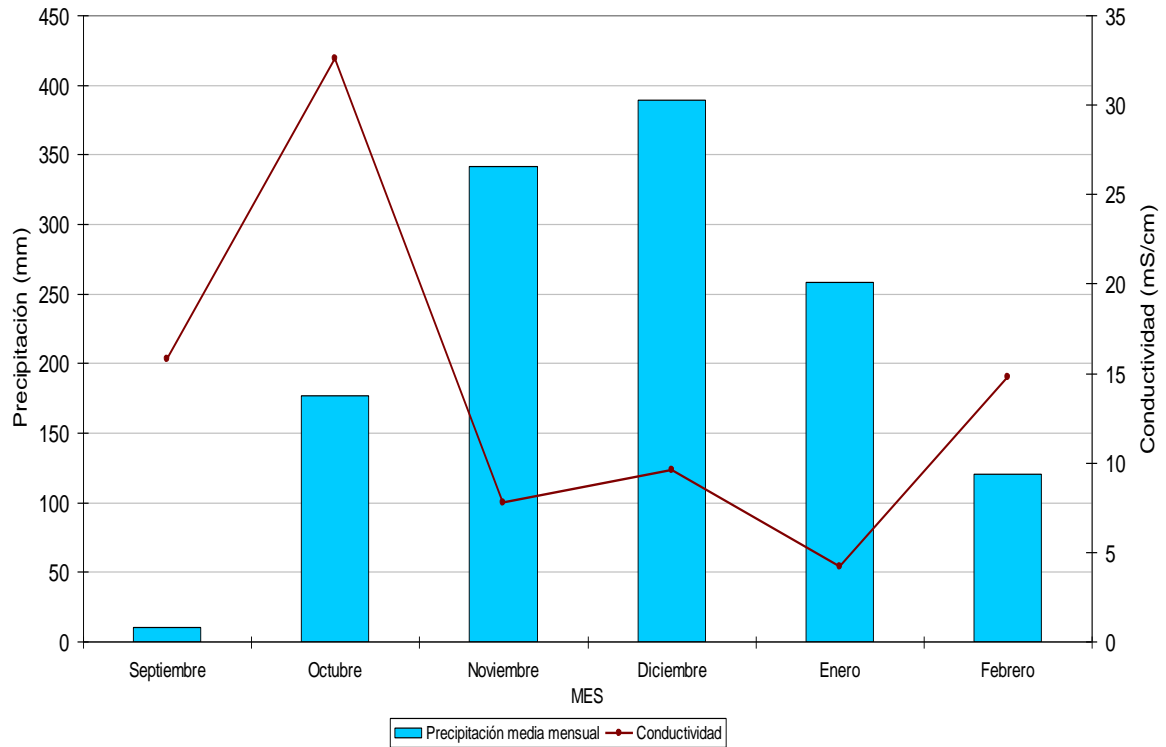
**Tabla 25 Estadística Descriptiva para Conductividad, Septiembre de 2001 a Febrero de 2002**

	N	Media ( $\mu\text{S/cm}$ )	Desviación Std.	Error Std.	Intervalo de Confianza del 95%		Mínimo	Máximo
					Límite Inferior	Límite Superior		
Sep	9	15,80	6,2630	2,0877	10,9836	20,6119	7,92	30,10
Oct	10	32,55	27,8298	8,8006	12,6448	52,4612	8,08	75,10
Nov	9	7,749	2,5616	,8539	5,7799	9,7179	4,53	13,71
Dic	9	9,549	5,0275	1,6758	5,6844	13,4134	3,90	20,52
Ene	9	4,178	1,4674	,4891	3,0498	5,3057	2,80	7,35
Feb	10	14,80	8,2300	2,6026	8,9146	20,6894	4,17	27,50
Total	56	14,45	15,3922	2,0569	10,3246	18,5687	2,80	75,10

En la Figura 29 se aprecia la relación que existe entre el comportamiento de la conductividad y el volumen de precipitación durante los meses de Septiembre de 2001 y Febrero de 2002. En el mes de Septiembre cuando finalizaba el período de lluvias escasas la conductividad media fue 15.80  $\mu\text{S/cm}$ , cerca al promedio para todo el período de muestreo (14.80  $\mu\text{S/cm}$ ). Los fuertes vientos que son comunes durante esta época posiblemente ayudaron a la acumulación de partículas en el aire. Como se explicó anteriormente, las lluvias durante esta época son escasas, poco intensas y de corta duración, de tal manera que durante los reducidos sucesos de lluvia, la concentración que precipitó con ésta pudo ser escasa, pero por efecto de la depositación seca sobre el embudo, al llover posiblemente fueron lavadas hacia el interior del reservorio, aumentando la conductividad en este. Por este motivo, en futuras investigaciones sería de gran importancia evaluar la depositación húmeda y la depositación seca, obteniendo dos tipos de muestras de agua de lluvia para determinar si hay variaciones entre ellas dependiendo de la época de lluvias. Octubre fue el mes con la conductividad media más alta, a consecuencia del lavado de iones atmosféricos debido al inicio de la temporada de lluvias abundantes. Teniendo en cuenta que durante este mes se registraron los valores más bajos de pH, es probable que la conductividad se deba a una mayor acumulación de aquellos aniones que le confirieron el carácter ácido al agua de lluvia durante el mes de Octubre. En los siguientes meses la conductividad promedio disminuyó dado el lavado iónico en la atmósfera por el aumento de la precipitación, favoreciendo la dilución de iones. En el mes de Febrero, al parecer se dio una mayor concentración de iones, tal vez, porque al disminuir las lluvias y

aumentar la acumulación de iones en la atmósfera, la concentración de estos en el agua de lluvia aumentó.

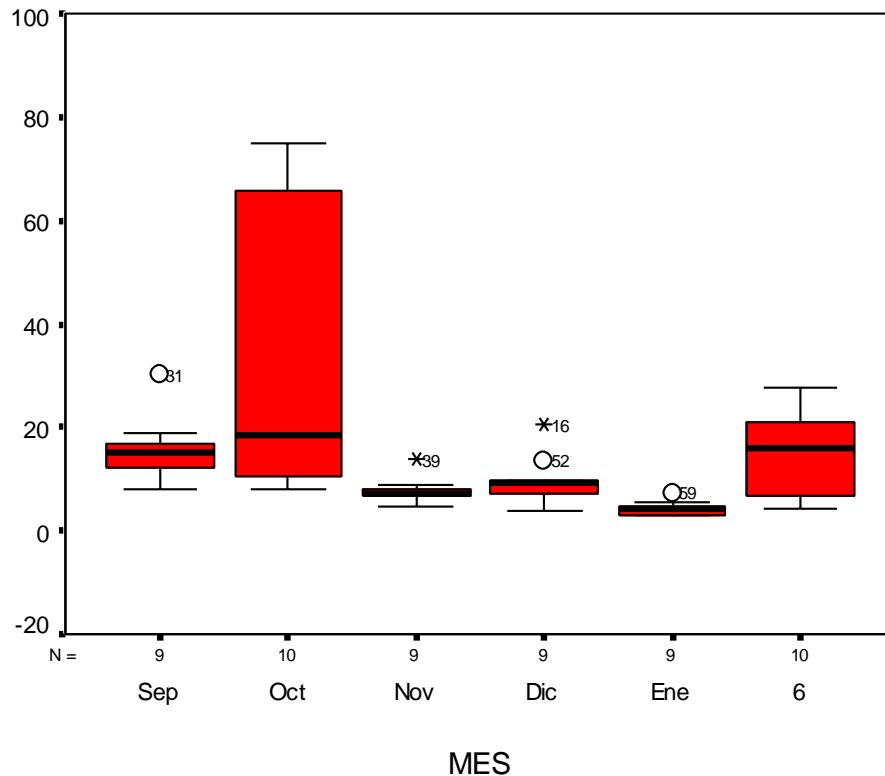
**Figura 29 Relación entre la Conductividad y la Precipitación Media Mensual. Septiembre de 2001 a Febrero de 2002.**



Para conocer más a fondo el comportamiento de la conductividad y lograr asociarla acertadamente a determinadas fuentes de emisión, es preciso llevar a cabo el análisis de los iones  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ , entre otros, y desde luego los incluidos en el presente estudio.

En la Figura 30 se presenta la agrupación de los valores en cada mes mediante el diagrama de caja. La fluctuación en el rango intercuartílico para cada mes fue muy notoria. A excepción del mes de Octubre donde la mayor agrupación se presentó en el tercer cuartil. Es decir, que en este mes al parecer hubo un aporte adicional de iones, lo que se relaciona con el lavado atmosférico por el inicio de la temporada de lluvias. Los demás tuvieron un rango intercuartílico muy angosto, ligado con la disminución de iones por el lavado constante de partículas atmosféricas.

**Figura 30 Diagrama de Caja para la Variable Conductividad. Septiembre de 2001 a Febrero de 2002.**



Con el Análisis de varianza (ANOVA) de una vía (Tabla 26) se obtuvo una altísima significancia igual a 0.000, por lo que se rechazó la igualdad de medias de la variable conductividad en los seis meses de muestro.

**Tabla 26 Tabla de ANOVA para la variable Conductividad. Septiembre de 2001 a Febrero de 2002.**

Conductividad	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	4864,772	5	972,954	5,957	,000
Intra-grupos	8165,807	50	163,316		
Total	13030,579	55			

Se determinaron diferencias entre las medias, por lo que se rechazó la hipótesis nula de igualdad de medias. Mediante la prueba de rango post hoc de Tukey (Tabla 27) se organizaron en dos subgrupos las medias que difieren.



**Tabla 27 Prueba Post Hoc de Tukey para la variable Conductividad. Septiembre de 2001 a Febrero de 2002.**

**Conductividad**

Tukey HSD<sup>a,b</sup>

MES	N	Subconjuntos para alpha = .05	
		1	2
Ene	9	4,18	
Nov	9	7,75	
Dic	9	9,55	
Feb	10	14,8	
Sep	9	15,8	15,8
Oct	10		32,6
Sig.		,378	,069

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 9,310.

b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

En la prueba Post Hoc de Tuckey, las medias se agruparon en dos subconjuntos. El primero reúne las medias de los meses de Noviembre de 2001 a Febrero de 2002, con una significancia del 37,8%. El segundo subgrupo reunió los meses de Septiembre y Octubre de 2001, con una significancia de 6,9%. Esta agrupación de las medias de conductividad advierte la acumulación de iones al terminar la temporada de menos lluvias e iniciar el período de lluvias abundantes, registrando valores altos en Septiembre y Octubre y una disminución en los meses posteriores de muestreo, a consecuencia del lavado atmosférico de los iones, disminuyendo su concentración en la atmósfera y por ende en el agua de lluvia.

#### **10.4. SULFATOS (SO<sub>4</sub><sup>=</sup>)**

**10.4.1. Comportamiento Espacial.** Las pruebas de normalidad de Kolmogorov – Smirnov y Shapiro – Wilk, dieron como resultado que los datos se acomodan a la distribución normal, optando por aplicar pruebas paramétricas (ver Anexo 4).

Durante todo el período de muestreo el valor máximo fue de 7.32 mgSO<sub>4</sub><sup>=</sup>/L, reportado en la estación BL el mínimo de 1.07 mgSO<sub>4</sub><sup>=</sup>/L, en la estación LM. El máximo y el mínimo de la media de los valores, dieron como resultados 4.69 mgSO<sub>4</sub><sup>=</sup>/L (estación BL) y 3.37 mgSO<sub>4</sub><sup>=</sup>/L (estación BM), respectivamente (Tabla 28).

**Tabla 28 Estadística Descriptiva para SO<sub>4</sub><sup>=</sup> en los Sitios de muestreo.**

SO<sub>4</sub>

	N	Media (mg/L)	Desviación Std.	Error Std.	Intervalo de Confianza del 95%		Mínimo	Máximo
					Límite Inferior	Límite Superior		
SN	3	3,95	,7736	,4467	2,0248	5,8685	3,50	4,84
VV	6	3,79	1,0507	,4290	2,6873	4,8927	2,48	5,09
HB	6	3,48	1,4155	,5779	1,9912	4,9621	1,51	4,84
CJ	6	3,58	,6854	,2798	2,8608	4,2992	2,67	4,40
NJP	6	4,38	1,4931	,6096	2,8130	5,9470	2,25	5,34
BL	6	4,69	1,6547	,6755	2,9518	6,4249	2,59	7,32
BM	6	3,37	,9106	,3717	2,4161	4,3273	2,48	4,60
LA	5	4,08	,9200	,4114	2,9416	5,2264	2,48	4,84
LE	6	4,02	1,2541	,5120	2,7055	5,3378	2,88	6,08
LM	6	3,42	1,8553	,7574	1,4746	5,3687	1,07	5,10
Total	56	3,87	1,2552	,1677	3,5324	4,2047	1,07	7,32

Las concentraciones de SO<sub>4</sub><sup>=</sup> en los 10 sitios de la ciudad de Popayán pueden ser ocasionadas principalmente por fuentes naturales en comparación con las antrópicas. Es importante tener en cuenta que las fuentes naturales están globalmente distribuidas, en cuanto las antropogénicas están concentradas en áreas pobladas.

La posible influencia volcánica, puede ser debida principalmente a la dispersión de compuestos azufrados provenientes de la Cadena Volcánica de los Coconucos por acción de los vientos del SE y por el arrastre de sales marinas sulfatadas provenientes del Océano Pacífico. Además, en los alrededores de la ciudad de Popayán, hay presencia de laderas erosionadas o carentes de vegetación, que pueden contener polvos sulfatados, cuyas partículas son arrastradas hasta la atmósfera por acción de los vientos. Los aportes de sales marinas sulfatadas hacia el interior de los continentes podría ser muy importante si se tienen en cuenta los datos reportados por Möller<sup>89</sup>, en donde el porcentaje de estas sales en relación con el total de sulfatos de las áreas remotas continentales varía entre el 1% y el 30%, dependiendo de la proximidad a la costa.

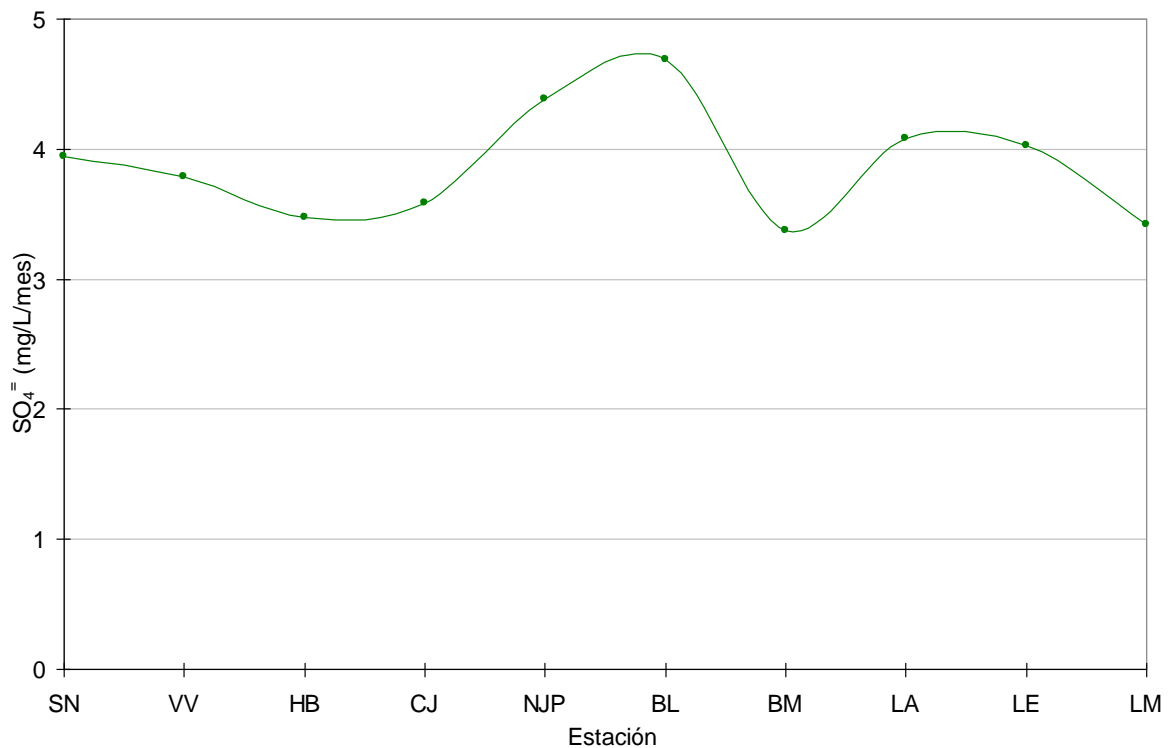
Aunque se tiene el accidente orográfico de la Cordillera Occidental, la distancia de la ciudad de Popayán al Océano Pacífico es de aproximadamente 80 Km en línea recta, y dado que los vientos son predominantes del SW y W, se podría pensar que el análisis de Möller tiene sentido, en cuanto a la influencia del océano en el aporte al total de sulfatos a la ciudad (ver Figura 31). Además la cercanía de la

<sup>89</sup> MÖLLER, D. Sulfate Aerosols and their Atmospheric Precursors. En: Aerosol Forcing of Climate, 1995. p. 73-90

ciudad de Popayán respecto al volcán activo de Puracé, el cual dista 30 Km de esta ciudad, podría ser de gran importancia en el aporte de compuestos que promuevan la formación de sulfatos en la atmósfera de la ciudad de Popayán. El río Vinagre que nace en el volcán Puracé, se han encontrado concentraciones de ácido sulfúrico un contenido aproximado de  $1\text{Kg/m}^3$ , confiriéndole valores de pH alrededor de 2<sup>90</sup>, por lo tanto, los aportes provenientes desde el volcán a partir de la emanación desde las fumarolas de compuestos azufrados y de la extracción de la mina de azufre y como consecuencia de los vientos SE, los aportes desde el volcán podrían ser considerables.

Los valores de  $4.38\text{ mgSO}_4^-/\text{L}$  y  $4.69\text{ mgSO}_4^-/\text{L}$  correspondientes a la media de los sitios de muestreo NJP y BL (Figura 31), respectivamente, pueden estar relacionados con fuentes locales de emisión de compuestos precursores, manifestándose durante los períodos de recolección.

**Figura 31 Valor medio de  $\text{SO}_4^-$  en la ciudad de Popayán en los Sitios de Muestreo.**



<sup>90</sup> Felix, et al., 1958. Op. Cit.

La cercanía del sitio BL al Barrio Bolívar, en donde el flujo vehicular es considerable\* debido a la falta de vías alternas en la ciudad, el paso del río Molino, el cual al pasar por este sector se ve afectado por las actividades antrópicas, presentando características fisicoquímicas como color y olor propias de aguas residuales domésticas con un grado considerable de contaminación, de acuerdo a lo reportado por Zamora<sup>91</sup>. Además, los aportes domésticos por utilización de productos con contenidos azufrados (pinturas, aerosoles, barnices, etc.), la quema de basuras en la galería del barrio Bolívar y la quema de vegetación en el cerro de las Tres Cruces y sectores aledaños, serían algunos de los factores de influencia sobre los niveles de  $\text{SO}_4^{=}$  en este sector de la ciudad de Popayán. En cuanto a los valores encontrados en el sitio NJP la posible fuente principal de emisión sería la cercanía a las dos principales vías de la ciudad de Popayán, la Carrera Sexta y la Avenida Panamericana, por lo tanto, se sugiere que la fuente principal de precursores formadores de  $\text{SO}_4^{=}$  en este sitio es la combustión vehicular.

Las posibles fuentes responsables del aporte de precursores de  $\text{SO}_4^{=}$  merecerían ser estudiadas a fondo en futuras investigaciones en sitios muy puntuales de la ciudad de Popayán, tales como, la carrera 6<sup>a</sup>, centro de la ciudad, calle 5<sup>a</sup> entre carreras 7<sup>a</sup> y 3<sup>a</sup>, barrio Bolívar, Avenida Panamericana a la altura del cruce con carrera 9<sup>a</sup>, entre otros. Lo anterior, complementándose con variables meteorológicas como la dirección de vientos, temperatura, humedad y evaporación, entre otras, para determinar el aporte real de dichas fuentes, y tener una mejor perspectiva de la tendencia no solo de los contaminantes azufrados, sino de cada contaminante y de esta manera generar indicadores del estado de la calidad del aire para la ciudad.

En el figura 32 se presenta la distribución espacial de los  $\text{SO}_4^{=}$  en cada uno de los sitios de la ciudad de Popayán.

---

\* De acuerdo a la información Suministrada por la Oficina de Tránsito, en la ciudad de Popayán se tiene un número aproximado de 25.000 vehículos.

<sup>91</sup> ZAMORA, H. Niveles de Alteración de las Comunidades de Macroinvertebrados Acuáticos del Río Molino por Efecto de las Actividades Antrópicas y la Contaminación Doméstica. En: Unicauca Ciencia. Vol. 3 (Sep. 1998); p. 35 – 59.

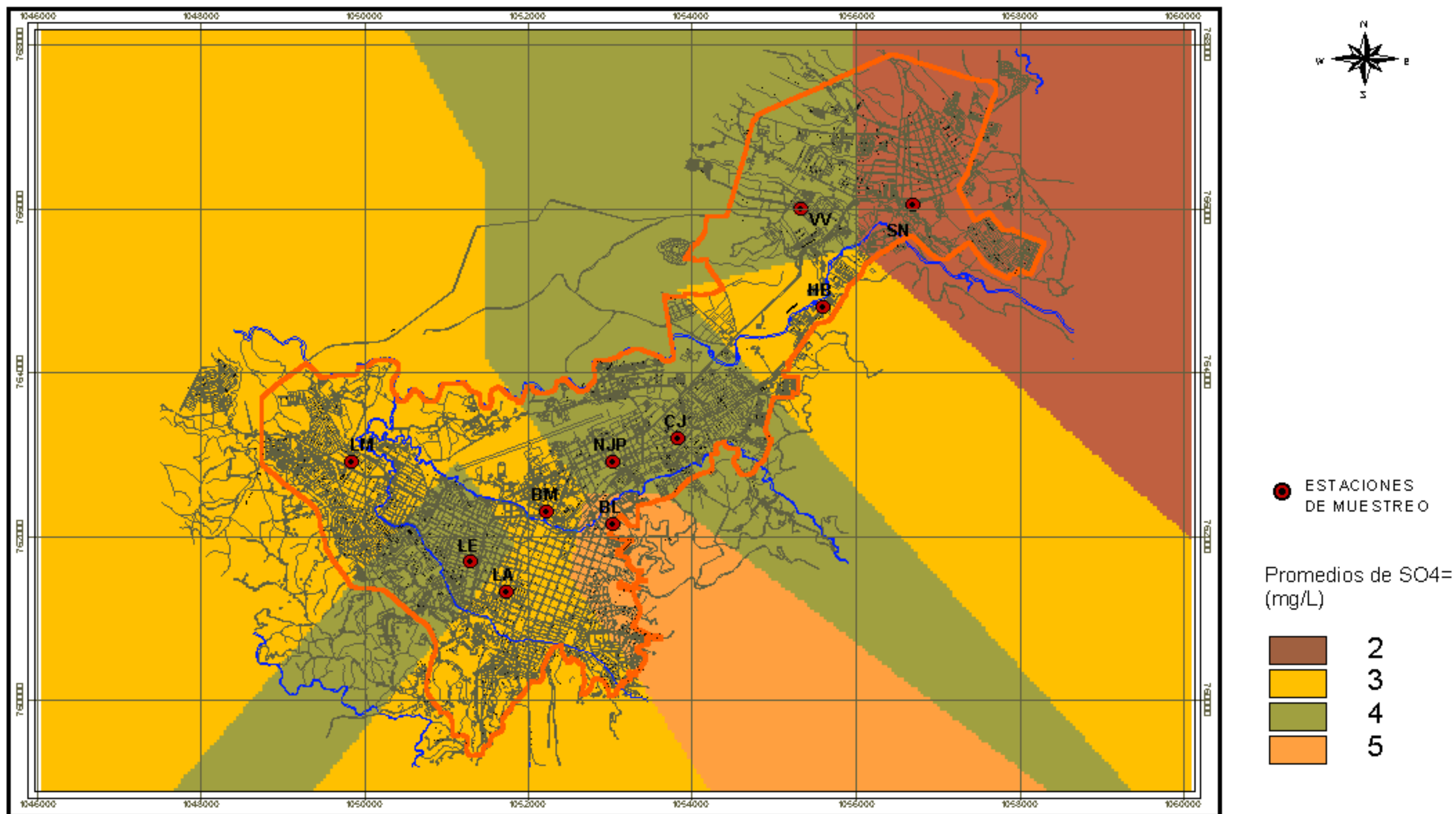


Figura 32 Distribución Espacial de  $\text{SO}_4^{=}$  en La Ciudad de Popayán

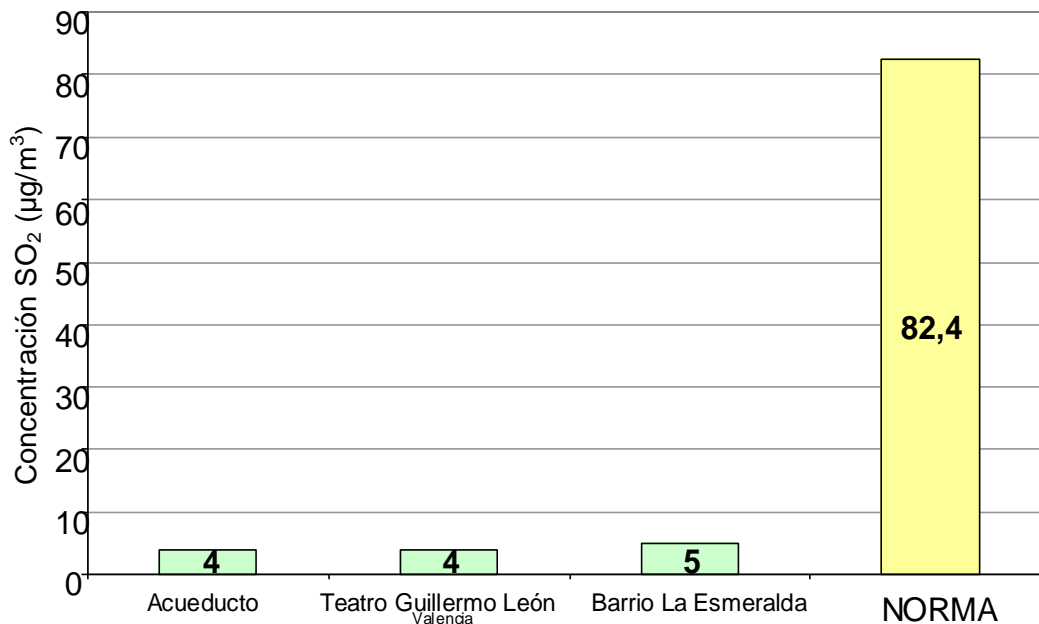
1 0 1 2 Kilometers

Fuente cartográfica y SIG :  
Grupo de Estudios Ambientales



En general, la contribución humana para la formación de  $\text{SO}_4^{=}$  se da principalmente en forma de  $\text{SO}_2$ , por lo tanto la presencia de  $\text{SO}_4^{=}$  en el agua de lluvia en la ciudad de Popayán, puede ser debida a la emisión de este precursor primario desde la combustión vehicular, actividades metalúrgicas, la emisión de aerosoles domésticos (por ejemplo, insecticidas, aromatizantes, pinturas, desodorantes, entre otros) en cuyo contenido se encuentren compuestos azufrados y la quema de vegetación, entre otras. Por otra parte, el  $\text{SO}_4^{=}$  particulado, pudo haber contribuido a la acidez del agua de lluvia, pero en menor proporción que la contribución de las sales sulfatadas provenientes del océano Pacífico y los compuestos azufrados acarreados desde la Cadena Volcánica de los Coconucos. Esto se explica por lo siguiente: la Corporación Autónoma Regional del Cauca<sup>92</sup>, en el período Septiembre de 2000 a Septiembre de 2001, mediante el Programa de Monitoreo del Recurso Aire en la ciudad de Popayán, obtuvo que las concentraciones de  $\text{SO}_2$ , siempre fueron inferiores al mínimo detectable por el método, el cual corresponde a  $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $4 \times 10^{-6} \text{ mg}/\text{L}$ ) (Figura 33), es decir que los aportes de  $\text{SO}_2$  por parte de la combustión vehicular, posiblemente contribuyen en menor grado a la acidez del agua de lluvia, en comparación con la influencia marina y volcánica.

**Figura 33 Nivel de Contaminante de  $\text{SO}_2$  en la ciudad de Popayán**

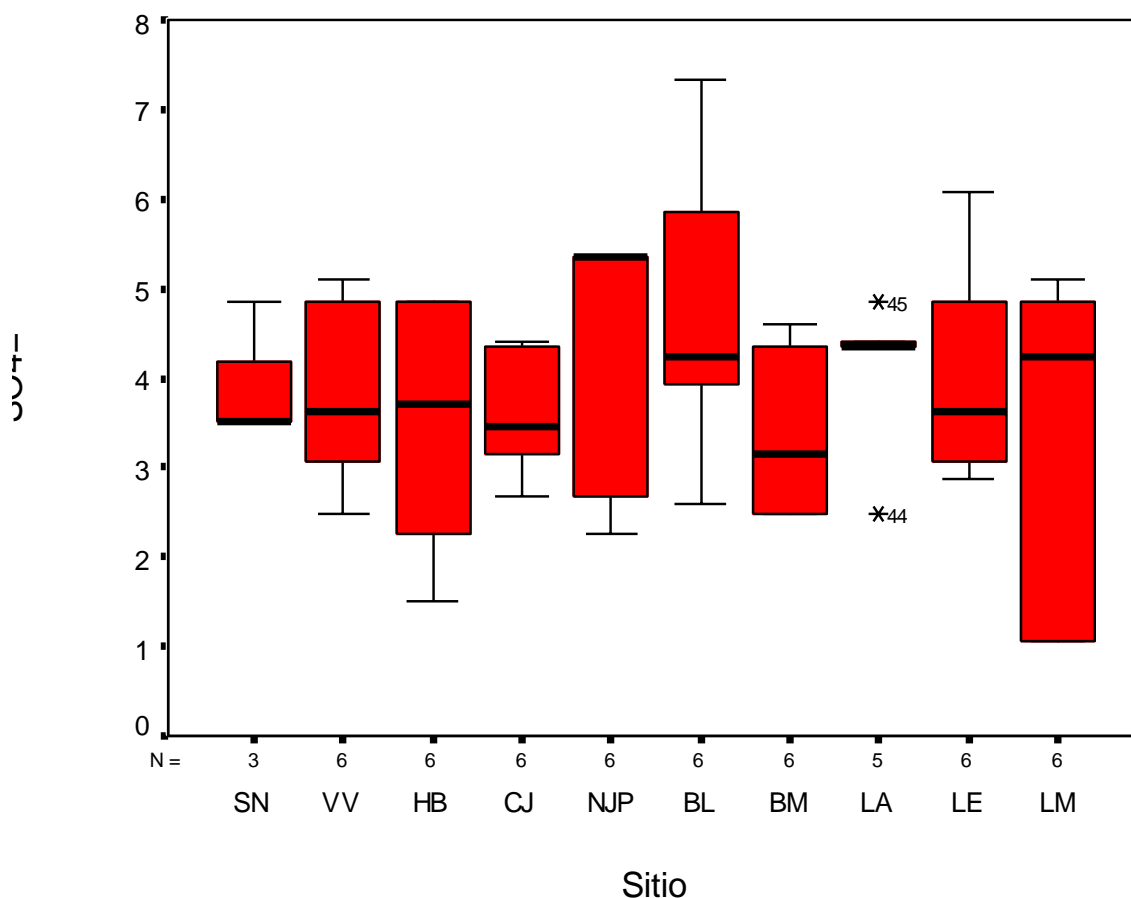


Fuente: Popayán. Corporación Autónoma Regional Del Cauca. Subdirección De Gestion Ambiental Recurso Aire. Popayán: CRC, 2001.

<sup>92</sup> POPAYÁN. CORPORACIÓN AUTONOMA REGIONAL DEL CAUCA. SUBDIRECCIÓN DE GESTION AMBIENTAL RECURSO AIRE. Informe Subdirección de Gestión Ambiental Recurso Aire. Popayán: CRC, 2001.

En la figura 34, correspondiente al diagrama de caja, se observan fluctuaciones del rango intercuartílico de cada uno de los sitios de muestreo, dentro del cual se agrupó el 50% de los datos alrededor de la mediana. Este diagrama muestra que las diferencias en las distribución de los valores de  $\text{SO}_4^-$  se pudieron originar por el aporte de precursores de este ión, a partir de fuentes puntuales en cada sitio, sobresaliendo el sitio BL, como el que registro las mayores concentraciones.

**Figura 34 Diagrama de Caja para la Variable  $\text{SO}_4^-$  en los Sitios de Muestreo.**



Los sitio de muestreo BL y LE, reportaron valores de mediana similares, además, las máximas concentraciones de  $\text{SO}_4^-$  en toda la ciudad de Popayán, 7.32  $\text{mgSO}_4^-/\text{L}$  y 6.08  $\text{mgSO}_4^-/\text{L}$ , respectivamente. Estos valores fueron comparables con la mediana de la concentración de  $\text{SO}_4^-$  en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México durante los años de 1997 al 2000 (Secretaría del Medio Ambiente, 2000). El percentil 75 del BL fue mayor respecto a los demás sitios, señalando que los valores más altos de  $\text{SO}_4^-$  se localizaron en este sitio. El comportamiento del  $\text{SO}_4^-$  en el BL se puede atribuir a la emisión de precursores

de  $\text{SO}_4^-$  a partir de la combustión vehicular, teniendo en cuenta que el BL está influenciado por la alta concentración de vehículos en el complejo universitario, el sector de la carrera 2ª y la carrera Sexta, los sectores que se constituyen en potenciales fuentes de este ión.

Los sitios SN, VV, HB, CJ y BM, presentaron valores de mediana similares alrededor de  $3.5 \text{ mgSO}_4^-/\text{L}$ , y sus valores no sobrepasaron los  $5.09 \text{ mgSO}_4^-/\text{L}$  (sitio VV). Las variaciones se reflejaron principalmente en el percentil 25. Esto indica que en estos sitios hubo aportes constantes de precursores de  $\text{SO}_4^-$  desde fuentes localizadas en estos sectores, la exposición a los vientos SW y W y las bajas estructuras urbanas pudieron influir en su dispersión y depositación.

En la tabla de ANOVA (Tabla 29) se obtuvo un nivel de significancia igual a 0.726, por lo cual no se rechazó la igualdad de medias de la variable  $\text{SO}_4^-$  en los diez sitios muestreados durante el período de estudio.

**Tabla 29 ANOVA para  $\text{SO}_4^-$  en los Sitios de muestreo.**

$\text{SO}_4^-$	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	10,130	9	1,126	,677	,726
Intra-grupos	76,528	46	1,664		
Total	86.659	55			

Como no se rechazó la hipótesis nula de igualdad de medias, estas para los diez sitios se ubicaron en el mismo subconjunto homogéneo con una significancia del 81.4%.



**Tabla 30 Prueba post hoc de Tukey para la variable SO<sub>4</sub><sup>=</sup> en los Sitios de muestreo.**

**SO<sub>4</sub>**

Tukey HSD<sup>a,b</sup>

SITIO	N	Sub conjun to = .05
		1
BM	6	3,372
LM	6	3,42
HB	6	3,48
CJ	6	3,58
VV	6	3,79
SN	3	3,95
LE	6	4,02
LA	5	4,08
NJP	6	4,38
BL	6	4,69
Sig.		,806

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

- a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 5,357.
- b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

**10.4.2. Comportamiento Temporal:** Las pruebas de normalidad de Kolmogorov – Smirnov y Shapiro – Wilk, dieron como resultado que los datos se acomodan a la distribución normal, por lo tanto, se optó por aplicar pruebas paramétricas (ver Anexo 5).

El máximo valor de SO<sub>4</sub><sup>=</sup> fue de 7.32 mgSO<sub>4</sub><sup>=</sup>/L y correspondió al mes de Febrero. La mínima concentración de SO<sub>4</sub><sup>=</sup> fue de 1.07 mgSO<sub>4</sub><sup>=</sup>/L en el mes de Octubre (Tabla 31). Los valores mínimos y máximos promedio fueron 2.55 mgSO<sub>4</sub><sup>=</sup>/L y 4.77 mgSO<sub>4</sub><sup>=</sup>/L, correspondientes a los meses de Octubre y Noviembre, respectivamente. mgSO<sub>4</sub><sup>=</sup>/L. El promedio de los valores medios fue de 3.87 mgSO<sub>4</sub><sup>=</sup>/L, el cual se ubicó entre los meses de Septiembre (2.82 mgSO<sub>4</sub><sup>=</sup>/L) y Diciembre (4.17 mgSO<sub>4</sub><sup>=</sup>/L).

**Tabla 31 Estadística Descriptiva para la variable SO<sub>4</sub><sup>=</sup>. Septiembre de 2001 a Febrero de 2002.**

SO<sub>4</sub>

	N	Media (mg/L)	Desviación Std.	Error Std.	Intervalo de Confianza del 95%		Mínimo	Máximo
					Límite Inferior	Límite Superior		
Sep	9	2,82	,8348	,2783	2,1739	3,4572	1,07	3,93
Oct	10	2,55	,6318	,1998	2,0950	2,9990	1,07	3,50
Nov	9	4,77	,7266	,2422	4,2126	5,3296	3,16	5,84
Dic	9	4,17	1,0857	,3619	3,3366	5,0057	1,51	5,34
Ene	9	4,54	,7411	,2470	3,9714	5,1108	3,60	6,08
Feb	10	4,45	1,3505	,4271	3,4819	5,4141	3,16	7,32
Total	56	3,87	1,2552	,1677	3,5324	4,2047	1,07	7,32

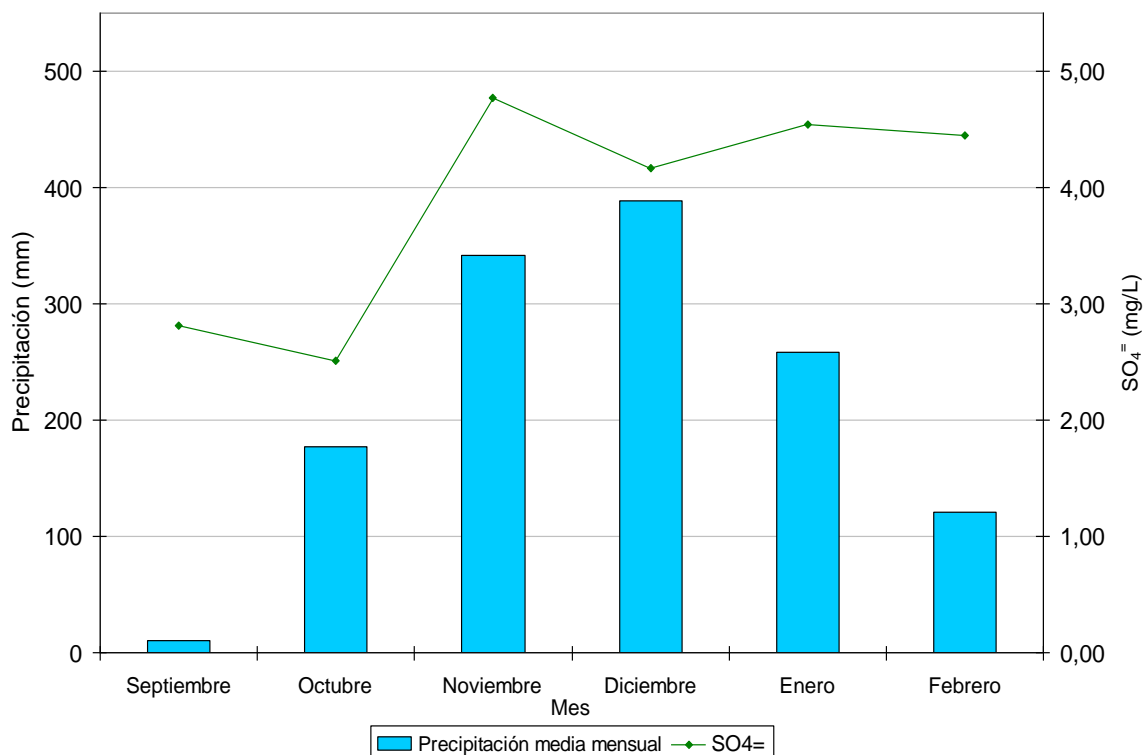
La concentración media mensual de SO<sub>4</sub><sup>=</sup> en la ciudad de Popayán durante los seis meses de muestreo fue de 3.89 mgSO<sub>4</sub><sup>=</sup>/L. Los valores máximos y mínimos de la media en cada uno de los meses de muestreo, fueron 4.77 mgSO<sub>4</sub><sup>=</sup>/L y 2.51 mgSO<sub>4</sub><sup>=</sup>/L, y recaen sobre los meses de Noviembre y Octubre.

Se esperaba que en el mes de Octubre cuando inició el periodo de lluvias abundantes en la ciudad de Popayán, el descenso del pH se debiera en parte a un incremento de SO<sub>4</sub><sup>=</sup> por el lavado atmosférico, pero se presentó el caso contrario, lo cual puede explicarse en parte, teniendo en cuenta los siguientes estudios de campo realizados por Junkermann<sup>93</sup>. En ellos se indica que casi la mitad del SO<sub>4</sub><sup>=</sup> atmosférico es formado a partir del proceso de conversión homogénea es decir, cuando la atmósfera se encuentra en fase gaseosa, durante los días claros y soleados y el resto por procesos de conversión heterogénea o en fase líquida, que depende en parte del tamaño y composición de las gotas del agua de lluvia, donde se forma. Esto puede ayudar a explicar la posibilidad que durante el mes de Septiembre, cuando estaba finalizando la época de menos lluvias en la ciudad de Popayán (Figura 35), y el mes de Octubre cuando estaba iniciando la época de mayores lluvias, las concentraciones de SO<sub>4</sub><sup>=</sup> fueran menores, por la prevalencia de la conversión homogénea que no facilitó la formación de este ión. Por otra parte, durante el mes de Octubre, con el lavado atmosférico que se presentó, pudo haber mayor presencia de cationes no analizados en este estudio y que probablemente neutralizaron a los SO<sub>4</sub><sup>=</sup>. Los valores medios de concentración de SO<sub>4</sub><sup>=</sup> predominaron durante los meses de mayor pluviosidad, es decir, desde

<sup>93</sup> JUNKERMANN, W.; DIETRICH, J.; WOLF, P.; WIEPRECHT, W.; SLEMR, J.; KOLTHOFF, G.; NIEßNER, R. Investigation of the vertical distribution of trace components in the lower troposphere using a cable car. En: Proc. EUROTRAC Sympos. Eds. P. Borell et al. Den Haag: Acad. Publ., S, 1994. p.1156-1161.

Noviembre de 2001 a Febrero de 2002, dado que al permanecer la atmósfera principalmente en fase acuosa, la formación de  $\text{SO}_4^-$  posiblemente se vió favorecida. El máximo valor medio de  $\text{SO}_4^-$  se presentó en el mes de Noviembre cuando el período de lluvias abundantes se acentuó.

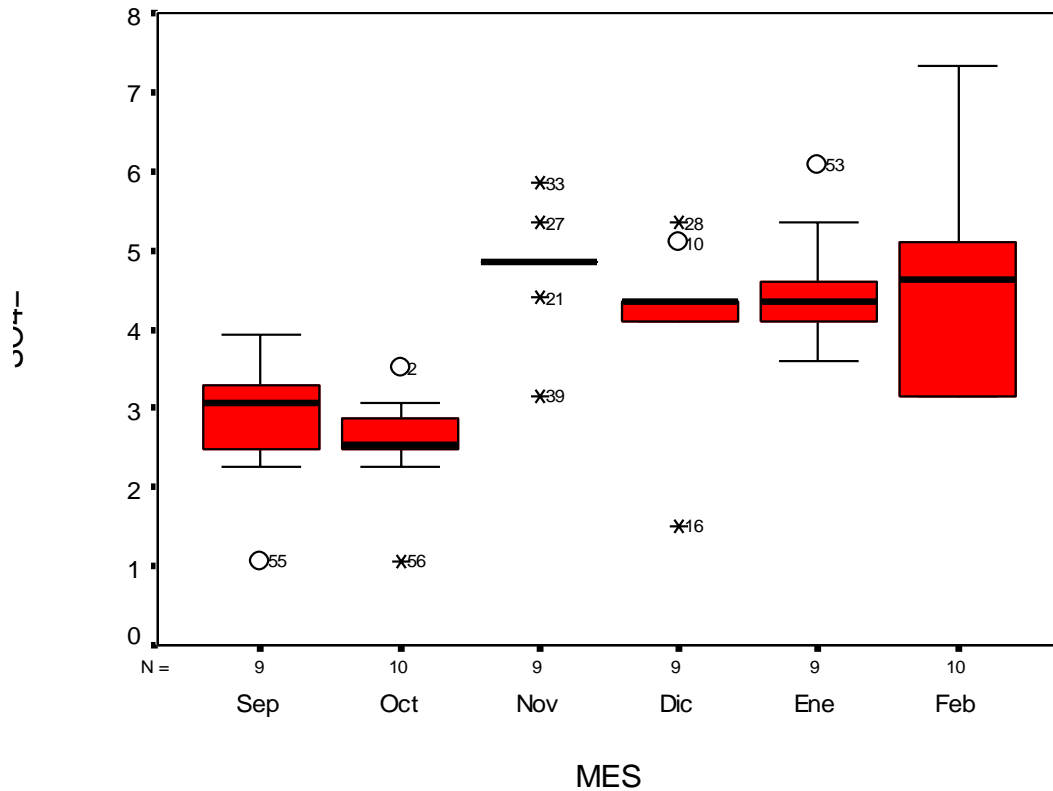
**Figura 35 Relación entre  $\text{SO}_4^-$  y la precipitación media mensual. Septiembre de 2001 a Febrero de 2002.**



Se aprecia en el diagrama de caja (Figura 36), que en la mayoría de los sitios la diferencia en el rango intercuartílico fue notoria, excepto para el mes de Enero donde hubo una considerable igualdad entre el percentil 25 y el 75. Para este mes, se supone que se presentó una fuente común de emisión de precursores de  $\text{SO}_4^-$  en toda la ciudad de Popayán, con una distribución de concentraciones en un rango muy estrecho. Los datos de la Rosa de los vientos (ver Figura 24) para la ciudad de Popayán, muestran que las direcciones predominante fueron SW y W, lo que indica que los precursores de sulfatos fueron probablemente las sales sulfatadas procedentes del océano Pacífico, sin descartar los compuestos azufrados provenientes desde la Cadena Volcánica de los Coconucos, por los vientos del SE. Esta agrupación de datos seguramente se debió a los procesos de conversión heterogénea de  $\text{SO}_4^-$ , imperantes en el período de lluvias abundantes. En los meses de Septiembre y Octubre aunque el rango intercuartílico fue diferente, por lo general todos los valores presentaron concentraciones bajas,

suponiendo la prevalencia de procesos de conversión homogénea sobre los de conversión heterogénea de  $\text{SO}_4^-$ . Sin embargo, en los meses de Noviembre y Febrero los valores tuvieron concentraciones de  $\text{SO}_4^-$  hasta el doble de las de Septiembre y Octubre, posiblemente por un efecto contrario de conversión de  $\text{SO}_4^-$ .

**Figura 36 Diagrama de Caja para la Variable  $\text{SO}_4^-$ . Septiembre de 2001 a Febrero de 2002.**



El nivel de significancia fue altísimo, igual a 0.000, el cual se obtuvo con el Análisis de varianza (ANOVA). Por esta razón se rechazó la igualdad de medias de la variable  $\text{SO}_4^-$  en los seis meses de nuestro (Tabla 32).

**Tabla 32 ANOVA para  $\text{SO}_4^-$ . Septiembre de 2001 a Febrero de 2002.**

$\text{SO}_4^-$	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	42,156	5	8,431	9,496	,000
Intra-grupos	43,507	49	,888		
Total	85,664	54			

Mediante el ANOVA se encontraron diferencias entre las medias, es decir que se rechazó la hipótesis nula de igualdad de medias. Por lo tanto, mediante la pruebas de rango post hoc de Tukey (Tabla 33) se determinaron las medias que difieren.

**Tabla 33 Prueba Post Hoc de Tukey para la variable  $SO_4^{=}$  de Septiembre de 2001 a Febrero de 2002.**

**SO4**

Tukey HSD<sup>a,b</sup>

MES	N	Subconjuntos para alpha = .05	
		1	2
Oct	10	2,55	
Sep	9	2,82	
Dic	9		4,17
Feb	10		4,45
Ene	9		4,54
Nov	9		4,77
Sig.		,989	,735

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 9,310.

b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

En las pruebas Post Hoc de Tuckey, las medias se agruparon en dos subconjuntos. El primero reunió las medias de los meses de Septiembre y Octubre, y el segundo, subgrupo a las de los meses de Noviembre de 2001 hasta Febrero de 2002. Los dos subgrupos presentaron medias, cuyos valores de  $SO_4^{=}$  se relacionan con fuentes puntuales de emisión de precursores de dicho ión y con la influencia de factores climáticos que favorecieron o no la formación de  $SO_4^{=}$ .

## **10.5. CLORUROS (Cl<sup>-</sup>)**

**10.5.1. Comportamiento Espacial:** Las pruebas de normalidad de Kolmogorov – Smirnov y Shapiro – Wilk, dieron como resultado que los datos se acomodaron a la distribución normal, por lo tanto, se optó por aplicar pruebas paramétricas (Anexo 4).

El máximo valor para Cl<sup>-</sup> durante todo el período de muestreo fue de 24.16 mg Cl<sup>-</sup>/L, se reportó en el sitio BM y el mínimo de 1.15 mg Cl<sup>-</sup>/L, en NJP. El valor medio máximo y el mínimo, dieron como resultado 9.99 mg Cl<sup>-</sup>/L (estación HB y 4.15 mg Cl<sup>-</sup>/L (estación LA), respectivamente. El promedio de la media de

todos los valores fue de 6.12 mg Cl<sup>-</sup>/L, cuyo valor estuvo entre los sitios BL (5.48 mg Cl<sup>-</sup>/L) y BM (6.52 mg Cl<sup>-</sup>/L) (Tabla 34).

**Tabla 34 Descriptivos de la variable Cl en los Sitios de muestreo.**

CL

	N	Media (mg/L)	Desviación Std.	Error Std.	Intervalo de Confianza del 95%		Mínimo	Máximo
					Límite Inferior	Límite Superior		
SN	3	4,44	3,4151	1,9717	-4,0468	12,9201	2,45	8,38
VV	6	5,08	3,5608	1,4537	1,3465	8,8201	1,99	11,83
HB	6	9,99	7,7134	3,1490	1,8986	18,0881	1,49	23,66
CJ	6	6,93	4,4651	1,8229	2,2391	11,6109	2,63	12,82
NJP	6	7,31	6,2455	2,5497	,7557	13,8643	1,15	15,28
BL	6	5,48	3,7095	1,5144	1,5822	9,3678	2,13	11,83
BM	6	6,52	8,7219	3,5607	-2,6348	15,6714	1,63	24,16
LA	5	4,15	3,0465	1,3624	,3713	7,9367	1,72	9,37
LE	6	5,27	3,5787	1,4610	1,5177	9,0290	1,88	11,34
LM	6	4,85	1,9322	,7888	2,8223	6,8777	2,48	7,40
Total	56	6,12	5,0489	,6747	4,7667	7,4708	1,15	24,16

Los valores de Cl<sup>-</sup> pudieron tener principalmente un origen natural, por los aportes de spray marino desde el Océano Pacífico, como consecuencia de la acción de los vientos húmedos provenientes de la costa que se descargan sobre el altiplano de Popayán, por los compuestos clorados emanados desde la Cadena Volcánica de los Coconucos\* y por supuesto, por los aportes domésticos y partículas de polvo. Sánchez<sup>94</sup> puntualiza que las alturas de la cordillera Occidental no impiden el soplo de los vientos húmedos del océano que se descargan sobre el altiplano de Popayán. Los paquetes de nubes son empujados desde la región del Pacífico por los vientos dominantes del oeste pasando sin mayores dificultades hacia el valle geográfico del río Cauca.

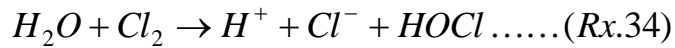
La ausencia en Popayán de industrias en las cuales se realiza la quema de plásticos fabricados con cloro, lleva a descartar que los valores registrados en el presente estudio tengan un origen principalmente antrópico, de tipo industrial. Más sin embargo, para comprobar o descartar el origen marino de los Cl<sup>-</sup> como principal aportante en la ciudad de Popayán, sería interesante que en trabajos

\* En el río Vinagre que nace en el volcán Puracé, se han encontrado concentraciones de HCl en una proporción aproximada de 1,217 g/L,

<sup>94</sup> SÁNCHEZ, EFRAIN. Cauca [Online]. text/html; charset=windows-1252. Colombia: Museo del Oro, Banco de la República, 2011 [Rev. 2001]. Disponible en internet: <http://www.banrep.gov.co/museo/esp/expo/cauca.htm>

posteriores se analizara el catión  $\text{Na}^+$  dada su relación con los  $\text{Cl}^-$ , por ser ambos integrantes del aerosol atmosférico de origen marino.

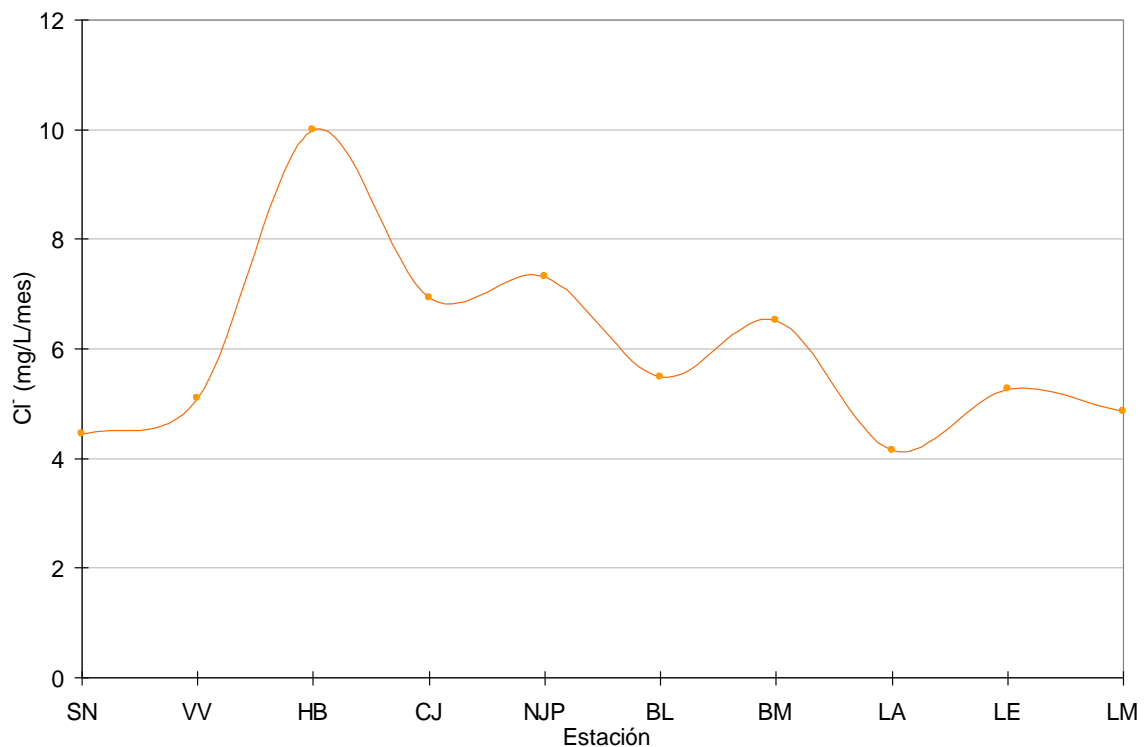
En general, la formación de  $\text{Cl}^-$  en el agua de lluvia de la ciudad de Popayán se dio mediante la reacción (Rx. 34):



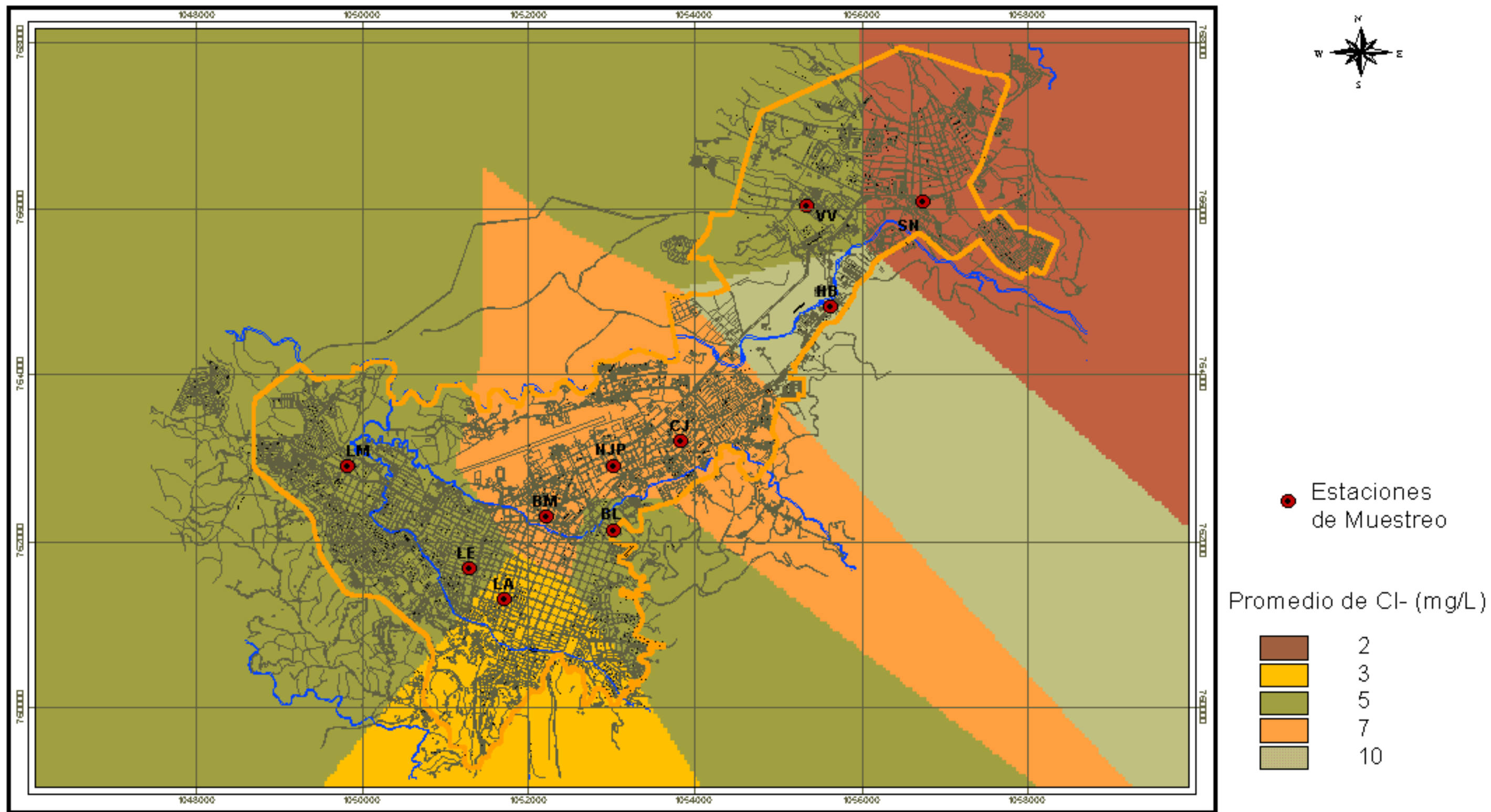
Es así como los  $\text{Cl}^-$  disueltos en el agua de lluvia tienen como precursor al cloro gaseoso presente en el aire, el cual al disolverse en las gotas de agua atmosférica, generan ácido clorhídrico y ácido hipocloroso, un agente oxidante.

La distribución de la media de los valores en todos los sitios de muestreo (Figura 37) no presenta una variación apreciable, excepto para el sitio HB. Este sitio se caracteriza porque dentro de su área de influencia se localiza la fábrica de productos lácteos Friesland, la cual podría estar aportando  $\text{Cl}^-$ , como producto de la combustión de la maquinaria utilizada en la misma.

**Figura 37 Valor Medio de la variable  $\text{Cl}^-$  en los Sitios de Muestreo.**



En el Figura 38 se observa la distribución espacial del ión  $\text{Cl}^-$  en toda la ciudad de Popayán.



**Figura 38** Distribución Espacial de Cl<sup>-</sup> en La Ciudad de Popayán

1 0 1 2 Kilometers

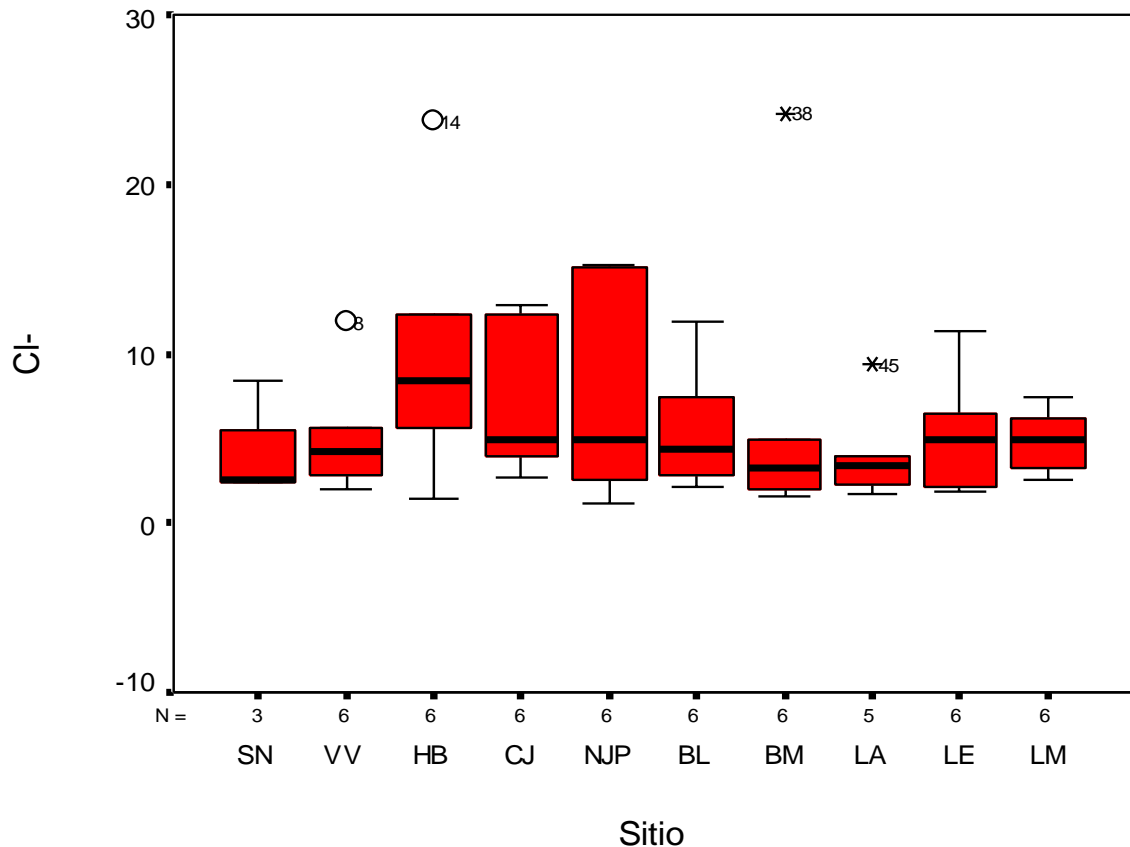
Fuente cartográfica y SIG :  
Grupo de Estudios Ambientales





En el diagrama de caja (Figura 39) se observan las diferencias en el rango intercuartílico es notoria en todos los sitios principalmente en el percentil 75, lo que indica que las concentraciones más altas se ubicaron en determinados sitios.

**Figura 39 Diagrama de Caja para la Variable Cl en los Sitios de Muestreo.**



Teniendo en cuenta que la fuente más probable de Cl<sup>-</sup> fue el spray marino, las variaciones en el percentil 75, puede considerarse como una entrada local de este anión a partir de la combustión vehicular o de aportes domiciliarios de productos en aerosol. Los sitios HB, CJ y NJP, contaron con los valores más altos de Cl<sup>-</sup> en toda la ciudad, los cuales se agruparon por encima de la mediana. El percentil 25 y la mediana de los sitios VV, CJ, NJP, BL, BM, LA, LE y LM, se ubicaron en una concentración similar de Cl<sup>-</sup>, lo que indica pocas variaciones de Cl<sup>-</sup> posiblemente debida a una entrada casi constante de ellos en determinado momento a partir del spray marino y por la actividad volcánica como fuentes más probables.

Mediante el Análisis de varianza ANOVA de una vía (Tabla 35) se obtuvo un nivel de significancia igual a 0.693, por lo cual no se rechazó la igualdad de medias de la variable Cl<sup>-</sup> en los diez sitios muestreados durante el período de estudio.

**Tabla 35 ANOVA para la variable CI<sup>-</sup> en los Sitios de muestreo.**

CI <sup>-</sup>	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	154,102	9	17,122	,631	,764
Intra-grupos	1247,912	46	27,129		
Total	1402,014	55			

Como no se rechazó la hipótesis nula de igualdad de medias presentada en la tabla de ANOVA (Tabla 35), con la prueba post hoc de Tukey (Tabla 36), las medias de los diez sitios se ubicaron en el mismo subconjunto homogéneo, con una significancia de 0,710.

**Tabla 36 Prueba post hoc de Tukey para la variable CI<sup>-</sup> en los sitios de muestreo.**

CI<sup>-</sup>

Tukey HSD<sup>a,b</sup>

SITIO	N	Sub con junto = .05
		1
LA	5	6
SN	3	6
LM	6	6
VV	6	6
LE	6	6
BL	6	6
BM	6	6,52
CJ	6	6,93
NJP	6	7,31
HB	6	9,99
Sig.		,710

Means for groups i in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 5,357.

b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

**10.5.2 Comportamiento Temporal:** Las pruebas de normalidad de Kolmogorov – Smirnov y Shapiro – Wilk, expresan que los datos se acomodaron a la distribución normal, optando por aplicar pruebas paramétricas (ver Anexo 5).

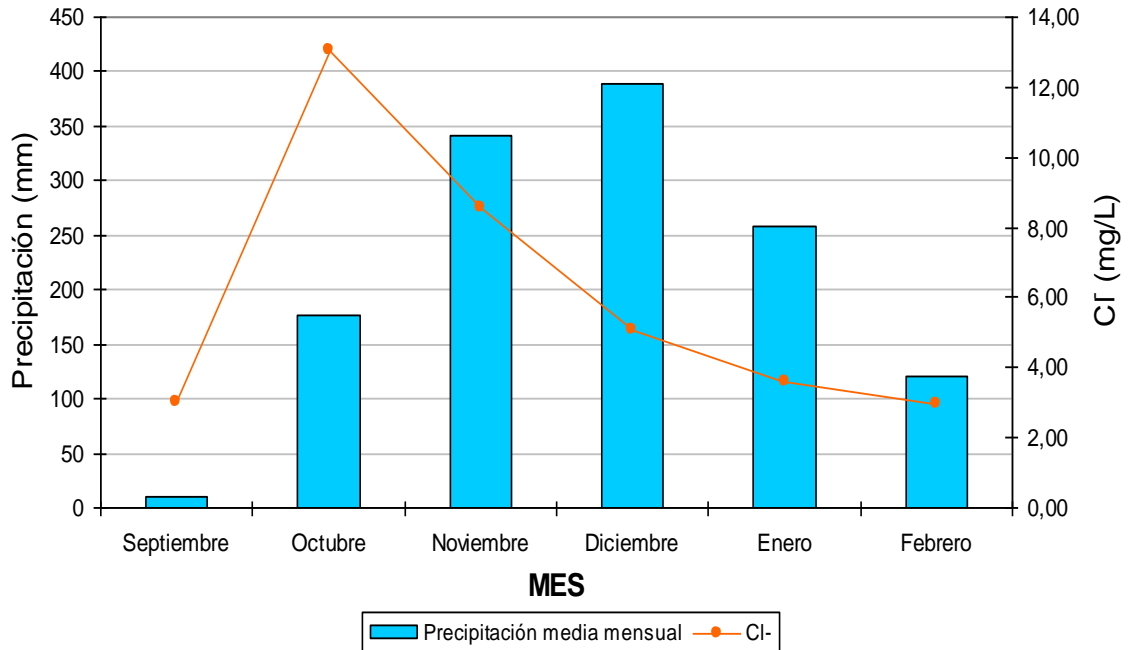
El valor máximo de Cl<sup>-</sup> se registró en el mes de Octubre con 24.16 mg Cl<sup>-</sup>/L, y el mínimo en Enero con 1.15 mg Cl<sup>-</sup>/L. El valor medio máximo fue de 13,04 mg Cl<sup>-</sup>/L durante el mes de Octubre y el valor medio mínimo en Febrero con 2.98 mg Cl<sup>-</sup>/L. El promedio de los valores medios de Cl<sup>-</sup> se calculó en 6.12 mg Cl<sup>-</sup>/L (Tabla 37).

**Tabla 37 Descriptivos de la variable Cl<sup>-</sup>. Septiembre de 2001 a Febrero de 2002**

	N	Media (mg/L)	Desviación Std.	Error Std.	Inrevalo de Confianza del 95%		Mínimo	Máximo
					Límite Inferior	Límite Superior		
					Sep	9		
Oct	10	13,0	6,5204	2,0619	8,3756	17,7044	3,94	24,16
Nov	9	8,56	3,6006	1,2002	5,7901	11,3254	4,90	15,28
Dic	9	5,09	3,1001	1,0334	2,7093	7,4752	2,13	12,32
Ene	9	3,59	1,8450	,6150	2,1707	5,0071	1,15	6,23
Feb	10	2,98	1,4388	,4550	1,9517	4,0103	1,63	6,36
Total	56	6,12	5,0489	,6747	4,7667	7,4708	1,15	24,16

El comportamiento de Cl<sup>-</sup> durante todo el período de muestreo, estuvo estrechamente relacionado con la distribución de las lluvias (Figura 40).

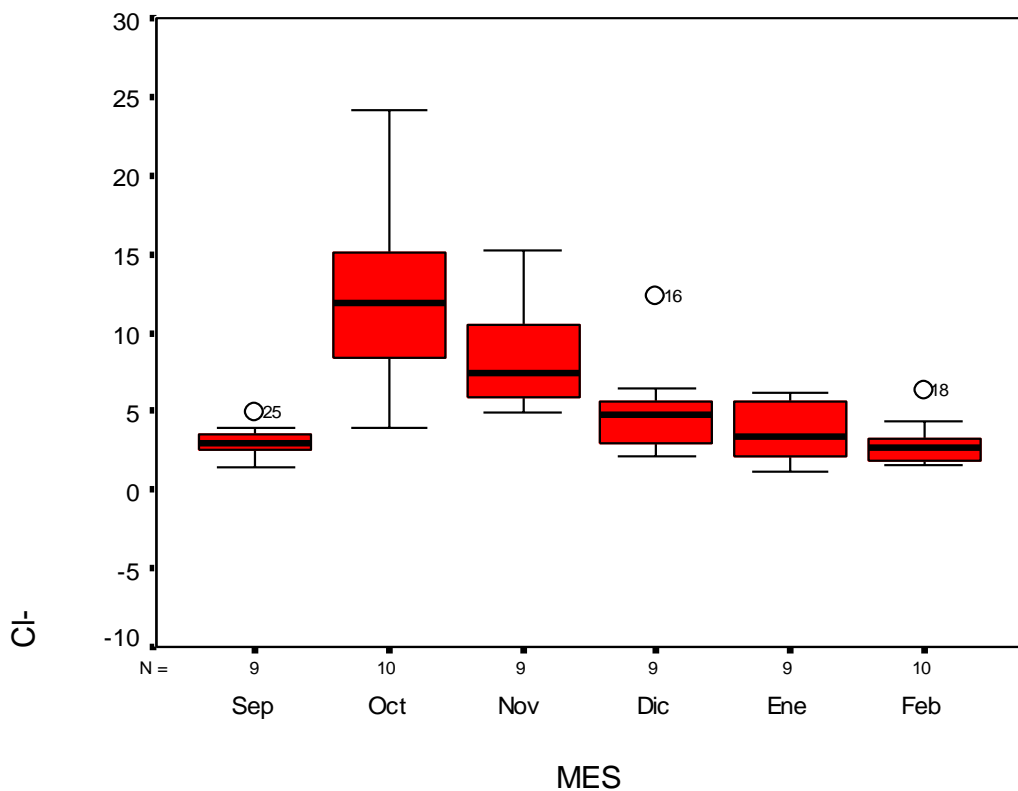
**Figura 40 Relación entre Cl<sup>-</sup> y la precipitación media mensual en Popayán. Septiembre de 2001 a Febrero de 2002**



En el mes de Septiembre cuando estaba finalizando el período de escasas lluvias, la concentración promedio de  $\text{Cl}^-$  fue baja (3.03 mg  $\text{Cl}^-/\text{L}$ ), posiblemente porque los eventos de lluvia fueron insuficientes para lavar los aerosoles clorados contenidos en la atmósfera. En el segundo mes de muestreo (Octubre), cuando comenzaron a presentarse las primeras lluvias de iniciación del período de abundantes lluvias, la concentración de  $\text{Cl}^-$  evidenció el lavado de partículas atmosféricas, al reportar el valor promedio más elevado de todo el período de muestreo. A medida que las lluvias se intensificaron, el promedio de  $\text{Cl}^-$  fue disminuyendo y por lo tanto pudo presentarse una mayor dilución de este ión en el agua de lluvia, manteniendo esta tendencia hasta el mes de Enero, cuando se presentaron fuertes eventos de lluvia. En el mes de Febrero los eventos de lluvia se hicieron más escasos y la concentración de  $\text{Cl}^-$  disminuyó, probablemente por un menor lavado de este ión y en consecuencia su menor dilución en el agua de lluvia.

Se observa en el diagrama de caja (Figura 41) que las variaciones en el percentil 75 fueron muy notorias, indicando que en cada mes varió la concentración de  $\text{Cl}^-$ , posiblemente por depender de la pluviosidad y por consiguiente de los procesos de dilución en las gotas de lluvia.

**Figura 41 Diagrama de Caja para la Variable  $\text{Cl}^-$ . Septiembre de 2001 a Febrero de 2002**



En el mes de Octubre, el rango intercuartílico no varió y se ubicó por encima del resto de los meses. El inicio de la temporada de lluvias, posiblemente favoreció el lavado atmosférico de este ión proveniente principalmente del spray marino, actividad volcánica y también de fuentes locales como los productos en aerosol de uso casero. El mes de Noviembre tuvo un comportamiento de datos de Cl<sup>-</sup> similar al mes de Octubre, pero con una disminución en las concentraciones de este anión y por encima de los otros meses, explicándose de manera similar que para el mes antecesor. Los meses de Septiembre y Febrero mostraron un comportamiento similar, con un rango intercuartílico muy poco variable y estrecho de valores bajos de Cl<sup>-</sup>, relacionado con la baja precipitación y por consiguiente con un menor lavado atmosférico de aerosoles.

Los meses de Diciembre y Enero fueron los meses de mayor precipitación, lo que facilitó el lavado constante de aerosoles y por consiguiente la disminución en la concentración de Cl<sup>-</sup> respecto de los dos meses anteriores y una variación intercuartílica no muy marcada pero con tendencia a una mayor agrupación de valores bajos de Cl<sup>-</sup> en el 50% de los datos por debajo de la mediana para el mes de Diciembre y valores altos agrupados en el 50% por encima de la mediana, para el mes de Enero.

La significancia fue altísima, igual a 0.000, obtenida mediante el Análisis de varianza (ANOVA) (Tabla 38), por lo que se rechazó la igualdad de medias de la variable Cl<sup>-</sup> en los seis meses de muestro.

**Tabla 38 ANOVA para la variable Cl<sup>-</sup>. Septiembre de 2001 a Febrero de 2002**

Cl <sup>-</sup>	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	783,857	5	156,771	12,681	,000
Intra-grupos	618,157	50	12,363		
Total	1402,014	55			

Mediante el ANOVA se pudo determinar que existen diferencias entre las medias, por lo que se rechazó la hipótesis nula de igualdad de medias, por lo tanto mediante la pruebas de rango post hoc de Tukey (Tabla 39) se determinaron las medias que difieren.

**Tabla 39 Prueba Post Hoc de Tukey para la variable Cl<sup>-</sup>. Septiembre de 2001 a Febrero de 2002.**

Cl<sup>-</sup>

Tukey HSD<sup>a,b</sup>

MES	N	Subconjuntos para alpha = .05		
		1	2	3
Feb	10	2,98		
Sep	9	3,03		
Ene	9	3,59		
Dic	9	5,09	5,09	
Nov	9		8,56	8,56
Oct	10			13,0
Sig.		,786	,291	,083

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

- a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 9,310.
- b. The group sizes are unequal. The harmonic mean of the group sizes is used. Type I error levels are not guaranteed.

En las pruebas Post Hoc de Tuckey, las medias se agruparon en tres subconjuntos. El primero subgrupo reunió las medias de los meses de Septiembre, Diciembre, Enero y Febrero. El segundo subgrupo a las de los meses de Noviembre y Diciembre. El último reunió las medias de Octubre y Noviembre. La agrupación de las medias de Cl<sup>-</sup> ratifica la influencia de una fuente constante de este ión, posiblemente de aerosoles marinos y volcánicos, y además por la influencia de factores climáticos sobre el comportamiento de este ión.

### **10.6. ANÁLISIS DE CORRELACIÓN**

Las matrices con los coeficientes de correlación obtenidos entre las variables se presentan en la Tabla 40.

**Tabla 40 Matriz de Correlación Paramétrica de Pearson**

		Volumen	pH	Conductividad	SO4	Cl-
Volumen	Correlación de Pearson	1,000	-,481	-,175	,296	,202
	Sig. (bilateral)	,	,000	,197	,027	,135
	N	56	56	56	56	56
pH	Correlación de Pearson	-,481	1,000	-,427	,161	-,548
	Sig. (bilateral)	,000	,	,001	,235	,000
	N	56	56	-,427	1,000	56
Conductividad	Correlación de Pearson	-,175	-,427	,001	,	,656
	Sig. (bilateral)	,197	,001	56	56	,000
	N	56	56	,161	-,360	56
SO4=	Correlación de Pearson	,296	,161	-,360	1,000	-,247
	Sig. (bilateral)	,027	,235	,006	,	,067
	N	56	56	56	56	56
Cl	Correlación de Pearson	,202	-,548	,656	-,247	1,000
	Sig. (bilateral)	,135	,000	,000	,067	,
	N	56	56	56	56	56

El volumen de captación presentó una de las correlaciones negativas más significativas con el pH ( $r = -0.482$ ): al incrementarse el volumen de captación del agua de lluvia, disminuyó el pH, por el lavado atmosféricos de iones, de los cuales, al parecer, los aniones se encontraron en mayor proporción que los cationes, por lo tanto, los procesos de neutralización pudieron ser afectados y el agua de lluvia tendió a la acidez. La correlación entre volumen y la conductividad ( $r=-0.175$ ) no fue significativa, mostrando una leve influencia del volumen en la disolución de iones. La asociación entre el volumen con los  $SO_4^-$  y los  $Cl^-$  no fue significativa y ratifica la influencia del volumen captado, en la disolución de los iones, debido al lavado atmosférico realizado durante los eventos de lluvia.

La conductividad presentó una correlación negativa significativa con los  $SO_4^-$  ( $r=-0.365$ ) y con el pH ( $r= -0.427$ ), lo que presume que a pesar que los  $SO_4^-$  participan como electrolitos en la conductividad, no son los principales responsables en los valores de ésta y que dicho parámetro dependen principalmente de la concentración de otros iones. Aunque la correlación negativa de la conductividad con el pH fue significativa, es importante considerar lo señalado por la Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación en el informe anual 1998<sup>95</sup> acerca de la precipitación ácida de la ZMCM, en cuanto

<sup>95</sup> Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación. Programa de Precipitación Ácida de la ZMCM informe anual 1998 [Online]. Adobe Acrobat. México: Gobierno del Estado de México,

que no existe una relación directa pH y conductividad, ya que la conductividad muestra la capacidad de conducción eléctrica de una sustancia por presencia de iones y no necesariamente se asocia con el pH. Entre todos los parámetros, la conductividad presentó la mejor correlación con los  $\text{Cl}^-$  ( $r = 0.656$ ). Esto quiere decir que la conductividad en gran medida estuvo en función de las concentraciones de  $\text{Cl}^-$  en el agua de lluvia, aunque seguramente se relacionó con otros iones que no fueron analizados. Se ratifica la suposición de la permanente entrada de  $\text{Cl}^-$  muy seguramente desde una fuente marina y volcánica, pero se necesitan estudios posteriores al respecto para su verificación.

La correlación entre el pH con los iones  $\text{SO}_4^{2-}$ , fue poco significativa ( $r = 0.105$ ). Lo anterior se explica por la presencia de cationes no analizados en el presente estudio, que pudieron haber intervenido de manera importante en la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  en el agua de lluvia, y al mismo tiempo contribuyeron con su carga iónica positiva en la neutralización de la acidez producida por este anión. Se presentó una significativa correlación negativa entre el pH y los  $\text{Cl}^-$  ( $r = -0.54$ ), lo que supone que hubo una emisión tanto natural como antrópica de éstos, reduciendo el pH en el agua de lluvia. Pero a pesar de no haber sido analizados algunos cationes, se demuestra que su presencia tuvo un gran efecto neutralizador sobre este anión, determinando en gran medida el comportamiento del pH del agua de lluvia en la ciudad de Popayán.

La correlación entre los  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$  ( $r = -0.235$ ), aunque no significativa supone que el aumento en la concentración del uno disminuye la del otro, aunque este hecho puede depender principalmente de los cationes encargados de neutralizarlos.

### **10.7 DEPOSITACIÓN TOTAL**

El depósito total de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$  en la ciudad de Popayán calculado fue de 4,75 Kg/Ha/mes y 4,67 Kg/Ha/mes, respectivamente.

En la siguiente tabla se comparan los valores de depósito total obtenidos en el agua de lluvia de la ciudad de Popayán, con los de otras ciudades del mundo. Para ello, las unidades reportadas en la literatura se convirtieron a las utilizadas en el presente estudio:

---

Departamento del Distrito Federal, Secretaría del Medio Ambiente, 1998 [rev. 1998]. Anual. Disponible en internet: < [http://www.sma.df.gob.mx/publicaciones/aire/inf\\_pre\\_acd\\_98/capitulo04.PDF](http://www.sma.df.gob.mx/publicaciones/aire/inf_pre_acd_98/capitulo04.PDF)>

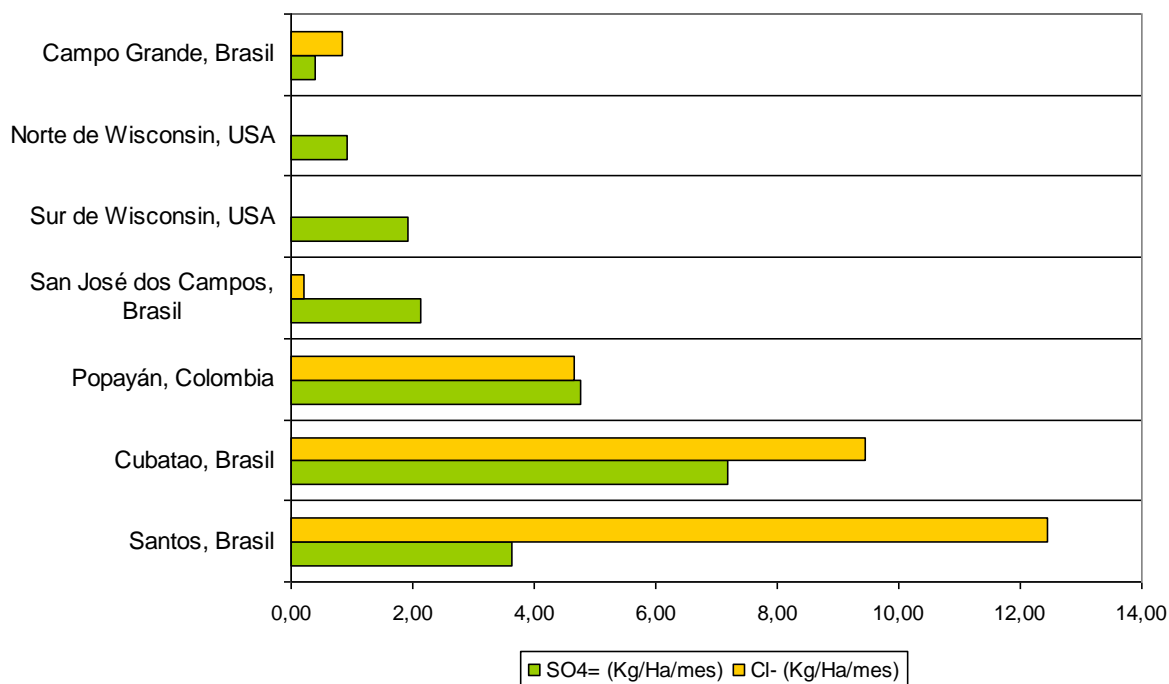


**Tabla 41 Depósito Total de SO<sub>4</sub><sup>=</sup> y Cl<sup>-</sup> en el agua de lluvia de algunas ciudades del mundo**

Lugar	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> (Kg/Ha/mes)	Cl <sup>-</sup> (Kg/Ha/mes)	Fuente
Santos, Brasil	3,63	12,46	Moreira-Nordemann et al.,1986, citado por Danelon, Olga & L. M. Moreira-Nordemann, 1991
Cubatao, Brasil	7,19	9,45	Moreira-Nordemann et al.,1986, citado por Danelon, Olga & L. M. Moreira-Nordemann, 1991
Popayán, Colombia	4,75	4,67	Presente estudio
Campo Grande, Brasil	0,4	0,83	L. M. Moreira-Nordemann, P. Girard & N. Ré Poppi, 1997
San José dos Campos, Brasil	2,14	0,2	L. M. Moreira-Nordemann1, P. Girard & N. Ré Poppi, 1997
Gdańsk-Sopot-Gdynia Tricity, Polonia	0,25	0,058	Zaneta, Polkowska, , Aleksander Astel, Marzena Gryniewicz, Tadeusz Górecki & Jacek Namie SNIK, 2002
Sur de Wisconsin, USA	1,91		B. SHAW & N. NIMPHIUS, 1997
Norte de Wisconsin, USA	0,92		B. SHAW & N. NIMPHIUS, 1997

La depositaciones de SO<sub>4</sub><sup>=</sup> y Cl<sup>-</sup> en la ciudad de Popayán (4,75 Kg/Ha/mes), son casi la mitad de las reportadas en la ciudad costera de Cubatao, Brasil (6,28 Kg/Ha/mes) (Figura 42).

**Figura 42 Depósito Total de SO<sub>4</sub><sup>-</sup> y Cl<sup>-</sup> en el agua de lluvia en varias ciudades del mundo**



Fuente: Tabla 41

Los autores citan que los altos valores de SO<sub>4</sub><sup>-</sup> y Cl<sup>-</sup> en la ciudad de Cubãtao se deben a los aportes desde la industria petroquímica que se asienta en la zona, más que a la influencia oceánica, mientras que en la ciudad de Popayán, los valores de SO<sub>4</sub><sup>-</sup> y Cl<sup>-</sup>, se atribuyen principalmente a emisiones desde fuentes naturales como la Cadena Volcánica de los Coconucos y el Océano Pacífico, más que a emisiones debidas a contaminación por actividades humanas, dado que en esta ciudad no existen áreas industriales, y donde las emisiones domésticas y vehiculares son consideradas como permanentes y posiblemente no representan la fuente principal de contaminación si se tiene en cuenta que la población de Popayán es de 230,000 habitantes<sup>96</sup>, casi el doble que en Cubatão (107,904 hab.)<sup>97</sup>. La consideración de si los SO<sub>4</sub><sup>-</sup> o los Cl<sup>-</sup> provienen principalmente de un lugar u otro es una incógnita que surge en este trabajo y que ojalá más adelante sea resuelta en otro estudio.

<sup>96</sup> Alcaldía Municipal de Popayán. Popayán: Sobre el municipio [Online]. DTD HTML 4.01 Transitional. Popayán, Colombia: Alcaldía Municipal de Popayán. 2003 [sin fecha de actualización]. Disponible en internet: <<http://www.popayan.gov.co/sitio.shtml?apc=l2--&s=m>>

<sup>97</sup> Directoría de Asuntos Metropolitanos. Cubitão [Online]. Textinfo. Cubitão, Brasil:. Universidad Católica de Santos. 2003 [sin fecha de actualización]. Disponible en internet: <<http://www.unisantos.br/~metropms/metroes/e10.htm>>

Como se observa, aunque la ciudad de Popayán presenta valores similares respecto a ciudades igualmente influenciadas por el océano, las fuentes emisoras de los altos contenidos de  $\text{SO}_4^-$  y  $\text{Cl}^-$  son diferentes, dado que en las ciudades brasileras son más de orden antrópico y en Popayán de origen natural.

Si se tiene en cuenta que en Europa y Canadá el valor límite admisible de  $\text{SO}_4^-$  en el agua de lluvia es 1,66Kg/Ha/mes (20 Kg/Ha/año), para que los ecosistemas acuáticos no sean afectados por la acidificación, el valor del depósito total de  $\text{SO}_4^-$  (4,67 Kg/Ha/mes) calculado para Popayán estaría excediendo sobremanera este tope. Sin embargo, hay que tener en cuenta que esos parámetros han sido establecidos para latitudes con condiciones climáticas, topográficas y ambientales completamente diferentes a las tropicales, donde se ubica Popayán. Por lo tanto, al comparar el valor de depósito total obtenido para esta ciudad con el estándar de Europa y Canadá, no puede ser del todo adecuado. De aquí la importancia de continuar consecutivamente ejecutando este tipo de estudios que conduzcan al desarrollo de indicadores ambientales propios y aplicables al entorno.

Además, se considera de suma importancia para complementar investigaciones de esta índole, el estudio de los efectos de la acidificación sobre ecosistemas acuáticos estratégicos y muy susceptibles a este problema, como es el caso de los humedales asociados al entorno urbano.

### **10.8 COMPARACION DE LA ACIDEZ, LA CONDUCTIVIDAD, SULFATO ( $\text{SO}_4^-$ ) Y CLORURO ( $\text{Cl}^-$ ) DEL AGUA DE LLUVIA EN POPAYÁN CON OTROS LUGARES DE COLOMBIA Y EL MUNDO.**

**10.8.1 Acidez:** Al comparar el promedio de pH (= 5.44) del agua de lluvia obtenido en el presente estudio para la ciudad de Popayán, con los valores de pH en otras ciudades, reportados por del IDEAM<sup>98</sup> en el año 2002 para algunas ciudades colombianas, se observa que en la mayoría de las ciudades indicadas en la Figura 43, los promedios de pH están dentro del rango considerado normal según la literatura<sup>99</sup> (pH= 4.5 – 5.5) y el valor de pH para la ciudad de Popayán está dentro de dicho rango.

Un hecho interesante es que el pH de la ciudad de Popayán es menor que en Bogotá. Se esperaría un caso contrario a sabiendas que la contaminación en la capital es mayor que en Popayán por la presencia mucho mayor de fuentes puntuales y móviles que emiten precursores de compuestos ácidos. Pero se

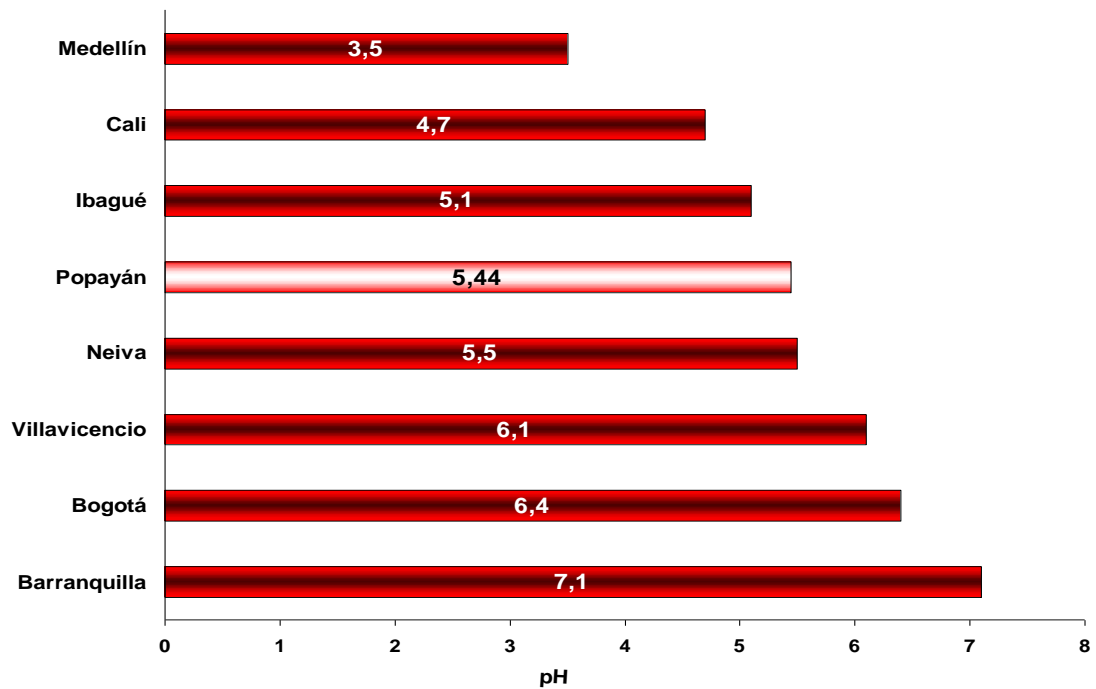
---

<sup>98</sup> Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Condiciones e indicadores ambientales en Colombia, julio de 2002: Proyecciones en el corto, mediano y largo plazo [Online]. Adobe Acrobat. Bogotá, Colombia: IDEAM, 2002 [rev. 2002] Mensual. Disponible en internet: <<http://www.ideam.gov.co/informe/Info90/11%20-%2069.pdf>>

<sup>99</sup> Rocha y Bittencourt. Op. Cit. p. 259 - 272

puede explicar por la cercanía de Popayán al Océano Pacífico y los vientos dominantes provenientes de dicho océano, los cuales estarían arrastrando precursores de compuestos acidificantes del agua de lluvia. Además, la proximidad de la Cadena Volcánica de los Coconucos a Popayán también puede estar aportando su cuota.

**Figura 43 El pH del agua de lluvia en varias ciudades Colombianas.**



Henry y Heinke<sup>100</sup> exponen que el agua de lluvia en regiones remotas del mundo depende de factores físicos y químicos, que determinan la variabilidad de su composición. Los precursores de acidificación pueden ser arrastrados por los vientos predominantes a grandes distancias, fenómeno conocido como *transporte de largo alcance de contaminantes aéreos (TLACA)*.

Es importante recalcar que los aportes de nutrientes por precipitación al suelo no son necesariamente los responsables de la acidez o basicidad de este. Este es el caso que se presenta en los suelos del piedemonte llanero cuyos suelos se caracterizan por ser fuertemente ácidos (pH = 4.5), de alto contenido de aluminio intercambiable, de baja fertilidad, y principalmente deficientes en Ca, P, N, Zn y Cu<sup>101</sup>, con lo que se podría pensar que es debido a la acidez aportada por la

---

<sup>100</sup> HENRY, J. Glynn., & HEINKE, Gary W. Op. Cit. 778 p.

<sup>101</sup> Elzo, M. A., G. Martínez, F. Gonzáles, y H. Huertas. Variabilidad y Predicciones Genéticas Para Características de Carne en el Rebaño Multirracial Sanmartinero-Cebú de La Libertad [Online].

precipitación, pero como se observó en los datos anteriores el pH del agua de lluvia en Villavicencio es de 6,1, tendiente a ser neutra. Por lo tanto, factores como el origen geológico y la meteorización son más determinantes en la acidez o la basicidad de los suelos de algunas regiones. Para el caso de Popayán, los suelos son esencialmente ácidos debido a su origen geológico. La base del suelo en este sector está conformada por depósitos de flujos de ceniza y bloques que pertenecen a un largo periodo de tiempo de intensa actividad volcánica que data de Plioceno-Holoceno (edad de la Formación Popayán)<sup>102</sup>.

En la Tabla 42 se presentan los valores de pH del agua de lluvia en algunas regiones remotas y ciudades de países latinoamericanos e industrializados, incluyendo los datos de la ciudad de Popayán.

**Tabla 42 Valores de pH del agua de lluvia en algunas regiones remotas y ciudades de países menos desarrollados e industrializados.**

Lugar	pH	Fuente
Patros, Grecia	6,44	Departamento del Distrito Federal, 1995
Kalyan, India	5,7	Ranjit Kumar, et al, 2002
Turrialba, Costa Rica	5,58	Hendry, C.D., 1985
<b>Popayán, Colombia</b>	<b>5,44</b>	Presente estudio
Delhi, India	5,4	Ranjit Kumar, et al, 2002
Ciudad de México	5,3	Departamento del Distrito Federal, 2000
Campo Grande, Brasil	4,9	L. M. Moreira-Nordemann, P. Girard & N. Ré Poppi, 1997
Chembur, India	4,8	Ranjit Kumar, et al, 2002
Korba, India	4,8	Ranjit Kumar, et al, 2002
Saõ José dos Campos	4,6	L.M.Moreira-Nordemann,P.Girard & N. Ré Poppi, 1997
Amazonía	4,6	Rocha Martins, C., y J. Bittencourt de Andrade, 2002.
Camburito, Estado Portuguesa, Venezuela	4,37	Sanhueza, E., 1987
Golfo de México	4	Parungo, F., 1990
Ithaca, NY	3,84	Rocha Martins, C., & J.Bittencourt de Andrade, 2002.

En la Figura 44 se aprecia de manera ilustrada que el pH del agua de lluvia en la mayoría de las regiones remotas y ciudades de los países latinoamericanos, el pH

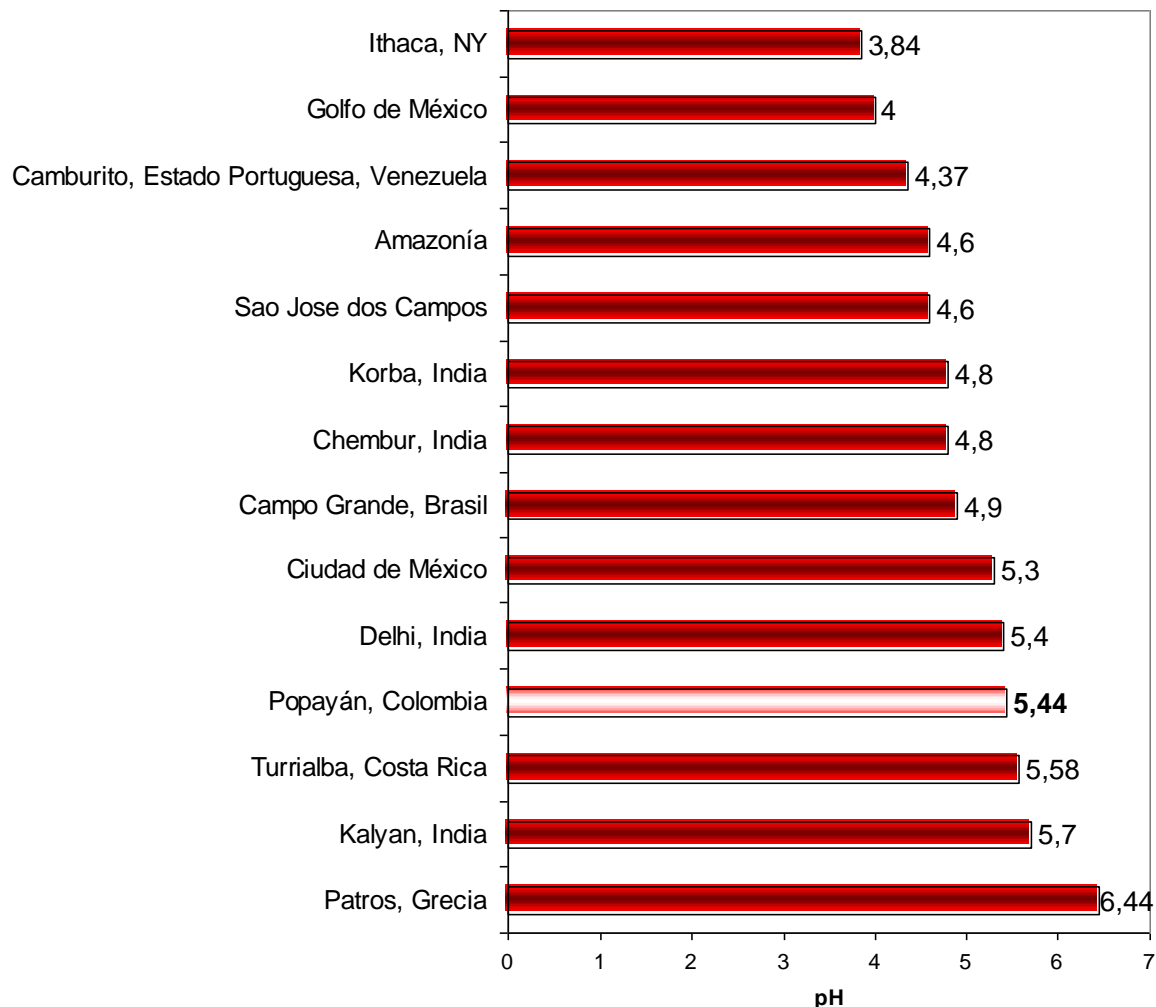
---

Microsoft Word 9. Florida, USA: Animal Science Department, University of Florida, 2003 (rev. Julio de 2003). Disponible en internet:  
 < <http://www.animal.ufl.edu/elzo/Publications%5CProceedings%5CSMCEBU-corrected.htm>>

<sup>102</sup> Torres, M. P. Aporte al Conocimiento de la Geología y la Estratigrafía de la Formación Popayán Departamento del Cauca. En: Novedades Colombianas. No. 7. Marzo, 1997. p. 4-28.

se encuentra dentro de los rangos aceptables (pH = 4.5 – 5.6), donde se considera que no incide sobre el ambiente.

**Figura 44 El pH del agua de lluvia en varios lugares del mundo.**



Fuente: Tabla 42

El valor del pH en el agua de lluvia de Popayán es comparable con los registrados en la Zona Metropolitana de Ciudad de México<sup>103</sup> y Turrialba (Costa Rica)<sup>104</sup>. El origen de los precursores de acidez en estos tres sitios, se podría decir que es diferente. En Ciudad de México, se responsabiliza de los valores de pH del agua de lluvia a las condiciones meteorológicas y a los patrones de emisión de compuestos precursores a partir de fuentes antrópicas (industria, combustión

<sup>103</sup> Dirección General de Gestión Ambiental del Aire. Op. Cit.

<sup>104</sup> HENDRY, CH., C. BERISH & E. EDGERTON. Op. Cit. p. 1677 – 1684

vehicular y doméstica), en Turrialba, Costa Rica, se encontró que la acidez se debió principalmente al ión  $\text{SO}_4^-$  (el más abundante en el agua de lluvia, en comparación a las pequeñas contribuciones de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{NO}_3^-$ ), al cual se le atribuye un origen principalmente volcánico. Mientras que la acidez del agua de lluvia en Popayán, parece estar directamente relacionada con las partículas arrastradas por la acción de los vientos predominantes del SW (ver Figura 24), los cuales provienen del océano Pacífico, ubicado cerca a esta ciudad. Además, la proximidad a la Cadena Volcánica de los Coconucos, estaría aportando iones acidificantes, principalmente ricos en azufre y cloro, transportados hacia Popayán por la acción de los vientos del SE (ver Figura 24). Lo anterior lleva a considerar que las principales fuentes responsables de los iones analizados en este estudio son las fuentes naturales, tanto marinas como volcánicas, sin descartar los aportes por combustión vehicular, emisiones domésticas, por quemas forestales en los alrededores, y en menor escala, los aportes por emisiones industriales.

Al comparar el pH del agua de lluvia de la ciudad de Popayán con todas las regiones y ciudades presentadas en la Figura 43, se puede decir, que su valor se encuentra dentro de los rangos normales.

Sanhueza, E., y M. Santana<sup>105</sup>, en su estudio sobre la depositación húmeda en América Tropical, afirma que hay varios problemas de acidificación local y regional que han sido observados en Venezuela y Brasil y se piensa que en otras áreas urbanas de la América tropical la acidificación antropogénica también está presente, pero aún no se han registrado mediciones. Aquí radica la importancia de monitoreos ambientales tanto en zonas urbanas, como sub-urbanas y remotas tanto en Colombia como en el resto de los países latinoamericanos, con el fin de establecer acuerdos para la disminución de emisiones de precursores de compuestos acidificantes a la atmósfera, dado que los contaminantes pueden viajar grandes distancias teniendo en cuenta factores climatológicos, sufrir transformaciones químicas y físicas, para luego depositarse en regiones distantes, causando daños sobre el ambiente.

### **10.8.2 Conductividad**

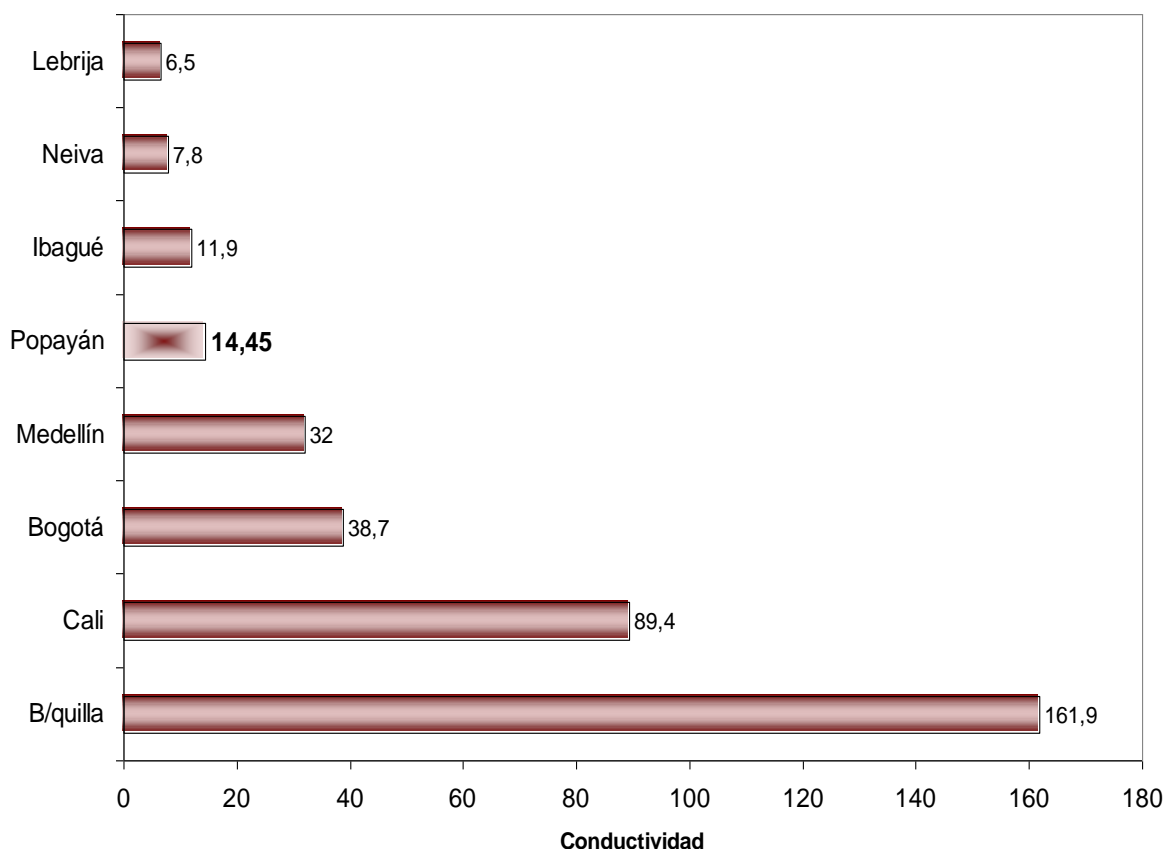
La comparación del parámetro *conductividad* en el agua de lluvia de la ciudad de Popayán fue posible únicamente con algunas ciudades colombianas (Figura 45), teniendo en cuenta el reporte del IDEAM<sup>106</sup> para el año 2002.

---

<sup>105</sup> SANHUEZA, E. & M. SANTANA. Op. Cit. p. 327-334.

<sup>106</sup> Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Op. Cit.

**Figura 45 Conductividad en el agua de lluvia de varias ciudades colombianas**



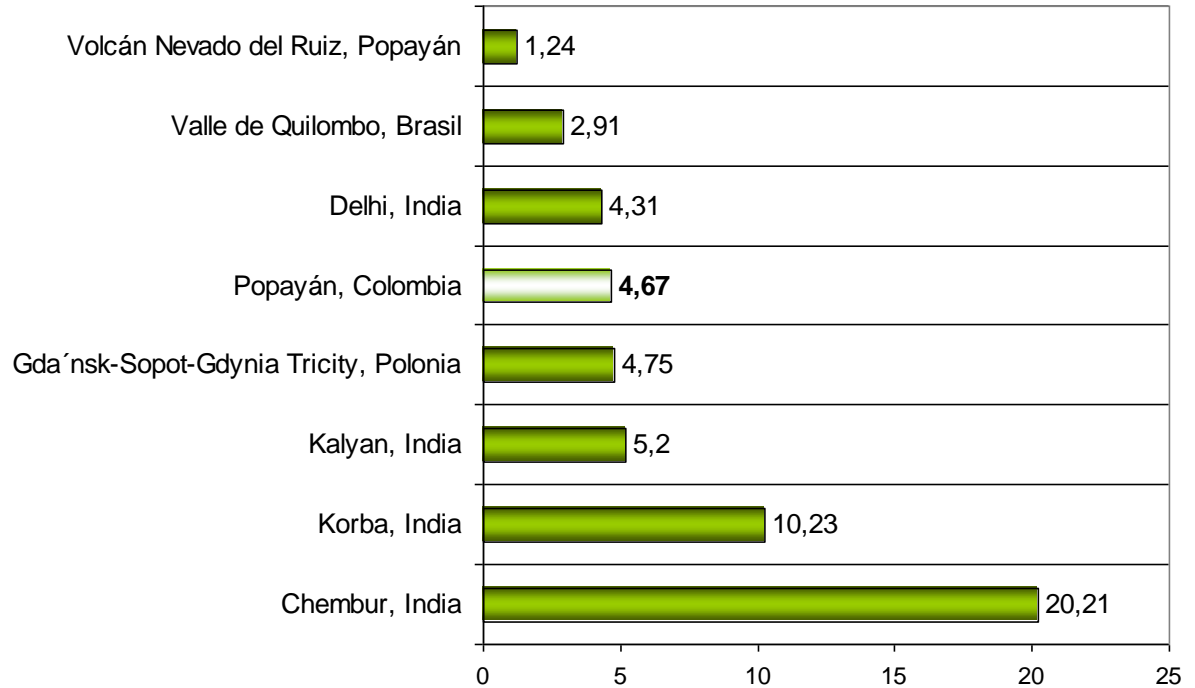
El valor promedio de conductividad en el agua de lluvia de Popayán ( $14.45\mu\text{S}/\text{cm}$ ), se encuentra muy por debajo de los valores de ciudades tan industrializadas y urbanizadas como Barranquilla, Cali, Bogotá y Medellín. Sin embargo, el valor promedio de conductividad en Popayán, está por encima de ciudades con características similares de urbanización e industrialización, como Ibagué, Neiva y Villavicencio. Esto se puede deber a que a diferencia de estas ciudades, Popayán se ubica cerca al Océano Pacífico y a la Cadena Volcánica de los Coconucos, de donde llegan aerosoles marinos que aportan al agua de lluvia gran cantidad de iones que generan una conductividad más alta.

### **10.8.3 Sulfatos ( $\text{SO}_4^-$ )**

El valor promedio de  $\text{SO}_4^-$  para Popayán se comparó los de otras ciudades del mundo. En vista que no fue posible encontrar en la literatura datos para otras ciudades colombianas, se utilizó el reporte del volcán nevado del Ruiz (Figura 46).



**Figura 46 SO<sub>4</sub><sup>=</sup> en el agua de lluvia de algunas ciudades del mundo**



El valor promedio de SO<sub>4</sub><sup>=</sup> en Popayán es comparable con el de Gdańsk-Sopot-Gdynia Tricity en Polonia, donde se asume que se debe principalmente a la actividad industrial de la zona, en comparación a Popayán donde posiblemente las principales fuentes son la oceánica y la volcánica. La concentración promedio de SO<sub>4</sub><sup>=</sup> en la ciudad de Popayán es similar con la ciudad hindú de Delhi<sup>107</sup>, la cual se ubica en una zona semiárida y ha experimentado en los últimos años un incremento de los niveles de contaminación debido a la expansión de su área metropolitana.

Aunque algunas ciudades presentan los valores promedios de SO<sub>4</sub><sup>=</sup> muy aproximados a los encontrados en Popayán, existen diferencias de ubicación latitudinal y de otras características ambientales que las influyen. Por lo tanto, aquello que en otros lugares puede ser perjudicial, en una ciudad tropical como Popayán, es probable que no represente problemas potenciales en un plazo determinado, dadas las características que le confiere su ubicación tropical, lo que tal vez le ha permitido desarrollar mecanismos buffer que posiblemente le han conferido la capacidad de protegerse de los altos niveles de este ión provenientes del océano Pacífico y de la Cadena Volcánica de los Coconucos, por acción de los sistemas de circulación atmosférica.

---

<sup>107</sup> RANJIT KUMAR, et al., 2002. Op. Cit.

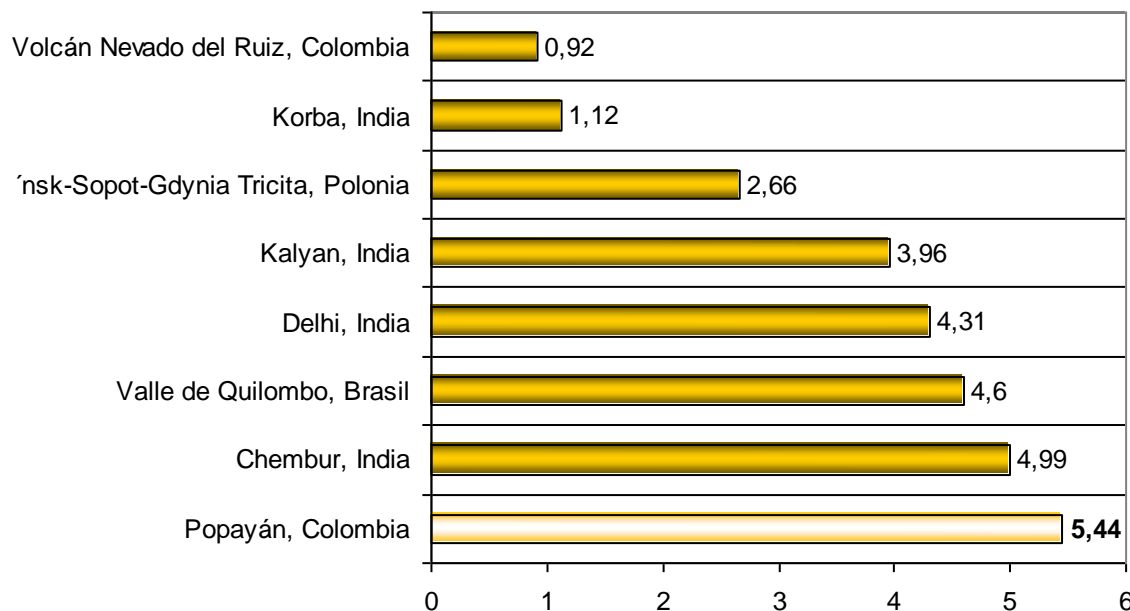
Se presenta el valor de  $\text{SO}_4^-$  reportado para el agua de lluvia en el Volcán Nevado del Ruiz<sup>108</sup>, en Colombia a pesar de no corresponder a una zona urbana, puede ser de interés su comparación con el valor de Popayán, debido a que el estudio se realizó en un área de influencia volcánica directa. La concentración de  $\text{SO}_4^-$  en Popayán es aproximadamente tres veces superior al reporte para el volcán nevado del Ruiz, el cuál se encuentra más alejado del océano Pacífico que Popayán. Sería muy interesante la realización de un estudio similar en el volcán Puracé, para determinar su verdadera influencia sobre la ciudad de Popayán.

#### 10.8.4 Cloruros ( $\text{Cl}^-$ )

En la Figura 47 se observa que la ciudad de Popayán reporta la mayor concentración de  $\text{Cl}^-$  (5,44 mg/L) en el agua de lluvia, en comparación con otras ciudades del mundo y con los datos del volcán nevado del Ruiz.

Por debajo de la concentración media de  $\text{Cl}^-$  para Popayán, se ubica la ciudad costera de Chemur, la que además de la influencia marina se caracteriza por ser una ciudad altamente industrializada, por lo tanto, los aportes de  $\text{Cl}^-$  son debidos a estas dos fuentes, en comparación con las posibles fuentes naturales responsables de la concentración de  $\text{Cl}^-$  en Popayán.

**Figura 47  $\text{Cl}^-$  en el agua de lluvia de algunas ciudades del mundo**



<sup>108</sup> Veneklaas, E.J., 1990. Op Cit.

## 11. CONCLUSIONES

Mediante la determinación del comportamiento espacial de los parámetros físicos y químicos analizados, se logró establecer que el pH,  $\text{SO}_4^-$  y  $\text{Cl}^-$ , no presentaron variaciones significativas entre los sitios muestreados, dando la posibilidad que los iones tuvieron una fuente constante de emisión, con un mecanismo de dispersión que facilitó la distribución homogénea de estos por toda la ciudad. La conductividad experimentó una distribución notablemente variable en cada uno de los sitios, lo que se explica posiblemente por los aportes localizados de diversos iones que en el presente estudio no fueron analizados.

La distribución de la acidez y de los aniones  $\text{SO}_4^-$  y  $\text{Cl}^-$ , en parte responsables de este, muestran que a pesar de haber evidencias de eventos de lluvia ácida en la ciudad de Popayán, la tendencia fue hacia precipitaciones con valores de acidez dentro del rango normal para el agua de lluvia.

Los mapas que se generaron a partir de la distribución espacial de los diversos parámetros, sirven como una herramienta visual que permita comprender y analizar mejor el comportamiento de los parámetros en la ciudad de Popayán. Además, junto con la base de datos generada, mediante el Sistema de Información Geográfica (SIG) utilizado (ArcView), puede ser posible el solapamiento con otros mapas que contengan otro tipo de información ambiental, de manera tal que se logre ampliar, conocer y comprender cada vez más y mejor el funcionamiento de los procesos ambientales, las causas y efectos de la contaminación ambiental y buscar las maneras de contrarrestarla si resulta perjudicial para el ambiente.

Se observó una leve tendencia al aumento de la acidez,  $\text{Cl}^-$  y conductividad durante el mes de Octubre, posiblemente por procesos de dilución de precursores de acidez, debido a la mayor intensidad, frecuencia y duración de los eventos de lluvias durante este mes, lo que pudo facilitar el lavado atmosférico de iones. Aunque se esperaba un comportamiento similar al de los  $\text{Cl}^-$ , la menor cantidad de  $\text{SO}_4^-$  que se presentó en el mes de Octubre se pudo deber a la posible neutralización por los cationes lavados de la atmósfera y a los procesos de conversión homogénea que se presentan cuando los la atmósfera se encuentra en fase gaseosa.

Tanto el comportamiento espacial como temporal, no mostraron tendencias notables hacia la acidez del agua de lluvia en la ciudad de Popayán, posiblemente por la presencia de cationes que ayudarían a contrarrestar la acción de los iones acidificantes.

Las posibles fuentes principales de emisión de los precursores primarios de los iones analizados en el agua de lluvia de la ciudad de Popayán,  $\text{SO}_4^-$  y  $\text{Cl}^-$ , fueron naturales, tanto de procedencia marina como volcánica, si se tiene en cuenta la acción de los vientos procedentes desde el océano Pacífico y la Cadena Volcánica de los Coconucos, los cuales se encuentran relativamente cerca a la ciudad de Popayán. Sin embargo, no se pueden descartar las fuentes antrópicas que implican una contaminación permanente de  $\text{SO}_4^-$  y  $\text{Cl}^-$ , como la combustión vehicular y las emisiones domésticas, las cuales pueden presentarse en menor proporción que las fuentes naturales. La escasa industrialización concentrada en determinadas zonas de la ciudad puede explicar los incrementos puntuales de los iones analizados en esos sitios.

El elevado valor de depósito total para los iones  $\text{SO}_4^-$  y  $\text{Cl}^-$  en el agua de lluvia de la ciudad de Popayán, con relación a otras ciudades del mundo, responde a la posible influencia marina y volcánica a la cual está sometida la ciudad de Popayán. Sin embargo, los valores promedios de la concentración de esos iones, son mucho más elevados que en otros lugares del mundo y esto puede estar relacionado con la elevada pluviosidad en esta ciudad, la cual puede estar facilitando el lavado atmosférico de los iones y por ende la dilución de los mismo.

La acidez y la conductividad del agua de lluvia en la ciudad de Popayán, permiten determinar que las condiciones de calidad del aire en la ciudad son favorables, dado que estos parámetros se encuentran dentro de rangos normales y más aún si las posibles fuentes que están condicionando la acidez son principalmente naturales, lo que facilitaría el control de las emisiones de origen antrópico.

Esta información resulta de vital importancia para determinar los efectos del ambiente sobre la salud de la población con el propósito de definir los objetivos de los programas para proteger y mejorar la calidad del aire en la ciudad de Popayán, con un esfuerzo sistemático basado en un mayor conocimiento y sustento técnico. De esta manera, los programas generados a partir de la información científica, se reflejen en la disminución de las concentraciones de los contaminantes considerados perjudiciales cuando sobrepasan sus niveles permisibles.

Los resultados del presente estudio y los que se pudiesen obtener con la continuidad de investigaciones de este tipo, serían de gran importancia para complementar el Programa de Monitoreo del Recurso Aire en la ciudad de Popayán implementado por la Corporación Autónoma Regional del Cauca, dado que los compuestos  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_2$ , determinados por la Corporación son los precursores de algunos de los iones ácidos ( $\text{SO}_4^-$ ) que se analizaron en esta investigación.

## 12. RECOMENDACIONES

- Es preciso que en futuras investigaciones del comportamiento químico del agua de lluvia, sean determinados además de los iones analizados en el presente estudio ( $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{Cl}^-$ ), los iones  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{HCO}_3^-$ , con el fin de asociar el comportamiento químico del agua de lluvia de una manera mas acertada con determinadas fuentes de emisión y lograr establecer indicadores ambientales propios y aplicables al entorno..
- Las mediciones del pH y la conductividad, deberían realizarse tanto *in situ*, como en laboratorio, dado que es probable que algunas reacciones puedan alterar estas propiedades fisicoquímicas.
- Los resultados obtenidos se hubiesen podido explicar mejor mediante la determinación de la alcalinidad, pues aunque el pH del agua de lluvia se ha considerado como un parámetro fundamental para analizar la sensibilidad a la acidificación de la lluvia, no es suficiente, dado que la disminución del pH por aumento de la concentración del  $\text{CO}_2$  no se considera como consecuencia de la formación de la lluvia ácida. Por lo tanto, se requiere determinar la alcalinidad respecto al punto equivalente de  $\text{CO}_2$  para la caracterización del agua de lluvia en futuras investigaciones o monitoreos del agua lluvia para la ciudad de Popayán.
- Las posibles fuentes responsables del aporte de precursores de  $\text{SO}_4^-$  merecerían ser estudiadas a fondo en futuras investigaciones en sitios muy puntuales de la ciudad de Popayán, tales como, la carrera 6ª, centro de la ciudad, calle 5ª entre carreras 7ª y 3ª, barrio Bolívar, Avenida Panamericana a la altura del cruce con carrera 9ª, entre otros, complementándose con variables meteorológicas como la dirección de vientos, temperatura, humedad y evaporación, para determinar el aporte real de las fuentes y tener una mejor perspectiva de la tendencia no solo de los contaminantes azufrados, sino de cada contaminante y de esta manera generar indicadores del estado de la calidad del aire para la ciudad.
- Es de suma importancia para complementar investigaciones de esta índole, el estudio de los efectos de la acidificación sobre ecosistemas acuáticos estratégicos y muy susceptibles a este problema, como es el caso de los humedales asociados al entorno urbano.

## BIBLIOGRAFIA

ALCALDIA MAYOR DE POPAYAN. SECRETARIA DE PLANEACIÓN MUNICIPAL. PLAN DE DESARROLLO RURAL. Diagnóstico para la Implementación del Plan Ambiental Municipal. Popayán: La Secretaría, 1999.

\_\_\_\_\_ Plan de Acción Ambiental Municipal. Diagnóstico – Estrategias. Secretaría de Planeación Municipal. Popayán: Unidad de Asistencia Técnica Agropecuaria – UMATA, 1999.

AMBIENTE ITALIA. La Casa [Online]. Textinfo. Italia: Radio Popolare, 2001 [Rev. 2001]. Disponible en internet: <<http://www.radiopopolare.it/lindo/spa/casa.htm>>

APHA, AWWA, WPCF. Métodos Normalizados: Para el Análisis de Aguas Potables y Residuales. 17 ed. Madrid: Diaz de Santos, 1992. p. 1 – 73

ARCILA, M. M., et al. 10 años del Observatorio Vulcanológico y Sismológico Ingeominas - Centro Operativo Regional Popayán. [Online]. Acrobat PDF Writer 4,0 para Windows. Colombia: Instituto Geofísico Universidad Javeriana, Primer Simposio Colombiano de Sismología "Avances de la Sismología Colombiana en os últimos 20 años", 6 de Octubre de 2002 sin fecha de actualización] Disponible en internet: <<http://ainsuca.javeriana.edu.co/geofisico/simposio2002/Instrumentacion/10%20A%D1OS%20DEL%20%20OVSP.PDF>>

ARCVIEW GIS [CD –ROM]. Versión 3.1. 26 de Febrero de 2003. Licencia autorizada a: Grupo de Estudios Ambientales de la Universidad del Cauca.

BALBO, M. La Planificación Y Gestión Urbana Local. En: JORDAN, R. & D. SIMIONI. Ciudades Intermedias De América Latina Y El Caribe: Propuestas Para La Gestión Urbana. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Ministerio degli Affari Esteri Cooperazione Italiana, 1998. p. 107 - 126.

BAEZ, A., R. BELMONT & H. PADILLA. Chemical composition at two sampling sites in México: A 7-year study. Atmospheric Environment. Vol. 31, 1997, p. 915-925.

BEDOYA, César. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Cloro y Cáncer [Online]. Texinfo 2 el. (Madrid, España), Informes, Enero 2002

(Actualizado en Mayo de 2002) Departamento de Construcción. Web: <<http://corbu.aq.upm.es/~cbedoya/webacv/informes/infclyca.htm>>

B. SHAW & N. NIMPHIUS. Acid Rain Measurement: What they mean. [Online]. Acrobat PDF Writer 3.0 para Windows. Wisconsin, United States: Department of Agricultural Journalism, University of Wisconsin-Madison, Junio 16 de 1997 [Mayo 12 de 1998]. Disponible en internet: <[http://cecommerce.uwex.edu/pdfs/G3305\\_2.PDF](http://cecommerce.uwex.edu/pdfs/G3305_2.PDF)>

BUENOS DÍAS PLANETA. Los Contaminantes Orgánicos Persistentes [Online]. Texinfo. España: Ecoespaña, Diciembre de 2000 [rev. Mayo de 2000]. Disponible en internet: <<http://www.buenosdiasplaneta.org/rm2000/i27a.htm>>

CELSI, S.A. & A. D. IACOBUCCI. Química Elemental Moderna. Buenos Aires: Kapalez & Cía, 1939. 366 p.

CENTRO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIONES PARA EL DESARROLLO. Aquatox [Online]. Mozilla/4.04. Canadá: IDRC, 21 de Octubre de 2002 [rev. Agosto de 2002]. Disponible en internet: <<http://www.idrc.ca/aquatox/sp/whatsnu/check.html>>

CENTRO DE INFORMACIÓN AMBIENTAL DE LA SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE DEL GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL. Preguntas Frecuentes: Contaminación del Aire [Online]. Texinfo 2 el. (México D. F., México), Coordinación Técnica, 2001 (Actualizado en noviembre de 2001). Gobierno del Distrito Federal de México. Web: <[http://148.243.232.98/preguntas\\_frecuentes/contaminacion\\_aire.htm](http://148.243.232.98/preguntas_frecuentes/contaminacion_aire.htm)>

CHIRIVI H. & VELASQUEZ, L.M. Ecobiología. Bogotá: Usta, 1984. 606 p.

COSCARELLA, Patricia. ¿Usted por qué vota? [Online]. Texinfo. Buenos Aires, Argentina: Fabio Zerpa, Marzo de 2001 [rev. Marzo de 2001]. Disponible en internet: <[http://www.fabiozerpa.com/EIQuintoHombre/marzo01/UstedporqueVota\\_1.htm](http://www.fabiozerpa.com/EIQuintoHombre/marzo01/UstedporqueVota_1.htm)>

DANELON, O. & L. M. MOREIRA-NORDEMANN. Natural and Anthropogenic Occurrence of  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ; And  $\text{SO}_4^{2-}$  in the Quilombo River Basin (Cubatão - SP). En: Revista Brasileira de Geociências. Vol. 21, No. 1. Marzo, 1991. p. 96-101.

DA SILVA FILHO, E.V., A.R. COELHO OVALLE & I.F. BROWN. Precipitacao ácida no Parque Nacional da Tijuca, Río de Janeiro. En: Ciencia e Cultura. Vol 39, 1987. p. 419-422

DEPARTAMENTO DE FÍSICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA. Los contaminantes, ¿son causa natural o humana? [Online]. Macintosh. Chile: Editorial Mantra, Agosto 2002 [Actualizado el 21 de Diciembre de 2002]. Disponible en internet: <[http://www.mantra.com.ar/contenido/zona1/frame\\_ozono4.html](http://www.mantra.com.ar/contenido/zona1/frame_ozono4.html)>

DIRECCIÓN GENERAL DE PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN. Programa de Precipitación Ácida de la ZMCM informe anual 1994 [Online]. Adobe Acrobat. México: Gobierno del Estado de México, Departamento del Distrito Federal, Secretaria del Medio Ambiente, 1994 [rev. 1994]. Anual. Disponible en internet: [http://www.sma.df.gob.mx/publicaciones/aire/inf\\_pre\\_acd\\_94/parte1.pdf](http://www.sma.df.gob.mx/publicaciones/aire/inf_pre_acd_94/parte1.pdf)

\_\_\_\_\_ Programa de Precipitación Ácida de la ZMCM informe anual 1994 [Online]. Adobe Acrobat. México: Gobierno del Estado de México, Departamento del Distrito Federal, Secretaria del Medio Ambiente, 1994 [rev. 1994]. Anual. Disponible en internet: <[http://www.sma.df.gob.mx/publicaciones/aire/inf\\_pre\\_acd\\_94/parte2.pdf](http://www.sma.df.gob.mx/publicaciones/aire/inf_pre_acd_94/parte2.pdf)>

\_\_\_\_\_ Programa de Precipitación Ácida de la ZMCM informe anual 1994 [Online]. Adobe Acrobat. México: Gobierno del Estado de México, Departamento del Distrito Federal, Secretaria del Medio Ambiente, 1995 [rev. 1995]. Anual. Disponible en internet: [http://www.sma.df.gob.mx/publicaciones/aire/inf\\_pre\\_acd\\_95/parte\\_3.pdf](http://www.sma.df.gob.mx/publicaciones/aire/inf_pre_acd_95/parte_3.pdf)

\_\_\_\_\_ Programa de Precipitación Ácida de la ZMCM informe anual 1998 [Online]. Adobe Acrobat. México: Gobierno del Estado de México, Departamento del Distrito Federal, Secretaria del Medio Ambiente, 1998 [rev. 1998]. Anual. Disponible en internet: < [http://www.sma.df.gob.mx/publicaciones/aire/inf\\_pre\\_acd\\_98/capitulo04.PDF](http://www.sma.df.gob.mx/publicaciones/aire/inf_pre_acd_98/capitulo04.PDF)>

DIRECCIÓN GENERAL DE GESTIÓN AMBIENTAL DEL AIRE. Informe Anual de la Calidad del Aire y Precipitación Ácida en el Valle de México 2000 [Online]. Acrobat Adobe. México: Gobierno del Estado de México, Departamento del Distrito Federal, Secretaria del Medio Ambiente, 2000 [rev. 2000]. Anual. Disponible en internet: <[http://www.sma.df.gob.mx/publicaciones/aire/aire\\_lluvia00/directorio.pdf](http://www.sma.df.gob.mx/publicaciones/aire/aire_lluvia00/directorio.pdf)>

\_\_\_\_\_ Informe del Estado de la Calidad del Aire y Tendencias 2001 para la ZMVM [Online]. Acrobat Adobe. México: Gobierno del Estado de México, Departamento del Distrito Federal, Secretaria del Medio Ambiente, 2001 [rev. 2001]. Anual. Disponible en internet: <[http://www.sma.df.gob.mx/publicaciones/aire/anual\\_aire2001/capitulo3.pdf](http://www.sma.df.gob.mx/publicaciones/aire/anual_aire2001/capitulo3.pdf)>



DOMENECH, X. Química Ambiental: El impacto de los residuos. Madrid: Miraguano Ediciones, 1993.

ECO-D. ARSÉNICO [Online]. Macintosh. México: Universidad Nacional Autónoma de México, 30 de Octubre de 2000 [2000]. Disponible en internet: <<http://www.jornada.unam.mx/2000/oct00/001030/eco-d.html>>

ELZO, M. A., G. Martínez, F. Gonzáles, y H. Huertas. Variabilidad y Predicciones Genéticas Para Características de Carne en el Rebaño Multirracial Sanmartinero-Cebú de La Libertad [Online]. Microsoft Word 9. Florida, USA: Animal Science Department, University of Florida, 2003 (rev. Julio de 2003). Disponible en internet: <<http://www.animal.ufl.edu/elzo/Publications%5CProceedings%5CSMCEBU-corrected.htm>>

EMPRESAS ASOCIADAS DEL CLOROSUR. El Cloro en la Naturaleza [Online]. Textinfo. Washington, D.C.: The Bivings Group, 28 de Febrero de 2002 [rev. Enero de 2002]. Disponible en internet: <<http://www.clorosur.com/espanhol/naturaleza.html>>

ESTELLANO, Washington. Después del Gasoducto Bolivia-Brasil [Online]. Microsoft FrontPage 2.0. Uruguay: Revista del Sur, Junio de 1999 [citado Mayo de 2001]. Mensual. Disponible en internet: <<http://www.revistadelsur.org.uy/revista092/Ambiente1.html>>

EXPOINDUSTRIA. Ciclo del Azufre [Online]. Textinfo. México: Expoindustria. 2001 [2001]. Disponible en internet: <<http://www.expoindustria.net/images/CicloAzufre.gif>>

\_\_\_\_\_ Ciclo del Nitrógeno [Online]. Textinfo. México: Expoindustria. 2001 [2001]. Disponible en internet: <<http://www.expoindustria.net/images/CicloNitrogeno.gif>>

FACULTAD DE INGENIERÍA. Lluvia ácida [Online]. Texinfo 2 el. (Cali, Colombia): Investigación, Jul. 2001 (Actualizado 13 de Agosto de 2001). Pontificia Universidad Javeriana – Seccional Cali. Web: <<http://atlas.ujavcali.edu.co/ftp/investigacion/conf-23-10-2000.doc>>

FELIX, C. Et al. Tratado de Química Mineral. Bogotá: Editorial Bedout, 1958. 452 p.

FIGUEROA C., A. & A. VALVERDE. Análisis del Aporte de Nutrientes por Precipitación y a Través del Follaje en un Ecosistema Altoandino. Universidad del Cauca, 2000. 11 p.

FUENTEALBA, Maximiliano. Lluvia Acida [Online]. Netscape. Chile: Akiraswars, 1999 [1999]. Disponible en Internet: <<http://www.geocities.com/Athens/Acropolis/5759/acida.html>>

GALLARDO TORRES, Alfredo y Lilia, GARCIA GALVAN. Lluvia Ácida [Online]. Adobe acrobat. México: Gobierno del Estado de México. Departamento del Distrito Federal. Secretaria del Medio Ambiente, Junio de 1999 [rev. 1994]. Disponible en internet. <[http://www.sma.df.gob.mx/publicaciones/aire/folleto\\_lluvia99/folleto.pdf](http://www.sma.df.gob.mx/publicaciones/aire/folleto_lluvia99/folleto.pdf)>

GLOBAL AIR POLLUTION. Tabla de datos de contaminantes con azufre [Online]. Mozilla/4.5 en Win95. España: Libro electrónico: Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, 2001 [rev. 1984 y 1988]. Disponible en internet: <<http://www1.ceit.es/asignaturas/ecologia/Hipertexto/10CAtm1/221DatComAz.htm>

\_\_\_\_\_ Tabla de datos de contaminantes con Nitrógeno [Online]. Mozilla/4.5 en Win95. España: Libro electrónico: Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, 2001 [rev. 1984 y 1988]. Disponible en internet: <[Http://www1.ceit.es/asignaturas/ecologia/Hipertexto/10CAtm1/231DatosCompN.htm](http://www1.ceit.es/asignaturas/ecologia/Hipertexto/10CAtm1/231DatosCompN.htm)

HENDRY, CH., C. BERISH & E. EDGERTON. Precipitation Chemistry at Turrialba, Costa Rica. En: Water Resource Research. Vol. 20, No. 11, 1984. p. 1677 – 1684

HENRY, J. Glynn., & HEINKE, Gary W. Ingeniería Ambiental. 2a ed. México: Prentice Hall, 1999. 778 p.

HERNANDEZ, R., FERNANDEZ, C. & P. BAPTISTA. Metodología de la Investigación. Colombia: McGrawHill, 1997. 505 p.

INFOAGRO. Atmósfera, contaminación y lluvia ácida [Online]. Microsoft FrontPage 4.0. España: Infoagro, 2001 [rev. 2001]. Disponible en internet: <[http://www.nortecastilla.es/canalagro/datos/agricultura\\_ecologica/lluvia\\_acida.htm](http://www.nortecastilla.es/canalagro/datos/agricultura_ecologica/lluvia_acida.htm)

INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, EL CENTRO DE PERCEPCIÓN REMOTA Y EL DEPARTAMENTO DE DESARROLLO ACADÉMICO DE SECICO. Curso Geografía del Mar: Propiedades del Agua de Mar [Online]. Text/html. Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile, 2001 [Rev. 2001]. Disponible en internet: <[http://www.puc.cl/sw\\_educ/geo\\_mar/html/h32.html](http://www.puc.cl/sw_educ/geo_mar/html/h32.html)>

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Condiciones e indicadores ambientales en Colombia, julio de 2002: Proyecciones en el corto, mediano y largo plazo [Online]. Adobe Acrobat. Bogotá, Colombia: IDEAM, 2002 [rev. 2002] Mensual. Disponible en internet: <<http://www.ideam.gov.co/informe/Info90/11%20-%2069.pdf>>

\_\_\_\_\_ Régimen anual de viento, Popayán [Online]. text/html; charset=windows-1252. Bogotá, Colombia: IDEAM, 2001 [rev. 2001]. Disponible en internet: <<http://www.ideam.gov.co/sectores/aero/climat/vienpopayan.htm>>  
INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTÍN CODAZZI. Métodos Analíticos de Cals. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2002.

INTERNATIONAL CO-OPERATION. Regional Air Pollution In Developing Countries (RAPIDC) [Online]. Text/javascript. Stockholm: Department of Biology, University of York, 2002 [Actualizado 02/03/2003]. Disponible en internet: <<http://www.york.ac.uk/inst/sei/rapidc2/latin/lamerica.html>>

JUNKERMANN, W.; DIETRICH, J.; WOLF, P.; WIEPRECHT, W.; SLEMR, J.; KOLTHOFF, G.; NIEßNER, R. Investigation of the vertical distribution of trace components in the lower troposphere using a cable car. En: Proc. EUROTRAC Sympos. Eds. P. Borell et al. Den Haag: Acad. Publ., S, 1994. p.1156-1161.

KAMMS PANIAGUA, Ligia. Fenómenos Atmosféricos [Online]. Adobe PageMill 2.0 Win. México: Universidad Nacional Autónoma de México, 11 de agosto de 2001 [Actualizado en Julio de 2001]. Disponible en internet: <<http://dgenp.unam.mx/chaac/paginas/lluvia.html>>

KELLMAN, M., J. HUDSON & K. SANMUGADAS. Temporal Variability in Atmospheric Nutrient Influx to a Tropical Ecosystem. En: Biotropica. Vol. 14, No.1, 1982. p. 1 - 9

LIKENS, S.E., F.H. BORMAN, R.S.PIERCE, S. EATON & N.M. JHONSON. Biochemistry of a Forested Ecosystem Springer. New York: Verlag, 1977.

MANAHAN, S., Fundamentals Of Environmental Chemistry. New York: Lewis Publisher, 1993. 840 p.

MARCANO, José. La Contaminación Atmosférica [Online]. Netscape. República Dominicana: República Dominicana, 17 de mayo de 2001 [Actualizado en Mayo de 2001]. Disponible en internet: <<http://jmarcano.com/recursos/contamin/catmosf.html>>

MÖLLER, D. Sulfate Aerosols and their Atmospheric Precursors. En: Aerosol Forcing of Climate, 1995. p. 73-90

MOREIRA-NORDEMANN, L. M., P. GIRARD & N. RÉ POPPI. Química da precipitação atmosférica na cidade de Campo Grande – MS. En: Rev. Bras. Geof. Vol.15, No.1. Marzo de 1997. p. 35-44. ISSN 0102-261X.

NOEL DE NEVERS, Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire. McGraw-Hill. Mexico. (1997); 546 p.

PARUNGO, F., C. NAGAMOTO, S. HOYT & H. BRAVO. The investigation of air quality and acid rain over the Gulf of México. En: Atmospheric Environment 24(A), 1990. p.109-123.

POPAYÁN. CORPORACIÓN AUTONOMA REGIONAL DEL CAUCA. SUBDIRECCIÓN DE GESTION AMBIENTAL RECURSO AIRE. Informe Subdirección de Gestión Ambiental Recurso Aire. Popayán: CRC, 2001.

RANJIT, KUMAR, et al. A Long Term Study on Chemical Composition of Rainwater at Dayalbagh, a Suburban Site of Semiarid Region. En: Journal of Atmospheric Chemistry. Vol. 41, 2002. p. 265–279.

RESTREPO, F. & L. VARGAS. Química Básica: Los Principios Fundamentales De La Química General. 5ª ed. Colombia: Editorial Bedout, 1951. 477 p.

ROCHA, C. & J. BITTENCOURT DE ANDRADE. Química atmosférica do enxofre (IV): Emissões, reações em fase aquosa e impacto ambiental. En: Química Nova. Vol. 25, No. 2, 2002. p. 259-272.

RODRIGUEZ, J & M, VILLA. Distribución Espacial De La Población, Urbanización Y Ciudades Intermedias: Hechos En Su Contexto. En: JORDAN, R. & D. SIMIONI. Ciudades Intermedias De América Latina Y El Caribe: Propuestas Para La Gestión Urbana. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Ministero degli Affari Esteri Cooperazione Italiana, 1998. p. 107 - 126

ROJAS CARVAJAL, Alpher. Economía política del riesgo: la incertidumbre fabricada [Online]. Textinfo. Colombia: Iniciativa Socialista. 2001 [2001]. Disponible en internet: <<http://www.inisoc.org/alpher2.htm>>

SÁNCHEZ, EFRAIN. Cauca [Online]. text/html; charset=windows-1252. Colombia: Museo del Oro, Banco de la República, 2011 [Rev. 2001]. Disponible en internet: <http://www.banrep.gov.co/museo/esp/expo/cauca.htm>

SANHUEZA, E. & M. SANTANA. Atmospheric wet deposition in Tropical America. En: Israel Journal Chemistry. No. 34, 1994. p. 327-334.

SERVICIO DE SALUD METROPOLITANA DEL AMBIENTE. Compuestos [Online]. Microsoft FrontPage 3.0. Santiago de Chile: Sesma, 2000 [rev. 2000]. Disponible en internet: <<http://www.sesma.cl/macam2rm/pag/p00mpccomp.htm>>

\_\_\_\_\_, N. GRATEROL & A. RONDÓN. Rainfall pH in the Venezuelan savannah. En: Tellus. Vol 39 (B), 1987. p. 329-332.

SPSS para Window [CD – ROM]. Release 7.5, Standard Version. Noviembre 14 de 1996. Copyright© SPSS Inc., 1989 – 1996.

STUMM, W. & J. J. MORGAN. Aquatic Chemistry: An Introduction Emphasizing Chemical Equilibria In Natural Waters. United States Of America: John Wiley & Sons, 1981. 780 p.

Torres, M. P. Aporte al Conocimiento de la Geología y la Estratigrafía de la Formación Popayán Departamento del Cauca. En: Novedades Colombianas. No. 7. Marzo, 1997. p. 4-28.

VIVAS, D. T. & E. MUÑOZ. Informe General Del Estado Actual De Los Recursos Naturales Y Del Medio Ambiente en el Municipio De Popayán. Contraloría Municipal de Popayán, 1999.

VENKLAAS, E. J. Nutrient Fluxes In Bulk Precipitation And Throughfall In Two Montane Tropical Rain Forests, Colombia. En: Journal Ecology. Vol. 78, 1990. p. 974-992

ZAMBRANO RAMÍREZ, Alex Roger. Lluvia Acida [Online]. text/html; ISO-8859-1. México: Monografías.com, 2001 [Rev. 2001]. Disponible en internet: <<http://www.monografias.com/trabajos5/lluac/lluac2.shtml>>

ZAMORA, H. Niveles de Alteración de las Comunidades de Macroinvertebrados Acuáticos del Río Molino por Efecto de las Actividades Antrópicas y la Contaminación Doméstica. En: Unicauca Ciencia. Vol. 3 (Sep. 1998); p. 35 – 59.

ZANETA POLKOWSKA, et al. Studies on Intercorrelation between Ions Co-Occurring in Precipitation in the Gdańsk-Sopot-Gdynia Tricity (Poland). En: Journal of Atmospheric Chemistry. Vol. 41. 2002. p. 239–264.

## ANEXOS

### ANEXO A. FICHA DE REGISTROS DE CAMPO

Ficha No.: \_\_\_\_\_

Punto de Muestreo	Cód. de Colector	Volumen de Captación (ml)	Anotaciones

**ANEXO B. FICHA DE REGISTRO EN LABORATORIO PARA LA  
DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS DEL AGUA  
DE LLUVIA EN LA CIUDAD DE POPAYÁN**

**Nombre del Análisis** \_\_\_\_\_  
**Sitio:** \_\_\_\_\_ **Fecha:** \_\_\_\_\_ **No.de Ficha:** \_\_\_\_\_

**Persona a cargo:** \_\_\_\_\_

Fecha	Código	pH	Conductividad ( $\mu$ S/cm)	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)

**ANEXO C. TABLA DE LOS DATOS DEL AGUA DE LLUVIA  
OBTENIDOS PARA LA CIUDAD DE POPAYÁN**

Sitio	Mes	Volumen (ml)	pH	Conductividad (µS/cm)	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)
1	1	1065	5,69	15,08	3,5	2,48
1	2	1063	4,29	20,2	3,5	8,38
1	3	-----	-----	-----	-----	-----
1	4	-----	-----	-----	-----	-----
1	5	-----	-----	-----	-----	-----
1	6	900	5,53	14,21	4,84	2,45
2	1	658	6,06	14,94	3,07	1,99
2	2	1313	4,04	16,91	2,48	11,83
2	3	1180	6,35	6,83	4,84	4,9
2	4	1950	5,95	7,11	5,09	5,57
2	5	1950	4,92	4,11	4,1	3,43
2	6	480	6,61	6,88	3,16	2,78
3	1	775	6	12,32	2,25	1,49
3	2	1320	3,74	65,7	3,07	23,66
3	3	1358	5,72	6,7	4,84	10,55
3	4	1950	5,07	20,52	1,51	12,32
3	5	1950	5	2,9	4,35	5,58
3	6	900	6,32	20,27	4,84	6,36
4	1	503	6,12	14,95	3,3	3,97
4	2	1619	3,96	34,8	2,67	12,82
4	3	1628	5,4	8,22	4,4	12,32
4	4	1950	5,14	3,9	4,35	5,4
4	5	1950	5,42	4,55	3,6	2,63
4	6	550	6,45	22,7	3,16	4,41
5	1	755	6,02	17	2,67	4,96
5	2	1513	3,68	75,1	2,25	15,04
5	3	1590	5,86	7,5	5,34	15,28
5	4	1950	5,76	7,43	5,34	4,82
5	5	1950	4,04	3,59	5,34	1,15
5	6	1000	5,88	8,37	5,34	2,61



**ANEXO C. CONTINUACIÓN DE LA TABLA DE LOS DATOS DEL  
AGUA DE LLUVIA OBTENIDOS PARA LA CIUDAD DE POPAYÁN**

Sitio	Mes	Volumen (ml)	pH	Conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ )	$\text{SO}_4^-$ (mg/L)	$\text{Cl}^-$ (mg/L)
6	1	698	6,19	30,1	3,93	2,98
6	2	1763	5,88	10,46	2,59	11,83
6	3	1613	5,74	7,35	5,84	7,39
6	4	1950	5,64	9,6	4,1	2,13
6	5	1950	5,17	2,8	4,35	5,74
6	6	800	6,39	17,57	7,32	2,78
7	1	565	5,71	7,92	2,48	3,47
7	2	1708	3,72	72,8	2,48	24,16
7	3	1560	6,23	13,71	3,16	4,93
7	4	1950	5,17	9,45	4,35	2,95
7	5	1950	4,88	2,85	4,6	1,97
7	6	1100	6,47	27,5	3,16	1,63
8	1	-----	-----	-----	-----	-----
8	2	1353	5,72	10,15	2,48	3,94
8	3	1950	5,57	6,03	4,84	9,37
8	4	1950	5,5	9,51	4,35	2,3
8	5	1950	5,05	4,1	4,35	3,44
8	6	500	6,23	21,1	4,4	1,72
9	1	568	5,56	18,82	3,07	3,47
9	2	1435	4,54	11,33	2,88	11,34
9	3	1533	5,89	8,87	4,84	6,41
9	4	1950	5,78	13,64	4,1	6,41
9	5	1950	4,7	5,35	6,08	2,13
9	6	600	6,17	4,17	3,16	1,88
10	1	933	5,54	11,05	1,07	2,48
10	2	1045	5,63	8,08	1,07	7,4
10	3	1545	5,8	4,53	4,84	5,87
10	4	1950	5,1	4,78	4,35	3,93
10	5	1950	4,31	7,35	4,1	6,23
10	6	1950	5,2675	5,25	5,1	3,19

**ANEXO D. PRUEBAS DE NORMALIDAD DE KOLMOGOROV – SMIRNOV  
Y SHAPIRO – WILK POR SITIOS DE MUESTREO**

**Pruebas de Normalidad**

SITIO	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk			
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.	
VOLUMEN	SN	,381	3	,			
	VV	,202	6	,200*	,883	6	,326
	HB	,208	6	,200*	,870	6	,275
	CJ	,314	6	,065	,770	6	,038
	NJP	,210	6	,200*	,883	6	,327
	BL	,271	6	,190	,790	6	,053
	BM	,231	6	,200*	,872	6	,284
	LA	,340	5	,060	,743	5	,038
	LE	,228	6	,200*	,822	6	,095
	LM	,294	6	,114	,779	6	,044
pH	SN	,347	3	,			
	VV	,285	6	,139	,883	6	,326
	HB	,203	6	,200*	,931	6	,531
	CJ	,209	6	,200*	,941	6	,617
	NJP	,367	6	,011	,732	6	,016
	BL	,159	6	,200*	,976	6	,916
	BM	,149	6	,200*	,946	6	,662
	LA	,202	5	,200*	,991	5	,982
	LE	,238	6	,200*	,871	6	,276
	LM	,206	6	,200*	,894	6	,370
Conductividad	SN	,336	3	,			
	VV	,342	6	,027	,824	6	,098
	HB	,349	6	,022	,785	6	,048
	CJ	,209	6	,200*	,887	6	,340
	NJP	,374	6	,009	,643	6	,010**
	BL	,269	6	,198	,903	6	,404
	BM	,297	6	,107	,767	6	,036
	LA	,302	5	,155	,880	5	,344
	LE	,154	6	,200*	,954	6	,726
	LM	,236	6	,200*	,883	6	,325
SO4=	SN	,385	3	,			
	VV	,226	6	,200*	,909	6	,429
	HB	,231	6	,200*	,869	6	,272
	CJ	,203	6	,200*	,911	6	,437
	NJP	,407	6	,002	,659	6	,010**
	BL	,248	6	,200*	,948	6	,681
	BM	,259	6	,200*	,843	6	,169
	LA	,414	5	,005	,781	5	,072
	LE	,254	6	,200*	,876	6	,299
	LM	,309	6	,075	,766	6	,035
Cl-	SN	,383	3	,			
	VV	,279	6	,158	,833	6	,126
	HB	,215	6	,200*	,922	6	,479
	CJ	,300	6	,097	,795	6	,059
	NJP	,313	6	,067	,797	6	,061
	BL	,249	6	,200*	,874	6	,289
	BM	,406	6	,003	,632	6	,010**
	LA	,328	5	,084	,823	5	,157
	LE	,209	6	,200*	,884	6	,331
	LM	,201	6	,200*	,927	6	,500

\*. This is a lower bound of the true significance.

\*\*. This is an upper bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

## ANEXO E. PRUEBAS DE NORMALIDAD DE KOLMOGOROV – SMIRNOV Y SHAPIRO – WILK POR PERÍODO DE MUESTREO

### Pruebas de Normalidad<sup>b,c</sup>

MES	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk			
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.	
Volumen	Sep	,169	9	,200*	,939	9	,541
	Oct	,142	10	,200*	,950	10	,637
	Nov	,244	9	,130	,906	9	,347
	Feb	,205	10	,200*	,811	10	,024
pH	Sep	,244	9	,130	,888	9	,255
	Oct	,206	10	,200*	,824	10	,035
	Nov	,211	9	,200*	,946	9	,623
	Dic	,244	9	,131	,883	9	,224
	Ene	,211	9	,200*	,939	9	,539
	Feb	,235	10	,126	,879	10	,156
Conductividad	Sep	,212	9	,200*	,866	9	,138
	Oct	,271	10	,035	,789	10	,013
	Nov	,220	9	,200*	,849	9	,083
	Dic	,274	9	,051	,880	9	,208
	Ene	,185	9	,200*	,867	9	,144
	Feb	,183	10	,200*	,931	10	,459
SO4=	Sep	,175	9	,200*	,939	9	,540
	Oct	,258	10	,058	,874	10	,130
	Nov	,316	9	,010	,834	9	,059
	Dic	,363	9	,001	,726	9	,010**
	Ene	,268	9	,061	,873	9	,175
	Feb	,230	10	,143	,855	10	,074
Cl-	Sep	,143	9	,200*	,977	9	,946
	Oct	,213	10	,200*	,901	10	,284
	Nov	,183	9	,200*	,912	9	,380
	Dic	,224	9	,200*	,829	9	,050
	Ene	,199	9	,200*	,912	9	,377
	Feb	,256	10	,063	,826	10	,037

\*. This is a lower bound of the true significance.

\*\*. This is an upper bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

b. VOLUMEN is constant when MES = 4. It has been omitted.

c. VOLUMEN is constant when MES = 5. It has been omitted.