



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE PARTÍCULAS  $PM_{2.5}$  Y  $PM_{10}$  POR  
CROMATOGRFÍA DE INTERCAMBIO IÓNICO EN JURQUILLA,  
QUERÉTARO**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**QUIMICO**

**PRESENTA**

**CARLOS PONCE GÓMEZ**



**CIUDAD DE MÉXICO**

**2018**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** María Rafaela Gutiérrez Lara  
**VOCAL:** María del Pilar Cañizares Macías  
**SECRETARIO:** Harry Alvarez Ospina  
**1er. SUPLENTE:** Patricia Díaz Arista  
**2° SUPLENTE:** Alejandro Gutiérrez Sánchez

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**FACULTAD DE CIENCIAS. EDIFICIO TLAHUIZCALPAN. TALLER DE METEOROLOGÍA**

**ASESOR DEL TEMA:**

---

Dr. Harry Alvarez Ospina

**SUSTENTANTE:**

---

Carlos Ponce Gómez

## Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Química por permitirme realizar mis estudios profesionales.

A la Facultad de Ciencias y al Centro de Ciencias de la Atmósfera, por permitirme realizar los análisis químicos en los que se basó este trabajo de tesis y por el conocimiento impartido.

Al programa UNAM-DGAPA-PAPIIT proyecto IA 107717 por el apoyo económico recibido para la realización de este trabajo.

A la M. en I. María Rafaela Gutiérrez Lara y a la Dra. María del Pilar Cañizares Macías por formar parte del jurado y por sus valiosos comentarios y observaciones durante la revisión de este trabajo.

Al ingeniero Alfredo Rodríguez Manjarrez y a la Química María Isabel Saavedra Rosado, por el gran apoyo técnico y conocimientos brindados durante el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Harry Alvarez Ospina por mostrarme la gran dedicación a su trabajo, compartir su conocimiento, el apoyo brindado, la enorme amistad y por su compromiso como profesional, docente e investigador.

---

**ÍNDICE**

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MARCO TEÓRICO .....	3
2.1 Aerosoles y su influencia en la atmósfera.....	3
2.2 Clasificación de los aerosoles .....	6
2.3 Efectos de los aerosoles .....	7
2.3.1 Efectos en la salud humana.....	7
2.3.2 Alteración del balance radiativo de la Tierra .....	9
2.3.3 Variación de la visibilidad.....	14
2.3.4 Deterioro de ecosistemas y edificaciones.....	16
2.4 Composición química de los aerosoles.....	18
2.4.1 Compuestos mayoritarios .....	19
2.4.2 Compuestos minoritarios .....	20
2.5 Análisis químico de los aerosoles .....	21
2.5.1 Cromatografía .....	21
2.5.1.1 Tipos de cromatografía .....	23
2.5.1.2 Cromatografía de líquidos.....	25
3. OBJETIVOS.....	31
3.1 Objetivo general .....	31
3.2 Objetivos Particulares .....	31
4. DISEÑO EXPERIMENTAL .....	32
4.1 Sitio de muestreo .....	32
4.2 Tratamiento de filtros .....	33
4.3 Impactador de cascada MiniVol .....	34

---

4.4	Análisis gravimétrico .....	35
4.5	Extracción de muestras.....	36
4.6	Condiciones Cromatográficas .....	37
4.7	Linealidad: Curvas de calibración .....	38
4.8	Precisión: Repetibilidad y reproducibilidad.....	39
4.9	Límites de detección y cuantificación.....	39
4.10	Cuantificación de iones inorgánicos solubles en agua.....	40
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	41
5.1	Análisis de partículas .....	41
5.2	Análisis de iones inorgánicos solubles en agua.....	44
5.2.1	Linealidad del sistema.....	44
5.2.2	Precisión .....	47
5.2.3	Límites de detección y cuantificación.....	49
5.2.4	Cuantificación de los iones mayoritarios .....	49
5.2.5	Distribución química de los iones inorgánicos solubles en agua.....	54
5.4	Balance iónico.....	56
5.5	Comparación con diferentes zonas de México.....	59
5.6	Rosas de viento .....	60
6.	CONCLUSIONES .....	67
7.	REFERENCIAS .....	69
7.1	Normas .....	69
7.2	Libros .....	69
7.3	Artículos .....	70
7.4	Páginas de internet .....	71

---

**ÍNDICE DE FIGURAS**

<b>Figura 1.</b> Incendio de vegetación en los Alpes en un día nublado.....	4
<b>Figura 2.</b> Evento de polvo sahariano en los Alpes.....	5
<b>Figura 3.</b> Fotografías de aerosoles atmosféricos depositadas sobre un filtro.....	5
<b>Figura 4.</b> Penetración del material particulado en el organismo .....	7
<b>Figura 5.</b> Vías que vinculan la exposición a PM y los efectos biológicos .....	9
<b>Figura 6.</b> Balance energético de la tierra promedio anual y global de la Tierra. ...	10
<b>Figura 7.</b> Marco conceptual de forzamiento climático, respuesta y retroalimentación en las condiciones climáticas actuales .....	12
<b>Figura 8.</b> Forzamiento radiativo estimado desde tiempos preindustriales para el sistema de la Tierra y la troposfera .....	13
<b>Figura 9.</b> El Cairo, Egipto.....	15
<b>Figura 10.</b> Piccadilly Circus, Londres, el 6 de diciembre de 1952, durante el Gran Smog.....	16
<b>Figura 11.</b> Cementerio de árboles de abetos en Polonia ocasionado por la lluvia ácida.....	17
<b>Figura 12.</b> Fotografía tomada en 1908 (izquierda) y tomada en 1968 (derecha)..	18
<b>Figura 13.</b> Representación esquemática de una separación cromatográfica .....	22
<b>Figura 14.</b> Principales tipos de cromatografía .....	24
<b>Figura 15.</b> Componentes del cromatógrafo de intercambio iónico.....	25
<b>Figura 16.</b> Ilustraciones esquemáticas a) una cromatografía de aniones con supresión iónica y b) una cromatografía de cationes con supresión iónica.....	28
<b>Figura 17.</b> Componentes del cromatógrafo Dionex, modelo ICS-1500 .....	29
<b>Figura 18.</b> Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación, UNAM.....	32
<b>Figura 19.</b> Tratamiento de filtros.....	33
<b>Figura 20.</b> MiniVol TAS, manual, batería y cabezales .....	34
<b>Figura 21.</b> Esquema de la impactación de las partículas .....	35
<b>Figura 22.</b> Proceso de extracción .....	36
<b>Figura 23.</b> Extracción de los iones inorgánicos .....	37

---

<b>Figura 24.</b> Concentración de PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> durante toda la campaña de medición .....	41
<b>Figura 25.</b> Concentración de PM <sub>2.5</sub> durante toda la campaña de medición .....	42
<b>Figura 26.</b> Concentración de PM <sub>10</sub> durante toda la campaña de medición.....	43
<b>Figura 27.</b> Relación entre PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> .....	44
<b>Figura 28.</b> Curva de calibración de cationes.....	45
<b>Figura 29.</b> Curva de calibración de aniones .....	46
<b>Figura 30.</b> Concentración de los cationes en PM <sub>10</sub> durante toda la campaña de muestreo .....	50
<b>Figura 31.</b> Concentración de los aniones en PM <sub>10</sub> durante toda la campaña de muestreo .....	50
<b>Figura 32.</b> Concentración del sulfato y amonio en PM <sub>10</sub> durante toda la campaña de muestreo .....	51
<b>Figura 33.</b> Concentración de los cationes en PM <sub>2.5</sub> durante cada día de la campaña de muestreo .....	52
<b>Figura 34.</b> Concentración de los aniones en PM <sub>2.5</sub> durante cada día de la campaña de muestreo .....	53
<b>Figura 35.</b> Concentración del sulfato y amonio en PM <sub>2.5</sub> durante toda la campaña de muestreo .....	53
<b>Figura 36.</b> Composición de las PM <sub>10</sub> totales de toda la campaña .....	54
<b>Figura 37.</b> Composición de las PM <sub>2.5</sub> totales de toda la campaña.....	55
<b>Figura 38.</b> Balance iónico entre los iones NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> y SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> durante la campaña .....,	57
<b>Figura 39.</b> Relación Amonio Total (AT)/ sulfato total (ST) durante la campaña....	58
<b>Figura 40.</b> Balance iónico entre NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> y la suma de los aniones SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> y NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> .....	59
<b>Figura 41.</b> Rosas de viento para los días de concentración mínima en PM <sub>10</sub> . ....	61
<b>Figura 42.</b> Rosas de viento para los días de concentración mínima en PM <sub>2.5</sub> .....	61
<b>Figura 43.</b> Rosas de viento para los días de concentración máxima en PM <sub>10</sub> .....	62
<b>Figura 44.</b> Rosas de viento para los días de concentración máxima en PM <sub>2.5</sub> .....	62
<b>Figura 45.</b> Rosa de vientos de vientos del sur .....	63
<b>Figura 46.</b> Rosa de vientos de vientos del norte.....	64
<b>Figura 47.</b> Composición de las PM <sub>10</sub> totales del norte y sur .....	65



**Figura 48.** Composición de las PM<sub>2.5</sub> totales del norte y sur. .... 65

**Figura 49.** Mapa de la zona con las direcciones de la rosa de vientos sobrepuesta  
.....66

---

**ÍNDICE DE TABLAS**

<b>Tabla 1.</b> Componentes mayoritarios y minoritarios de las partículas suspendidas. .....	19
<b>Tabla 2.</b> Condiciones cromatográficas utilizadas para analizar los aniones .....	37
<b>Tabla 3.</b> Condiciones cromatográficas utilizadas para analizar los cationes .....	38
<b>Tabla 4.</b> Resumen del análisis de la regresión lineal simple para la evaluación de la linealidad del sistema para cationes.....	46
<b>Tabla 5.</b> Resumen del análisis de la regresión lineal simple para la evaluación de la linealidad del sistema para aniones .....	47
<b>Tabla 6.</b> Datos experimentales para la evaluación de la precisión de cationes ....	48
<b>Tabla 7.</b> Datos experimentales para la evaluación de la precisión de aniones.....	48
<b>Tabla 8.</b> LD y LC para el sistema de aniones .....	49
<b>Tabla 9.</b> LD y LC para el sistema de cationes.....	49
<b>Tabla 10.</b> Comparación de mediciones en México. ....	60

## Lista de Abreviaturas

**ABC:** Área Bajo la Curva

**ADN:** Ácido desoxirribonucleico

**CFC:** Clorofluorocarbonos

**CV:** Enfermedades respiratorias cardiovasculares

**DER:** Desviación Estándar Relativa

**E:** Este

**ENE:** Este-noreste

**EPA:** Agencia de Protección Ambiental

**ESE:** Este-sureste

**HAP:** Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos

**HPLC:** Cromatografía de líquidos de alta eficacia

**IARC:** Centro Internacional de Investigaciones Sobre el Cáncer

**IC:** Intervalo de Confianza

**IPCC:** Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

**LC:** Límite de Cuantificación

**LD:** Límite de Detección

**N:** Norte

**NE:** Noreste

**NNE:** Norte-noreste

**NNW:** Norte-noroeste

**NW:** Noroeste

**OMS:** Organización Mundial de la Salud

**PM:** Partículas en suspensión

**PM<sub>10</sub>:** Partículas con diámetro aerodinámico de 10  $\mu\text{m}$

**PM<sub>2.5</sub>:** Partículas con diámetro aerodinámico de 2.5  $\mu\text{m}$

**PM<sub>0.1</sub>:** Partículas con diámetro aerodinámico de 0.1  $\mu\text{m}$

**PST:** Partículas Suspensas Totales

**PUF:** Partículas Ultrafinas

**S:** Sur

**SSE:** Sur-sureste

**SSW:** Sur-suroeste

**SW:** Suroeste

**VFC:** Variabilidad de la frecuencia cardiaca

**W:** Oeste

**WNW:** Oeste-noroeste

**WSW:** Oeste-suroeste

## RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se enfocó en determinar la calidad del aire en Juriquilla, Querétaro, la cual es una zona influenciada principalmente por fuentes antropogénicas como zonas agrícolas y parques industriales, estos últimos mostrando un crecimiento notorio en los últimos años. La evaluación se realizó mediante una campaña de muestreo entre el 9 y 30 de mayo de 2017 en Juriquilla (Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación), en donde se determinó la concentración de las partículas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , así como los iones inorgánicos solubles en agua presentes en dichos aerosoles.

La concentración promedio de  $PM_{2.5}$  fue de  $24 \mu\text{g m}^{-3}$  y de  $PM_{10}$   $35 \mu\text{g m}^{-3}$ , los cuales son valores que están por debajo de la Norma Oficial Mexicana (NOM-025-SSA-1-2014) que establece como límite permisible la concentración de 45 y  $75 \mu\text{g m}^{-3}$  para  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$ , respectivamente. En cuanto a los iones inorgánicos estos fueron analizados y cuantificados por cromatografía de intercambio iónico, los iones mayoritarios fueron el sulfato y el amonio para las  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , mientras que los iones minoritarios para las  $PM_{10}$  fueron el sodio, el potasio y el cloruro y para las  $PM_{2.5}$  fueron el sodio, el nitrato y el potasio.

Los resultados de la campaña permitieron determinar que la atmósfera de Juriquilla, Querétaro al ser comparados con otros sitios de la República Mexicana presenta menores concentraciones de casi todos los iones menos el amonio, el cual está asociado principalmente con procesos agrícolas, los cuales predominan cerca del sitio de muestreo.

# 1. INTRODUCCIÓN

Se denomina contaminación a la presencia en el ambiente de cualquier agente (físico, químico, biológico y/o forma de energía) que pueda provocar algún daño o desequilibrio en un ecosistema, medio físico o en un ser vivo. La contaminación atmosférica tuvo su impacto ambiental más notable durante la Revolución Industrial a mediados del siglo XIX, debido principalmente a las nuevas fuentes de emisión que provocaron la muerte de miles de personas, siendo el gran smog de Londres uno de los mayores sucesos.

Desde entonces, la contaminación atmosférica ha sido uno de los problemas ambientales más importantes tanto a nivel local como global y se define como la alteración de la composición natural de la atmósfera como consecuencia del aumento de contaminantes (aerosoles y/o partículas en suspensión) producto de procesos naturales y/o antropogénicos. Dentro de las fuentes que generan mayor contaminación de origen antropogénico están los procesos industriales, combustión doméstica e industrial y vehículos.

Los aerosoles engloban una gran variedad de compuestos químicos que presentan diferentes fuentes de emisión, vías de formación y características fisicoquímicas que afectan diferentes ámbitos, entre los cuales destacan la salud humana, el clima y los ecosistemas. En cuanto a los ecosistemas tenemos el efecto que provoca la lluvia ácida tales como las alteraciones ecológicas y la pérdida de la biodiversidad, otro ejemplo es la eutrofización que consiste en el exceso de nutrientes de nitrógeno en forma de amoníaco y óxidos de nitrógeno. Mientras que en la salud humana las partículas debido a su tamaño pueden causar grandes daños en los pulmones y afectar las corrientes sanguíneas, así como mutaciones permanentes en el ADN, ataques cardíacos y muerte prematura. Todo depende del tamaño de partícula y existe una clasificación general basada en el diámetro que a su vez se asocia con la zona que suelen dañar, afectar o en dónde se pueden acumular. A las partículas  $PM_{10}$ , se les conoce como fracción torácica y suelen

afectar las vías respiratorias, mientras que la fracción respirable  $PM_{2.5}$ , logra depositarse principalmente en los bronquios y bronquiolos. Finalmente, las partículas ultrafinas  $PM_{0.1}$ , pueden atravesar la barrera alveolo-capilar y llegar por la circulación sanguínea a otros órganos, como el corazón y el cerebro.

Dado los efectos mencionados, se han establecido normas y métodos de muestreo alrededor del mundo por diversas entidades como la organización mundial de la salud (OMS, por sus siglas en inglés), la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) y en México por la Secretaría de Salud, la cual ha establecido los valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en el aire ambiente y los criterios para su evaluación a través de la norma **NOM-025-SSA1-2014**.

A pesar de que el tamaño de partícula es importante y está regulado, es necesario conocer la composición química de éstas, con la finalidad de determinar el origen, los mecanismos de formación y los efectos que pueden ocasionar. Por ejemplo, la presencia de sodio, cloro, yodo, se asocia con partículas provenientes de la sal marina; aluminio y silicio con polvos terrestres y cobre, zinc, arsénico, selenio, cadmio, indio, antimonio, plomo y sulfato con partículas producidas por industrias de materiales no ferrosos. Por otro lado, la composición química es fundamental dado que en muchas ocasiones se puede determinar si hay presencia de compuestos como el plomo, cadmio, arsénico o mercurio, que son tóxicos y pueden causar varios efectos nocivos como anemia, daño en riñones, disminución en la fertilidad del hombre y disminución en las capacidades cognitivas de los niños. Dado la importancia de conocer la composición química de las partículas atmosféricas, este trabajo se enfocó en realizar un análisis de los iones inorgánicos solubles en agua presente en las partículas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en Juriquilla, la cual se encuentra ubicada al norte de la Ciudad de Santiago de Querétaro, dentro del municipio de Santa Rosa Jáuregui y que actualmente se encuentra en un constante crecimiento urbano y una fuerte influencia de contaminantes por parques industriales.

---

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Aerosoles y su influencia en la atmósfera

El clima es una propiedad estadística de las condiciones meteorológicas en un período determinado. Tal período debe ser lo suficientemente largo para que estas condiciones meteorológicas sean adecuadas, pero no demasiado largas para que se puedan detectar las variaciones climáticas naturales y antropogénicas, se considera que 30 años constituyen un período ideal para caracterizar el sistema climático. El estudio del sistema climático, también llamado climatología, por lo tanto, difiere de la meteorología, que se trata de las fluctuaciones a corto plazo de la atmósfera (Boucher, 2015). Sin embargo, tanto el clima como la meteorología se están viendo afectados y/o modificados por la presencia de partículas o aerosoles atmosféricos.

Los aerosoles atmosféricos, se definen como una suspensión de partículas sólidas o líquidas finas en un gas (atmósfera) a excepción de todos los hidrometeoros (gotas de nubes, cristales de hielo, gotas de lluvia, copos de nieve y granos de granizo). Los aerosoles forman una parte integral del sistema climático e interactúan con la atmósfera, la criósfera (un término que designa todas las formas de hielo en el planeta), la biosfera y el océano. También intervienen fuertemente en el ciclo del agua y en una serie de ciclos biogeoquímicos, por esta razón, se considera que los gases de efecto invernadero no son los únicos impulsores antropogénicos del cambio climático, sino que los aerosoles antropogénicos también contribuyen al calentamiento (Boucher, 2015).

Los aerosoles están siempre presentes en la atmósfera, pero en concentraciones extremadamente variables. Esto se debe a la gran heterogeneidad en las fuentes de aerosoles y su tiempo de residencia relativamente corto en la atmósfera (del orden de horas a semanas). La gran mayoría de los aerosoles no son visibles a simple vista debido a su tamaño microscópico, pero se puede ver fácilmente el efecto colectivo de los aerosoles en la atmósfera tan pronto como sus



concentraciones son lo suficientemente grandes. Por ejemplo, una neblina que reduce la visibilidad atmosférica y blanquea el cielo no es más que una colección de partículas de aerosol que interactúan con el vapor de agua y la radiación solar. Una columna de humo está compuesta de partículas microscópicas que provienen de la combustión incompleta de combustibles carbonaceos; estas partículas oscurecen colectivamente el cielo (Figura 1) apreciándose una coloración azul que contrastan con el color blanco de las nubes. El color azul se debe al pequeño tamaño de aerosol en la columna de humo y su mayor efectividad en la dispersión de la radiación en las longitudes de onda más cortas del espectro visible (Dispersión Rayleigh). Los aerosoles también pueden ser visibles cuando se depositan en gran cantidad en la superficie de la Tierra, como ocurre ocasionalmente con las partículas de polvo proveniente del Sahara que se depositan en la nieve tomando esta una coloración naranja (Figura 2).

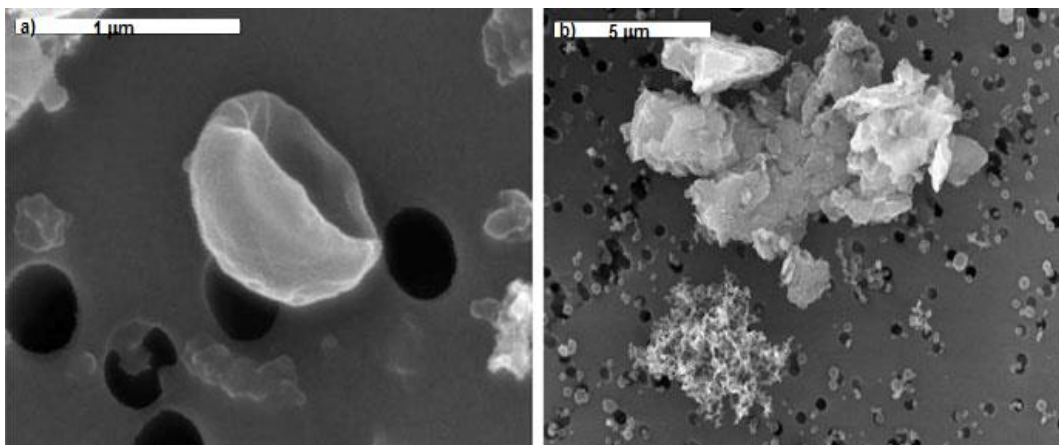


**Figura 1.** Incendio de vegetación en los Alpes en un día nublado (Boucher, 2015).



**Figura 2.** Evento de polvo sahariano en los Alpes (Boucher, 2015).

Dado el pequeño tamaño de los aerosoles atmosféricos, es posible visualizarlos con la ayuda de un microscopio de barrido electrónico, tal como se aprecia en la Figura 3 (Boucher, 2015).



**Figura 3.** Fotografías de aerosoles atmosféricos depositadas sobre un filtro: a) partículas vegetales y, b) partículas de hollín junto a un agregado mineral (Boucher, 2015).

## 2.2 Clasificación de los aerosoles

Los aerosoles se clasifican dependiendo su origen, de su fuente de emisión y de su tamaño. De acuerdo a su origen se clasifican en primarios y secundarios.

Los aerosoles primarios, son los que se emiten directamente a la atmósfera como partículas. Este es el caso de los aerosoles producidos por el efecto de la fricción del viento sobre una superficie oceánica o terrestre y los aerosoles producidos durante una combustión incompleta. Los aerosoles secundarios, designan aquellas partículas que no han sido emitidas directamente, sino que han experimentado una serie de transformaciones químicas antes de condensarse, denominadas precursores de aerosoles (Tomasi *et al.*, 2017).

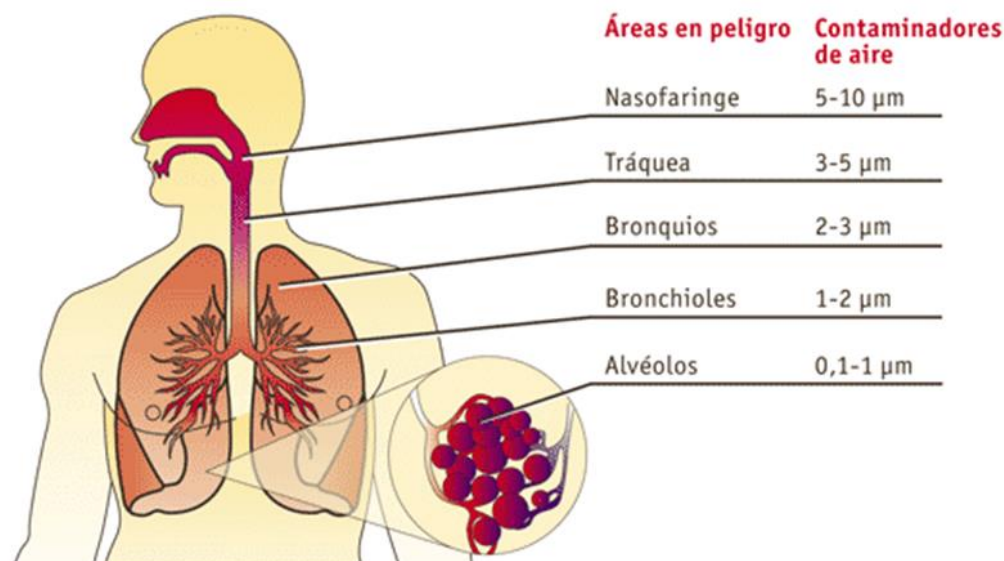
De acuerdo a su fuente se pueden clasificar en naturales (polvo transportado por el viento, rocío de mar, restos volcánicos, aerosoles biogénicos) y antropogénicos (sulfatos y nitratos de emisiones industriales, polvo mineral forzado por el viento movilizado en áreas explotadas para actividades agrícolas, combustión de combustibles fósiles, quema de residuos y biomasa).

Las partículas de aerosol varían en tamaño desde unos pocos nanómetros hasta varias decenas de micrómetros, sin embargo, dado su forma es difícil determinar su diámetro geométrico y poderlos clasificar, por esta razón, para fines práctico-comparativos se trabaja con el diámetro aerodinámico, que se define como el diámetro de una partícula esférica equivalente con una de densidad igual a  $1 \text{ g cm}^{-3}$  que tendría el mismo comportamiento aerodinámico en un flujo de aire (Baird, 2001). Teniendo en cuenta el diámetro aerodinámico los aerosoles se clasifican en partículas suspendidas totales (PST),  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  y  $\text{PM}_1$ . Las partículas suspendidas totales se definen como el conjunto de todas las partículas de cualquier tamaño, las  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$  están compuestas por partículas que tienen un diámetro aerodinámico medio inferior a 10 y 2.5  $\mu\text{m}$ , respectivamente y las  $\text{PM}_1$  tienen un diámetro inferior a 1  $\mu\text{m}$ .

## 2.3 Efectos de los aerosoles

### 2.3.1 Efectos en la salud humana

El destino final o el área a afectar de las partículas se asocian principalmente con el tamaño de ellas, la fracción torácica ( $PM_{10}$ ) es la que penetra en el árbol respiratorio superior (traquea y nariz), mientras que la fracción respirable ( $PM_{2.5}$ ) es la que llega hasta los pulmones y en ocasiones hasta los alvéolos y las  $PM_{0.1}$  pueden atravesar la barrera alveolo-capilar y llegar por la circulación sanguínea a otros órganos, como el corazón y el cerebro (Querol *et al.*, 2018) (Figura 4).



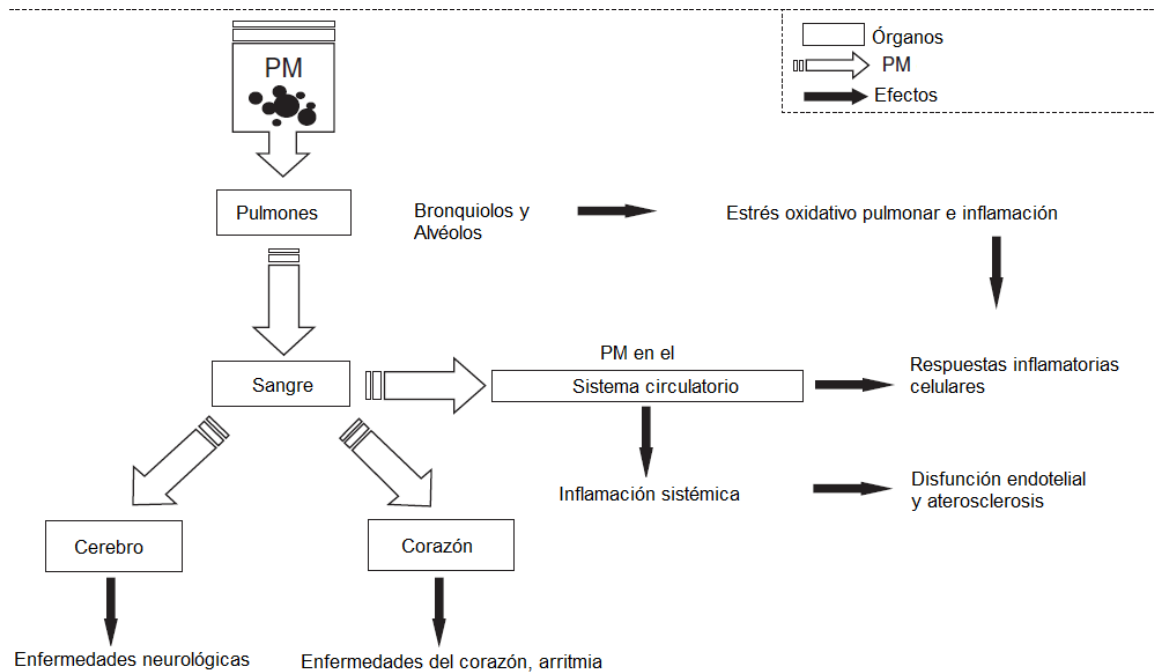
**Figura 4.** Penetración del material particulado en el organismo  
(<http://userscontent2.emaze.com/images/3cc513af-fe96-4c39-98ae-fe93fc3ec0f1/a934870c-0340-4f1b-b7f3-25f24e2ae9e4.png>).

Las actuales normas europeas y norte americanas de calidad del aire para la salud humana y la protección del medio ambiente para las PM están por encima de las Guías de Calidad del Aire de la Organización Mundial de la Salud que apuntan a proteger la salud pública. En el caso de México, la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, fue impuesta por la Secretaria de Salud Pública y establece como media anual  $40 \mu\text{g m}^{-3}$  para las  $PM_{10}$  y  $12 \mu\text{g m}^{-3}$  para las  $PM_{2.5}$ , valores que también están por encima de las propuestas por la OMS.

En las últimas décadas, se ha realizado un gran esfuerzo para estudiar los efectos adversos sobre la salud utilizando diferentes diseños y enfoques de investigación, incluidos grandes estudios epidemiológicos, experimentos con animales y ensayos toxicológicos *in vitro* para establecer mutagenicidad, citotoxicidad y reactividad del ADN (Ácido desoxirribonucleico) en relación con la composición química y el tamaño específico de las PM. Los puntos finales (enfoque) de salud a menudo están relacionados con la mortalidad (número de personas que fallecen) y la morbilidad (cantidad de personas que enferman), los ingresos hospitalarios por enfermedades respiratorias cardiovasculares (CV), la función pulmonar y la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC).

Algunos estudios proporcionan evidencia sobre el papel de los componentes de las PM y sus efectos adversos para la salud asociados, pero todavía falta un consenso dentro de la comunidad científica sobre cuáles componentes específicos son los determinantes de la respuesta toxicológica. Por esta razón, los estudios toxicológicos en animales y sistemas celulares deben analizarse más a fondo para descubrir los mecanismos finos de los efectos activados por las PM en los pulmones y otros órganos (Figura 5). De igual manera las PM o sus componentes pueden translocarse al sistema circulatorio e impactar sobre otros órganos como el corazón y el cerebro (Tomasi *et al.*, 2017).

La Organización Mundial de la Salud y el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés) el 17 de octubre de 2013 designaron las PM como un carcinógeno del grupo 1 (Grupo 1: carcinógeno para el ser humano). En 2013, un estudio con 312,944 personas en nueve países europeos reveló que no había un nivel seguro de PM y que por cada aumento de  $10 \mu\text{g m}^{-3}$  en  $\text{PM}_{10}$ , la tasa de cáncer de pulmón es del 22 %, mientras que las  $\text{PM}_{2.5}$  fueron particularmente mortal, con un aumento del 36 % en el cáncer de pulmón por cada  $10 \mu \text{gm}^{-3}$  inhalado, ya que puede penetrar más profundamente en los pulmones (Tomasi *et al.*, 2017).



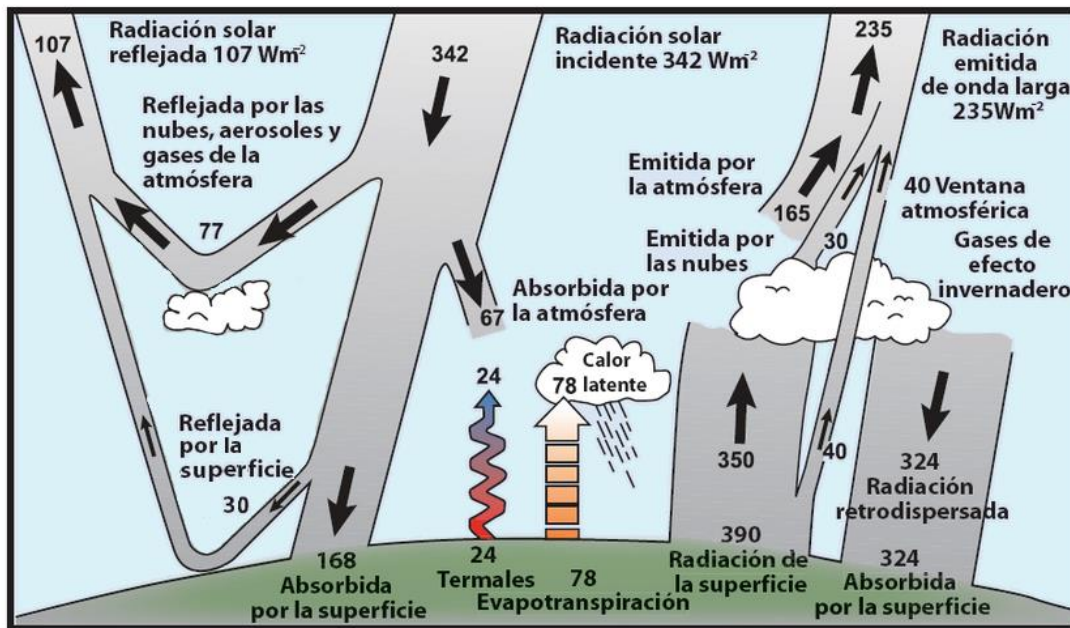
**Figura 5.** Vías que vinculan la exposición a PM y los efectos biológicos (Tomasi *et al.*, 2017).

### 2.3.2 Alteración del balance radiativo de la Tierra

El tiempo y el clima en la Tierra están determinados por la cantidad y distribución de la radiación proveniente del Sol, para un clima en equilibrio, la radiación de onda larga saliente debe ser igual a la radiación de onda corta entrante, aunque hay una gran cantidad de superficies que la pueden alterar (océano, criósfera, superficie terrestre). La energía radiante entrante puede ser dispersada y reflejada por otro tipo de interferencias como las nubes, los aerosoles o simplemente ser absorbida en la atmósfera. La energía radiante solar o de onda corta se transforma en calor sensible, calor latente (que involucra diferentes estados de agua), energía potencial y energía cinética antes de emitirse como energía radiante de onda larga. La energía puede almacenarse durante un tiempo, transportarse en diversas formas y convertirse entre los diferentes tipos, dando lugar a una rica variedad de fenómenos meteorológicos o turbulentos en la atmósfera y el océano. Trenberth y colaboradores revisaron las estimaciones anteriores del flujo medio global de energía a través del sistema climático y presentaron un nuevo balance energético mundial global basado en diversas mediciones y modelos. También,



realizaron una serie de cálculos radiativos para examinar las características espectrales de la radiación entrante, saliente y determinaron el papel de las nubes y diversos gases de efecto invernadero en los flujos de energía radiativa general. En la cima de la atmósfera, los valores se basaron en gran medida en las observaciones del experimento del balance radiativo (también llamado equilibrio térmico de la Tierra) tal como se aprecia en la figura 6 (Trenberth *et. al*, 2009), en donde la cantidad de radiación solar entrante absorbida por la Tierra y la atmósfera se transfiere a la atmósfera calentando el aire en contacto con la superficie (factores térmicos), mediante evapotranspiración y mediante radiación de onda larga, que es absorbida por las nubes y los gases de efecto invernadero. La atmósfera, a su vez, emite la energía de onda larga de regreso a la Tierra, así como al espacio.



**Figura 6.** Balance energético de la tierra promedio anual y global de la Tierra ([https://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/ru/figure-faq-1-1-figure-1.html](https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/ru/figure-faq-1-1-figure-1.html)).

Es útil introducir primero el paradigma habitual de forzamiento radiativo, retroalimentación climática y respuesta climática. Para este efecto, consideramos un sistema climático que se encuentra en un estado de equilibrio, con un balance radiativo equilibrado, para el cual la cantidad de energía radiante saliente (infrarroja) es igual a la cantidad de energía radiante entrante (solar). Este equilibrio solo se

realiza en promedio a lo largo de un período suficientemente largo (típicamente multidecenales) porque el sistema climático genera naturalmente una variabilidad interna que puede sacar al sistema del equilibrio radiativo en escalas de tiempo más cortas. En presencia de una perturbación radiativa, el sistema climático evoluciona hacia un nuevo equilibrio para el balance radiativo, pero también otros parámetros difieren de los del estado de equilibrio inicial. En realidad, el sistema climático nunca está estrictamente hablando en equilibrio porque hay una serie de perturbaciones externas que actúan sobre él en varias escalas de tiempo que van desde un año y menos hasta cien mil años y más. Algunas perturbaciones son naturales y pueden ser más o menos aleatorias, como la actividad volcánica, o exhiben algunos ciclos, como cambios en la actividad solar y cambios en los parámetros de la órbita de la Tierra alrededor del Sol.

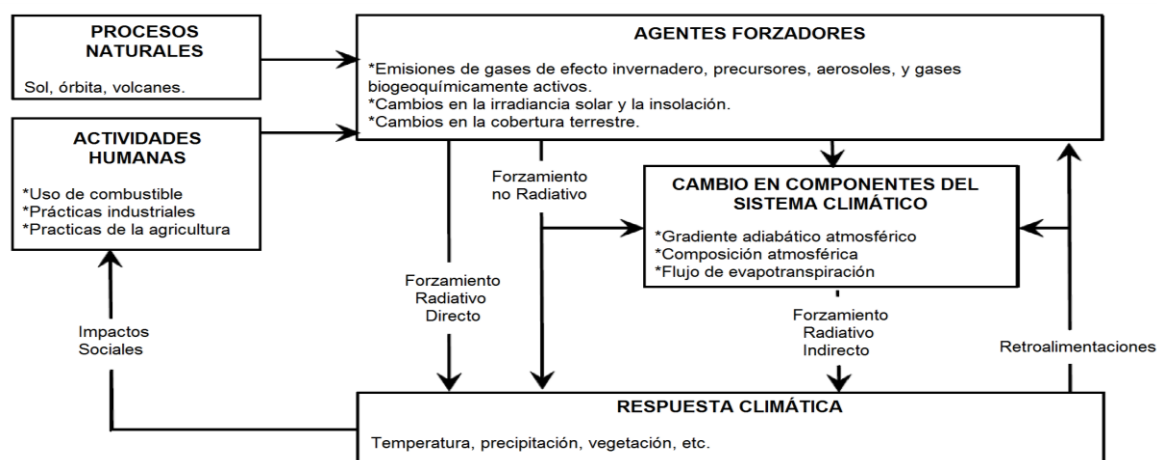
Todas estas perturbaciones actúan simultáneamente de modo que el clima está en evolución perpetua, como puede inferirse del cambio climático observado durante el período geológico y el pasado más reciente. Otras perturbaciones tienen un origen antropogénico, como las emisiones de gases de efecto invernadero de larga duración, aerosoles, precursores de aerosoles y cambios en el uso de la tierra. Las perturbaciones antropogénicas son ahora más importantes y más rápidas que las perturbaciones naturales y han dominado la evolución reciente del sistema climático (en los últimos 50 a 100 años).

Estas perturbaciones del sistema climático, también llamadas forzadores climáticos, a menudo son de origen radiativo y se pueden caracterizar a través de una cantidad llamada forzamiento radiativo. Un forzamiento radiativo, indicado como  $\Delta F$ , corresponde al desequilibrio radiativo (medido en  $W m^{-2}$ ) causado por una perturbación climática. A menudo se estima en la tropopausa, antes de que la superficie de la Tierra y la troposfera respondan a la perturbación radiativa (es decir, con propiedades superficiales fijas y perfiles verticales de temperatura, humedad y nubes), pero después del ajuste estratosférico del perfil de temperatura. El ajuste estratosférico se reconoció desde el principio como importante porque está esencialmente en equilibrio radiativo y está desacoplado de la troposfera. La



consideración del ajuste estratosférico hace que el forzamiento radiativo sea un mejor predictor del eventual cambio en la temperatura superficial. En la práctica, un forzamiento radiativo se diagnostica con una doble llamada al esquema de transferencia radiativa en un modelo atmosférico o climático con y sin la perturbación radiativa. La contabilidad del ajuste estratosférico requiere equilibrar la estratosfera antes de volver a calcular la perturbación radiativa. La diferencia en el flujo radiativo neto en la tropopausa (a veces aproximada en la parte superior de la atmósfera) corresponde a la definición tradicional del forzamiento radiativo (Boucher, 2015).

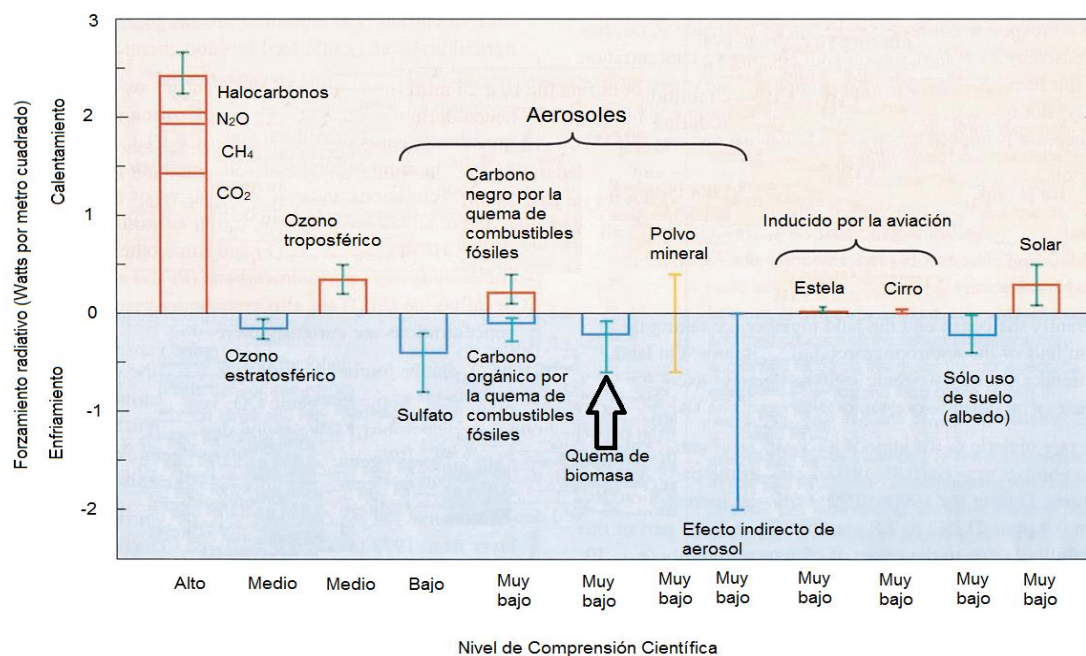
El sistema climático responde a una perturbación a través de una serie de mecanismos conocidos como retroalimentaciones climáticas. Se produce una retroalimentación a través de modificaciones de la superficie de la Tierra, la atmósfera, el océano y la criósfera que pueden amplificar (retroalimentación positiva) o atenuar (retroalimentación negativa) la perturbación inicial inducida por el forzamiento radiativo tal como se muestra en la figura 7, en la cual, las listas de cada recuadro se incluyen ejemplos de actividades humanas, agentes forzadores, componentes del sistema climático y variables que pueden estar involucradas en la respuesta climática (National Research Council, 2005).



**Figura 7.** Marco conceptual de forzamiento climático, respuesta y retroalimentación en las condiciones climáticas actuales (National Research Council, 2005).

La figura 8 muestra la magnitud de varios forzadores importantes según lo estimado en el informe de síntesis más reciente del Grupo Intergubernamental de

Expertos Sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), en donde se muestra el forzamiento radiativo estimado desde tiempos preindustriales para el sistema de la Tierra y la troposfera (forzamiento radiativo de la cima de la atmósfera con temperaturas estratosféricas ajustadas). La altura de la barra rectangular denota una estimación central o mejor del forzamiento, mientras que cada línea vertical es una estimación del rango de incertidumbre asociado con el forzamiento, guiada por la dispersión en el registro publicado y la comprensión física, y sin connotación estadística. Cada agente forzador está asociado con un nivel de comprensión científica, que se basa en una evaluación de la naturaleza de los supuestos involucrados, las incertidumbres que prevalecen sobre los procesos que rigen el forzamiento y la confianza resultante en los valores numéricos de la estimación. En el eje vertical, la dirección del cambio de temperatura superficial esperado debido a cada forzamiento radiativo se indica mediante las etiquetas "calentamiento" y "enfriamiento" (National Research Council, 2005).



**Figura 8.** Forzamiento radiativo estimado desde tiempos preindustriales para el sistema de la Tierra y la troposfera (National Research Council, 2005).

El mayor forzamiento positivo (calentamiento) en la figura 8 proviene del aumento de los gases de efecto invernadero bien mezclados (CO<sub>2</sub>, óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), metano (CH<sub>4</sub>) y clorofluorocarbonos (CFC) y asciende a 2.4 W m<sup>-2</sup> entre los

años 1750 y 2000. De los forzadores que se muestran en la figura 8, el impacto radiativo de los aerosoles es la mayor incertidumbre. El concepto de forzamiento radiativo se ha utilizado ampliamente en la literatura de investigación del clima en las últimas décadas y también se ha convertido en una herramienta estándar para el análisis de políticas respaldado por el IPCC. Para una amplia gama de forzadores, existe una relación casi lineal entre el forzamiento radiativo en la cima de atmósfera y la respuesta de equilibrio resultante de la temperatura superficial media global simulada en modelos de circulación general. Esto permite una comparación cuantitativa y conveniente de los efectos de diferentes forzamientos en el pasado y de varios escenarios posibles de forzamiento futuro. El forzamiento radiativo de la cima de la atmósfera es relativamente fácil de computar, generalmente robusto en todos los modelos, fácil de usar en aplicaciones de políticas, directamente observable desde el espacio, y también deducible de los cambios observados en el contenido de calor del océano. Proporciona una métrica extremadamente útil para la investigación y la política del cambio climático (National Research Council, 2005).

Parece que las interacciones aerosol-radiación y nube de aerosol causan un forzamiento radiativo negativo efectivo que es lo suficientemente grande como para compensar una fracción significativa del calentamiento esperado del efecto invernadero antropogénico. El forzamiento radiativo efectivo debido a los aerosoles también es mucho menos uniforme que el debido a los gases de efecto invernadero bien mezclados. Esto se debe a la heterogeneidad de las emisiones y, por lo tanto, a las concentraciones de los principales aerosoles antropogénicos primarios y precursores de aerosoles (National Research Council, 2005).

### **2.3.3 Variación de la visibilidad**

Como se mencionó al inicio, los aerosoles no son visibles a simple vista debido a su tamaño microscópico, pero pueden presentar efectos tan pronto sus concentraciones sean altas, un ejemplo de esto es la reducción de la visibilidad. La visibilidad es una cantidad subjetiva que se refiere a la claridad con la que se pueden

ver los objetos distantes. El aerosol atmosférico degrada la visibilidad como resultado de la dispersión y absorción de la luz por partículas de aerosol como se puede observar en la figura 9.



**Figura 9.** El Cairo, Egipto ([https://aerosol.ees.ufl.edu/atmos\\_aerosol/section09.html](https://aerosol.ees.ufl.edu/atmos_aerosol/section09.html)).

Otro ejemplo, es el "smog de Londres" o "smog sulfuroso" (Figura 10), en donde se observa la contaminación en Piccadilly Circus, Londres, el 6 de diciembre de 1952, durante el gran Smog, el cual se formó frecuentemente desde el siglo XIX hasta mediados del siglo XX en las regiones industrializadas. Este tipo de smog es una consecuencia de la gran cantidad de carbón que se quemaba en las ciudades o áreas industriales, el clima frío y la humedad. El smog de Londres se eliminó en gran medida durante el siglo XX por las estrategias de reducción de emisiones de humo. Sin embargo, eventos similares de contaminación del aire pueden ocurrir hoy en día en grandes ciudades durante la temporada de invierno debido a la gran emisión de material particulado, óxidos de nitrógeno y otros

contaminantes originados por el tráfico y la calefacción residencial combinados con un sistema de alta presión de larga duración (Boucher, 2015).



**Figura 10.** Piccadilly Circus, Londres, el 6 de diciembre de 1952, durante el Gran Smog (<https://www.thoughtco.com/the-great-smog-of-1952-1779346>).

### 2.3.4 Deterioro de ecosistemas y edificaciones

Otro efecto notable de los aerosoles está relacionado con la formación de la lluvia ácida, que es un término comúnmente usado para referirse a la depositación ácida. Durante este proceso, altas cantidades de ácidos fuertes (ácido nítrico y sulfúrico) y otras sustancias formadoras de ácido son eliminadas de la atmósfera hacia la superficie (Boucher, 2015). Los compuestos que contribuyen a la formación de la lluvia ácida se forman principalmente a partir de las emisiones gaseosas de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) afectando suelos, paisajes boscosos y ecosistemas acuáticos, un ejemplo de este efecto es el cementerio de árboles de abetos en Polonia (Figura 11).





**Figura 11.** Cementerio de árboles de abetos en Polonia ocasionado por la lluvia ácida (<https://www.nationalgeographic.com/environment/global-warming/acid-rain/>).

También se ha visto el efecto de la lluvia ácida en algunos edificios y monumentos históricos ya que ciertas construcciones están hechas con piedra caliza o mármol como lo son los monumentos mayas en México. La lluvia ácida ocasiona un proceso de neutralización con el carbonato de calcio de la roca caliza (Bravo *et al.*, 2003), sin embargo, estos daños también ocurren en otros países como es el caso de Alemania, en donde un monumento hecho de piedra arenisca que se encontraba sobre el portal de un castillo en Westfalia se ha ido destruyendo con el tiempo (Figura 12).



**Figura 12.** Fotografía tomada en 1908 (izquierda) y tomada en 1968 (derecha) (<https://acidraingermany.weebly.com/acid-rain-in-germany.html>).

## 2.4 Composición química de los aerosoles

La composición química de los aerosoles es muy diversa y depende principalmente de la fuente emisora y/o del mecanismo de formación. Por ejemplo, las partículas encontradas en una región costera estarán principalmente compuestas de cloruro de sodio proveniente de la sal presente en el mar, mientras que las partículas de origen geológico estarán formadas por óxidos de hierro, calcio, sílice y aluminio. En los procesos de combustión se emiten partículas de carbón, pero también materia inorgánica que proviene del contenido de mineral presente en los combustibles. Caso similar pasa con la mayoría de los procesos industriales, como las cementeras, donde las emisiones contienen compuestos inorgánicos, a menudo de composición similar a las materias primas o productos generados. Los aerosoles que provienen de fuentes móviles que usan gasolina presentan una mezcla de carbón orgánico, carbón elemental y pequeñas trazas de metales y sulfatos.

En vehículos que utilizan diésel como combustible, los aerosoles contienen principalmente carbón elemental (70 – 80 %), hidrocarburos pesados (12 – 23 %) y sulfatos (7 %). No obstante, las proporciones de estos compuestos varían de acuerdo con parámetros como la temperatura, los sistemas de inyección del combustible, el catalizador, entre otros. Es así que dependiendo del tipo de partículas y de su fuente de emisión se pueden encontrar tanto compuestos mayoritarios como minoritarios (Tabla 1).

**Tabla 1.** Componentes mayoritarios y minoritarios de las partículas suspendidas.

<b>Compuestos Mayoritarios</b>	<b>Compuestos Minoritarios</b>
✓ $\text{SO}_4^{2-}$	
✓ $\text{NO}_3^-$	✓ Elementos traza: metales, como Pb, Cd, Hg, Ni, Cr, Zn y Mg, etc.
✓ $\text{NH}_4^+$	
✓ $\text{Na}^+$ y $\text{Cl}^-$	✓ Compuestos orgánicos:
✓ Carbón elemental	hidrocarburos aromáticos
✓ Carbón orgánico o Aerosol orgánico secundario	policíclicos (HAP), alifáticos, aldehídos, ácidos carboxílicos y cetonas, entre otros.
✓ Componentes minerales o $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , Ca, Si y Al	

#### 2.4.1 Compuestos mayoritarios

Estos compuestos generalmente conforman la mayor parte de la masa de las partículas dentro de los cuales se encuentran:

- ❖ Sulfatos: Son principalmente componentes secundarios que se originan de la oxidación del  $\text{SO}_2$ , aunque pueden estar presentes como un componente primario derivado de la sal de los mares o de la materia mineral, como el yeso.
- ❖ Nitratos: La forma más común de los nitratos en las partículas suspendidas es como  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , compuesto que se deriva de la neutralización de vapores



de  $\text{HNO}_3$  por  $\text{NH}_3$ . También los nitratos pueden estar presentes como nitrato de sodio.

- ❖ Amonio: Los compuestos más comunes de amonio presentes en las partículas son el sulfato de amonio ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ) y el nitrato de amonio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ).
- ❖ Sodio y cloro: Principalmente se originan de la sal marina.
- ❖ Carbón elemental: Está constituido principalmente por carbón negro (hollín) formado durante la combustión de combustibles fósiles y biomasa.
- ❖ Carbón orgánico: Comprende los compuestos orgánicos, tanto primarios, derivados de fuentes móviles o industriales, como secundarios, resultado de la oxidación de compuestos orgánicos volátiles.
- ❖ Componentes minerales: Se originan del material de suelo y roca por procesos de la fuerza del viento, de construcción y demolición. Los suelos y las rocas son ricos en aluminio, sílice, hierro y calcio.

#### 2.4.2 Compuestos minoritarios

Estos compuestos pueden estar presentes adicionalmente a los compuestos mayoritarios en los aerosoles o formar parte de ellos. Los principales compuestos minoritarios son:

- ❖ Elementos traza: Metales, como plomo, cadmio, mercurio, níquel, cromo, zinc y manganeso, los cuales pueden ser emitidos por procesos metalúrgicos, sistemas de combustión, etc. Las concentraciones de los elementos traza son muy pequeñas, tanto que su detección es a menudo una función de la sensibilidad del procedimiento analítico utilizado.
- ❖ Compuestos orgánicos trazas: A pesar de que la masa total de los compuestos orgánicos puede conformar una parte significativa de la masa total de las partículas hay una importante cantidad de compuestos orgánicos individuales que están presentes en muy bajas concentraciones como los

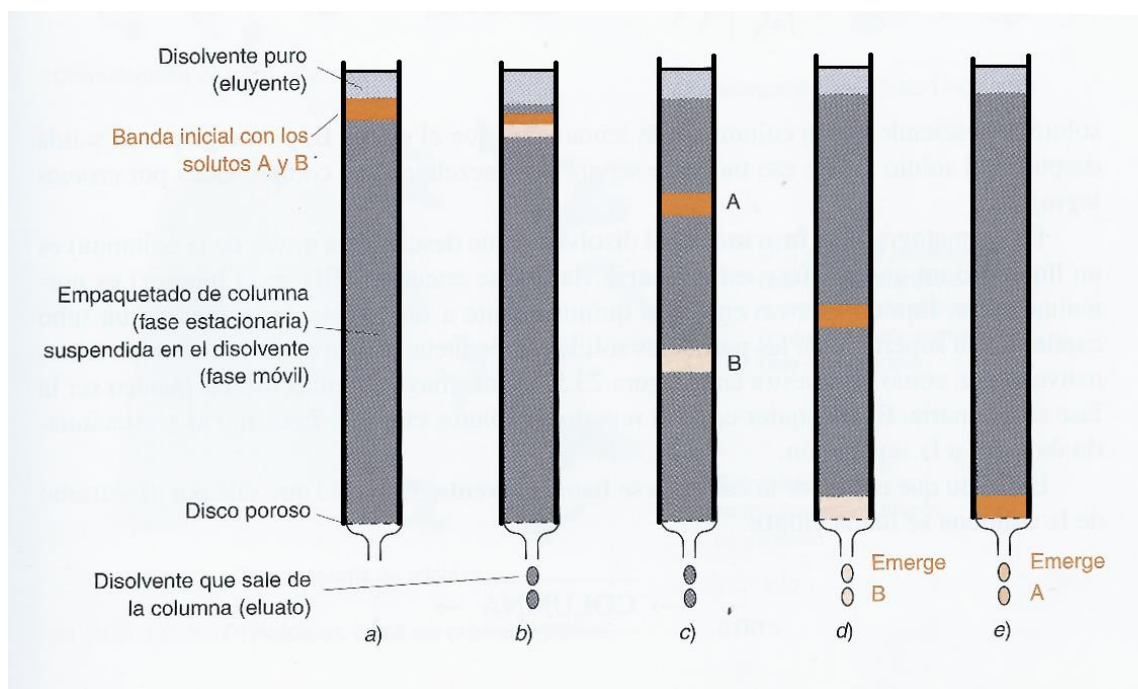
HAP y alifáticos, los aldehídos, los ácidos carboxílicos y las cetonas, entre otros (<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros /695/queson.pdf>).

## 2.5 Análisis químico de los aerosoles

La instrumentación para la caracterización de los aerosoles es diversa ya que pueden usarse impactadores en cascada para clasificar las partículas por su tamaño, contadores ópticos, espectrómetros para determinar su número y sus propiedades ópticas y microscopía electrónica de barrido para determinar su forma, tamaño, composición química y monitorear las posibles fuentes de las partículas (Aragon, 2011). Sin embargo, las técnicas analíticas son muy versátiles para la caracterización química de manera fácil y rápida, además que permiten determinar compuestos de tipo orgánica e inorgánico, dentro de estas técnicas se destacan las cromatográficas.

### 2.5.1 Cromatografía

La cromatografía funciona con el mismo principio que el de la extracción. Pero en este caso una fase se mantiene fija y la otra se mueve a través de ella. La figura 13, muestra una disolución que contiene los solutos A y B, que se depositan en la parte superior de una columna empaquetada con partículas sólidas y llena de disolvente. Cuando se abre la salida, los solutos A y B entran en la columna, a continuación, se añade nuevo disolvente por la entrada de la columna y la mezcla se eluye de la columna mediante un flujo continuo de disolvente. Si el soluto A se adsorbe más fuertemente que el soluto B en las partículas sólidas, el soluto A se encuentra libre en la disolución una fracción menor de tiempo. Es decir, el soluto A desciende por la columna más lentamente que el soluto B y emerge por la salida después del soluto B, de ese modo se separa una mezcla en sus componentes por cromatografía (Harris, 2012).



**Figura 13.** Representación esquemática de una separación cromatográfica (Harris, 2012).

En cromatografía la fase móvil (el disolvente que desciende a través de la columna) es un líquido o un gas. La fase estacionaria (la que se encuentra fija en el interior) es normalmente un líquido viscoso enlazado químicamente a las paredes interiores de un tubo capilar o a la superficie de las partículas sólidas empaquetadas dentro de la columna. Alternativamente, como se muestra en la figura 13, las mismas partículas sólidas pueden ser la fase estacionaria. En cualquier caso, el reparto de solutos entre las fases móvil y estacionaria da a la separación. El fluido que entra por la columna, se llama eluyente. El fluido que sale por el extremo de la columna se llama eluato.

El proceso de paso de un líquido o un gas a través de una columna cromatográfica se llama elución, cuando la fase móvil es un gas, se denomina cromatografía de gases, mientras que cuando la fase móvil es un líquido, se llama cromatografía de líquidos. Las columnas pueden ser empaquetadas o tubulares abiertas. Una columna empaquetada se llena con partículas que son la fase estacionaria (Figura 13), mientras que una columna de tubo abierto es un capilar

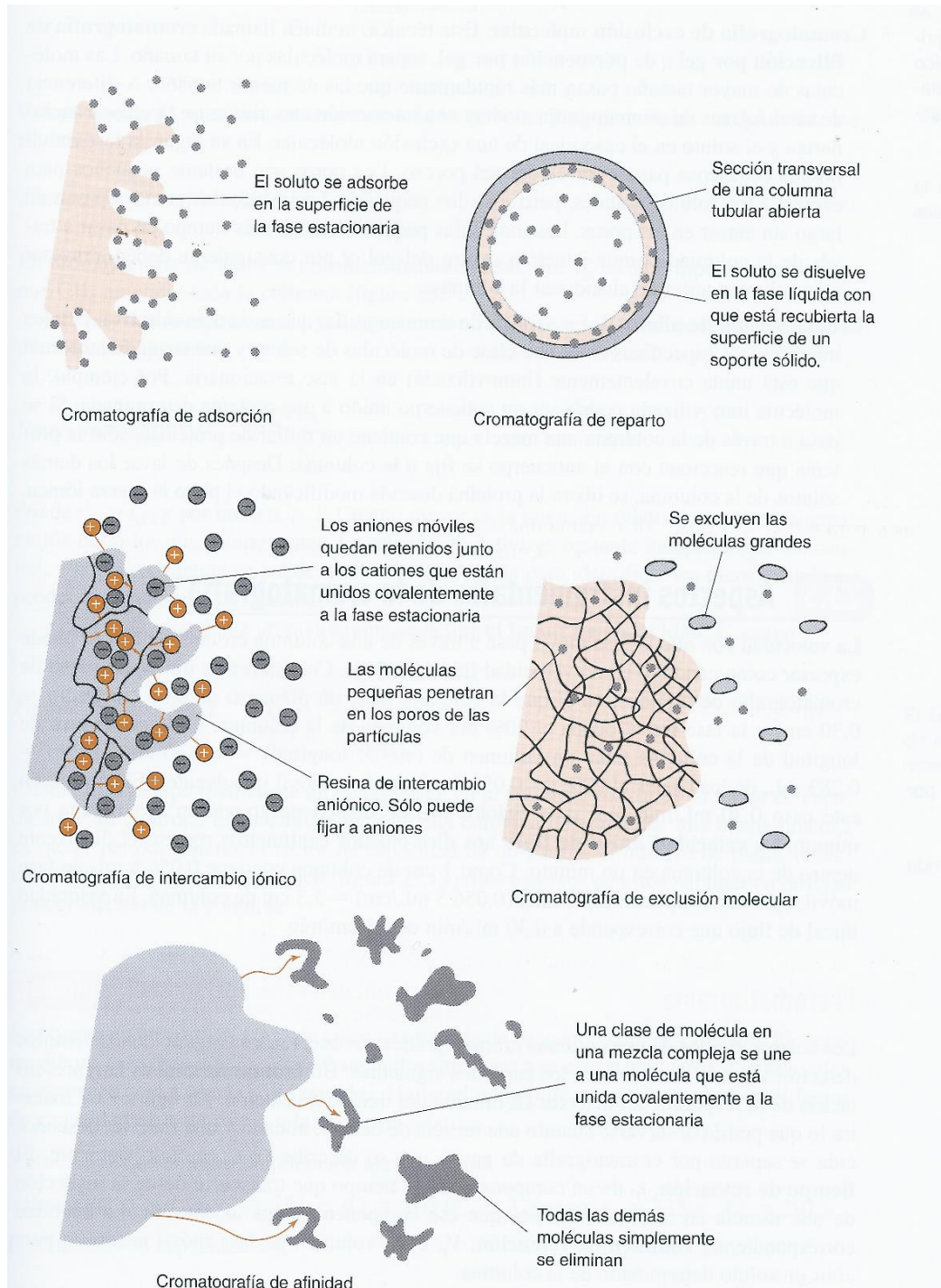
huevo estrecho cuyas paredes interiores están cubiertas con la fase estacionaria (Harris, 2012).

### 2.5.1.1 Tipos de cromatografía

La cromatografía se divide en varias categorías en función del mecanismo de interacción del soluto con la fase estacionaria, como se muestra en la figura 14.

- ❖ Cromatografía de adsorción: usa una fase estacionaria sólida y una fase móvil líquida o gaseosa. El soluto se adsorbe en la superficie de las partículas sólidas y cuanto más fuertemente se adsorbe un soluto, más lentamente atraviesa la columna.
- ❖ Cromatografía de reparto: utiliza una fase estacionaria líquida, en forma de una fina película de alto punto de ebullición sobre la superficie de un soporte sólido, que en cromatografía de gases es típicamente la cara interna de una columna de cromatografía de sílice. El soluto está en equilibrio entre el líquido estacionario y la fase móvil, que en cromatografía de gases es el gas que fluye.
- ❖ Cromatografía de intercambio iónico: Este tipo de cromatografía existen aniones como  $-\text{SO}_3^-$  o cationes como  $-\text{N}(\text{CH}_3)_3^+$  que son unidos covalentemente a la fase estacionaria sólida, que es ordinario de una resina. Los iones en disolución de carga opuesta son atraídos a la fase estacionaria por fuerzas electrostáticas.
- ❖ Cromatografía de exclusión molecular: Esta técnica, también llamada cromatografía de filtración por gel o permeación por gel, separa moléculas por su tamaño. Las moléculas de mayor tamaño pasan más rápidamente que las de menor tamaño. A diferencia de otras formas de cromatografía, no hay una interacción atractiva entre la “fase estacionaria” y el soluto.
- ❖ Cromatografía de afinidad: Esta cromatografía es la más selectiva, emplea interacciones específicas entre una clase de moléculas de soluto y una segunda molécula que está unida covalentemente (inmovilizada) en la fase estacionaria, por ejemplo, la molécula inmovilizada podría ser un anticuerpo unido a una proteína determinada. Si se pasa a través de la columna una

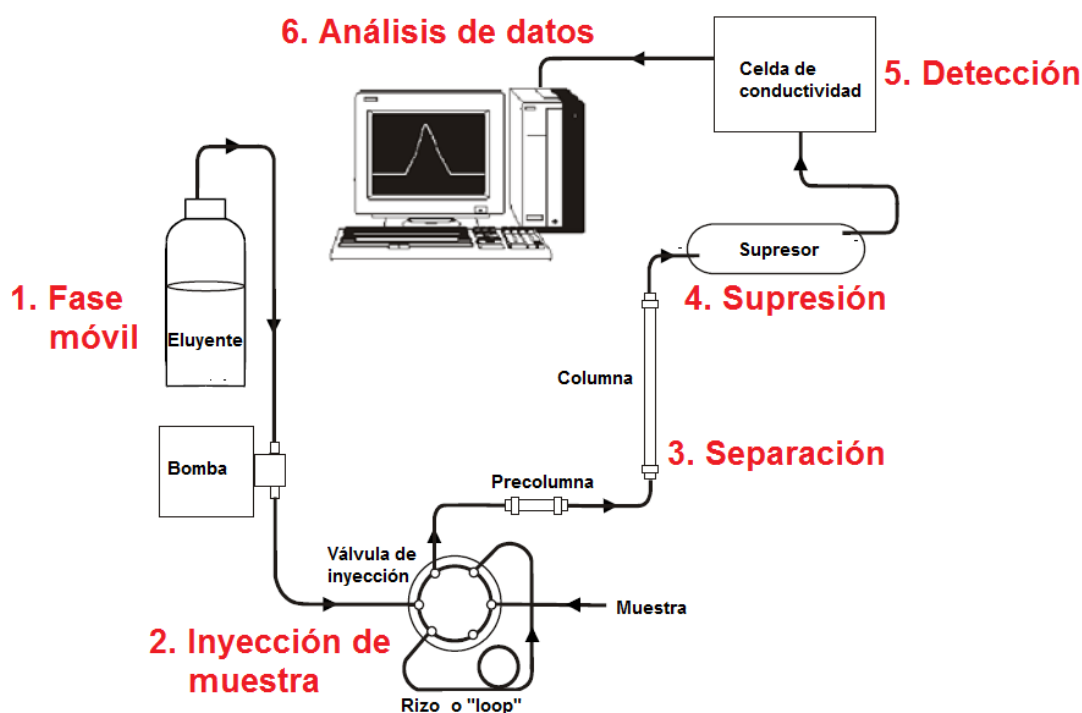
mezcla que contiene un millar de proteínas, solo la proteína que reacciona con el anticuerpo se fija a la columna y después de lavar los demás solutos de la columna, se libera la proteína deseada modificando el pH o la fuerza iónica (Harris, 2012).



**Figura 14.** Principales tipos de cromatografía (Harris, 2012).

### 2.5.1.2 Cromatografía de líquidos

La cromatografía de líquidos de alta eficacia (HPLC, por sus siglas en inglés) es importante dado que la mayoría de los compuestos no son volátiles para que se pueda usar la cromatografía de gases. En HPLC se utiliza una presión elevada para forzar al disolvente a pasar por una columna que contiene partículas muy finas, consiguiendo así separaciones de gran resolución. Las componentes de un cromatógrafo de líquidos de intercambio iónico se muestran en la figura 15, que consta de un sistema de suministro de disolvente, una válvula de inyección de muestra, una columna de alta presión, un supresor, un detector y un ordenador para controlar el equipo y visualizar los resultados (Harris, 2012).



**Figura 15.** Componentes del cromatógrafo de intercambio iónico (<https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/CMD/manuals/Man-031917-ICS-1500-Man031917-EN.pdf>).



A continuación se describen las principales piezas de un cromatógrafo.

- Fuente de fase móvil: El eluyente, un líquido que ayuda a separar los iones de la muestra, transporta la muestra a través del sistema de cromatografía iónica. El ICS-1500 usa un sistema isocrático, esto significa que la composición y la concentración del eluyente permanecen constantes durante todo el tiempo. Las bombas se encargan de proporcionar un flujo constante de fase móvil al sistema cromatográfico.
- Inyección de muestra: Consiste en un arreglo de acero inoxidable con seis orientaciones, que permiten la conexión del sistema de flujo, su nombre técnico es válvula de seis pasos. La válvula consta de un rizo o “loop”, el cual determina el volumen de inyección total, la muestra se inyecta de forma manual o automática.
- Separación: A medida que el eluyente y la muestra se bombean a través de la columna de separación, los iones de la muestra se separan. En el ICS-1500, el modo de separación se llama intercambio iónico, esto se basa en la premisa de que los diferentes iones de una muestra migran a través de la columna a diferentes velocidades, dependiendo de sus interacciones con los sitios de intercambio iónico.
- Supresión: Después de que el eluyente y los iones de muestra abandonan la columna, fluyen a través de un supresor que mejora selectivamente la detección de los iones de muestra mientras suprime la conductividad del eluyente.
- Detección: Una celda de conductividad mide la conductancia eléctrica de los iones de muestra a medida que emergen del supresor y produce una señal basada en una propiedad química o física del analito.
- Análisis de datos: La celda de conductividad transmite la señal a un sistema de recolección de datos, el sistema de recolección de datos (para el ICS-1500, este es Chromeleon) identifica los iones en función del tiempo de retención y cuantifica cada analito integrando el área del pico o la altura del pico. Los datos se cuantifican comparando los picos de muestra en un cromatograma con los producidos a partir de una solución estándar. Los

resultados se muestran como un cromatograma y las concentraciones de analitos iónicos se pueden determinar y tabular automáticamente.

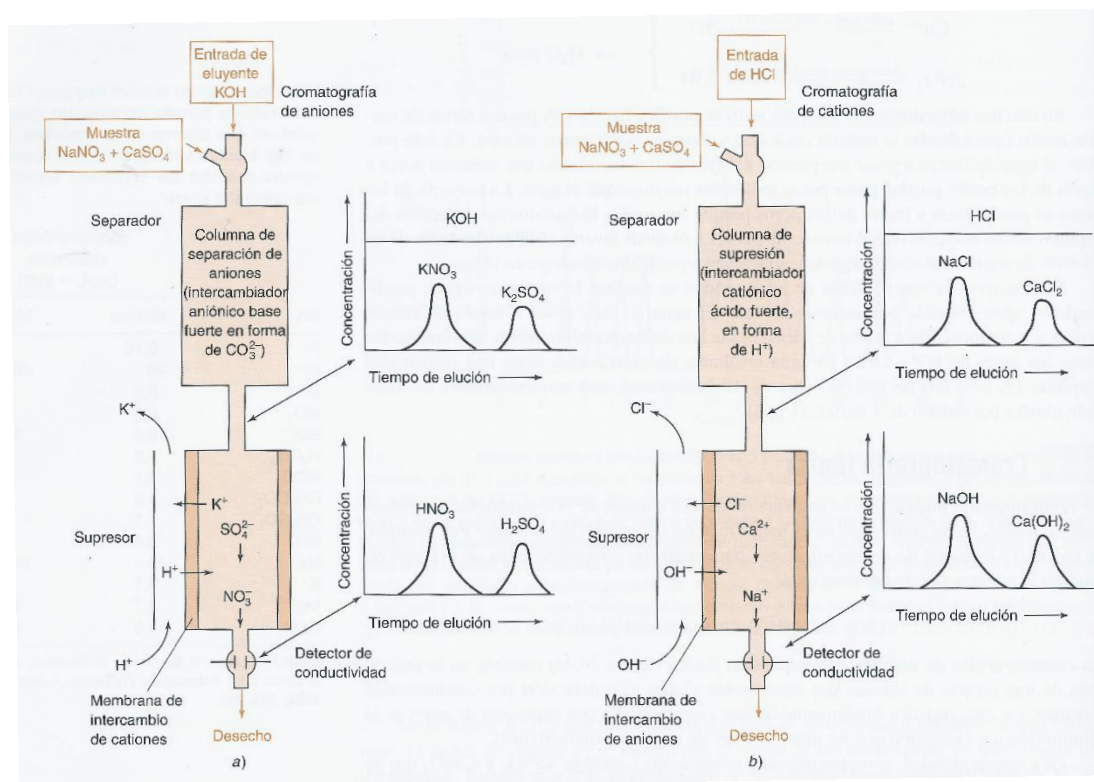
La cromatografía de aniones con supresión iónica (Figura 16) consiste en la separación de una mezcla de aniones por intercambio iónico y su detección por conductividad eléctrica. La característica fundamental de una cromatografía con supresión de iones es la eliminación de la señal de la fase móvil antes de medir la conductividad de los iones que nos interesan. Para mayor claridad, consideremos una muestra que contenga  $\text{NaNO}_3$  y  $\text{CaSO}_4$  que se hace pasar por una columna de separación (una columna de intercambio aniónico en la forma de carbonato) seguida de elución con  $\text{KOH}$ . El  $\text{NO}_3^-$  y el  $\text{SO}_4^{2-}$  se equilibran con la resina, y son desplazados lentamente por el  $\text{OH}^-$  del eluyente. Los cationes  $\text{Na}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$  no son retenidos y se eliminan simplemente por lavado. Después de un cierto tiempo se eluyen  $\text{KNO}_3$  y  $\text{KSO}_4$  de la columna de separación, como se muestra en el gráfico superior de la figura 16a.

Estas especies, sin embargo, no se pueden detectar fácilmente, porque el disolvente contiene una elevada concentración de  $\text{KOH}$ , cuya conductividad no deja ver la señal del analito. Para solucionar este problema, la disolución se hace pasar luego a través de una columna de supresión, en la cual los cationes son remplazados por  $\text{H}^+$ . El  $\text{K}^+$  es reemplazado por  $\text{H}^+$ , en este ejemplo, a través de una membrana de intercambio catiónico en el supresor. El  $\text{H}^+$  difunde desde la alta concentración que hay fuera de la membrana a la baja concentración que hay adentro de la membrana. El  $\text{K}^+$  difunde desde la alta concentración que hay dentro a la baja concentración que hay fuera. El resultado neto es que el eluyente  $\text{KOH}$ , que tiene una gran conductividad, se convierte en agua, que tiene baja conductividad. Cuando hay analito, se produce  $\text{HNO}_3$  y  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , que aumentan mucho la conductividad y son fácilmente detectados (Harris, 2012).

La cromatografía catiónica con supresión iónica se lleva a cabo de una manera análoga, pero el supresor sustituye el  $\text{Cl}^-$  que sale de la columna con  $\text{OH}^-$  a través de una membrana de intercambio aniónico. La figura 16b ilustra la separación de intercambio catiónico, emerge una disolución de  $\text{NaCl}$  y  $\text{CaCl}_2$ , mientras que de



la columna del supresor sale NaOH y  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , El eluato de HCl se convierte en agua. En sistemas muy automatizados, los  $\text{H}^+$  y  $\text{OH}^-$  eluyentes y supresores se generan electrolíticamente, sin intervención de un operario (Harris, 2012).



**Figura 16.** Ilustraciones esquemáticas a) una cromatografía de aniones con supresión iónica y b) una cromatografía de cationes con supresión iónica (Harris, 2012).

En la figura 17 se aprecian las principales piezas de un cromatógrafo de intercambio iónico de la marca Dionex, modelo ICS-1500, el cual consta de las siguientes partes:

- **Válvula eluyente:** La válvula eluyente controla el flujo de la fuente de fase móvil. La válvula de elución se abre automáticamente cuando se inicia la bomba y se cierra cuando se apaga la bomba.
- **Sensor de fuga:** El sensor de fugas está instalado en la bandeja de goteo en la parte inferior del panel de componentes. Si se acumula líquido en la bandeja, se registra un mensaje de error.

- Cabezales de bomba: El ICS-1500 incluye una bomba serial de doble pistón. El caudal puede ajustarse a entre 0.00 y 5.00 mL min<sup>-1</sup>.
- Transductor de presión: El transductor de presión mide la contrapresión del sistema.
- Válvula de inyección: La válvula de inyección es una válvula de seis puertos activada eléctricamente.

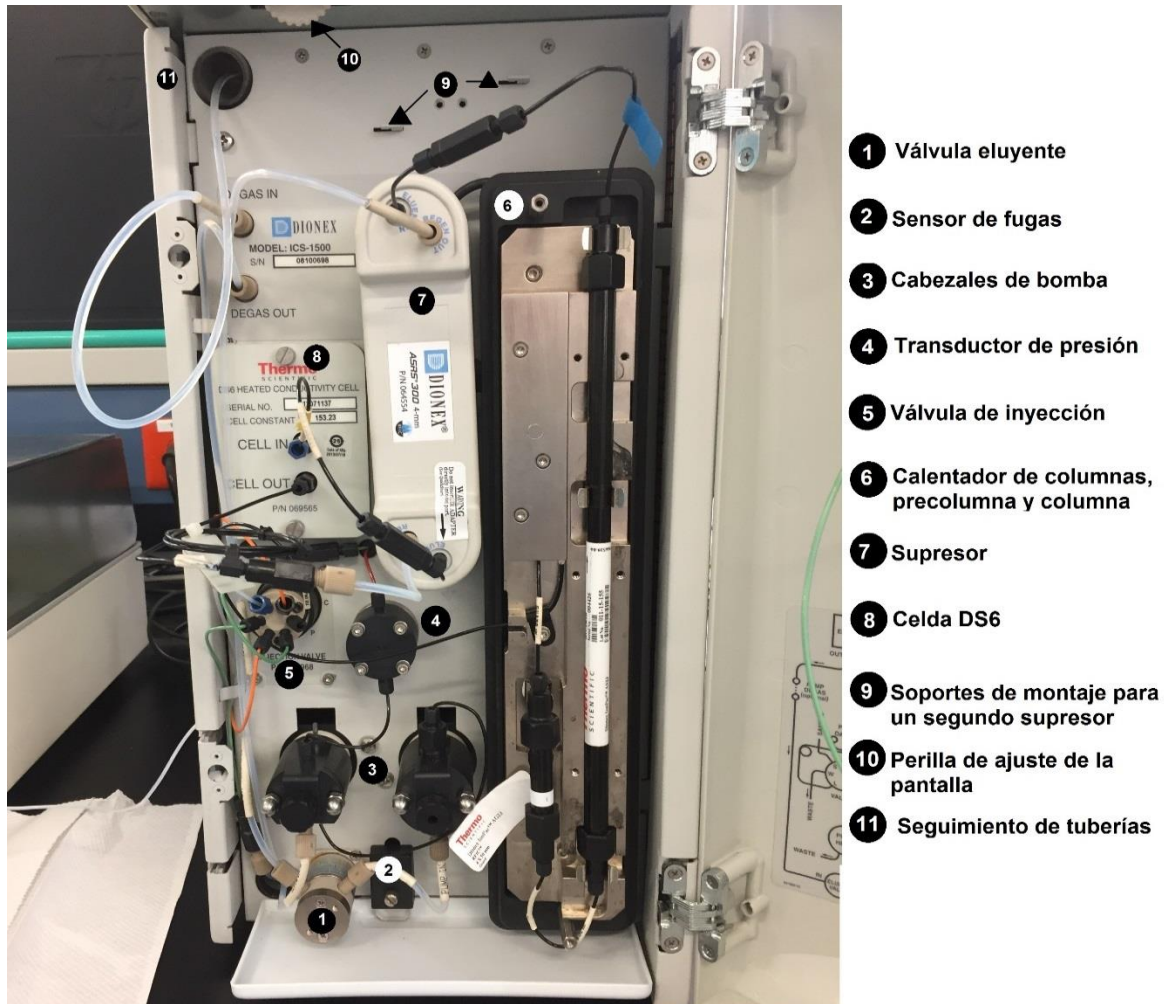


Figura 17. Componentes del cromatógrafo Dionex, modelo ICS-1500.

- Calentador de columnas, precolumna y columna: Tanto la precolumna como la columna separadora están empacadas con la misma resina y realizan la separación de los iones de muestra. La función principal de la precolumna es

atrapar los contaminantes y eliminar las partículas que podrían dañar la columna de separación.

- Calentador de columna: El calentador de columna controla la temperatura de la columna y precolumna. La temperatura puede ajustarse entre 30 y 60 °C.
- Supresor: El supresor reduce la conductividad del eluyente y mejora la conductividad de los iones de muestra, lo que aumenta la sensibilidad de detección.
- Celda de conductividad climatizada DS6: La celda de conductividad de flujo mide la conductancia eléctrica de los iones de analito a medida que pasan a través de la celda
- Seguimiento de tuberías: El seguimiento de la tubería que viene de la fuente de fase móvil.

## 3. OBJETIVOS

### 3.1 Objetivo general

Determinar la concentración de los iones inorgánicos mayoritarios presentes en la atmósfera de Juriquilla, Querétaro, con la finalidad de evaluar la calidad del aire y las posibles fuentes de emisión.

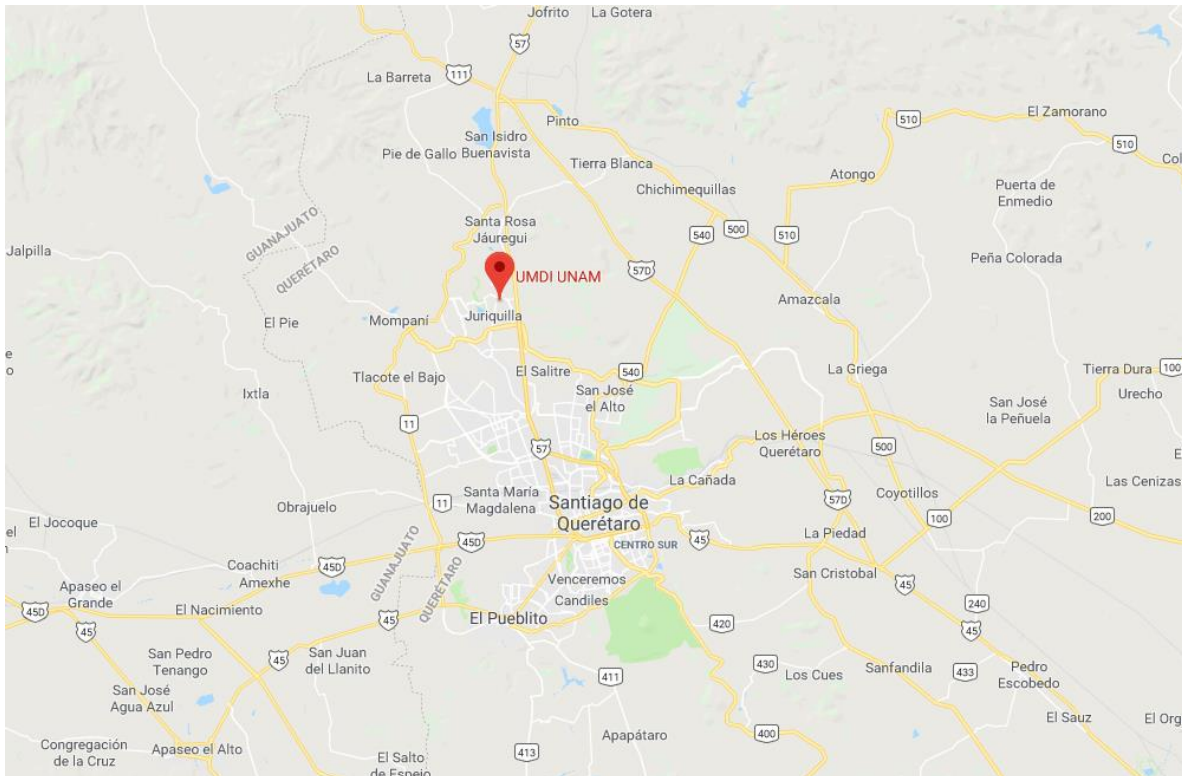
### 3.2 Objetivos Particulares

- ✓ Evaluar métodos analíticos por cromatografía de intercambio iónico.
- ✓ Determinar las concentraciones de los iones cloruro, nitrato, sulfato, sodio, amonio, potasio y magnesio por cromatografía de intercambio iónico.
- ✓ Realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos en Juriquilla contra diferentes ciudades de México con la finalidad de darnos una idea de la calidad del aire en nuestro sitio de muestreo.
- ✓ Identificar las fuentes responsables de los aerosoles atmosféricos.

## 4. DISEÑO EXPERIMENTAL

### 4.1 Sitio de muestreo

Durante el periodo comprendido del 9 al 30 de mayo de 2017, se realizó una campaña de medición de contaminantes atmosféricos en las inmediaciones del Campus Juriquilla (UNAM), el lugar específico donde se llevaron a cabo las mediciones fue en la Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación (UMDI) (Figura 18), el cual se encuentra al norte de la Ciudad de Santiago de Querétaro, en las coordenadas latitud  $20^{\circ}70'30''\text{N}$ , longitud  $100^{\circ}44'73''\text{W}$ , y a una altura sobre el nivel del mar de 1,945 metros. Este sitio de muestreo se caracteriza por estar rodeado de pocos edificios académicos y una amplia vegetación, aunado que cerca de este lugar hay pocas emisiones antropogénicas de contaminantes.



**Figura 18.** Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación, UNAM (Google Maps).

El clima del sitio de muestreo se caracteriza por ser una zona árida con temperaturas mínimas desde 5 °C y máximas medias entre 22 y 29 °C. En cuanto a su régimen pluviométrico el promedio anual oscila alrededor de los 5 milímetros, acumulando 574 milímetros promedio al año, siendo junio, julio, agosto y septiembre los meses con mayor volumen de precipitación (<https://es.climate-data.org/location/3364/>).

#### 4.2 Tratamiento de filtros

Para la recolección del material particulado se usaron filtros de teflón, dado sus características hidrofóbicas (Figura 19a). Estos filtros de teflón utilizados durante la campaña requirieron un tratamiento previo y un acondicionamiento adecuado para su uso óptimo desempeño. El tratamiento consistió en lavarlos con agua desionizada por ambos lados con la finalidad de remover algún contaminante que pudiera estar presente, después se realizó su secado en una campana de flujo laminar con aire limpio libre de partículas. Una vez secos los filtros, se colocaron en una cámara de acondicionamiento (Figura 19b) durante 24 horas a temperatura y humedad constante (T (°C) y HR %, respectivamente) para que posteriormente se pesaran y se colocaran en cajas petri, sellándolos con parafilm y etiquetándolos para su identificación (Figura 19c).



**Figura 19.** Tratamiento de filtros: a) Filtro de teflón, b) Cámara de acondicionamiento y, c) Etiquetado.



Una vez realizado el muestro, los filtros se introdujeron nuevamente a la cámara de acondicionamiento durante 24 horas y se pesaron.

### 4.3 Impactador de cascada MiniVol

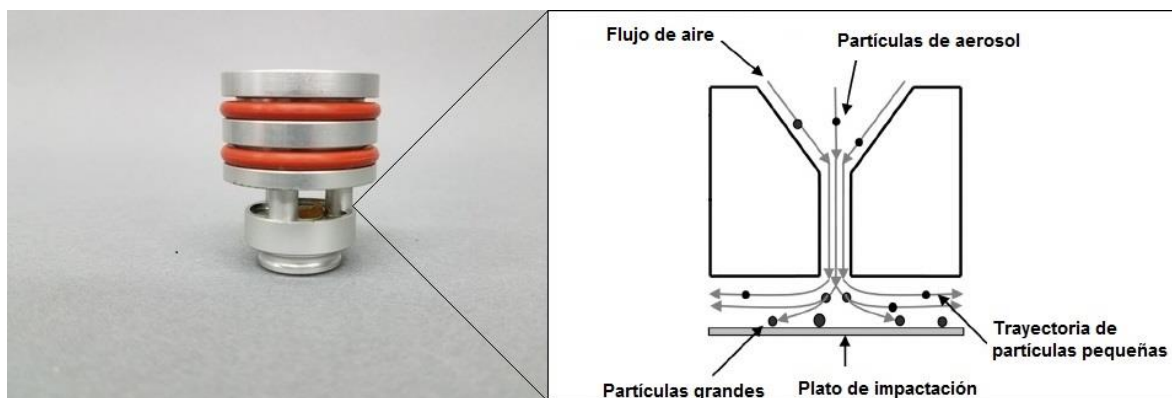
El miniVol TAS (Tactical Air Sampler, de la marca Airmetrics) es un equipo portátil (Figura 20) utilizado para recolectar muestras de  $PM_{2.5}$  o  $PM_{10}$ , pero solo un tipo a la vez. La bomba del MiniVol succiona aire a un flujo de  $5 \text{ L min}^{-1}$  que es obligado a pasar a través de un separador de tamaño de partícula (impactador) y luego a través de un filtro. La separación de partículas de 10 o 2.5 micras se logra mediante impactación.



**Figura 20.** MiniVol TAS, manual, batería y cabezales (<https://publiclab.org/wiki/minivol>).

La bomba de succión es controlada por un temporizador programable que puede configurarse para hacer ciclos de 24 horas o una semana. En el MiniVol, el

aire muestreado pasa por el cabezal, en el cual las partículas con alta inercia, es decir, las partículas mayores al tamaño a obtener impactan contra el plato de impactación ubicado en la parte inferior del fragmentador, mientras que las menores o iguales al tamaño a separar siguen las líneas de flujo y son depositadas sobre el filtro de teflón (Figura 21).



**Figura 21.** Esquema de la impactación de las partículas ([https://www.researchgate.net/figure/e-The-low-pressure-cascade-impactor-with-the-schematic-representation-of-a-stage-within\\_fig1\\_271732386](https://www.researchgate.net/figure/e-The-low-pressure-cascade-impactor-with-the-schematic-representation-of-a-stage-within_fig1_271732386)).

Es importante mencionar que fue necesario realizar una calibración antes del muestreo ya que de esta manera se aseguró un rendimiento óptimo y constante del separador inercial. Esta calibración se realizó bajo las condiciones ambientales del sitio de muestreo. Para la calibración se utilizó un calibrador de flujo Gilian Gilibrator 2 (Calibration System, de la marca Sensidyne). La tasa de flujo volumétrico usada fue de  $5.07 \text{ L min}^{-1}$  y  $4.99 \text{ L min}^{-1}$  para  $\text{PM}_{2.5}$  y  $\text{PM}_{10}$ , respectivamente. El MiniVol operó durante los 22 días de la campaña situada a una altura superior de la copa de los árboles y de los edificios de la zona, recolectando muestras en periodos de 23.85 horas.

#### 4.4 Análisis gravimétrico

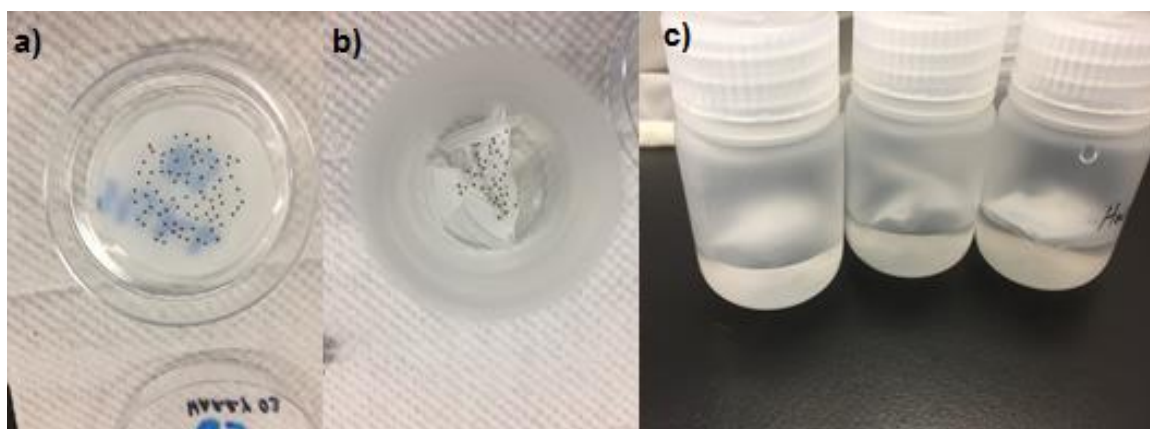
La concentración de las partículas colectadas [C] se determinó mediante un análisis gravimétrico a los filtros de teflón. Se consideró la diferencia de peso del filtro (antes y después del muestreo), el flujo de alimentación de aire y el tiempo de funcionamiento del equipo (Ecuación 1).



$$[C] = \frac{\text{Peso final del filtro} - \text{Peso inicial del filtro}}{\text{Flujo MiniVol} \times \text{Tiempo de funcionamiento MiniVol}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

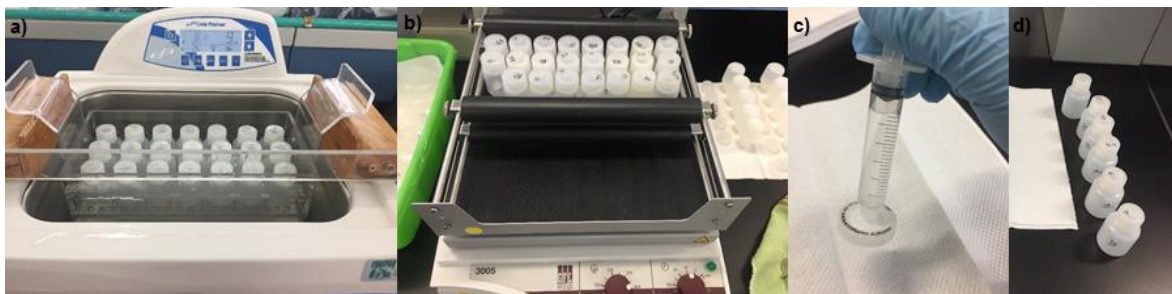
#### 4.5 Extracción de muestras

Los filtros con muestra de material particulado PM<sub>2.5</sub> o PM<sub>10</sub> (Figura 22a) después del acondicionamiento y su pesado, se sometieron al proceso de extracción. Proceso que consistió en cortar el anillo sin tocar el filtro para evitar contaminación, y colocarlos en frascos Nalgene de polietileno de alta densidad (HDPE, por sus siglas en inglés) de 30 mL (Figura 22b), adicionándoles 10 mL de agua desionizada (Figura 22c).



**Figura 22.** Proceso de extracción: a) Filtro, b) Filtro cortado y, c) frasco Nalgene con 10 mL de agua desionizada y el filtro a extraer.

Posteriormente, los frascos se colocaron en un baño ultrasónico (baño ultrasónico Cole-Parmer modelo CPXH) durante 1 hora (Figura 23a), a una temperatura no mayor de 27 °C, esto permitió que las partículas presentes en el filtro fueran fragmentadas y desadsorbidas, logrando así que la superficie de contacto fuera mayor y la extracción de los iones más eficiente. Al terminar, estos fueron colocados en un agitador orbital (Figura 23b) por 6 horas a 400 rpm (Agitador orbital GFL modelo 3005) para concluir el proceso de extracción. Finalmente, las muestras fueron filtradas con acrodiscos (Figura 23c) de 25 mm de diámetro y 0.2 µm de tamaño de poro (Acrodiscos de la marca PALL), para evitar que partículas pudieran quedar atrapadas en la columna empacada o en la tubería del cromatógrafo. Las muestras se almacenaron a - 4 °C.



**Figura 23.** Extracción de los iones inorgánicos: a) Baño ultrasónico, b) Agitador orbital, c) Acrodisco y d) Almacenamiento.

#### 4.6 Condiciones Cromatográficas

Una vez realizada la extracción, se realizó su análisis usando un cromatógrafo de intercambio iónico (Cromatógrafo dionex, modelo ICS-1500). Las condiciones de análisis para los aniones se muestran en la tabla 2.

**Tabla 2.** Condiciones cromatográficas utilizadas para analizar los aniones.

<b>Condiciones de análisis</b>	
<b>Columna</b>	Diodex IonPac AS23 (4 X 250 mm)
<b>Precolumna</b>	Dionex IonPac AG23(4 X 50 mm)
<b>Supresor</b>	ASRS 300 4mm
<b>Fase móvil</b>	Agua desionizada : Eluyente concentrado Dionex AS23 (99 : 1)
<b>Método</b>	Isocrático
<b>Flujo</b>	1 mL min <sup>-1</sup>
<b>Temperatura</b>	30 °C
<b>Detección</b>	Detector de conductividad a 40 mA
<b>Volumen de inyección (loop)</b>	500 µL
<b>Estándar</b>	Dionex Seven Anion Standard II
<b>Presión</b>	1120 psi

En el caso de los cationes, las condiciones cromatográficas se muestran en la tabla 3.

**Tabla 3.** Condiciones cromatográficas utilizadas para analizar los cationes.

<b>Condiciones de análisis</b>	
<b>Columna</b>	Dionex IonPac CS12A (4 X 250 mm)
<b>Precolumna</b>	Dionex IonPac CG12A (4 X 50 mm)
<b>Supresor</b>	CSRS 300, 4 mm
<b>Fase móvil</b>	Agua desionizada : Ácido metansulfónico, pureza > 99.0 % (99.3 : 0.7)
<b>Método</b>	Isocrático
<b>Flujo</b>	1 mL min <sup>-1</sup>
<b>Temperatura</b>	30 °C
<b>Detección</b>	Detector de conductividad a 50 mA.
<b>Volumen de inyección (loop)</b>	500 µL
<b>Estándar</b>	Dionex Six Cation Standard II
<b>Presión</b>	1046 psi

#### 4.7 Linealidad: Curvas de calibración

Se prepararon 3 curvas de calibración por duplicado (Concentración vs conductividad eléctrica) para evaluar la linealidad del sistema; se utilizaron siete niveles de concentración en un intervalo entre 0.051 – 8.160 mg L<sup>-1</sup> para Cl<sup>-</sup>, 0.049 – 7.912 mg L<sup>-1</sup> para NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 0.049 – 7.856 mg L<sup>-1</sup> para SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 0.016 – 1.608 mg L<sup>-1</sup> para Na<sup>+</sup>, 0.042 – 4.016 mg L<sup>-1</sup> para K<sup>+</sup> y 0.040 – 4.000 mg L<sup>-1</sup> para Ca<sup>2+</sup>. En el caso del amonio se prepararon 2 curvas de calibración, una para concentraciones bajas (0.020 – 0.500 mg L<sup>-1</sup>) y otra para concentraciones altas (0.500 – 4.000 mg L<sup>-1</sup>).

Estas concentraciones se prepararon a partir de los estándares Dionex Six Cation-II Standard (50 mg L<sup>-1</sup> para Li<sup>+</sup>, 200 mg L<sup>-1</sup> para Na<sup>+</sup>, 250 mg L<sup>-1</sup> para NH<sub>4</sub><sup>+</sup>,

500 mg L<sup>-1</sup> para K<sup>+</sup>, 250 mg L<sup>-1</sup> para Mg<sup>2+</sup> y 500 mg L<sup>-1</sup> para Ca<sup>2+</sup>) y Dionex Seven Anion Standard II (20 mg L<sup>-1</sup> para F<sup>-</sup>, 100 mg L<sup>-1</sup> para Cl<sup>-</sup>, 100 mg L<sup>-1</sup> para NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, 100 mg L<sup>-1</sup> para Br<sup>-</sup>, 100 mg L<sup>-1</sup> para NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 200 mg L<sup>-1</sup> para PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> y 100 mg L<sup>-1</sup> para SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>). Con los resultados obtenidos se graficó el área bajo la curva (ABC) correspondiente al pico de la referencia a cuantificar (Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>) con respecto a la concentración de cada disolución. El cálculo de la ordenada de origen ( $b_0$ ), la pendiente de la recta ( $b_1$ ), el coeficiente de correlación ( $r$ ) y el coeficiente de determinación ( $r^2$ ), se realizó mediante un análisis de regresión lineal simple. Los parámetros obtenidos se compararon con los siguientes criterios:  $b_0 \approx 0$ ;  $b_1 \neq 0$ ;  $r \geq 0.99$  y  $r^2 \geq 0.98$  (ICH, 2005).

#### 4.8 Precisión: Repetibilidad y reproducibilidad

La precisión del sistema o repetibilidad se estableció mediante el análisis de seis réplicas de una disolución de referencia. Los resultados obtenidos se expresan en desviación estándar relativa (DER), este parámetro de calidad establece que el sistema es preciso si la DER calculada es menor del 2 % (ICH, 2005).

Por otra parte, la reproducibilidad (precisión intermedia) se evaluó mediante el análisis por sextuplicado de una disolución de uno de los estándares preparados en dos días diferentes. Los resultados obtenidos bajo estas condiciones experimentales se analizaron mediante un ANOVA utilizando el estadístico de Fischer (F) y se expresan en términos DER (ICH, 2005).

#### 4.9 Límites de detección y cuantificación

El límite de detección (LD) de un método se refiere a la concentración mínima de analito en una muestra que puede ser detectada, pero no necesariamente cuantificada. El límite de cuantificación (LC) se define como la concentración mínima de analito que puede ser detectada y cuantificada con precisión y exactitud (ICH, 2005). La evaluación de los límites de detección y cuantificación se realizó mediante

la desviación estándar de cinco blancos y la pendiente de cada uno de los iones. Los parámetros estadísticos evaluados mediante un análisis de regresión lineal fueron:  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $r$  y  $r^2$ . Así, los LD y LC fueron determinados de acuerdo a las expresiones matemáticas que se indican a continuación (Ecuaciones 2 y 3):

$$LD = \frac{3.3x S_{b_0}}{b_1} \quad LC = \frac{10x S_{b_0}}{b_1} \quad (\text{Ecuaciones 2 y 3})$$

Dónde  $S_{b_0}$  es la desviación estándar de los blancos y  $b_1$  es el valor de la pendiente de cada sistema.

#### 4.10 Cuantificación de iones inorgánicos solubles en agua

La cuantificación de los principales iones presentes en las partículas atmosféricas recolectadas en Campus Juriquilla se realizó de la siguiente manera:

1. En primer lugar, se determinó la masa de cada uno de los iones a partir del volumen de extracción y de las curvas de calibración, utilizando la ecuación 4:

$$\text{Masa ion} = \left(\frac{y-b_0}{b_1}\right)(\text{vol. extracción}) \quad (\text{Ecuación 4})$$

La ecuación de la curva de calibración sigue la forma de  $y = b_1x + b_0$ ; donde  $y$  es la respuesta del cromatógrafo ( $\text{mS min}^{-1}$ ) y  $x$  es la concentración de cada ion de los analitos de interés ( $\text{mg L}^{-1}$ )

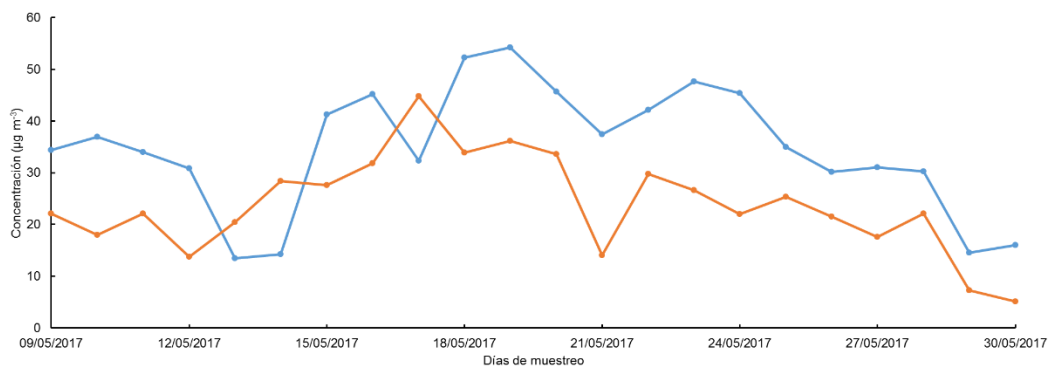
2. Una vez determinada la masa de cada uno de los iones, se calculó la concentración ambiental, utilizando la ecuación 5:

$$\text{Concentración} = \frac{\text{Masa ion}}{\text{Flujo MiniVol} \times \text{Tiempo de funcionamiento MiniVol} \times \text{Resolución MiniVol}} \quad (\text{Ecuación 5})$$

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 Análisis de partículas

Se determinó las concentraciones de las  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  utilizando los datos de volumen de muestreo, tiempo de funcionamiento del equipo y la masa de las partículas. Con los datos obtenidos se pudo observar la evolución de las concentraciones en los diferentes días de muestreo (Figura 24), en donde se aprecia una variación constante que va de mayor a menor concentración. También se pudo notar que los días 13 y 27 de mayo fueron sábados, y los días 14 y 28 fueron domingos, dichos días registraron un ligero aumento en la emisión de partículas atmosféricas, caso contrario sucedió los días 20 y 21 de mayo en donde ocurrió una disminución el día domingo.

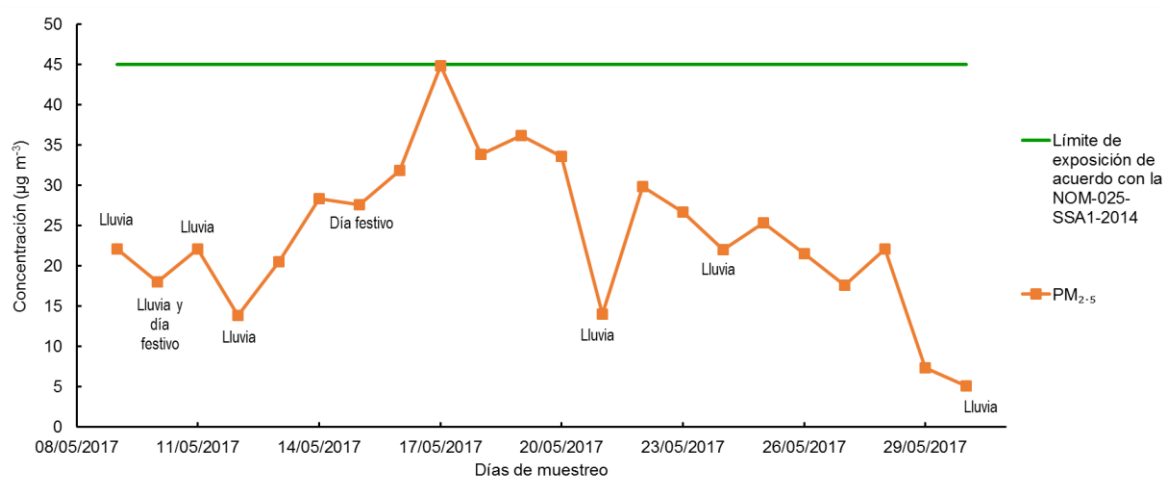


**Figura 24.** Concentración de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  durante toda la campaña de medición.

Con el objetivo de conocer si durante toda la campaña de medición se sobrepasó la norma oficial NOM-025-SSA1-2014 que establece los límites permisibles de exposición diaria y anual para las  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , se realizó un análisis para cada tamaño de partícula (Figuras 25 y 26). En el caso de las  $PM_{2.5}$  el límite de concentración de exposición es de  $45 \mu\text{g m}^{-3}$  y se representa con la línea verde

(Figura 25) de lo cual se puede apreciar que solo el 17 de mayo se alcanzó este valor, los demás días estuvieron por debajo de la norma.

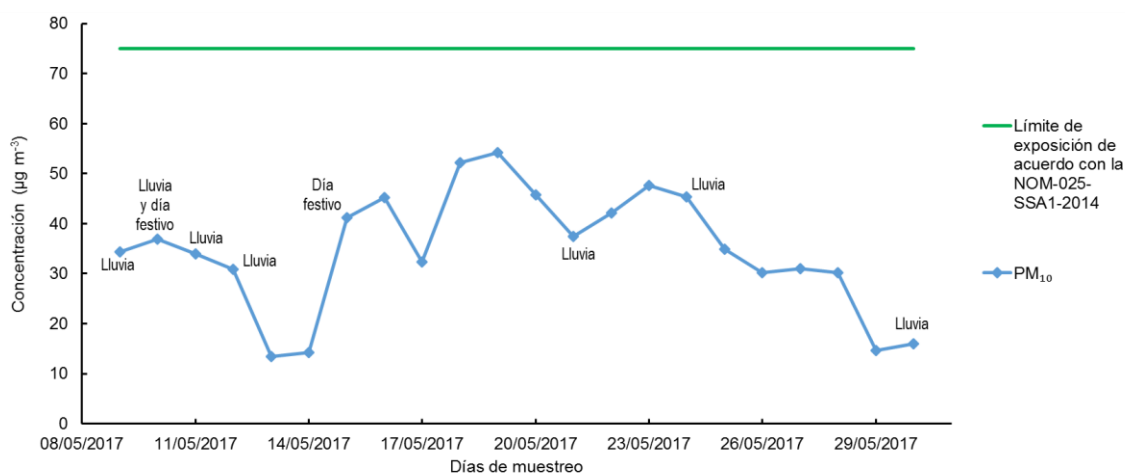
Por otro lado, se observó que durante los días festivos las concentraciones disminuyeron lo cual nos hace pensar en una disminución en el flujo vehicular. Durante los días 12, 21 y 30 de mayo se determinaron las concentraciones más bajas las cuales coinciden con eventos de precipitación, mientras que para los días 14, 17 y 22 de mayo tenemos los máximos de concentración de partículas de este tamaño. Los días 11 y 24 de mayo a pesar de presentar lluvias, estas no fueron lo suficientemente intensas y duraderas para causar una notable disminución en la concentración de las  $PM_{2.5}$  (Figura 25).



**Figura 25.** Concentración de  $PM_{2.5}$  durante toda la campaña de medición.

En el caso de las  $PM_{10}$ , en los días 13, 14 y 29 se determinaron las concentraciones mínimas, mientras que los días 16, 19 y 23 tenemos los máximos de concentración de partículas. A diferencia de las  $PM_{2.5}$  los días con menor concentración no coinciden con los días lluviosos. En cuanto a la comparación de las concentraciones medidas con la norma oficial NOM-025-SSA1-2014 que establece los límites permisibles de exposición diaria y anual para las  $PM_{10}$  de  $75 \mu\text{g m}^{-3}$ , podemos decir que no se sobrepasó en ninguno de los días y que la concentración promedio de toda la campaña fue de  $35 \mu\text{g m}^{-3}$  (Figura 26).

En los días festivos, las  $PM_{10}$  no tuvieron una disminución en su concentración como es el caso de las  $PM_{2.5}$ , debido a que generalmente este tamaño de partícula se asocia a la resuspensión de partículas depositadas en el suelo y suspensión de suelos (cultivos, minería y calles no pavimentadas) factores que en Juriquilla se favorece por las características en el clima y suelo de ésta, que a su vez es favorecida por las fuertes corrientes de viento en diversas direcciones y con diferente magnitud que ocurren, lo cual también comprueba que la atmósfera es un sistema dinámico (Seinfeld y Pandis, 1998).



**Figura 26.** Concentración de  $PM_{10}$  durante toda la campaña de medición.

Con la finalidad de conocer la contribución de las  $PM_{2.5}$  a las  $PM_{10}$ , se realizó un análisis de regresión lineal en la cual a través de la pendiente podemos apreciar que cerca del 44 % de las  $PM_{2.5}$  contribuyen o forman parte de las  $PM_{10}$  (Figura 27).



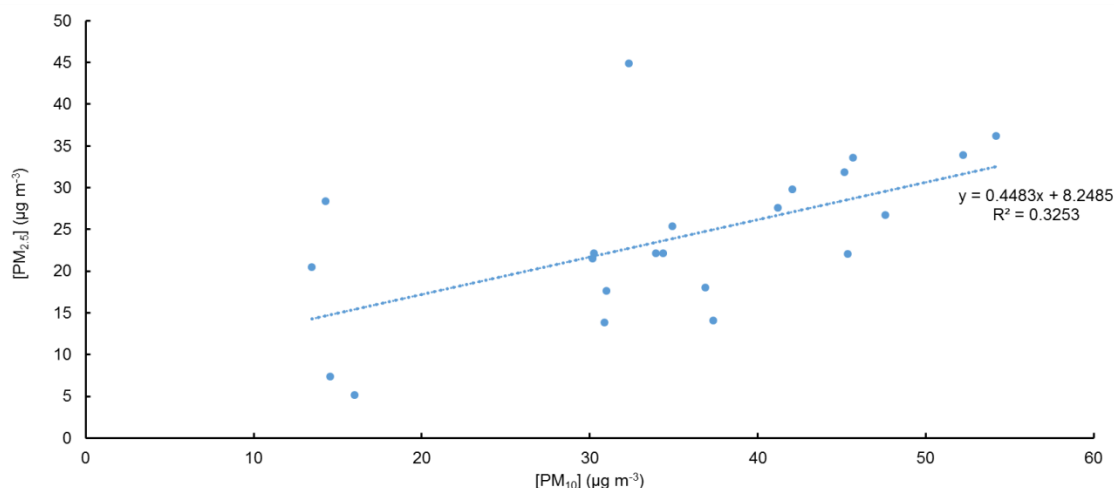


Figura 27. Relación entre PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>.

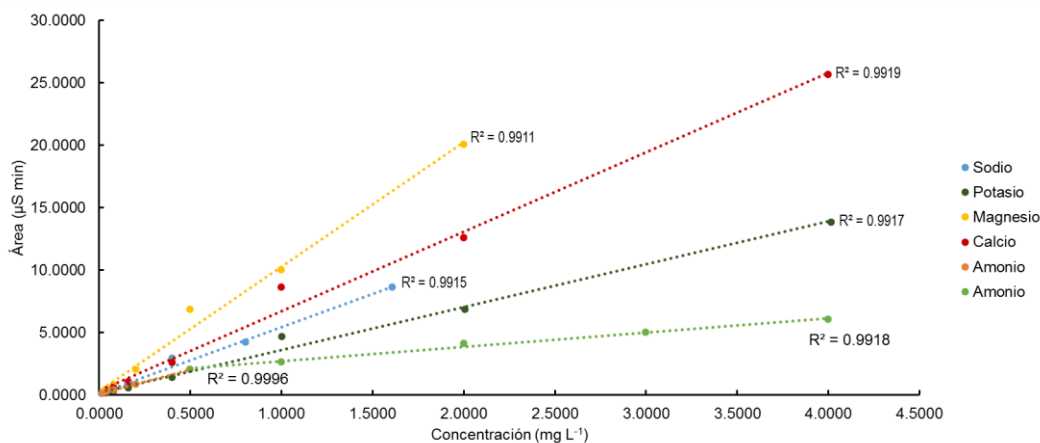
## 5.2 Análisis de iones inorgánicos solubles en agua

Con la finalidad de determinar la concentración de los iones inorgánicos solubles en agua presentes en las muestras de la campaña se evaluaron parámetros analíticos por cromatografía de intercambio iónico. La evaluación de los parámetros analíticos son el procedimiento necesario para demostrar que el método analítico es aceptable para llevar a cabo el análisis de uno o más componentes específicos de la muestra y comprende el estudio de parámetros que permiten garantizar la obtención de datos con una buena exactitud, precisión y confiabilidad. Los parámetros analíticos evaluados a los métodos analíticos se realizaron basándose en los criterios establecidos por las guías de la International Council for Harmonisation (ICH, 2005).

### 5.2.1 Linealidad del sistema

Para la linealidad del sistema, se construyeron diferentes curvas de calibración en el intervalo de concentraciones de trabajo ya mencionado en la sección 4.7, realizando seis réplicas de cada concentración. En la figura 28, se

observa la evaluación del sistema de cationes, en donde todos los iones presentan un  $r^2$  mayor a 0.99, lo que demuestra una buena linealidad del sistema.



**Figura 28.** Curva de calibración de cationes.

De igual manera para la evaluación de la linealidad del sistema de aniones se realizaron curvas de calibración, las cuales se muestran en la figura 29, en donde todos los aniones presentan una buena correlación ( $r^2 \geq 0.98$ ), por lo tanto, se puede decir que existe una buena linealidad del sistema tanto para cationes como aniones.

El ajuste de datos experimentales que se usó para determinar la linealidad del sistema se obtuvo mediante un análisis de regresión lineal. Los parámetros estadísticos obtenidos fueron:  $b_0$ ,  $b_1$ , y  $r^2$  se calcularon mediante el análisis estadístico que permitió la estimación de la ecuación de la curva de calibración de cada uno de los iones, así como los coeficientes de determinación y el intervalo de confianza para la pendiente (IC [ $\beta_1$ ]). Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 4 y 5 para el sistema de cationes y aniones, respectivamente.

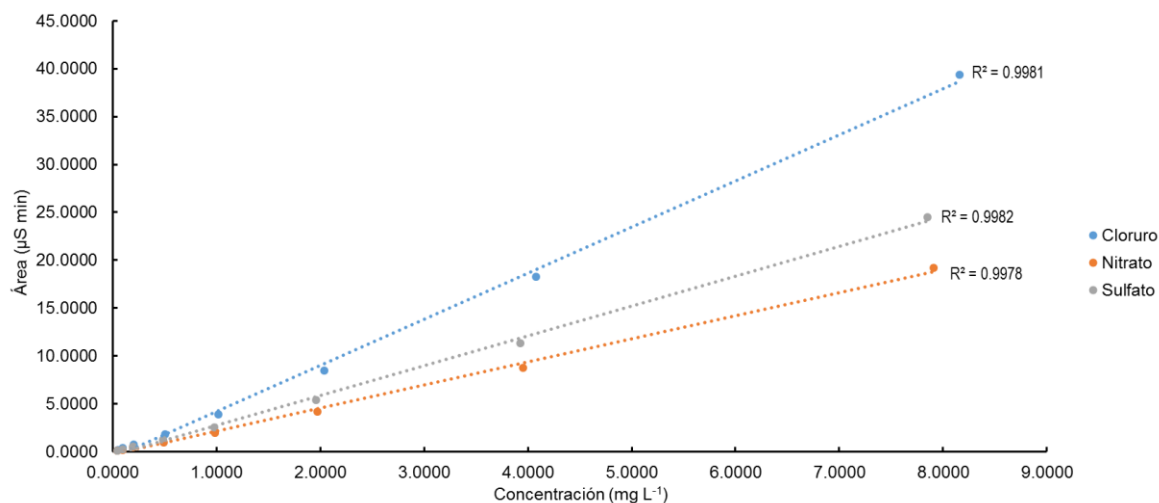


Figura 29. Curva de calibración de aniones.

Tabla 4. Resumen del análisis de la regresión lineal simple para la evaluación de la linealidad del sistema para cationes.

Estadístico	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
Intervalo de trabajo (mg L <sup>-1</sup> )	0.016 – 1.608	0.020 – 0.500 0.500 – 4.000	0.042 – 4.016	0.040 – 4.000
Pendiente (b <sub>1</sub> )	5.324	3.923 1.448	3.425	6.364
Ordenada de origen (b <sub>0</sub> )	0.114	0.084 1.555	0.179	0.337
Coefficiente de correlación (r)	0.995	0.999 0.995	0.995	0.995
Coefficiente de determinación (r <sup>2</sup> )	0.991	0.999 0.991	0.991	0.991
IC (β <sub>1</sub> )	5.2 – 5.5	4.0 – 4.1 1.4 – 1.7	3.3 – 3.5	6.2 – 6.5

**Tabla 5.** Resumen del análisis de la regresión lineal simple para la evaluación de la linealidad del sistema para aniones.

<b>Estadístico</b>	<b>Cl<sup>-</sup></b>	<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>
<b>Intervalo de trabajo (mg L<sup>-1</sup>)</b>	0.051 – 8.160	0.049 – 7.912	0.049 – 7.856
<b>Pendiente (b<sub>1</sub>)</b>	4.819	2.414	3.102
<b>Ordenada de origen (b<sub>0</sub>)</b>	-0.607	-0.273	-0.327
<b>Coefficiente de correlación (r)</b>	0.998	0.998	0.998
<b>Coefficiente de determinación (r<sup>2</sup>)</b>	0.997	0.997	0.997
<b>IC (β<sub>1</sub>)</b>	4.8 – 4.9	2.4 – 2.4	3.1 – 3.1

Con los resultados en la tabla 5 y 6 podemos observar que las ecuaciones obtenidas para los iones cumplen con los parámetros de armonización establecidos (ICH, 2005) y cumplen con los siguientes criterios estadísticos:  $b_0 \approx 0$ ,  $b_1 \neq 0$  y  $r^2 \geq 0.98$ . El intervalo de confianza para la pendiente IC ( $\beta_1$ ) no incluye el cero, con todo esto se concluye que el modelo estadístico establecido mediante el análisis de regresión lineal, así como el intervalo de concentraciones es adecuado.

### 5.2.2 Precisión

Para evaluar la precisión del método se realizaron diferentes experimentos conducentes a evaluar la repetibilidad, es decir, cuan preciso es el instrumento de medición para dar valores muy cercanos entre sí a las mismas condiciones de medición y la reproducibilidad, que es la concordancia entre determinaciones

independientes realizadas en diferentes periodos de tiempo (días). De manera general, estos resultados se expresan en términos de desviación estándar relativa (DER) y se resumen en las tablas 6 y 7.

La repetibilidad se evaluó midiendo los resultados individuales aplicando el mismo procedimiento repetidamente a una misma muestra de análisis de  $0.5 \text{ mg L}^{-1}$  para aniones ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ) y de  $0.2 \text{ mg L}^{-1}$  para  $\text{Na}^+$  y  $\text{NH}_4^+$ , y de  $0.4 \text{ mg L}^{-1}$  para  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ . En todos los casos, la DER calculada para  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  fue de 1.15, 0.95, 0.96, 1.07, 0.17, 0.28, 0.27, respectivamente. Lo que permite concluir que el método es repetible bajo las condiciones de ensayo.

Por otra parte, la reproducibilidad del método se realizó analizando una concentración de  $0.5 \text{ mg L}^{-1}$  para aniones ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ) y de  $0.2 \text{ mg L}^{-1}$  para  $\text{Na}^+$  y  $\text{NH}_4^+$ , y de  $0.4 \text{ mg L}^{-1}$  para  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , en dos días diferentes de análisis, permitiendo calcular una DER menor al 2 %, evidenciando que en todos los casos el método analítico es repetible y reproducible

**Tabla 6.** Datos experimentales para la evaluación de la precisión de cationes.

<b>Analito</b>	<b>Reproducibilidad (DER)</b>	<b>Repetibilidad (DER)</b>
<b>Na<sup>+</sup></b>	1.67	1.15
<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	1.91	0.95
<b>K<sup>+</sup></b>	1.77	0.96
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	1.97	1.07

**Tabla 7.** Datos experimentales para la evaluación de la precisión de aniones.

<b>Analito</b>	<b>Reproducibilidad (DER)</b>	<b>Repetibilidad (DER)</b>
<b>Cl<sup>-</sup></b>	1.34	0.17
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	0.94	0.28
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	0.21	0.27

### 5.2.3 Límites de detección y cuantificación

Los límites de detección (LD) y cuantificación (LC) se determinaron a partir de la curva de calibración y de las expresiones matemáticas mencionadas en el inciso 4.9 de la sección experimental. Los LC y LD se resumen en las tablas 7 y 8.

**Tabla 8.** LD y LC para el sistema de aniones.

	<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>	<b>Ca<sup>2+</sup></b>
<b>Límite de detección (mg L<sup>-1</sup>)</b>	4.67x10 <sup>-3</sup>	6.35X10 <sup>-3</sup>	7.27X10 <sup>-3</sup>	3.91X10 <sup>-3</sup>
<b>Límite de cuantificación (mg L<sup>-1</sup>)</b>	0.017	0.019	0.022	0.012

**Tabla 9.** LD y LC para el sistema de cationes.

	<b>Cl<sup>-</sup></b>	<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>
<b>Límite de detección (mg L<sup>-1</sup>)</b>	0.075	0.075	0.073
<b>Límite de cuantificación (mg L<sup>-1</sup>)</b>	0.227	0.228	0.221

### 5.2.4 Cuantificación de los iones mayoritarios

Una vez evaluado los métodos de trabajo, se realizó la cuantificación de los iones inorgánicos soluble en agua presentes en PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, utilizando las expresiones matemáticas del inciso 4.10 de la sección experimental. En la figura 30, se aprecia el comportamiento de la concentración de los iones sodio, potasio, amonio y calcio en las PM<sub>10</sub> durante toda la campaña, en donde el catión más abundante es el amonio y sus concentraciones están entre 0.5 y 2.9 µg m<sup>-3</sup>, las cuales son mucho mayores que las de sodio, potasio y calcio que solo alcanzan los

0.9  $\mu\text{g m}^{-3}$  individualmente. Además, es importante señalar que el amonio y el calcio se pudieron cuantificar durante todos los días de muestreo en comparación con el sodio y potasio, tal es el caso que el potasio se encontró por debajo del límite de detección los días 10, 11, 14, 15 y 29 y 30 de mayo, mientras que el sodio se dio una tendencia constante, sin grandes cambios de concentración de un día a otro pero el día 11 se encontró por debajo del límite de detección, por lo cual podemos decir que estos iones se presentan en concentraciones mínimas y muy constantes.

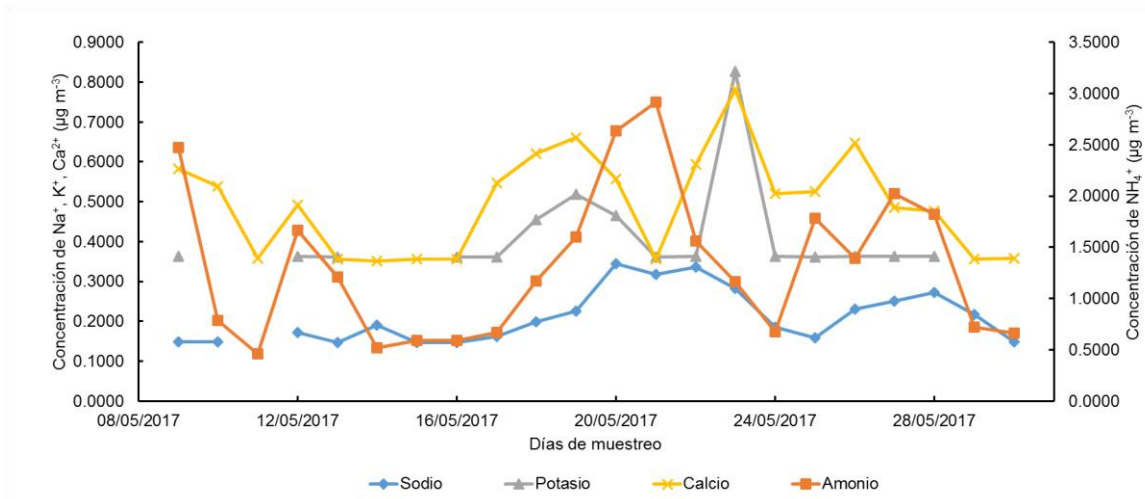


Figura 30. Concentración de los cationes en PM<sub>10</sub> durante toda la campaña de muestreo.

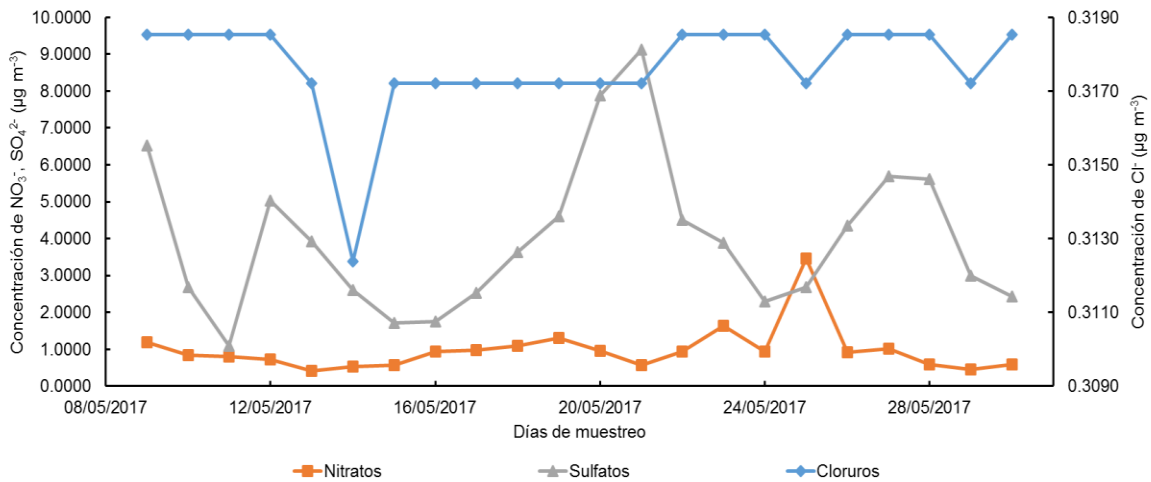
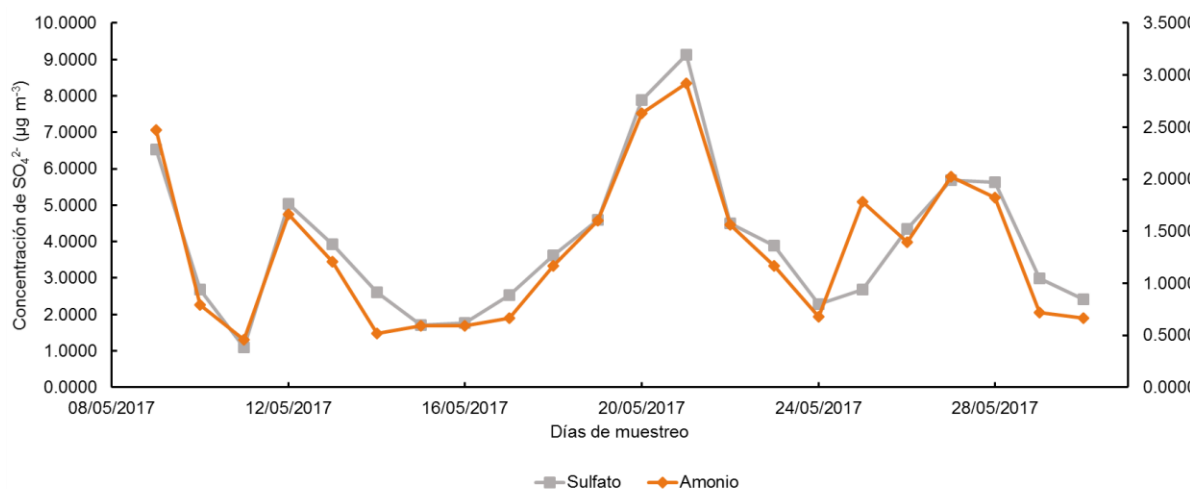


Figura 31. Concentración de los aniones en PM<sub>10</sub> durante toda la campaña de muestreo.

Para el caso de la concentración de los aniones en  $PM_{10}$ , estos se encuentran por arriba del límite de detección en todos los días, teniendo como anión más abundante al sulfato con variaciones bastante notables a través de cada día. Mientras que, para el cloruro y el nitrato, las concentraciones tienen tendencias constantes, siendo el anión minoritario el cloruro (Figura 31).

Observando el comportamiento de cada ion en las figuras 30 y 31 se puede apreciar que la tendencia del sulfato y el amonio es muy similar ya que tienen disminuciones y aumentos en los mismos días, con pequeñas diferencias como la que se da entre los días 25 y 26 de mayo, lo cual nos permite afirmar que provienen principalmente de la misma fuente de emisión (Figura 32).



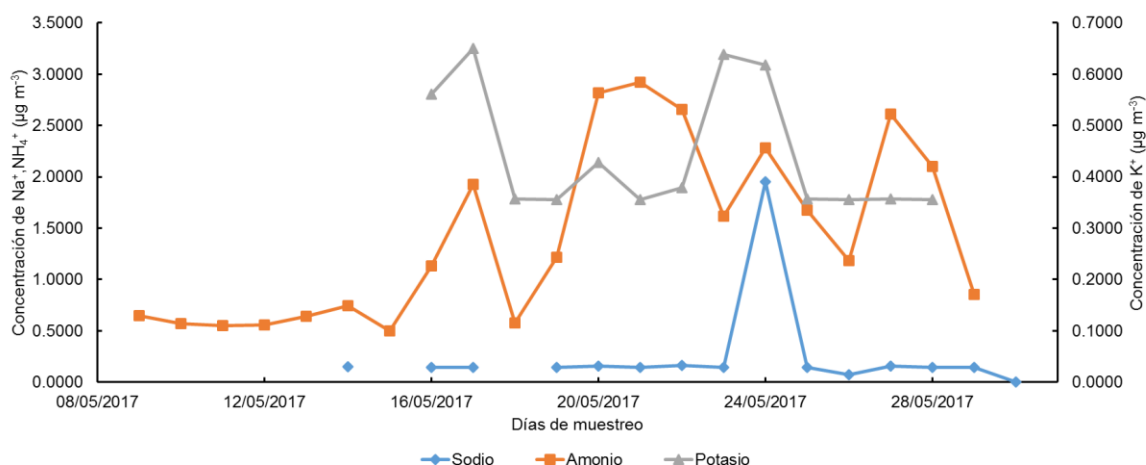
**Figura 32.** Concentración del sulfato y amonio en  $PM_{10}$  durante toda la campaña de muestreo.

Por otro lado, en la figura 33 se aprecia la tendencia de los cationes para las partículas  $PM_{2.5}$ . En este caso el ion amonio siempre estuvo por arriba del límite de cuantificación, siendo el catión más abundante, mientras que los cationes sodio y potasio tienen concentraciones por debajo del límite de detección durante gran parte del muestreo y el calcio no se pudo cuantificar en ninguno de los días de muestreo, lo que indica que estos iones provienen principalmente de resuspensión de polvos (Seinfeld y Pandis, 1998).



En el caso del sodio tenemos que no se pudo cuantificar durante los días 9, 10, 11, 12, 13, 15, 18 y 30 de mayo, además de tener la tendencia casi constante, teniendo el día 24 de mayo un incremento en su concentración, siendo el único día que presenta este sobresalto. Mientras que para el potasio se encontró por debajo del límite de detección los días 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 29 y 30 de mayo.

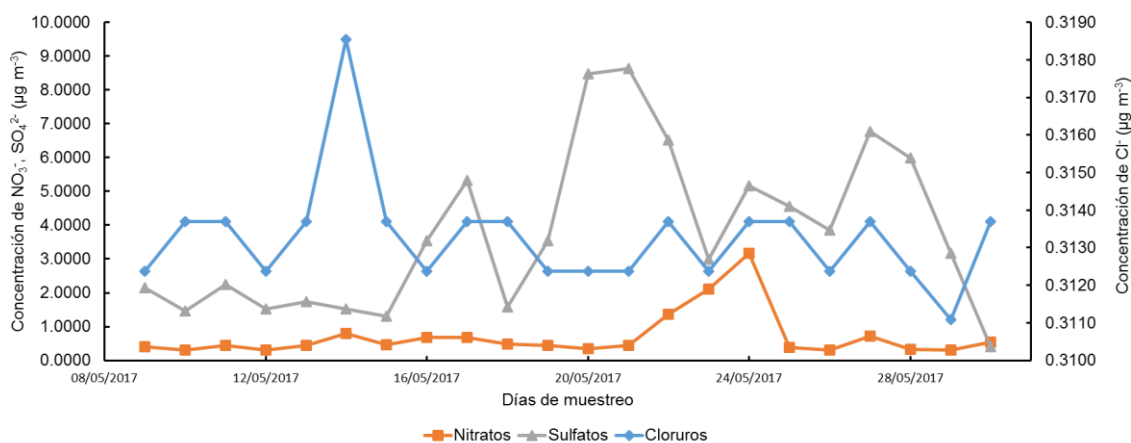
Algo importante de mencionar, es que no se lograron cuantificar los cationes correspondientes al día 30 de mayo, último día de la campaña, ya que la concentración se encontró por debajo del límite de detección (Figura 33), además de que como se observa en la figura 24 y 25, el día 30 de mayo la concentración total de  $PM_{2.5}$  fue la menor durante toda la campaña y fue un día con lluvia, lo cual conllevó a que ocurriera una precipitación húmeda, logrando que la mayoría de los cationes analizados, se encontraran por debajo del límite de detección.



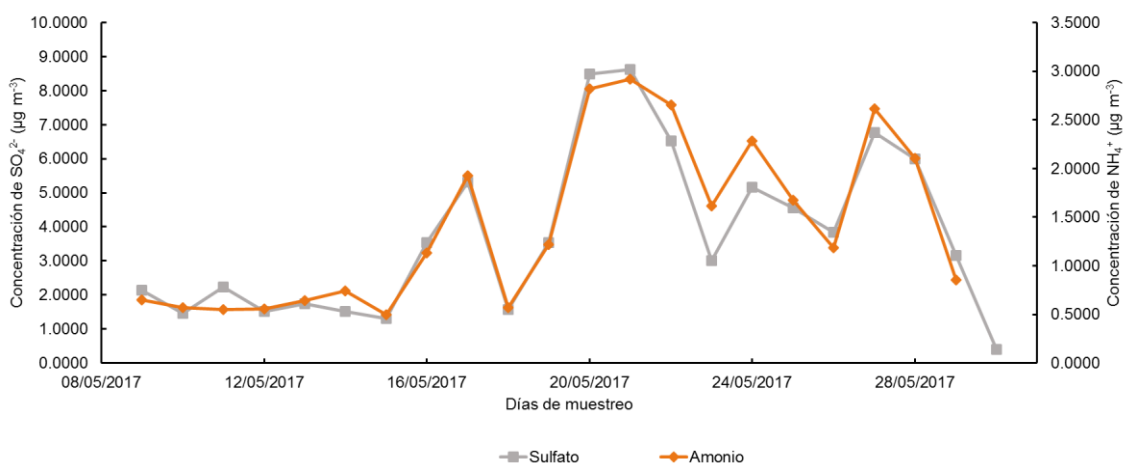
**Figura 33.** Concentración de los cationes en  $PM_{2.5}$  durante cada día de la campaña de muestreo.

En la figura 34 podemos observar la variación de los aniones de  $PM_{2.5}$ , teniendo como anión mayoritario al sulfato y como minoritario al cloruro con una tendencia casi constante. Este comportamiento del cloruro se asocia principalmente a que no hay una fuente (mar) cerca del sitio de muestreo que pueda provocar una fuerte variación en su concentración. El nitrato se encuentra en menor concentración que el sulfato, sin embargo, en los días 20, 21, 22, 27 y 28 supera al sulfato coincidiendo el 20 y 27 con los sábados y el 21 y 28 con el domingo. También

se observó que el sulfato y el amonio tienen comportamientos similares (Figura 35) tal como en las  $PM_{10}$ , indicando que se encuentran principalmente en forma de sales, lo cual se comprobó más adelante con el balance iónico.



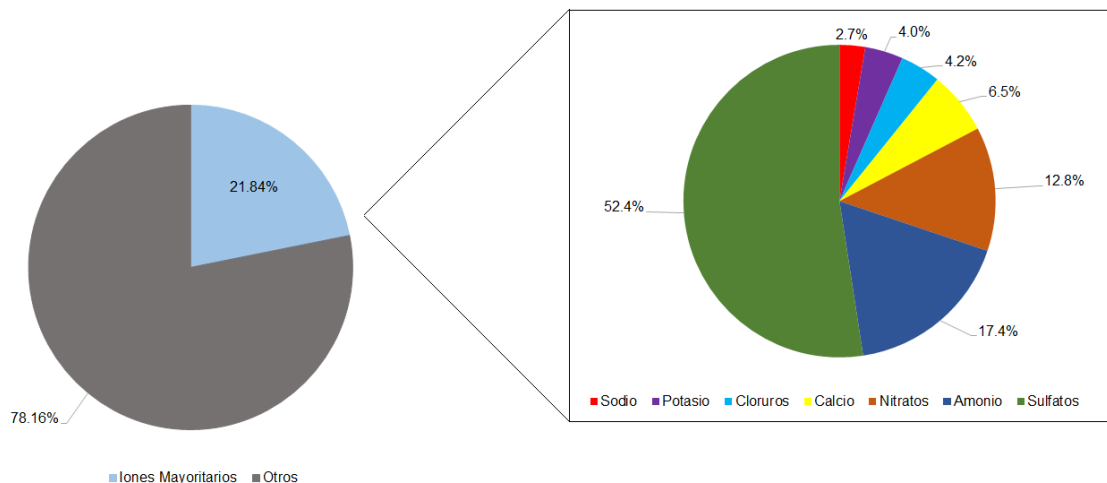
**Figura 34.** Concentración de los aniones en  $PM_{2.5}$  durante cada día de la campaña de muestreo.



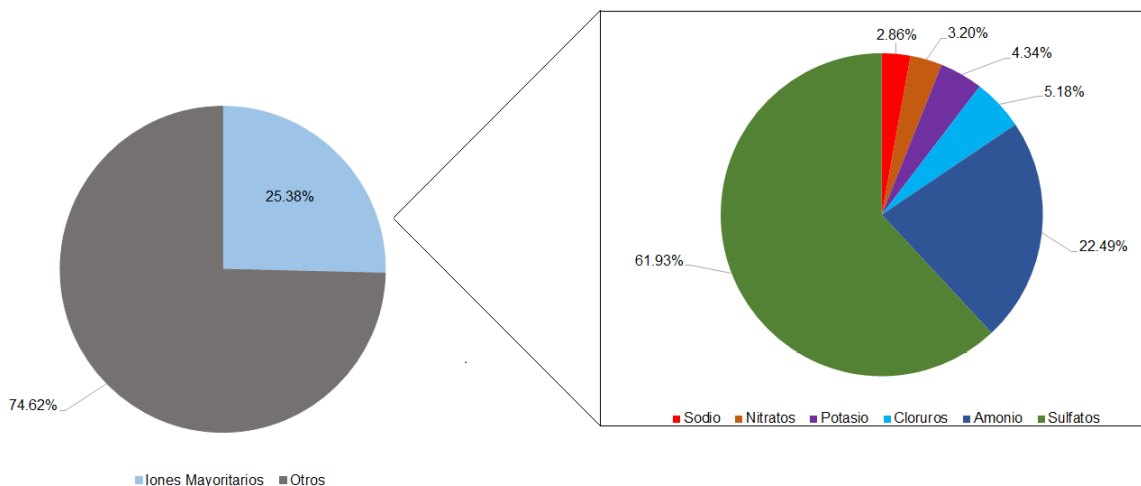
**Figura 35.** Concentración del sulfato y amonio en  $PM_{2.5}$  durante toda la campaña de muestreo.

### 5.2.5 Distribución química de los iones inorgánicos solubles en agua

En las figuras 36 y 37 se aprecia el porcentaje que representan los iones inorgánicos solubles en agua del total de la concentración másica del aerosol menor a 10 y 2.5 micras (24 y 26, respectivamente), recolectado durante toda la campaña de medición en el campus Juriquilla. En el caso de las de las  $PM_{10}$  el sulfato representa el 52.4 %, el amonio el 17.4 % y el nitrato el 12.8 % mientras que para las  $PM_{2.5}$  el sulfato fue de 61.93 %, el amonio 22.49 % y el nitrato de 3.20 %. Estos porcentajes nos indican que cerca del sitio de muestreo predominan las fuentes naturales sobre las antropogénicas, esto debido a las bajas concentraciones de nitrato cuantificado, sin embargo, para confirmar esta afirmación es necesario saber las direcciones y velocidades de los vientos y así poder darnos una mejor idea de donde provienen estos aerosoles que se muestrearon y discernir el motivo de estas variaciones.



**Figura 36.** Composición de las  $PM_{10}$  totales de toda la campaña.



**Figura 37.** Composición de las PM<sub>2.5</sub> totales de toda la campaña.

De manera general podemos decir que las fuentes de emisión para el catión amonio en PM<sub>2.5</sub> se debe principalmente a la formación de aerosoles secundarios, siendo los compuestos más comunes el sulfato de amonio ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) y el nitrato de amonio (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>) teniendo como precursor al amoniaco, el cual puede ser emitido biogénicamente o antropogénicamente. Dentro de las fuentes significativas de amoniaco están los desechos de plantas y animales, la pérdida de fertilizantes basados en amoniaco de los suelos y las emisiones industriales (Seinfeld y Pandis, 1998). Tanto el sulfato como el nitrato son producto de reacciones secundarias que ocurren en la atmósfera a partir del SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> emitidos por actividades industriales y de transporte, sin olvidar que también pueden ser emitidos por el uso de fertilizantes. El cloruro es el anión menos abundante de los tres aniones estudiados y se emite principalmente de la de las burbujas de sal marina que eclosionan. (Seinfeld y Pandis, 1998; <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/695/queson.pdf>).

## 5.4 Balance iónico

El estudio del balance iónico se realizó con el objetivo de conocer la naturaleza ácida o básica de la atmósfera, es decir, si hay una mayor concentración de aniones se incrementa la acidez, lo que conduce a daños en la salud de los ecosistemas, contaminación de cuerpos de agua y deterioro en construcciones, etc. (Moya *et al.*, 2003).

Para realizar el balance iónico se utilizó la expresión matemática de neutralidad para los iones (Moya *et al.*, 2003):

$$\Sigma(v_a n_a - v_c n_c) = 0 \quad (\text{Ecuación 6})$$

Despejando se tiene:

$$\Sigma(v_a n_a) = \Sigma(v_c n_c) \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde  $v$  es la carga del ion,  $n$  el número de mol mientras que los subíndices  $a$  y  $c$  se refieren a aniones y cationes, respectivamente.

De acuerdo con la literatura, la reacción dominante en las partículas atmosféricas se da entre el  $\text{NH}_4^+$  y el  $\text{SO}_4^{2-}$ , los cuales en el presente estudio fueron los de mayor concentración. Para evaluar si el caso de estudio es rico en amoníaco (atmósfera no ácida) o pobre en amoníaco (atmósfera ácida), se debe evaluar la relación molar entre el amoníaco total y el sulfato total (AT/ST). De acuerdo a la teoría, si la relación molar  $\text{AT/ST} < 2$  entonces se define una atmósfera pobre en amoníaco. Por el contrario, si la relación molar  $\text{AT/ST} > 2$  entonces se define como un medio ambiente rico en amoníaco (Seinfeld y Pandis, 1998).

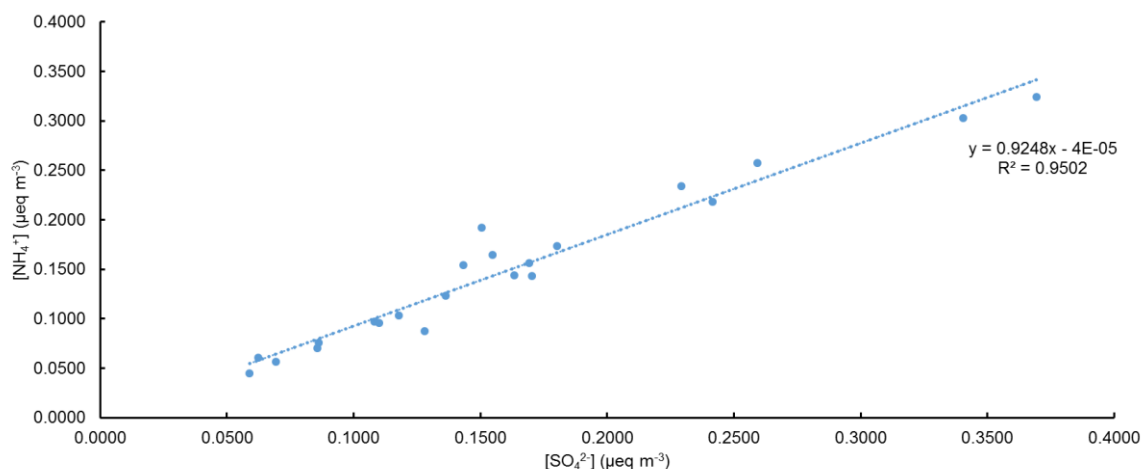
En casos específicos, si la relación molar AT/ST es:

- I. Menor o igual 0.5, las partículas de aerosol existen primordialmente como disoluciones de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .
- II. Entre 0.5 – 1.25, el componente dominante en el sistema es  $\text{NH}_4\text{HSO}_4(\text{s})$  (o una disolución de  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{HSO}_4^-$ ).

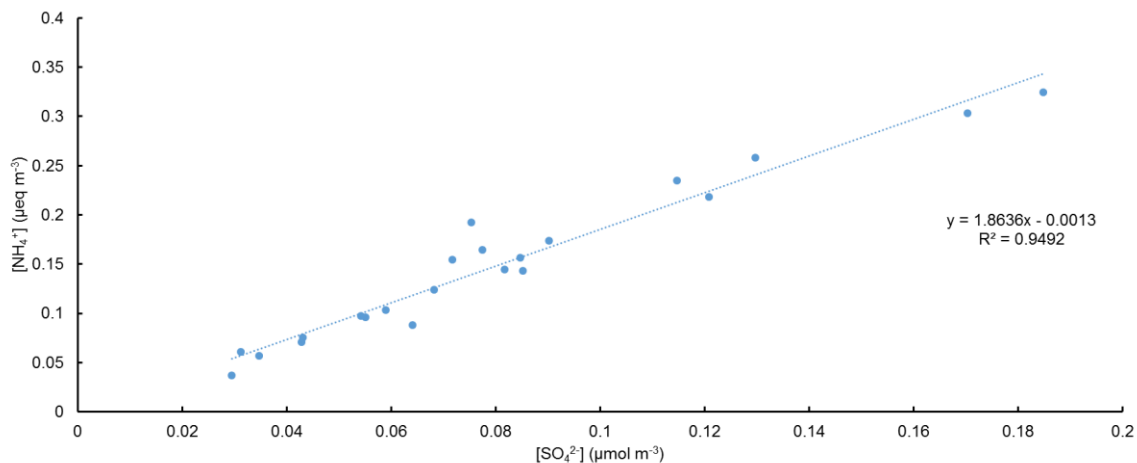
- III. Entre 1.25 – 1.5, encontrándose  $\text{NH}_4\text{HSO}_4(\text{s})$  y  $(\text{NH}_4)_3\text{H}(\text{SO}_4)_2$  (letovicita), o una disolución con los iones correspondientes coexistiendo en el sistema.
- IV. Igual a 1.5, el sistema consiste exclusivamente de  $(\text{NH}_4)_3\text{H}(\text{SO}_4)_2$  (letovicita) o una disolución con sus iones correspondientes.
- V. Mayor a 1.5 o menor a 2, todo el amonio es completamente neutralizado con el sulfato presente y por lo tanto, el componente predominante en el sistema es  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4(\text{s})$  o una disolución de los iones correspondientes.

La figura 38 muestra la relación entre los iones  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  de la sumatoria de los iones en  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$ , encontrándose que el ambiente en Juriquilla, Querétaro se puede considerar neutro, debido a que la pendiente entre ellos fue muy cercana a 1 y el coeficiente de determinación fue de 0.95, lo que indica que el 95 % de los datos de una de las variables son explicados por la otra.

La pendiente obtenida en este sistema evaluado fue de 1.86, lo que indica que en el sistema existe la presencia dominante de  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4(\text{s})$  en disolución (Figura 39).

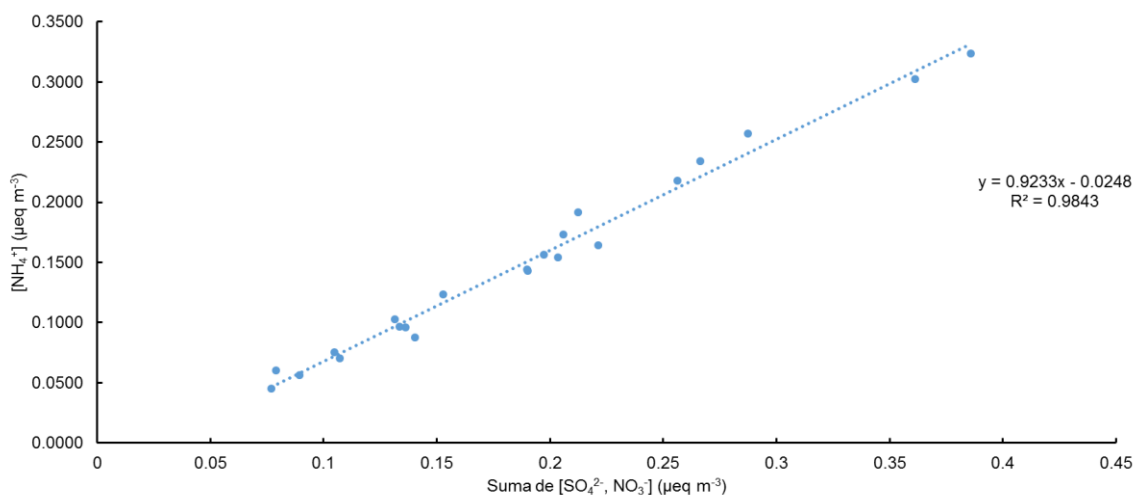


**Figura 38.** Balance iónico entre los iones  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  durante la campaña.



**Figura 39.** Relación Amonio Total (AT)/ sulfato total (ST) durante la campaña.

Independientemente de que el  $NH_4^+$  sea vinculado con el  $SO_4^{2-}$ , se sabe que existe también presencia de algunos compuestos relacionados con el  $NO_3^-$ . En la figura 40, se encuentra la relación de la suma de los iones  $SO_4^{2-}$  y  $NO_3^-$  con el catión de mayor interés, observándose que el coeficiente de determinación aumenta de 0.95 a 0.98 y la pendiente del sistema en este caso es de 0.92, indicando que efectivamente, el  $NO_3^-$  se encuentra en bajas concentraciones en forma de  $NH_4NO_3$ , esto debido a que este producto es inestable termodinámicamente y tiende a generar nuevamente  $HNO_3$  que es más estable.



**Figura 40.** Balance iónico entre  $NH_4^+$  y la suma de los aniones  $SO_4^{2-}$  y  $NO_3^-$

## 5.5 Comparación con diferentes zonas de México

Para examinar la calidad del aire que se respira en Juriquilla, Querétaro frente a otros sitios de la República Mexicana se realizó la comparación de los resultados obtenidos en el presente estudio (Tabla 9) frente a los resultados de un sitio semiurbano como Tecámac (Castro *et al.*, 2017) y de dos principales ciudades de México, las cuales son la Ciudad de México (Querol *et al.*, 2008) y Guadalajara (Hernández-Mena *et al.*, 2010).

A partir de la tabla 9, podemos decir que, en el caso de las  $PM_{10}$ , las concentraciones que se reportan son en general más bajas que las reportadas para la Ciudad de México. En el caso de las  $PM_{2.5}$ , se observa lo mismo que para las  $PM_{10}$ , es decir, en casi todos los iones las concentraciones fueron menores que los reportados en la literatura científica a excepción del amonio, lo cual reafirma la teoría de que esta zona está fuertemente influenciada por la agricultura.



Tabla 10. Comparación de mediciones en México.

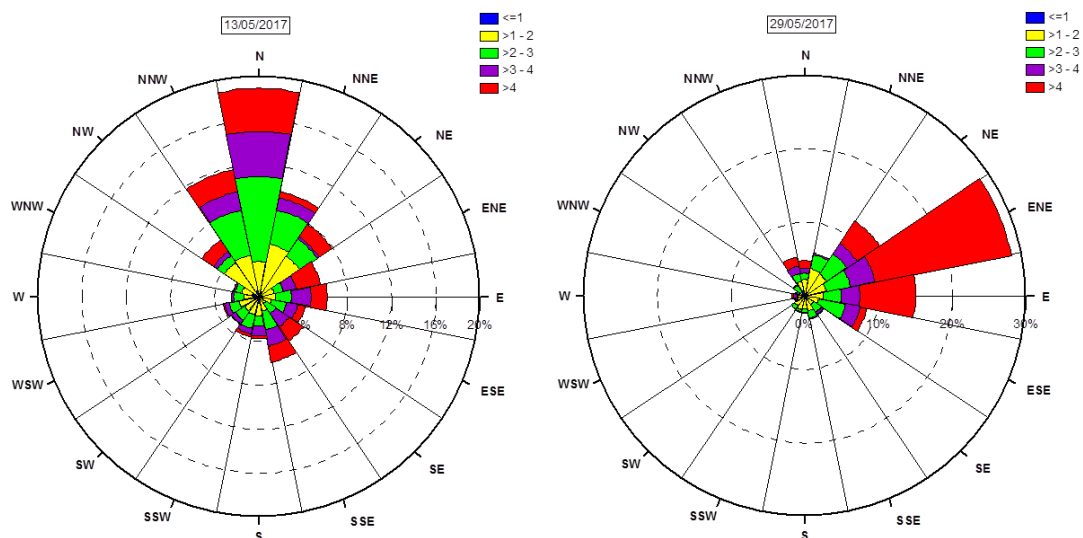
Ion ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	Centro de Guadalajara	Tecámac	Ciudad de México		Resultados de la campaña	
	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>
<b>Na<sup>+</sup></b>	0.30	—	0.30	0.30	0.17	0.20
<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	1.67	1.19	1.00	1.50	1.36	1.32
<b>K<sup>+</sup></b>	0.50	1.21	0.30	0.70	0.26	0.30
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	0.36	1.47	0.60	1.50	—	0.49
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	2.37	2.34	2.80	3.60	0.70	0.97
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	3.17	3.76	3.70	5.30	3.74	3.98

## 5.6 Rosas de viento

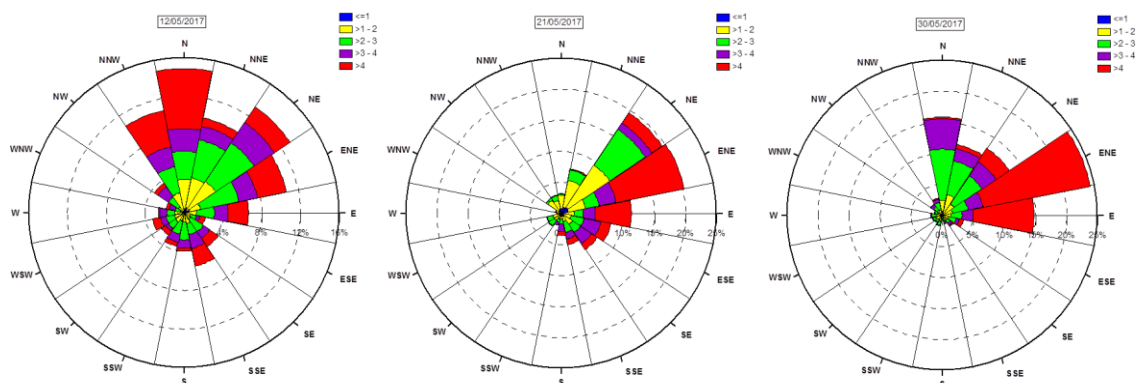
El análisis de las rosas de vientos se dividió en dos partes; en la primera se verificó la dirección y magnitud de los vientos únicamente durante los días que se presentaron los máximos y mínimos de concentración para PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> (Figura 24); la segunda parte consistió en agrupar los días de acuerdo a sus direcciones de viento y así determinar si existe una diferencia en la composición química de los aerosoles dependiendo de la zona donde provengan los vientos.

En el caso de las concentraciones mínimas tenemos los días 12, 21 y 30 de mayo para PM<sub>2.5</sub> y los días 13 y 29 de mayo para PM<sub>10</sub>. En las figuras 41 y 42 podemos observar la dirección y magnitud de los vientos a lo largo de estos días de muestreo, indicando que los vientos proceden del norte-noroeste (NNW), del norte (N), del norte-noreste (NNE), del noreste (NE) y del este-noreste (ENE) principalmente, aunque con pocas contribuciones del este (E), lo cual demuestra

que en estas direcciones no hay gran emisión de aerosoles secundarios o sus precursores (Figura 47).



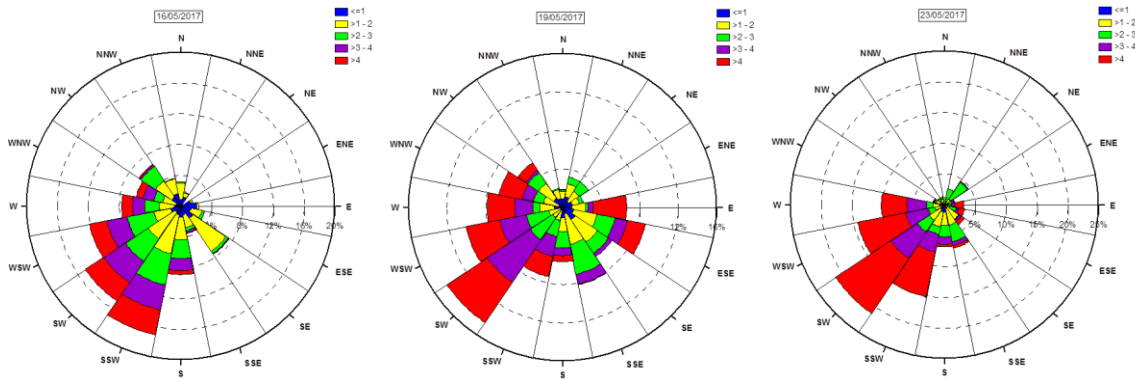
**Figura 41.** Rosas de viento para los días de concentración mínima en PM<sub>10</sub>.



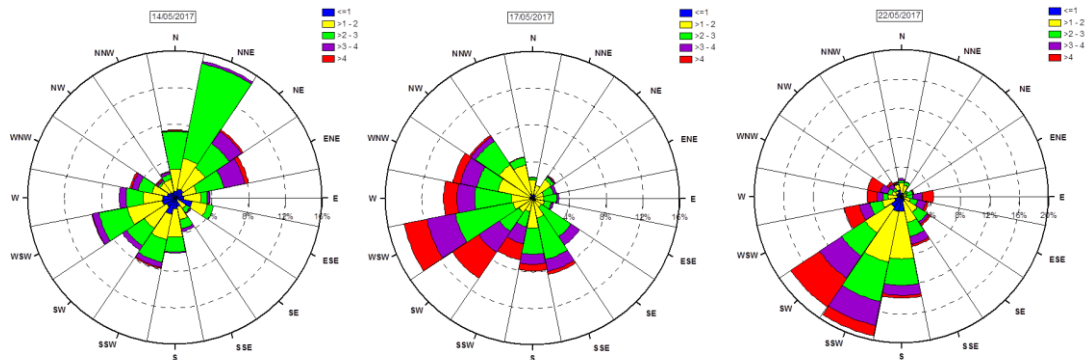
**Figura 42.** Rosas de viento para los días de concentración mínima en PM<sub>2.5</sub>.

De igual manera se construyeron las rosas de vientos para los días que presentaron máximas concentraciones tanto en PM<sub>10</sub> como en PM<sub>2.5</sub> (Figura 43 y 44). En ambas figuras se observa que los vientos proceden principalmente de las direcciones sur (S), sur-suroeste (SSW), oeste-suroeste (WSW) y con muy pocas contribuciones en el oeste (W) y el sur-sureste (SSE), lo que nos indica que en estas

direcciones hay una gran emisión de aerosoles secundarios o de sus precursores (Figura 49), sin embargo, hay que aclarar que durante el día 14 de mayo el viento para  $PM_{2.5}$  presentó una fuerte contribución de la dirección NNE, mientras que los vientos procedentes de NE, ENE y N son similares a WSW, SSW y SW pero con mayor intensidad, por lo tanto se puede decir que a pesar de tener una contribución de vientos en direcciones del norte y derivados, la mayor contribución de aerosoles es del sur.



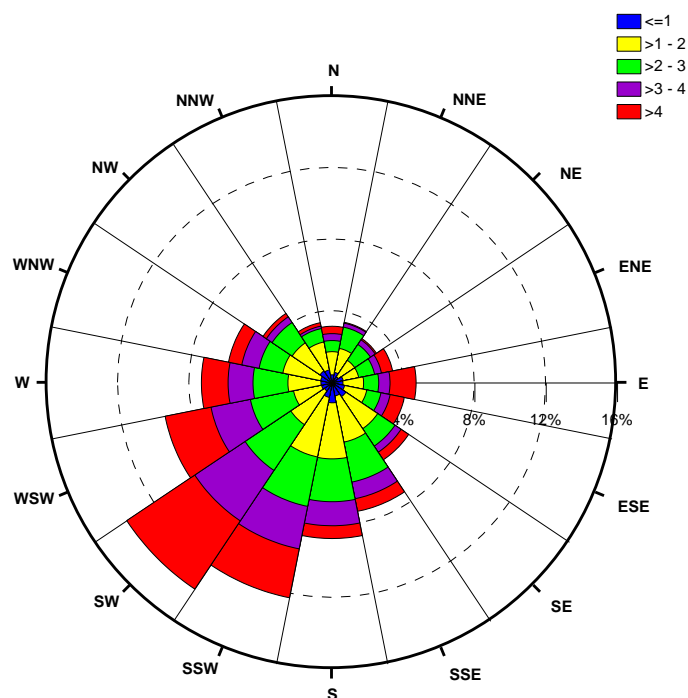
**Figura 43.** Rosas de viento para los días de concentración máxima en  $PM_{10}$ .



**Figura 44.** Rosas de viento para los días de concentración máxima en  $PM_{2.5}$ .

Con relación al segundo punto del análisis de las rosas de viento, se puede decir que los días 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 24 y 25 de mayo los vientos procedían principalmente del sur y bajo este criterio se construyó una rosa de

vientos general para estos días la cual indica que el viento proviene principalmente de SW, SSW y WSW (Figura 45).

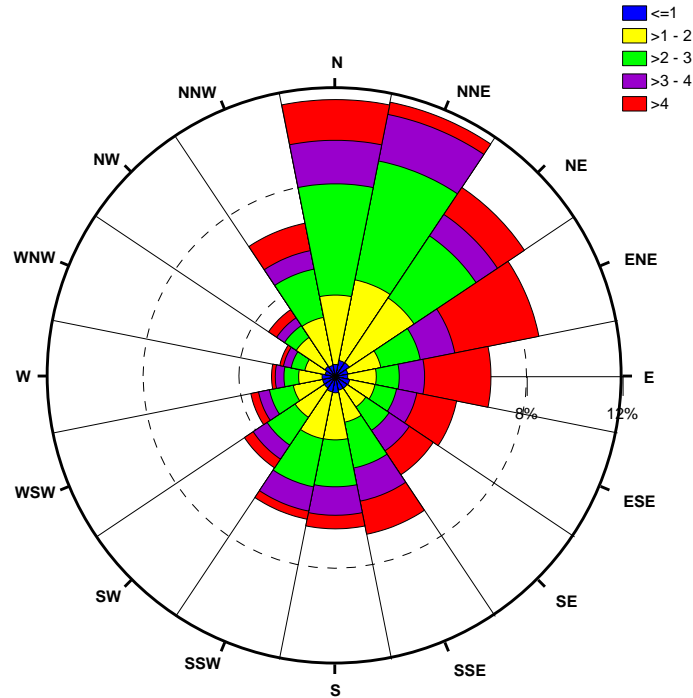


**Figura 45.** Rosa de vientos de vientos del sur.

De igual manera se realizó otra rosa de vientos pero con direcciones de viento principalmente del norte que fueron medidos durante los días 9, 10, 11, 12, 13, 14, 21, 27 y 28 de mayo indicando que los vientos provienen del N, NNE, NE y ENE principalmente, sin embargo, hay contribuciones considerables del sur (Figura 46).

Una vez realizado este análisis, se decidió ver el efecto del viento sobre la composición química de las  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  (Figuras 47 y 48), en la cual se encontró una analogía en composición cuando provienen del mismo lugar independiente del tamaño, es decir, cuando los aerosoles provienen del sur, hay un incremento en los iones inorgánicos de origen geológico (calcio, potasio y sodio), así como un incremento en el nitrato y una disminución en amonio y sulfato, lo que nos permite decir que las concentraciones de estos pueden provenir principalmente de zonas agrícolas (Figura 49), lugares en donde se ara la tierra y se usan fertilizantes, pero para confirmar este se decidió corroborar con la Secretaria de Desarrollo

Agropecuaria (SEDEA), que es la encargada de monitorear los cultivos por zonas, las hectáreas sembradas, de cosecha o hectáreas siniestradas, así como la producción y su rendimiento en diferentes épocas del año.



**Figura 46.** Rosa de vientos de vientos del norte.

En su informe para la primavera-verano 2017 se tuvo que en Corregidora (zona que se encuentra al S) plantaron cultivos de apio, elote, frijol, lechuga, maíz forrajero en verde, maíz grano y trigo grano en un total de 4,441 hectáreas, produciendo 24,205 toneladas, lo cual infiere que la concentración mayoritaria de sulfato y amonio medido se puede asociar con el uso de fertilizantes en los cultivos tal como se intuía ([sedea.queretaro.gob.mx/sites/sedea.queretaro.gob.mx/files/PV\\_2017\\_RT\\_.pdf](http://sedea.queretaro.gob.mx/sites/sedea.queretaro.gob.mx/files/PV_2017_RT_.pdf)). Adicionalmente, se verificó con el anuario estadístico y geográfico de Guanajuato de 2015, en el cual menciona que la gran parte de las zonas ubicadas en las direcciones SW, SSW y W se dedican a la agricultura ([www.diputados.gob.mx/sedia/biblio/usieg/mapas/gto\\_map.pdf](http://www.diputados.gob.mx/sedia/biblio/usieg/mapas/gto_map.pdf)).

Sin embargo, no hay que descartar la contribución de las zonas industriales a diferentes distancias que se encuentran tanto en las direcciones norte como sur. En el caso del sur tenemos influencia por parte del Parque Industrial Jurica, el

Parque Industrial Balvanera, el parque Industrial el Pueblito, el Microparque Industrial La Noria, Finsa Querétaro, el Parque Industrial Bernardo Quintana, el Parque Industrial El Marqués, Parque Industrial la Cruz, O'Donnell Aeropuerto y el Parque Aeroespacial de Querétaro, mientras que para al norte solo tenemos el Parque industrial Polígono Empresarial y el Parque Industrial Querétaro.

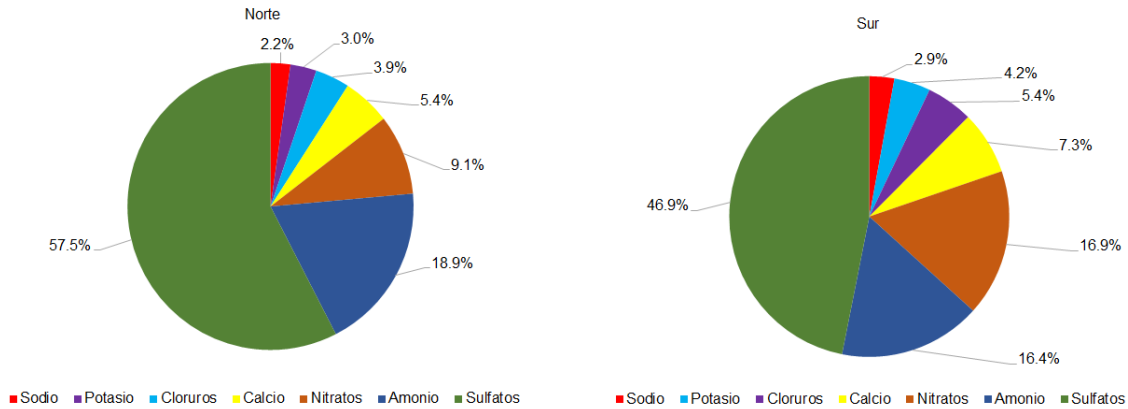


Figura 47. Composición de las PM<sub>10</sub> totales del norte y sur.

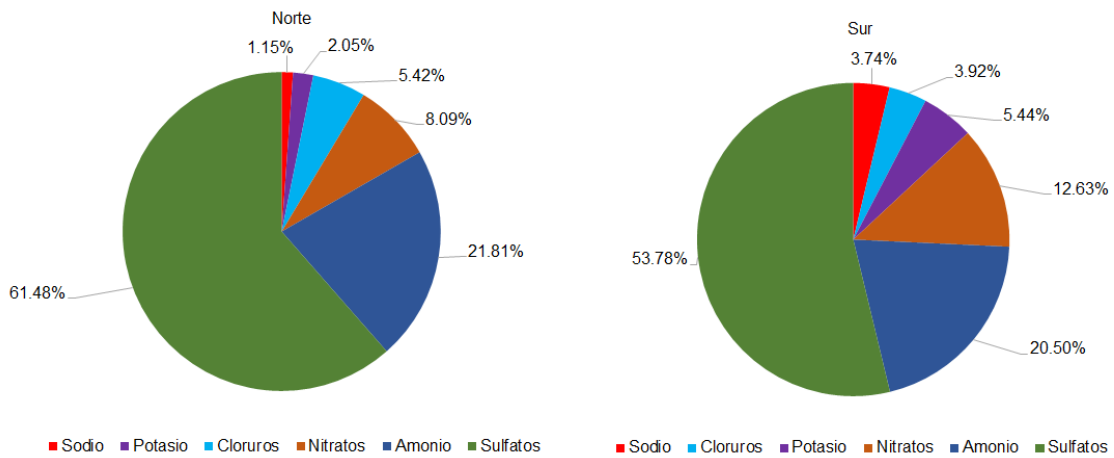
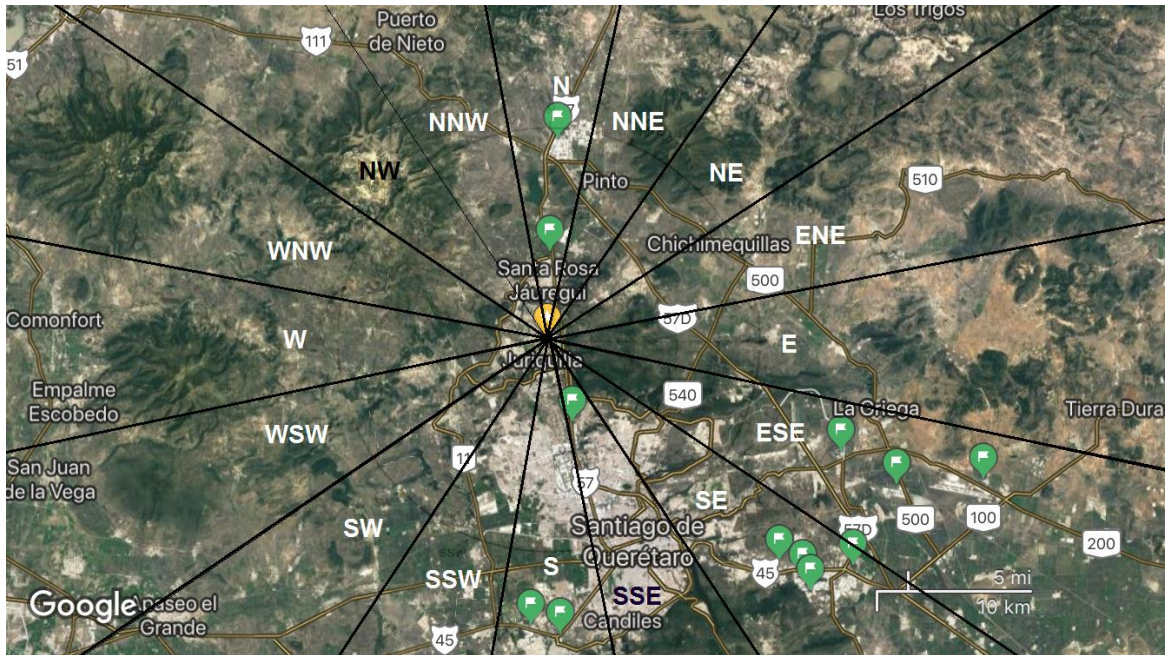


Figura 48. Composición de las PM<sub>2.5</sub> totales del norte y sur.



**Figura 49.** Mapa de la zona con las direcciones de la rosa de vientos superpuesta (marcador amarillo representa la UMDI y marcadores verdes representan parques o zonas industriales). Imagen tomada y modificada de google maps.



## 6. CONCLUSIONES

Durante la campaña comprendida en Juriquilla, Querétaro del 9 al 30 de mayo de 2017 se encontró una concentración promedio de  $24 \mu\text{g m}^{-3}$  y  $35 \mu\text{g m}^{-3}$  para  $\text{PM}_{2.5}$  y  $\text{PM}_{10}$ , respectivamente. Únicamente el día 17 de mayo la concentración de  $\text{PM}_{2.5}$  estuvo en el límite de exposición de acuerdo con la NOM-025-SSA1-2014, por lo cual se determina que la atmósfera tiene las condiciones adecuadas para evitar daños a los seres vivos o ecosistemas. En dos de los tres fines de semana, así como en los días festivos hubo una disminución en la concentración de  $\text{PM}_{2.5}$ , mientras que  $\text{PM}_{10}$  no tuvo cambios tan notables. Se determinó que cerca del 44 % de las  $\text{PM}_{10}$  se asocian a partículas de  $\text{PM}_{2.5}$ .

La evaluación de los métodos analíticos demostró que son lineales, repetibles y reproducibles. Los iones mayoritarios fueron el sulfato y el amonio tanto para las  $\text{PM}_{10}$  como para las  $\text{PM}_{2.5}$ . Los iones minoritarios para las  $\text{PM}_{10}$  fueron el sodio, el potasio y el cloruro y para las  $\text{PM}_{2.5}$  el sodio, el nitrato y el potasio, sin embargo, el catión calcio no se cuantificó dado que se genera principalmente por resuspensión de suelos.

Los resultados de la campaña permitieron determinar que la atmósfera de Juriquilla, Querétaro al ser comparados con otros sitios de la República Mexicana presenta menores concentraciones de casi todos los iones, menos el amonio, el cual está asociado principalmente con procesos agrícolas.

Las zonas NNW, N, NNE, NE y ENE, denominadas “norte” son pobres en material particulado, mientras que las zonas S, SSW, WSW, W y SSE, llamadas “sur” son ricas en material particulado. Evidenciando que la zona norte y sur muestran variaciones en la composición química de sus iones, para la zona norte tenemos mayor cantidad de sulfato y amonio, mientras que para la zona sur se tiene mayor cantidad de sodio, potasio y nitrato.

Para la zona norte se tiene que las principales fuentes de los aerosoles y/o sus precursores son Parque Industrial Polígono Empresarial, Parque Industrial



Querétaro, Parques Industriales Jurica, las emisiones por vehículos y una pequeña porción de las parcelas dedicadas a la agricultura.

Para la zona sur las principales fuentes de emisión son por las actividades en las parcelas dedicadas a la agricultura en dirección SW, SSW, S y W tanto en la zona de Querétaro como en las encontradas en Guanajuato. Las emisiones por vehículos son mayores del lado sur debido a que se abarca una mayor porción urbanizada y las concentraciones de los nitratos aumenta en esta zona. La presa de Juriquilla también tiene importancia porque al encontrarse en esta dirección, la concentración de cloruro y sodio aumenta de manera considerable a comparación de su contraparte, la zona norte.

## 7. REFERENCIAS

### 7.1 Normas

- NOM-025-SSA1-2014. Valores límite permisible para la concentración de partículas suspendidas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en el aire ambiente y criterios para su evaluación.

### 7.2 Libros

- Aragon-Piña, A. (2011). *¿Cómo son las partículas atmosféricas y cuál es su relación con los diversos tipos de fuentes contaminantes?* Groppe Libros
- Baird, Colin (2001). *Química ambiental*. Editorial Reverté.
- Boucher, Olivier (2015). *Atmospheric Aerosols: Properties and Climate Impacts*. Springer.
- Colegio Nacional de Químicos Farmacéuticos Biólogos, A. C. (2002). *Guía de Validación de Métodos Analíticos*.
- Harris, D. C. (2012). *Análisis químico cuantitativo*. Editorial Reverté.
- National Research Council (2005). *Radiative Forcing of Climate Change: Expanding the Concept and Addressing Uncertainties*. Washington, DC: The National Academies Press.
- Querol, X. (2018). *La calidad del aire en las ciudades. Un reto mundial*. Fundación Gas Natural Fenosa.
- Seinfeld, J. H., Seinfeld y Pandis, S. N. (1998) *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution*. John Wiley and Sons.
- Tomasi, C., Fuzzi, S., Kokhanovsky, A. (2017). *Atmospheric Aerosols: Life Cycles and Effects on Air Quality and Climate*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

### 7.3 Artículos

- Bravo-Álvarez, H., Soto-Ayala, R., Sosa-Echeverría, R., Sánchez-Álvarez, P. (2003). Efecto de la lluvia ácida en el material constituyente de los monumentos mayas mexicanos. *Ingeniería, investigación y tecnología*, **4**, 195 – 205.
- Castro, T., Peralta, O., Salcedo, D., Santos, J., Saavedra, M. I., Espinoza, M. L., Salcido, A., Celada-Murillo, A. T., Carreón-Sierra, S., Alvarez-Ospina, H., Carabali, G., Barrera, V., Madronich, S. (2017). Water-soluble inorganic ions of size-differentiated atmospheric particles from a suburban site of Mexico City. *Journal of Atmospheric Chemistry*, **75**, 155 – 169.
- Hernández-Mena, L., Saldarriaga-Noreña, H., Carbajal-Romero, P., Cosío-Ramírez, R., Esquivel-Hernández, B. (2010). Presence of the Most Abundant Ionic Species and Their Contribution to PM<sub>2.5</sub> Mass, in the City of Guadalajara, Jalisco (Mexico). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, **85**, 632 – 637.
- Moya M., Castro, T., Zepeda, M., Báez, A., (2003). Characterization of size-differentiated inorganic composition of aerosol in Mexico City. *Atmospheric Environment*, **37**, 3581 – 3591.
- Moya, M., Grutter, M., Báez, A., (2004). Diurnal variability of size-differentiated inorganic aerosol and their gas-phase precursors during January and February of 2003 near downtown Mexico City. *Atmospheric Environment*, **38**, 5651 – 5661.
- Querol, X., Pey, J., Minguillón, M., Pérez, N., Alastuey, A., M. Viana, M., Moreno, T., Bernabé, R. M., Blanco, S., Cárdenas, B., Vega, E., Sosa, G., Escalona, S., Ruiz, H. y Artíñano, B. 2008. PM speciation and sources in Mexico during the MILAGRO-2006 Campaign. *Atmospheric chemistry and Physics*, **8**, 111 – 128.
- Trenberth, K.E., Fasullo, J.T., Kiehl, J. (2009). Earth's Global Energy Budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **3**, 311 – 324.

## 7.4 Páginas de internet

- ICH. 2005. Text on Validation of Analytical Procedures. Text and methodology. <http://www.ich.org/products/guidelines/quality/quality-Single/article/validation-of-analytical-procedures-text-and-methodology.html> (Consultado el 20/08/2018).
- <http://userscontent2.emaze.com/images/3cc513af-fe96-4c39-98ae-fe93fc3ec0f1/a934870c-0340-4f1b-b7f3-25f24e2ae9e4.png> (Consultado el 15/05/2018).
- [https://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/ru/figure-faq-1-1-figure-1.html](https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/ru/figure-faq-1-1-figure-1.html) (Consultado el 17/05/2018).
- <https://es.climate-data.org/location/3364/> (Consultado el 20/05/2018)
- [https://aerosol.ees.ufl.edu/atmos\\_aerosol/section09.html](https://aerosol.ees.ufl.edu/atmos_aerosol/section09.html) (Consultado el 23/05/2018).
- <https://www.thoughtco.com/the-great-smog-of-1952-1779346> (Consultado el 28/05/2018).
- <https://www.nationalgeographic.com/environment/global-warming/acid-rain/> (Consultado el 04/06/2018).
- <https://acidraingermany.weebly.com/acid-rain-in-germany.html> (Consultado el 04/06/2018).
- <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/695/queson.pdf> (Consultado el 16/05/2018).
- <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/CMD/manuals/Man-031917-ICS-1500-Man031917-EN.pdf> (Consultado el 04/06/2018).
- [https://www.researchgate.net/figure/e-The-low-pressure-cascade-impactor-with-the-schematic-representation-of-a-stage-within\\_fig1\\_271732386](https://www.researchgate.net/figure/e-The-low-pressure-cascade-impactor-with-the-schematic-representation-of-a-stage-within_fig1_271732386) (Consultado el 16/05/2018).
- [sede.a.gob.mx/sites/sede.a.gob.mx/files/PV\\_2017\\_RT\\_.pdf](http://sede.a.gob.mx/sites/sede.a.gob.mx/files/PV_2017_RT_.pdf) (Consultado el 16/07/2018).
- [www.diputados.gob.mx/sedia/biblio/usieg/mapas/gto\\_map.pdf](http://www.diputados.gob.mx/sedia/biblio/usieg/mapas/gto_map.pdf) (Consultado el 17/07/2018).