



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

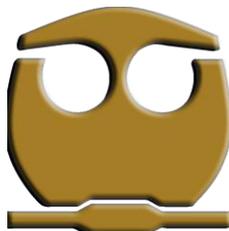
**ESPECIACIÓN QUÍMICA DE LOS AEROSOLES  
ATMOSFÉRICOS EN LA CIUDAD DE MÉRIDA  
POR FLUORESCENCIA DE RAYOS X.**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**INGENIERA QUÍMICA**

**P R E S E N T A**

Gabriela Lucero Pietra Santa Rivera



**CD. MX. , 2019**



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:** M. en I. María Rafaela Gutiérrez Lara

**VOCAL:** Dr. José Agustín García Reynoso

**SECRETARIO:** Dr. Harry Alvarez Ospina

**1er. SUPLENTE:** Dr. Patricia Díaz Arista

**2° SUPLENTE:** M. en C. Alejandra Mendoza Campos

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**FACULTAD DE CIENCIAS Y CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA.**

**ASESOR DEL TEMA:**

---

**Dr. Harry Alvarez Ospina**

**SUPERVISOR TÉCNICO:**

---

**Dr. Luis Antonio Ladino Moreno**

**SUSTENTANTE (S):**

---

**Gabriela Lucero Pietra Santa Rivera**

## **Agradecimientos**

A la Universidad Nacional Autónoma de México por ser la institución que me permitió tener una buena formación profesional llena de experiencias que me hicieron crecer como persona, estudiante y futura ingeniera.

A la Facultad de Ciencias y el Centro de Ciencias de la Atmósfera, lugares donde se desarrolló principalmente el presente proyecto de tesis.

Al Instituto de Física de la UNAM, donde se empleó el espectrómetro de fluorescencia de rayos X que fue fundamental en este análisis.

Al CONACYT por la beca otorgada a través del proyecto de frontera de la Ciencia (I000/781/2016) para la realización de este trabajo de investigación.

Al jurado evaluador por sus sugerencias, principalmente al Dr. Harry Álvarez Ospina que también es el director de esta tesis por tener la buena disponibilidad y paciencia para apoyarme en múltiples dudas o correcciones a lo largo de todo el trabajo realizado.

Al Dr. Luis Antonio Ladino Moreno por la confianza depositada al aceptar ser mi asesor técnico.

Al Dr. Javier Miranda Martín del Campo y al Fis. Juan Carlos Pineda Santamaría por la asesoría brindada en el uso del espectrómetro de fluorescencia de rayos X.

A la Q. María Isabel Saavedra por el apoyo técnico recibido en el análisis de la fracción carbonácea de mis muestras.

Al Dr. Jong Kim de la Universidad Dalhousie, Canada, por el préstamo del muestreador de partículas Partisol.

Al M. en C. Daniel Rosas y al Lic. Talib Amador por la ayuda en la recolección de las partículas atmosféricas PM<sub>2.5</sub>.

# ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS .....	I
LISTA DE TABLAS .....	III
1. RESUMEN.....	1
2. INTRODUCCIÓN .....	2
3. MARCO TEÓRICO.....	4
3.1 Contaminación Atmosférica.....	4
3.2 Unidades de Concentración de Contaminantes Atmosféricos .....	5
3.3 Clasificación de los Contaminantes Atmosféricos .....	6
3.3.1 Aerosoles .....	6
3.3.2 Polvo .....	6
3.3.2 Gases .....	7
3.3.1.1 Clasificación de los Aerosoles Atmosféricos .....	8
3.3.1.1.1 Según su Fuente.....	9
3.3.1.1.1.1 Fuentes antropogénicas .....	9
3.3.1.1.1.2 Fuentes naturales .....	10
3.3.1.1.2 Según su Origen.....	11
3.3.1.1.3 Según su Tamaño .....	12
3.3.1.1.4 Según su proceso de formación .....	13
3.3.1.2 Composición Química de los Aerosoles Atmosféricos.....	15
3.3.1.2.1 Compuestos Mayoritarios.....	16
3.3.1.2.2 Compuestos Minoritarios .....	17
3.3.1.3 Métodos de Análisis de los Aerosoles Atmosféricos .....	17
4. OBJETIVOS.....	23
4.1 Objetivo General: .....	23
4.2 Objetivos Particulares:.....	23
5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....	24
5.1 Sitio de Muestreo. ....	24
5.2 Pretratamiento de los Filtros.....	25
5.3 Equipo de Medició.....	26

5.4 Análisis Gravimétrico .....	27
5.5 Análisis de las Muestras .....	28
5.6 Análisis de Carbono .....	29
<b>6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>33</b>
6.1 Análisis de la Concentración Másica de las partículas $PM_{2.5}$ .....	33
6.2 Análisis de composición química (elementos) de las partículas $PM_{2.5}$ .....	34
6.2.1 Sodio (Na).....	34
6.2.2 Magnesio (Mg).....	35
6.2.3 Fósforo (P).....	37
6.2.4 Calcio (Ca).....	37
6.2.5 Cloro (Cl).....	38
6.2.6 Azufre (S).....	39
6.2.7 Potasio (K).....	40
6.2.8 Titanio (Ti).....	41
6.2.9 Cromo (Cr).....	42
6.2.10 Hierro (Fe).....	43
6.2.11 Níquel (Ni).....	44
6.2.12 Cobre (Cu).....	45
6.2.13 Zinc (Zn).....	46
6.2.14 Plomo (Pb).....	47
6.3 Concentración Promedio por Elemento.....	48
6.4 Comparación de Resultados con Diferentes Estudios.....	51
6.5 Análisis de la Fracción Carbonácea de las Partículas $PM_{2.5}$ .....	55
6.5.1 Carbono Total (CT).....	55
6.5.2 Carbono Orgánico (CO).....	57
6.6 Distribución Química de las Partículas $PM_{2.5}$ .....	58
<b>7. CONCLUSIONES.....</b>	<b>61</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>63</b>
8.1 Normas.....	63
8.2 Libros y artículos .....	63
8.3 Páginas de Internet.....	72

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Clasificación de los aerosoles atmosféricos.....	8
<b>Figura 2.</b> Clasificación de las fuentes de emisión.....	9
<b>Figura 3.</b> Tipos de fuentes antropogénicas y naturales .....	10
<b>Figura 4.</b> Clasificación de los aerosoles según su origen .....	12
<b>Figura 5.</b> Relación entre las secciones del Sistema Respiratorio y el tamaño de partícula.....	14
<b>Figura 6.</b> Clasificación de partículas de acuerdo a su proceso de formación .....	15
<b>Figura 7.</b> Composición química de PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> .....	16
<b>Figura 8.</b> Espectrómetro de fluorescencia de rayos X .....	18
<b>Figura 9.</b> Proceso de análisis por fluorescencia de rayos X .....	21
<b>Figura 10.</b> Estación de monitoreo RUOA en la UADY.....	24
<b>Figura 11.</b> Mufla de la marca THERMOLYNE, tipo 47900.....	25
<b>Figura 12.</b> Caja de acondicionamiento usada en el laboratorio de Química Atmosférica en el CCA, UNAM.....	26
<b>Figura 13.</b> Partisol 2025i de Thermo Fisher.....	27
<b>Figura 14.</b> Ilustración del espectrómetro de rayos del Laboratorio de Aerosoles en el Instituto de Física, UNAM. Dibujo por Miguel A. Mejía .....	29
<b>Figura 15.</b> Analizador de carbono UIC CM5014 .....	30
<b>Figura 16.</b> Analizador de carbono UIC CM5014 .....	31
<b>Figura 17.</b> Sistema de detección .....	32
<b>Figura 18.</b> Concentración promedio de PM <sub>2.5</sub> durante toda la campaña de monitoreo. ....	34
<b>Figura 19.</b> Serie de tiempo de sodio durante toda la campaña de monitoreo.....	35
<b>Figura 20.</b> Serie de tiempo de magnesio durante toda la campaña de monitoreo. ....	36
<b>Figura 21.</b> Serie de tiempo de fosforo durante toda la campaña de monitoreo. ...	37
<b>Figura 22.</b> Serie de tiempo de calcio durante toda la campaña de monitoreo. ....	38
<b>Figura 23.</b> Serie de tiempo de cloro durante toda la campaña de monitoreo. ....	39
<b>Figura 24.</b> Serie de tiempo de azufre durante toda la campaña de monitoreo. ....	40

<b>Figura 25.</b> Serie de tiempo de potasio durante toda la campaña de monitoreo....	42
<b>Figura 26.</b> Serie de tiempo de titanio durante toda la campaña de monitoreo.....	43
<b>Figura 27.</b> Serie de tiempo de cromo durante toda la campaña de monitoreo. ....	43
<b>Figura 28.</b> Serie de tiempo de hierro durante toda la campaña de monitoreo. ....	44
<b>Figura 29.</b> Serie de tiempo de níquel durante toda la campaña de monitoreo. ....	45
<b>Figura 30.</b> Serie de tiempo de cobre durante toda la campaña de monitoreo. ....	46
<b>Figura 31.</b> Serie de tiempo de zinc durante toda la campaña de monitoreo.....	47
<b>Figura 32.</b> Serie de tiempo de plomo durante toda la campaña de monitoreo. ....	48
<b>Figura 33.</b> Concentraciones promedio por elemento durante toda la campaña de monitoreo. ....	49
<b>Figura 34.</b> Gráfica comparativa de concentraciones promedio por elemento para cada periodo estacional.....	50
<b>Figura 35.</b> <i>Serie de tiempo de carbono total durante toda la campaña de monitoreo.</i> ....	57
<b>Figura 36.</b> Serie de tiempo de carbono orgánico durante toda la campaña de monitoreo. ....	58
<b>Figura 37.</b> Valores promedio considerando todas las PM <sub>2.5</sub> presentes en la atmósfera analizada. ....	59
<b>Figura 38.</b> Valores promedio considerando solamente los elementos analizados. ....	60

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Concentraciones promedio por elemento para cada temporada climática. .....	50
<b>Tabla 2.</b> Comparación de las concentraciones promedio obtenidas con las de artículos de otras regiones en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . .....	52
<b>Tabla 3.</b> Concentraciones promedio de carbono orgánico y total durante toda la campaña de monitoreo.....	56



## 1. Resumen

En este trabajo de investigación se llevó a cabo la caracterización química de las partículas atmosféricas  $PM_{2.5}$  en la ciudad de Mérida, Yucatán, mediante las técnicas de fluorescencia de rayos X y coulombimetría. Las muestras a analizar se recolectaron en filtros de cuarzo durante el período comprendido entre el 14 de abril al 28 de julio del 2017 en la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos ubicado la Facultad de Química de la Universidad Autónoma de Yucatán.

Mediante el análisis de las muestras recolectadas en la ciudad de Mérida se observó que ningún día incluyendo los días en que se presentaron los máximos sobrepasaron la norma oficial mexicana NOM-025-SSA1-2014. Además, se logró la identificación de 14 elementos (Na, Mg, P, S, Cl, K, Ca, Ti, Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, Pb), además del carbono orgánico y total. El elemento más abundante fue el calcio, seguido del sodio y el plomo.

Adicionalmente, se encontró que en la temporada de lluvias la concentración de la mayoría de los elementos analizados disminuyo notoriamente, sin embargo, en el potasio, cromo, cobre y zinc, sus concentraciones no variaron mucho, lo cual nos confirma que cerca del sitio de muestreo hay una fuente local responsable de la emisión de estos elementos.

Finalmente, al comparar los resultados obtenidos con los presentados en artículos realizados en diferentes partes del mundo, observamos que en la mayoría de los casos las concentraciones de los elementos analizados resultaban más altas que en Mérida, demostrando con ello que la contaminación en esa zona no es un problema latente como en otras ciudades.



## 2. Introducción

La contaminación es un problema a nivel mundial originado principalmente por acciones humanas y se define como la introducción o la presencia de sustancias, organismos o formas de energía en ambientes o sustratos a los que no pertenecen o en cantidades superiores a las propias de dichos sustratos, por un tiempo suficiente y bajo condiciones tales que, esas sustancias interfieren con la salud y la comodidad de las personas, dañan los recursos naturales o alteran el equilibrio ecológico de la zona (Albert, 2011).

Los graves problemas de contaminación surgieron a partir de la Revolución Industrial en el siglo XVIII, cuando las emisiones y descargas de contaminantes de procesos industriales sobrepasaron la capacidad de purificación de los cuerpos receptores (agua, aire y suelo) y conllevaron a la generación de problemas de salud en los seres humanos y alteración de los ecosistemas (Hunt y Johnson, 1998).

Actualmente dentro del tema de contaminación destaca la contaminación atmosférica, la cual se define como la presencia en el aire de materia o formas de energía que impliquen riesgo, daño o molestia grave para las personas o bienes de cualquier naturaleza (Martínez y Díaz de Mera, 2004). Este tema ha tomado mucha relevancia y se han realizado numerosos estudios en todo el mundo con la finalidad de estimar el grado de contaminación, el tipo de compuestos presentes e identificar las fuentes de emisión; esto con el objetivo de tomar medidas que permitan disminuir las emisiones a la atmósfera, ya que se ha visto que una disminución en los niveles de contaminación del aire puede reducir de manera importante la morbilidad y mortalidad derivada de enfermedades cardiovasculares, cáncer de pulmón, neumopatías crónicas y agudas, entre ellas el asma (OMS, 2012).



Cabe mencionar que en México, se han realizado múltiples estudios pero la gran mayoría han sido enfocados a la Ciudad de México, razón por la cual, actualmente se está empezando a realizar caracterizaciones químicas y físicas de las partículas atmosféricas en distintas ciudad del país, un ejemplo de esto, es el actual proyecto de investigación del cual forma parte esta tesis y que se realiza en la ciudad de Mérida y que tiene objetivo principal observar la influencia de la quema de biomasa de poblaciones vecinas, la variabilidad estacional de contaminantes, el efecto de los polvos del Sahara, los efectos de la contaminación local (quema de combustibles fósiles y biomasa) e Identificar y cuantificar las fuentes de los núcleos de glaciación que afectan significativamente el ciclo hidrológico al sureste de México. Dentro del contexto mencionado, el presente trabajo de investigación se enfocó en realizar la caracterización química (elementos, carbono orgánico y total) de los aerosoles atmosféricos presentes en la ciudad de Mérida durante el período del 14 de abril al 28 de junio del 2017.



## 3. Marco Teórico

### 3.1 Contaminación Atmosférica

La contaminación atmosférica es un problema de suma importancia en el medio ambiente, del cual, el ser humano tiene gran parte de la responsabilidad, ya que cada actividad que realizamos repercute de algún modo en el medio ambiente.

La contaminación atmosférica puede definirse como la presencia de algún material o sustancia en el aire en concentraciones suficientes para causar un efecto negativo en la salud de las personas, el medio ambiente o algunos bienes materiales (Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT, 2018). Algunos efectos nocivos de la contaminación atmosférica son:

- *En la salud humana:* Los orígenes de la preocupación respecto a cómo puede afectar en la salud, se remontan al año 1952 en Londres, año en que el dióxido de azufre originado por las emisiones de la quema de carbón formó una niebla espesa a la que se le llamó “killer fog”, dado que hubo una gran cantidad de personas que perecieron a causa de ella y otras tantas que enfermaron (Brockington, 2017).

Actualmente existen numerosos estudios respecto a la relación que existe entre los contaminantes y la salud. Estos estudios han demostrado que el aumento en la contaminación del aire en muchas ocasiones está vinculado con afecciones en el aparato respiratorio y aumentos en los ataques cardíacos, así como sus efectos negativos a personas con asma u otros tipos de padecimientos pulmonares o cardíacas; además de que los niños y los adultos mayores son los sectores poblacionales más vulnerables a esta contaminación (Dockery *et al.*, 1993; Moolgavkar, 2000; Schwartz *et al.*, 2002; Hoek *et al.*, 2002; Pope y Dockery, 2006).



- *En los bienes materiales:* Muchos materiales de construcción son afectados por reacciones con contaminantes atmosféricos, como se puede ver en el deterioro de monumentos o antiguas construcciones (Bravo *et al.*, 2006).
- *En la vegetación:* La lluvia ácida, producida por las reacciones químicas de algunos contaminantes con el agua y oxígeno de la atmósfera, genera la acidificación del suelo que a su vez produce desertificación (Dalmasso *et al.*, 1997; Fonseca *et al.*, 2013).
- *En el medio ambiente:* El ejemplo más común de cómo se ve afectado el medio ambiente a nivel mundial son los gases de efecto invernadero, que son los culpables del aumento de temperatura en el planeta, es decir, generan un calentamiento global, que a su vez tiene muchas consecuencias en el planeta (IPPC, 2007).

Los contaminantes atmosféricos pueden encontrarse en estado gaseoso, sólido y líquido, y pueden clasificarse de acuerdo a su fuente en naturales y antropogénicos, por su origen en primarios y secundario. Los primarios son emitidos directamente a la atmósfera desde alguna fuente ya sea natural o antropogénica; mientras que los secundarios, son originados por medio de reacciones químicas que ocurren entre los contaminantes primarios y otros elementos de la atmósfera.

### 3.2 Unidades de Concentración de Contaminantes Atmosféricos

Las unidades que suelen emplearse para expresar la concentración de los contaminantes presentes en el aire son:

- **Partes por millón (ppm) y partes por billón (ppb):** Son unidades de tipo volumen/volumen, y se utilizan para contaminantes en estado gaseoso.
- **Microgramos por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y miligramos por metro cúbico ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ):** Son unidades de masa/volumen, es decir, están fundamentadas en



el peso por unidad de volumen de aire. Se emplean para contaminantes gaseosos y sólidos.

- **Moléculas por volumen ( $\text{moléculas}/\text{m}^3$ ):** Se usan para expresar las concentraciones de componentes como los radicales libres.
- **Unidades Dobson:** Se emplea para expresar la concentración de ozono estratosférico. Cada unidad de este tipo equivale a una capa de ozono puro de 0.01 mm de espesor a 1 atm y 273 °k.

### 3.3 Clasificación de los Contaminantes Atmosféricos

Dado que en la atmósfera hay distintos tipos de sustancias contaminantes se clasifican en aerosoles, polvos y gases.

#### 3.3.1 Aerosoles

Un aerosol es generalmente definido como una suspensión de partículas sólidas o líquidas en un gas, cuyo diámetro está en el rango de  $10^{-9}$  a  $10^{-4}$  m. Los ejemplos más evidentes de aerosoles en la atmósfera son las nubes que están conformadas principalmente por agua condensada con diámetros de partícula aproximadamente del orden de 10  $\mu\text{m}$ . En ciencias atmosféricas, tradicionalmente el término aerosol se refiere a partículas suspendidas que contienen una gran proporción de material condensado diferente del agua, dado que las nubes son consideradas como un fenómeno separado (Ulrich, 2005).

#### 3.3.2 Polvo

Es materia sólida de mayor tamaño que los aerosoles, su tamaño va desde los 20  $\mu\text{m}$  en adelante. Éste, suele ser un problema tanto en el área en que se



desarrolla como donde es transportado por acción del viento (Colbeck y Lizardis, 2014).

### 3.3.2 Gases

Los gases contaminantes son elementos que se encuentran en altas concentraciones en la atmósfera, generando con ello daños a la salud y problemas medioambientales. Pueden originarse por fuentes naturales o por acción de las actividades humanas como es el caso de los gases emitidos por la industria (Font, 2011).

Entre los gases contaminantes más comunes podemos encontrar los siguientes:

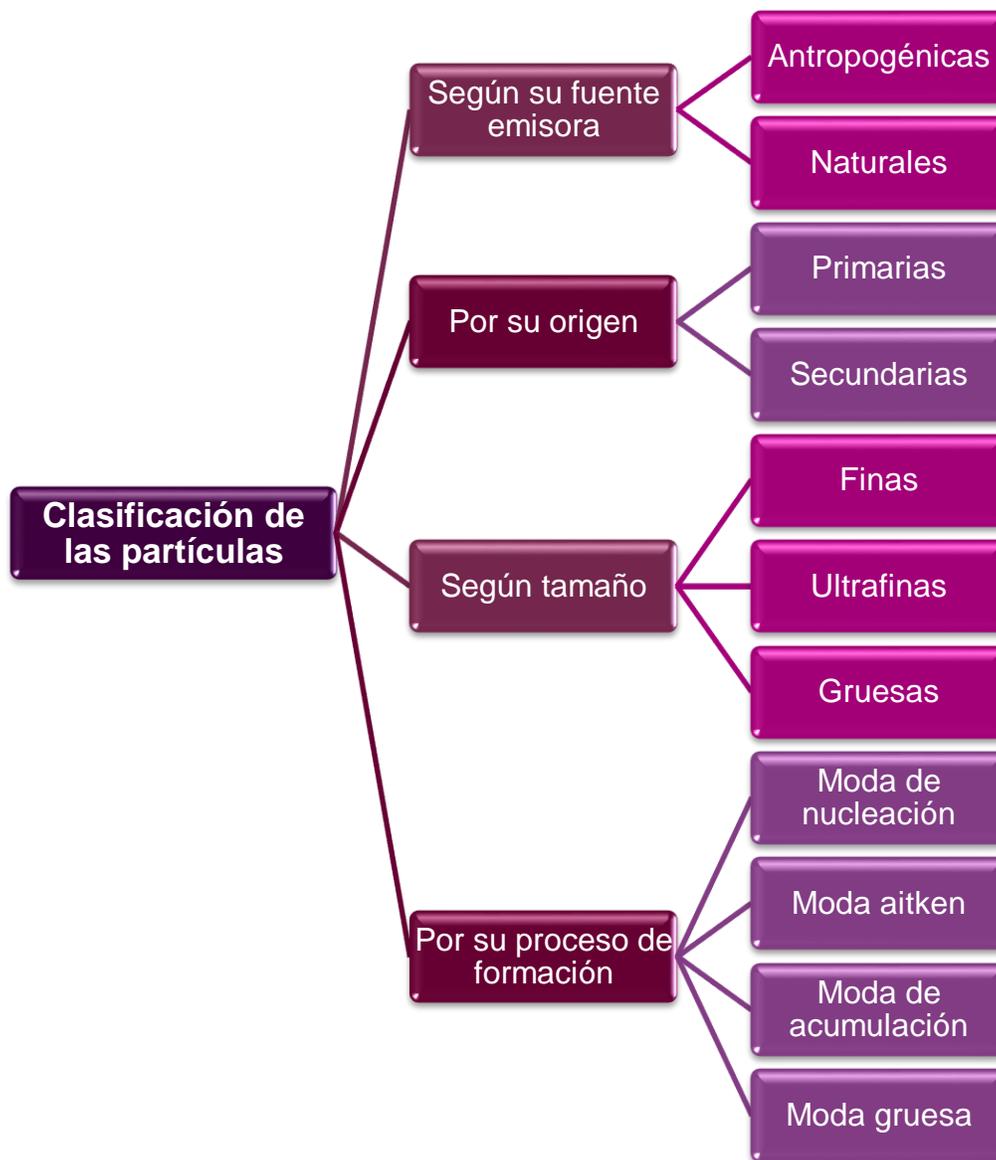
- Clorofluorocarbonos (CFC)
- Monóxido de carbono (CO)
- Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)
- Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)
- Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)
- Metano (CH<sub>4</sub>)
- Ozono (O<sub>3</sub>)

De los contaminantes mencionados los de mayor importancia son los aerosoles y los gases, sin embargo, nos enfocaremos a lo largo del trabajo en los aerosoles.



### 3.3.1.1 Clasificación de los Aerosoles Atmosféricos

Los aerosoles se clasifican de diversas maneras, siendo las más importantes las referentes a su fuente, origen, tamaño y proceso de formación (Figura 1).



**Figura 1.** Clasificación de los aerosoles atmosféricos.



### 3.3.1.1.1 Según su Fuente

Los aerosoles se clasifican de acuerdo a su fuente de emisión en antropogénicos y naturales. Como su nombre lo indica, los primeros abarcan las emisiones generadas por el hombre y las segundas son aquellas donde éste no interviene (Jacobson, 2002). Sin embargo, esta clasificación, tiene una subdivisión. Por un lado, las fuentes antropogénicas pueden ser fijas o estacionarias, de áreas y móviles, mientras que las naturales pueden ser biogénicas y geogénicas (Figura 2). Este tipo de subdivisión es importante y útil cuando se requiere realizar inventarios de emisiones (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2011).

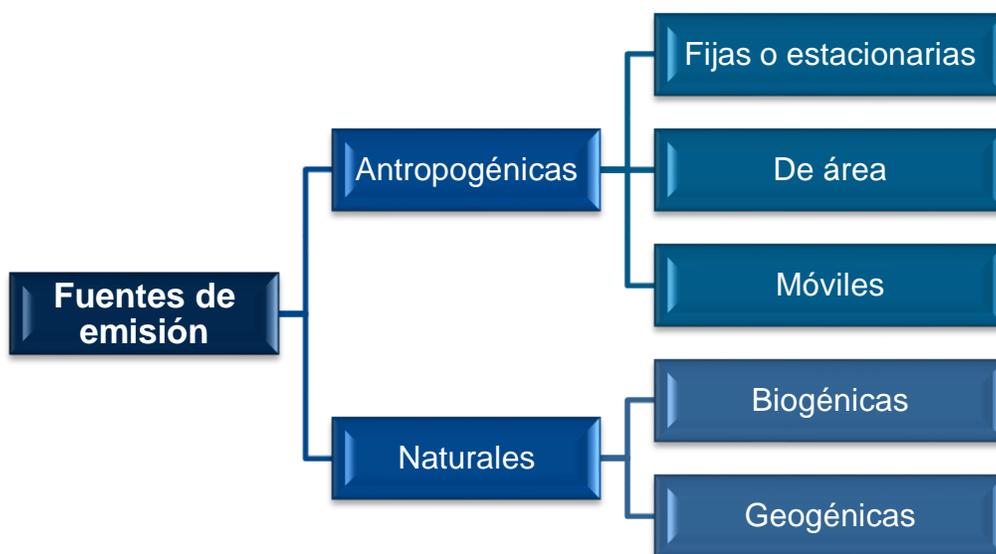


Figura 2. Clasificación de las fuentes de emisión.

#### 3.3.1.1.1.1 Fuentes antropogénicas

##### A. Fuentes fijas o estacionarias

Se refiere a edificios industriales, comerciales, de servicios u otros que generan emisiones y contaminantes considerables. También se incluyen establecimientos alimenticios y cualquier instalación inamovible (Figura 3).

## B. Fuentes de área

Son establecimientos o actividades que se encuentra distribuido y dispersos, se considera en conjunto como una fuente emisora de contaminantes de área, sin embargo, estas fuentes deben ser numerosas, por ejemplo, gasolineras, fábricas y quema de leña (Figura 3).

## C. Fuentes móviles

Comprenden todos los vehículos (automóviles, camiones, trenes, tractores, barcos, etc) que principalmente emiten productos de combustión y evaporación de combustible (Figura 3).



Figura 3. Tipos de fuentes antropogénicas y naturales (<http://cienciauanl.uanl.mx/?p=5391>).

### 3.3.1.1.1.2 Fuentes naturales

#### A. Fuentes geogénicas

Se emiten de procesos naturales como las erupciones volcánicas o como consecuencia de la erosión del suelo (Figura 3).



## **B. Fuentes biogénicas**

Se emiten como producto de las actividades de los seres vivos y constan principalmente de emisiones significativas de compuestos orgánicos volátiles a la atmósfera (Figura 3).

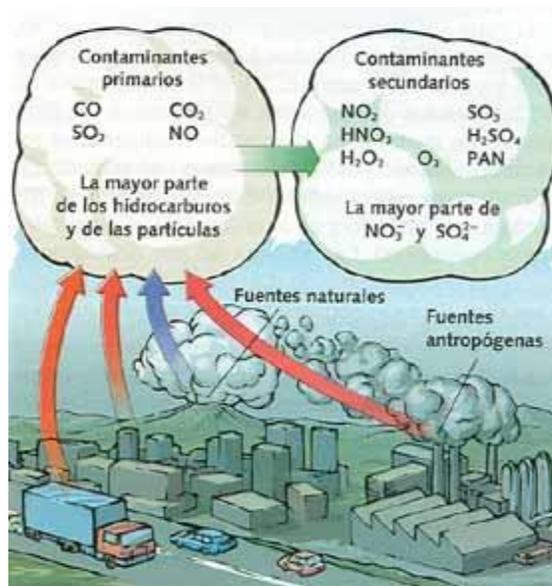
### **3.3.1.1.2 Según su Origen**

Al igual que los contaminantes atmosféricos estos se clasifican en (Figura 4):

**A. *Primarios*:** Son emitidos directamente a la atmósfera (Seinfeld y Pandis, 1998), algunos ejemplos de este tipo de partículas son:

- Partículas provenientes de procesos de combustión, brisas marinas, erupciones volcánicas e incendios.
- Partículas de polen y microorganismos.
- Partículas de metales ligeros o pesados.

**B. *Secundarios*:** Éstos son producidos como resultado de reacciones químicas entre componentes presentes en la atmósfera, los principales precursores son los óxidos de azufre y los de nitrógeno (Seinfeld y Pandis, 1998).



**Figura 4.** Clasificación de los aerosoles según su origen (<http://abelardo-monroy.blogspot.com/2012/10/contaminacion-atmosferica.html>).

### 3.3.1.1.3 Según su Tamaño

Determinar el tamaño de los aerosoles es difícil debido a su gran variedad de formas y tamaño, en su lugar se utiliza el parámetro de diámetro aerodinámico para clasificarlas de acuerdo a su tamaño. El diámetro aerodinámico se define como el diámetro de una esfera hipotética de densidad 1 g/cm<sup>3</sup> que tiene la misma velocidad final debido a la fuerza gravitatoria, que la partícula bajo las condiciones existentes de temperatura, presión y humedad relativa (Seinfeld y Pandis, 1998).

Según el diámetro aerodinámico los aerosoles se clasifican en PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>1</sub>. Las partículas que tienen un diámetro aerodinámico menor a 10 μm se les conoce como PM<sub>10</sub> y suelen penetrar hasta la región extratorácica; las menores a 2.5 μm se les conoce como PM<sub>2.5</sub> y llegan hasta la región traqueobronquial y finalmente las menores a 1.0 μm se les conoce como PM<sub>1</sub> y llegan hasta la región alveolar (Figura 5). A partir de esto se puede decir que cuánto más pequeña sea la partícula, mayor es la penetración en el sistema respiratorio y por eso la atención



se ha centrado en las partículas finas (con un diámetro entre 2.5 y 1  $\mu\text{m}$ ) y ultrafinas (Menores a 1  $\mu\text{m}$ ).

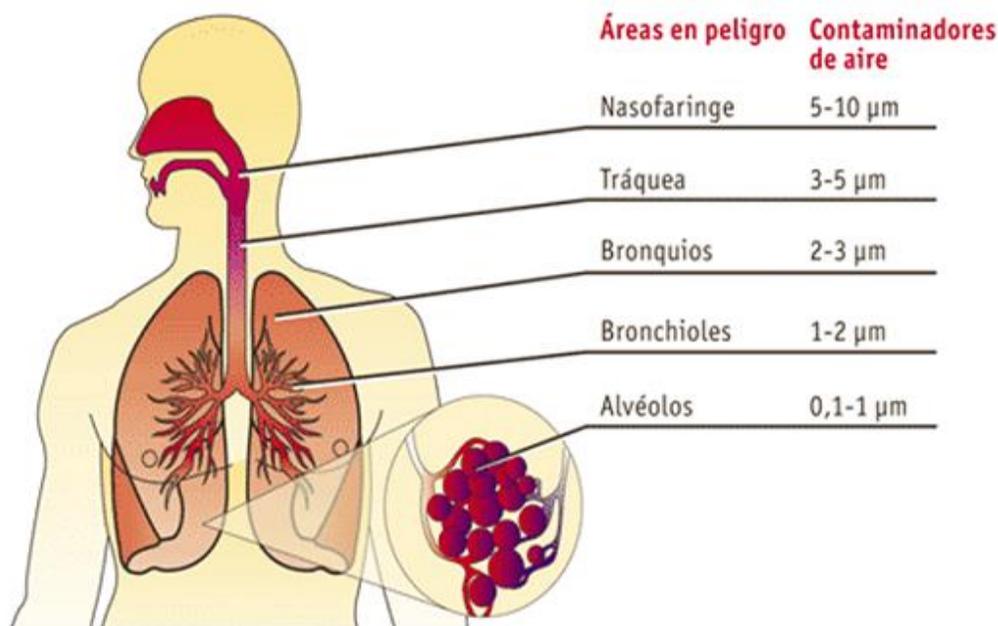
#### 3.3.1.1.4 Según su proceso de formación

**A. *Moda de nucleación (>0.02  $\mu\text{m}$  - 1  $\mu\text{m}$ ):*** Son partículas cuyo origen está en la condensación de vapores; se puede producir de modo homogéneo o heterogéneo, el primero sólo puede llevarse a cabo con  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NH}_3$  o  $\text{H}_2\text{O}$  como gases precursores, en el segundo caso, intervienen otras partículas finas que estén en el ambiente. La mayoría de las partículas pertenecientes a esta moda se encuentran entre los 5 y los 15 nm, además de tener una vida media de horas, dado que se con el paso del tiempo se convierten en partículas más gruesas por procesos de coagulación con otras partículas. Su formación depende de las condiciones de presión, temperatura y humedad relativa, además de la concentración del vapor, se sabe que la formación de estas partículas se ve favorecida por descensos en la temperatura y/o incrementos en la humedad relativa (Seinfeld y Pandis, 1998). Se ha observado mayor presencia de estas moléculas cuando se presenta mayor contaminación por vehículos (Figura 6).

**B. *Moda Aitken (0.02 - 0.1  $\mu\text{m}$ ):*** Estas partículas pueden ser de origen primaria o secundaria, y pueden originarse por distintos procesos que pueden ser coagulación de partículas nucleadas, condensación o reacciones en fase líquida por compuestos inorgánicos (Vergaz, 2001). Permanecen en la atmósfera durante un tiempo considerable y su concentración está altamente influenciada por actividades humanas, por esta razón hay mayor presencia de ellas en las ciudades; se considera que, por el diámetro de partícula, éstas y las formadas por la moda de nucleación son las que provocan mayores daños a la salud (Figura 6).

**C. Moda de acumulación (0.1 - 1  $\mu\text{m}$ ):** Este tipo de partículas se forman por el crecimiento de partículas de la moda Aitken a través de reacciones en fase líquida en las gotas de agua de las nubes. Los tiempos promedio de residencia de estas partículas son mucho mayores debido a su tamaño (Horvath, 2000). Cabe mencionar, que éstas suelen ser muy eficientes para dispersar la luz, afectando con ello la visibilidad (Figura 6).

**D. Moda gruesa (>1  $\mu\text{m}$ ):** Se originan usualmente por procesos mecánicos naturales tanto por la erosión que da origen a materia mineral y otros materiales como por la explosión de burbujas en la superficie de los mares (Figura 6), que da origen a los aerosoles marinos.



**Figura 5.** Relación entre las secciones del Sistema Respiratorio y el tamaño de partícula (<https://www.catorce6.com/actualidad-ambiental/bienestar/15451-consejos-y-purificadores-para-mejorar-la-calidad-del-aire-al-interior-de-su-vivienda>).

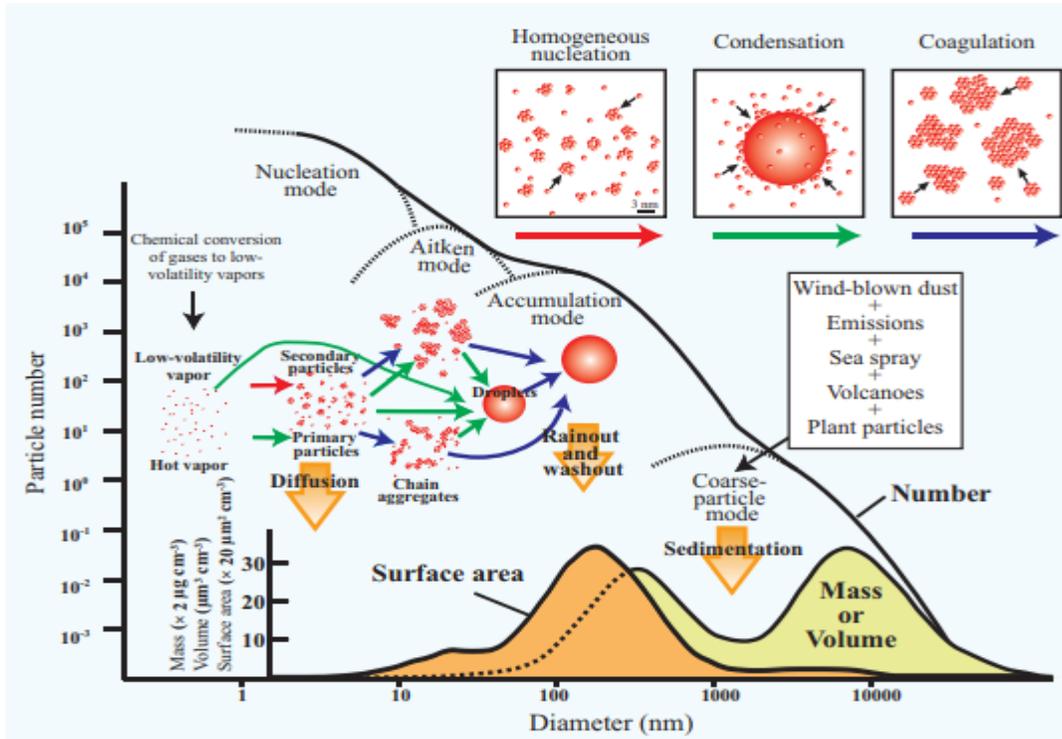
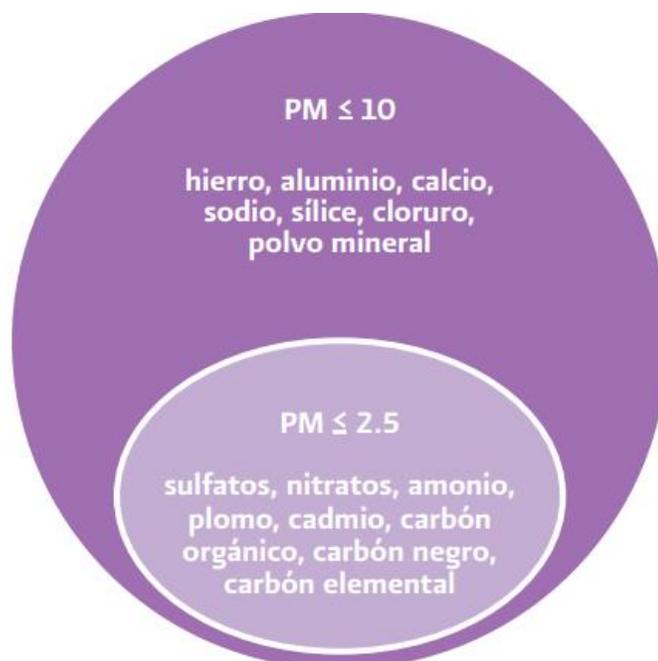


Figura 6. Clasificación de partículas de acuerdo a su proceso de formación (Buseck & Adachi, 2008).

### 3.3.1.2 Composición Química de los Aerosoles Atmosféricos

La composición química de los aerosoles es muy diversa ya que depende tanto de su fuente emisora como de sus procesos de formación, no es lo mismo una partícula proveniente de una región montañosa que de una zona costera, es decir, una puede contener altas concentraciones de óxidos metálicos (como  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  y  $\text{CaO}$ ) y otras altas concentraciones de  $\text{NaCl}$ . De igual manera, la variación puede estar asociada a una industria emisora o al tipo de combustible usado por los coches y camiones. Sin embargo, a pesar de la gran variedad que existe en la composición química puede encontrarse compuestos similares en diversos ambientes (Figura 7). En la actualidad existen componentes mayoritarios y minoritarios comunes en los aerosoles.



**Figura 7.** Composición química de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$   
([www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/695/queson.pdf](http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/695/queson.pdf)).

### 3.3.1.2.1 Compuestos Mayoritarios

Como su nombre lo indica, suelen abarcar la mayor parte de las partículas de algunas zonas, los compuestos más comunes son:

- Sulfatos
- Nitratos
- Amonio
- Sodio y cloro
- Carbón elemental
- Componentes minerales



### 3.3.1.2.2 Compuestos Minoritarios

Pueden encontrarse junto a los compuestos mayoritarios o de forma independiente, algunos son:

- Elementos traza, como el arsénico y el plomo.
- Compuestos orgánicos trazas, como pesticidas y solventes

### 3.3.1.3 Métodos de Análisis de los Aerosoles Atmosféricos

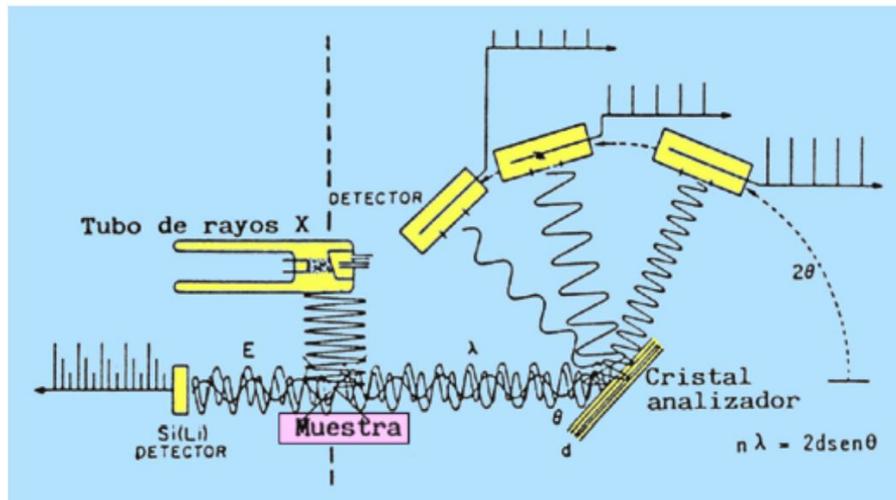
Para la determinación de la composición química de los aerosoles atmosféricos existen diversos métodos analíticos como la cromatografía de líquidos, cromatografía de gases, absorción atómica, plasma acoplado inductivamente, espectrometría de rayos X, entre otros. Sin embargo, existe un método en el cual se puede hacer una gran determinación de compuestos simultáneamente, conocida como espectrometría por fluorescencia de rayos X o XRF por sus siglas en inglés. Los rayos X, fueron descubiertos durante el siglo XIX por el físico Wilhem Conrad Röntgen, quien descubrió una radiación electromagnética desconocida para su tiempo. Ahora sabemos que los rayos X son radiación ionizante con longitudes de onda de van desde 0.01 hasta 10nm, cuyo valor energético está entre 0.125 y 125 keV, respectivamente (Mejía, 2017).

La fluorescencia de rayos X presenta la ventaja de poder realizar análisis sin que la muestra se destruya, lo cual es ideal en el análisis de aerosoles atmosféricos ya que se puede complementar con otras técnicas y de esta manera poder elucidar en alto grado la composición química de estos.

Otras de las ventajas de usar esta técnica para llevar a cabo el análisis de los aerosoles son:

- Análisis de bajo costo.
- Obtención e interpretación de los resultados de manera simple.
- No se requiere una preparación previa de la muestra.
- Se pueden llevar a cabo determinaciones elementales desde el Berilio hasta el uranio de manera simultánea.
- Presenta límite de detección bajos que va de 1 a 10  $\mu\text{g/g}$ .

Un espectrómetro de fluorescencia de rayos es un instrumento que como su nombre lo indica, produce un espectro donde la energía, la intensidad y la longitud de onda se pueden medir. Están conformados por una fuente de radiación y un sistema de detección. Para poder llevar a cabo el análisis, la muestra es irradiada de manera puntual por la fuente y al mismo tiempo, el detector mide la irradiación secundaria que produce la muestra (Figura 8).



**Figura 8.** Espectrómetro de fluorescencia de rayos X

([www.usc.es/export/sites/default/gl/.../riaidt/raiosx/.../UNED\\_Curso\\_Fluorescencia.pdf](http://www.usc.es/export/sites/default/gl/.../riaidt/raiosx/.../UNED_Curso_Fluorescencia.pdf)).



De manera general, podemos decir que no todos los elementos químicos presentan la misma estabilidad, y que mientras mayor sea la inestabilidad es más fácil que puedan emitir partículas con carga o radiación electromagnética, llamadas fotones. Es decir, si una emisión de alguna carga o radiación interacciona con un átomo, ocasionara la liberación de un electrón, por lo tanto, se dice que ocurrió una ionización.

Los tipos de radiación ionizante son:

- **Radiaciones alfa:** Son núcleos de helio que se emiten en determinadas desintegraciones nucleares y que están formados por dos neutrones y dos protones. Las partículas alfa son las radiaciones ionizantes con mayor masa, por ello son muy poco penetrantes además de muy energéticas.
- **Radiaciones beta:** Ocurre una emisión de electrones (beta negativas) o positrones (beta positivas) como resultado de una desintegración nuclear. Su masa es menor que la de las partículas alfa, lo cual les permite ser un poco más penetrantes y las hace menos energéticas.
- **Radiaciones gamma:** Son radiaciones electromagnéticas por lo cual no tiene masa ni carga, de modo que resultan altamente penetrantes. Se originan de la desintegración de los núcleos inestables de algunos elementos radiactivos.
- **Rayos X:** Poseen las mismas características que la clasificación anterior, pero provienen de las capas externas del átomo, donde se encuentran los electrones.
- **Neutrones liberados:** Éstos tienen la mayor capacidad de penetración ya que no cuentan con una capa eléctrica, pueden penetrar fácilmente en la

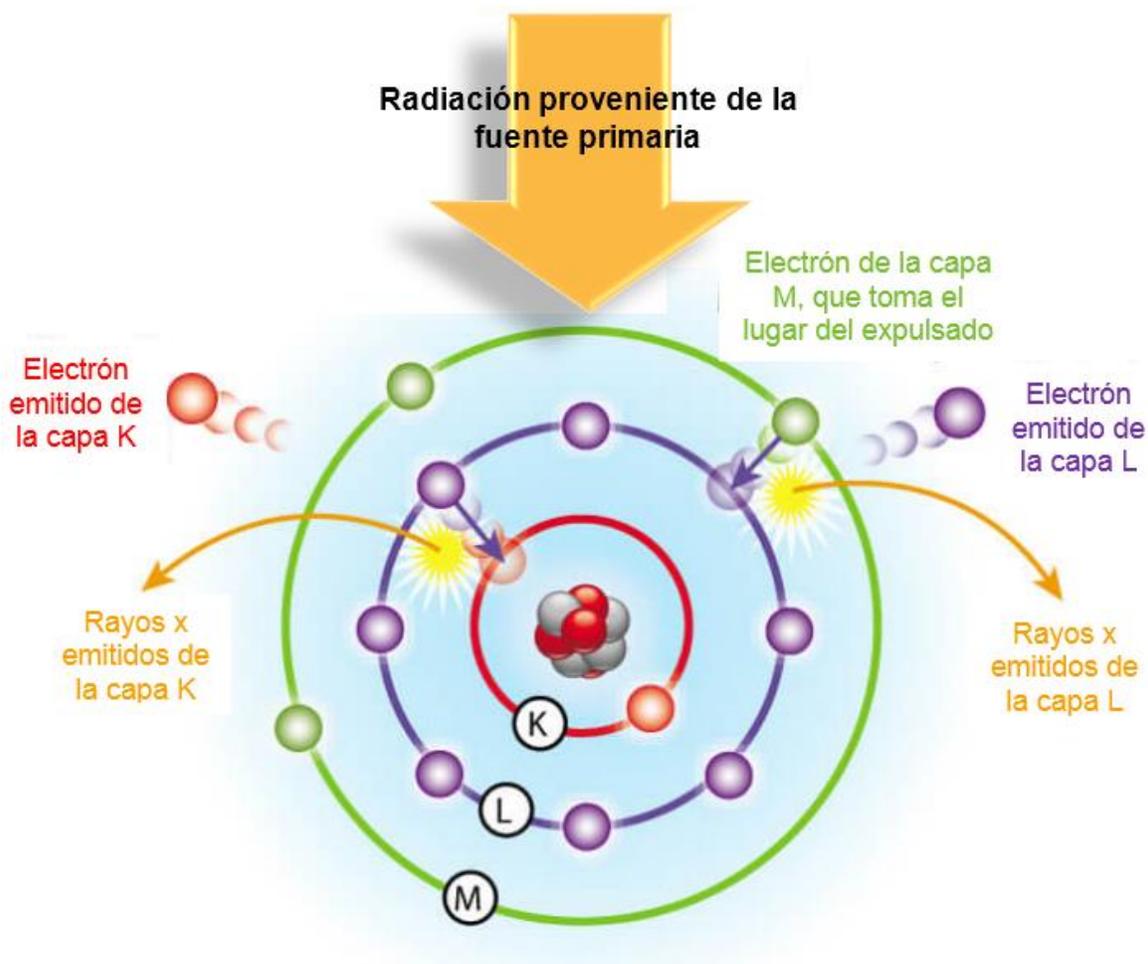


estructura de algunos átomos y provocar su división, lo cual a su vez puede hacer que se emita una partícula cargada o un rayo gamma.

Dado lo anterior, para que se lleve a cabo el proceso de fluorescencia, la fuente debe de emitir una radiación de rayos X, para que los elementos de la muestra a analizar reciban la energía de un fotón altamente cargado, cuando sus átomos la absorben un electrón de los que se encuentran cerca del núcleo es expulsado de una de las capas internas K o L.

Esto provoca que el átomo quede en un estado muy excitado e inestable; por lo tanto, para reestablecer su estabilidad, los electrones de las capas superiores ocuparan ese espacio. Al pasar un electrón de una capa superior con una energía diferente a la del electrón que se perdió, se produce una diferencia de energía, la cual se emite en forma de radiación de rayos X (fotón).

El fotón emitido, tendrá una energía específica y esta energía es única para cada elemento (Figura 9), esto nos permite identificar con base en los valores de dicha energía y el número de electrones liberados que elementos están presentes en la muestra (Mejía, 2017).



**Figura 9.** Proceso de análisis por fluorescencia de rayos X

(<https://www.911metallurgist.com/blog/wp-content/uploads/2013/08/XRF-Radiation1.jpg>).

Los espectrómetros de fluorescencia de rayos X se dividen de acuerdo al sistema de detección que se utilice.

- A. Fluorescencia de rayos X por dispersión de longitud de onda (WDXRF):** En este caso, se considera que cada elemento emite una longitud de onda característica cuando la muestra es expuesta a una fuente de rayos X que excita los electrones de los elementos presentes en la misma. Para detectar dichas longitudes de onda se emplea un cristal que sirve para difractar el espectro emitido por la muestra en diferentes longitudes de onda individuales, tomando en cuenta que el detector de rayos X está colocado en cierto ángulo que permite medir longitudes de



onda específicas y que puede ser cambiado. Los cristales empleados pueden ser de distintos tipos, entre los cuales encontramos, minerales, metálicos, orgánicos y de multicapas sintéticas. Lo anterior se fundamenta en la Ley de Bragg que establece que los cristales reflejan rayos X de longitudes de onda y ángulos de incidencia específicos cuando interfiere la longitud de onda de los rayos X dispersos.

**B. Fluorescencia de rayos X por dispersión de energía (EDXRF):** En esta se tiene un detector de energía dispersa que en combinación con un analizador multi canal se encarga de recolectar simultáneamente la radiación de fluorescencia emitida por la muestra y separar las diferentes energías de radiación características de cada elemento presente en la muestra (Sherma, 2007).



## 4. Objetivos

### 4.1 Objetivo General:

- Realizar la caracterización química de las partículas atmosféricas  $PM_{2.5}$  en la ciudad de Mérida, Yucatán, mediante las técnicas de Fluorescencia de Rayos X y coulombimetría.

### 4.2 Objetivos Particulares:

- Determinar las concentraciones de las partículas atmosféricas  $PM_{2.5}$  y los elementos en cada una de las muestras recolectadas en la ciudad de Mérida.
- Identificar las posibles fuentes emisoras de los elementos analizados.
- Establecer el elemento que se encuentra mayoritariamente en las partículas  $PM_{2.5}$ .
- Realizar un análisis comparativo de las concentraciones obtenidas, dividiendo el periodo total de muestreo en temporada de secas y de lluvias.
- Comparar los resultados obtenidos con estudios realizados en diferentes ciudades y zonas costeras del mundo.

## 5. Metodología Experimental

### 5.1 Sitio de Muestreo.

Con la finalidad de evaluar la calidad del aire en la ciudad de Mérida y conocer la composición química de los aerosoles atmosféricos, se realizó un monitoreo atmosférico usando filtros de cuarzo y un recolector de partículas partisol del 14 de abril al 28 julio en la Facultad de Química de la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY), que se ubica a una latitud  $20^{\circ} 59' 2''$  N y una longitud  $89^{\circ} 38' 43''$  W (Figura 10).

Este monitoreo atmosférico permitió conocer la variabilidad de algunos elementos químicos en las temporadas de secas y de lluvias, así como el impacto que tiene la quema de biomasa (febrero - mayo) de zonas cercanas sobre la calidad de aire en Mérida. El sitio de muestreo estuvo localizado en la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (RUOA), lo cual permitió contar con la infraestructura necesaria para complementar el monitoreo atmosférico con otros instrumentos (Figura 10).



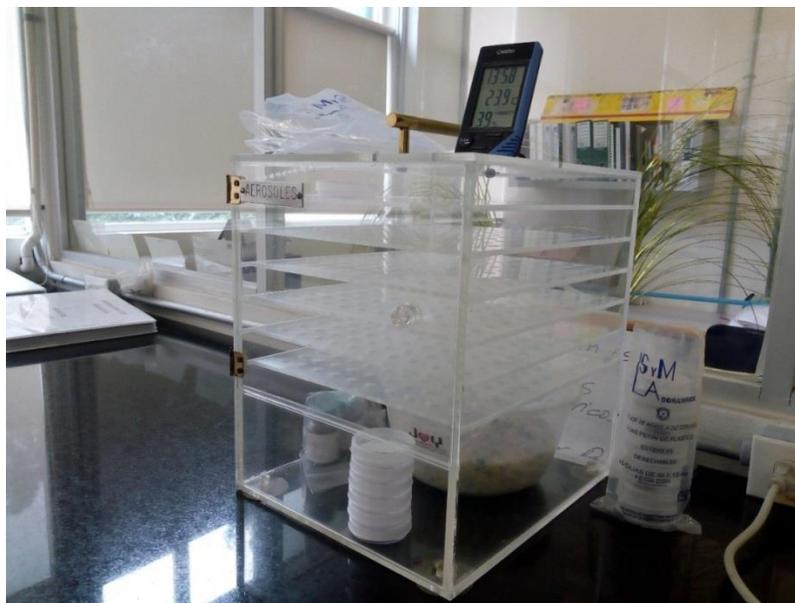
**Figura 10.** Estación de monitoreo RUOA en la UADY.

## 5.2 Pretratamiento de los Filtros

Con la finalidad de asegurar que los filtros de cuarzo a usar estuvieran libres de materia orgánica se realizó un pretratamiento a cada uno de ellos antes de ser colocados en el recolector de aerosoles Partisol. Este pretratamiento consistió en colocar los filtros en crisoles e introducirlos en una mufla que está a 550 °C durante 6 horas (Figura 11). Posteriormente, se sacaron los crisoles de la mufla y se colocaron cada uno de los filtros en una caja de petri, los cuales se introducen en una cámara de acondicionamiento durante 24 horas con la finalidad de asegurar que todos estén en igual condiciones de humedad y temperatura (Figura 12). Finalmente, los filtros son pesados e introducidos nuevamente en las cajas Petri y sellados con parafilm hasta su uso.



**Figura 11.** Mufla de la marca THERMOLYNE, tipo 47900.



*Figura 12. Caja de acondicionamiento usada en el laboratorio de Química Atmosférica en el CCA, UNAM.*

### 5.3 Equipo de Medición

Para la recolección de las partículas atmosféricas  $PM_{2.5}$  se utilizó un recolector de partículas partisol (Figura 13), en el cual a través del uso de una bomba de vacío se succiona aire de la atmósfera a un flujo constante de 16.7 L/min, el cual se obliga a pasar a través de un sistema de entrada en donde se colocan filtros de 47 mm, en nuestro caso de cuarzo y de esta manera las partículas presentes en la atmósfera son depositadas y/o retenidas en los filtros.

Este instrumento permite realizar un monitoreo de forma semiautomática, esto debido a que internamente cuenta con 16 cassetes en los cuales se puede colocar un filtro limpio en cada uno de ellos, los cuales automáticamente el instrumento una vez recolectado partículas durante un día realiza el correspondiente cambio de filtro, de esta manera se puede dejar trabajar solo durante 15 días, sin embargo, no es muy recomendable dejar los filtros muestreados en el instrumento ya que puede haber pérdidas de compuestos

debido a la volatilización de estos. Lo recomendado es que una vez recolectadas las partículas, estos se regresen a sus cajas de petri, para sellarlas con parafilm y almacenarlas a 4°C. Cabe mencionar que cada toma de muestras de partículas se realizó durante 24 horas.



Figura 13. Partisol 2025i de Thermo Fisher.

## 5.4 Análisis Gravimétrico

Una vez que se ha realizada la recolección de las partículas atmosféricas PM<sub>2.5</sub> con el partisol es importante realizar un análisis gravimétrico con el fin de conocer la concentración en masa de las partículas colectadas; para ello se toma en consideración el peso antes y después del muestreo de cada filtro, el flujo de alimentación de aire y el tiempo correspondiente a cada muestra. Para calcular de concentración de PM<sub>2.5</sub> en µg/m<sup>3</sup> se utilizando la ecuación 1.

$$\text{Concentración} = \frac{\text{Peso final} - \text{Peso inicial}}{\text{Flujo Volumétrico} \times \text{Tiempo de muestreo}} \quad \text{(Ecuación 1)}$$

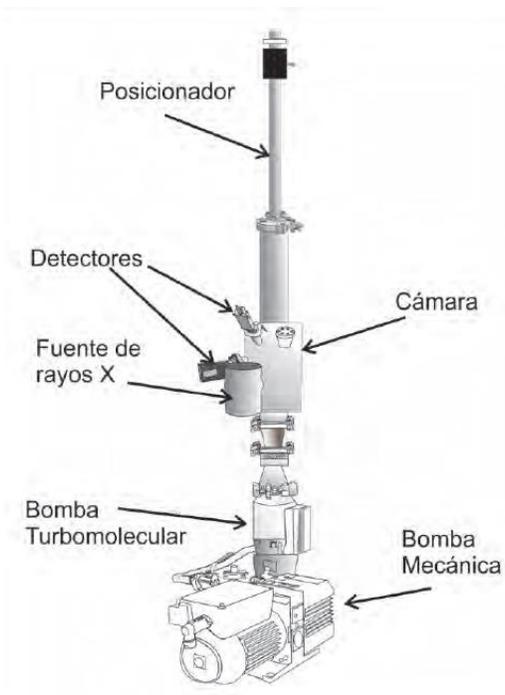


## 5.5 Análisis de las Muestras

Con el objetivo de conocer la composición química de las partículas  $PM_{2.5}$  recolectadas en la ciudad de Mérida, se realizó el análisis de fluorescencia de rayos X en el Laboratorio de Aerosoles Atmosféricos del Instituto de Física de la UNAM.

Antes de introducir las muestras a analizar es importante estabilizar el espectrómetro a usar, para lo cual inicialmente se enciende su bomba mecánica con el objetivo de crear un vacío en la cámara, este vacío debe generar una presión interna de 60 mtorr. Posteriormente, se pone en funcionamiento la bomba turbomolecular, esta permite crear un mayor vacío alcanzando presiones de  $10^{-5}$  torr. Una vez que se tiene el vacío requerido, se encienden los detectores que se van a utilizar, así como la fuente de rayos X, esta última esta lista para utilizar cuando se alcanzan tensiones de 50 KV y una corriente de 500  $\mu$ A. Una vez estabilizado el equipo se introduce el portamuestra en el, este portamuestra es en donde se colocan nuestros filtros de cuarzo. El análisis de fluorescencia de rayos X se realiza durante 5 min, tiempo en el cual la muestra es irradiada con rayos X provenientes de un tubo de rayos X con un ánodo de rodio.

Cuando se trabaja con este tipo de instrumentación es importante la seguridad, para lo cual se usa un contador Geiger que permite monitorear y asegurar que la radiación del tubo de rayos X no sale del espectrómetro, también se usa una pequeña pared de acrílico emplomado para evitar que la radiación llegue al operador.



**Figura 14.** Ilustración del espectrómetro de rayos del Laboratorio de Aerosoles en el Instituto de Física, UNAM. Dibujo por Miguel A. Mejía (Mejía, 2017).

## 5.6 Análisis de Carbono

Para determinar el contenido de carbono orgánico y total presente en las partículas atmosféricas  $PM_{2.5}$ , se utilizó un analizador de carbono CM5014 (Figura 15), el cual tiene la particularidad de realizar mediciones de carbono orgánico, inorgánico y total tanto para muestras líquidas como para sólidas. En nuestro caso se analizaron los filtros de cuarzo previamente empleados en el análisis elemental por fluorescencia de rayos X.



**Figura 15.** Analizador de carbono UIC CM5014 (<http://www.uicinc.com>).

En este equipo el filtro de cuarzo es colocado en un portamuestra de porcelana el cual posteriormente se introduce en un tubo de cuarzo cilíndrico que se encuentra a temperatura promedio de 700 °C para el análisis de carbono total y a 450 °C para el carbono orgánico, lo que asegura que durante el proceso de combustión los compuestos de carbono se oxiden. Una vez que el carbono presente en la muestra se oxida, es emitido en forma de CO<sub>2</sub> y otros gases (vapor de agua, compuestos nitrogenados y azufrados), los cuales son arrastrado por una corriente de oxígeno hacia una trampa de agua que contiene perclorato de magnesio anhídrido y de esta manera garantizar que toda el agua ha sido eliminada. Posteriormente la mezcla de gases pasa por otra trampa que contiene dicromato ácido en silogel y dióxido de manganeso por separado; el primero para evitar que pasen óxidos de nitrógeno y el segundo para evitar que los compuestos de azufre y halógenos den una mala cuantificación. Por último, el gas (CO<sub>2</sub>) se dirige hacia el coulómetro donde se realiza la cuantificación (Figura 16). El oxígeno que se utiliza como gas de arrastre se purifica antes de ser usado como gas de arrastre, haciéndolo pasar por una solución de KOH al 45 %.

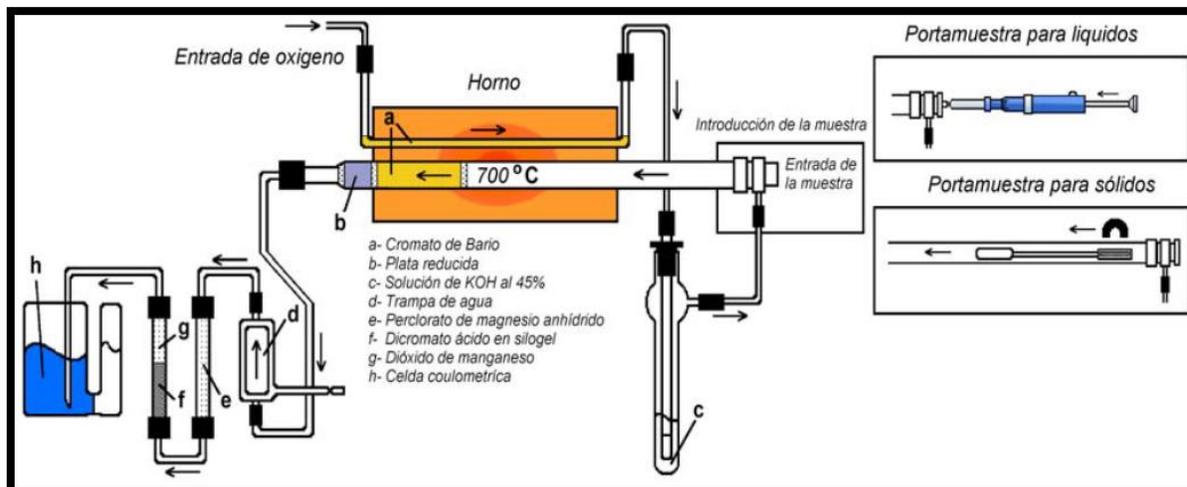


Figura 16. Analizador de carbono UIC CM5014 (<http://www.uicinc.com>)

Una vez el dióxido de carbono es arrastrado hacia la celda coulométrica, este reacciona de la siguiente manera:

### A. Reacciones en la Solución Catódica

#### I. Absorción del CO<sub>2</sub> por la monoetanolamina



#### II. Generación electroquímica de OH<sup>-</sup>



#### III. Neutralización del CO<sub>2</sub> absorbido por la monoetanolamina con el OH<sup>-</sup> generado electroquímicamente

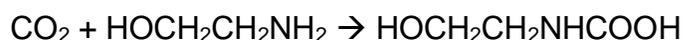


### B. Reacción en la Solución Anódica

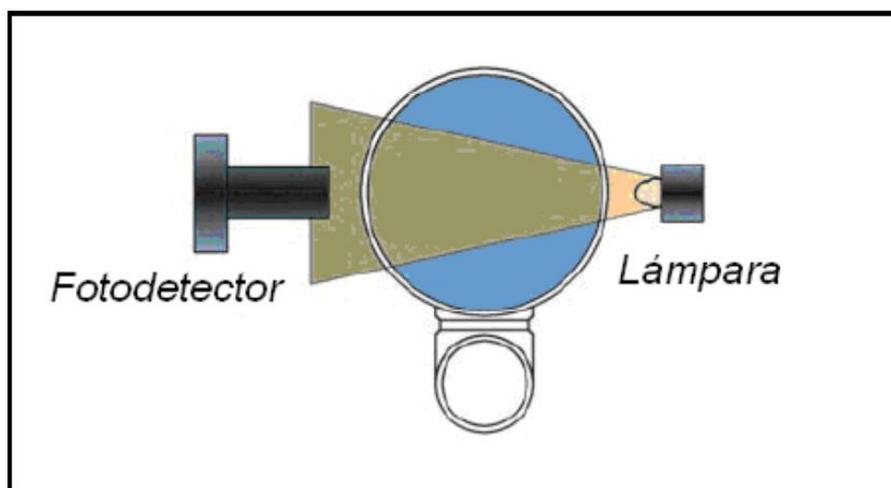


La *celda coulométrica* consta de dos compartimientos separados por una membrana, uno contiene solución de monoetanolamina, un indicador de pH y un electrodo de platino; el otro contiene yoduro de potasio y un electrodo de plata.

Por la solución catódica pasa un haz de luz la cual llega a un sensor fotoeléctrico (Figura 17), cuando el  $\text{CO}_2$  es absorbido por la  $\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{NH}_2$ , se forma el ácido  $\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{NHCOOH}$ , haciendo que el color azul de indicador desaparezca (Ecuación 6).



(Ecuación 6)



**Figura 17.** Sistema de detección (<http://www.uicinc.com>)

El sensor fotoeléctrico (fotodetector) tiene como función registrar el cambio de color como porcentaje de transmitancia y cuando la solución retorna al color original (azul) se da por terminada la titulación o determinación de la concentración de carbono total.



## 6. Resultados y Discusión

### 6.1 Análisis de la Concentración Másica de las partículas $PM_{2.5}$

Las partículas  $PM_{2.5}$  recolectadas en la ciudad de Mérida entre el 14 de abril y 28 de julio del 2017 presentaron un comportamiento variable tal como se ilustra en la figura 18. Se observa que durante los días 28 de mayo y 29 de junio se presentaron los máximos de concentraciones con valores de 37.33 y 25.76  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente. Adicionalmente, se aprecia que ningún día, incluyendo los días en que se presentaron los máximos sobrepasaron la norma oficial mexicana NOM-025-SSA1-2014, la cual establece como límite permisible una concentración de 45  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para un promedio de 24 horas para las partículas  $PM_{2.5}$ . Por otro lado, se comprobó que las concentraciones de las partículas fueron menores durante la temporada de lluvias (junio-julio) que en las secas (abril-mayo), a excepción del día 29 de junio, el cual fue un día en la temporada de lluvias que se cuantificaron altas concentraciones de partículas, sin embargo, al realizar el cálculo de concentración promedio de las dos estaciones se observó más claramente la diferencia, con valores promedios de 10.4 y 14.58  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente. Es decir, que la concentración de  $PM_{2.5}$  se ve afectada (reducida) por la lluvia, dado que ocurre un proceso de remoción húmeda.

Cabe mencionar que los datos presentados en la figura 18 fueron obtenidos con el atenuador beta de la Red Universitaria de Observatorios Atmosférico de Mérida, dado que para la recolección de nuestras muestras utilizamos un partisol y filtros de cuarzo, los cuales para transportarlos a la Ciudad de México y cuantificar los elementos presentes tuvieron que mantenerse a 4°C, sin embargo, este tipo de filtro tienen la desventajas de que absorben muy fácilmente la humedad del ambiente y al tenerlos en refrigeración a para que no se pierda material volátil afectó los resultados de la gravimetría, sin embargo, estos datos presentados son válidos dado que las muestras fueron recolectadas en el mismo lugar donde está la RUOA.

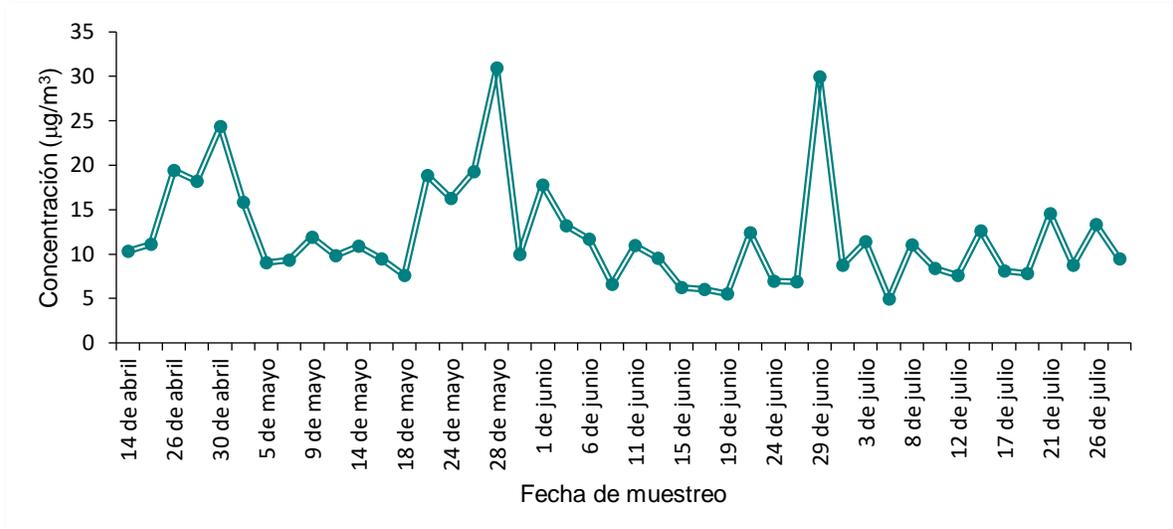


Figura 18. Concentración promedio de PM<sub>2.5</sub> durante toda la campaña de monitoreo.

## 6.2 Análisis de composición química (elementos) de las partículas PM<sub>2.5</sub>

Con el fin de conocer la composición química de las partículas de interés se realizó la caracterización química enfocada a cuantificar la concentración de 14 elementos (Na, Mg, P, S, Cl, K, Ca, Ti, Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, Pb) utilizando fluorescencia de rayos X.

### 6.2.1 Sodio (Na)

En la figura 19, se observa el comportamiento del sodio a lo largo de la campaña de monitoreo, encontrándose que las concentraciones oscilaron entre 0.1 y 0.2 µg/m<sup>3</sup> entre los meses de abril – mayo y luego disminuyeron hasta concentraciones de 0.002 µg/m<sup>3</sup> entre junio – julio, este comportamiento diferencial en los meses se asocia a las temporadas climáticas, las cuales en la primera parte del muestreo fueron secas y en la segunda de lluvias.

Las altas concentraciones de sodio presentadas en la temporada de secas se deben a la presencia de aerosoles marinos dado la cercanía del sitio de



muestreo al océano, mientras que las bajas concentraciones en la temporada de lluvias se asocian a la afinidad que tiene este ion con el agua. El máximo de concentración en la temporada seca se alcanzó el 30 de abril con un valor de  $0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , y el máximo en la temporada de lluvias fue el 10 julio con una concentración de  $0.08 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que la mínima concentración de todo el muestreo se cuantificó el 15 de julio con  $0.002 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , obteniéndose un promedio total de muestreo de  $0.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Cabe mencionar que a lo largo de las series de los elementos se presentan algunos espacios en blanco en las figuras y esto se debe a que las concentraciones no se pudieron cuantificar dadas las bajas concentraciones.

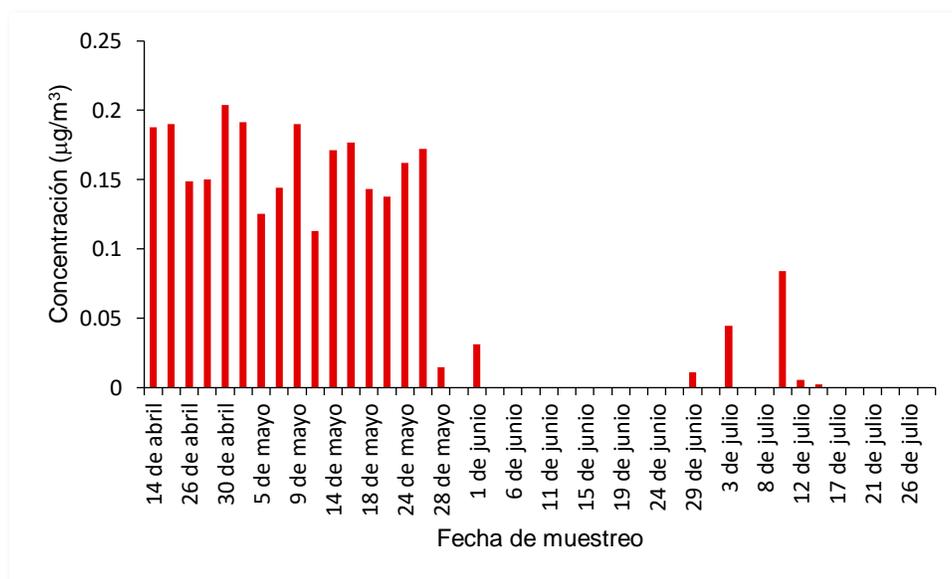


Figura 19. Serie de tiempo de sodio durante toda la campaña de monitoreo.

## 6.2.2 Magnesio (Mg)

En la figura 20, se presenta el comportamiento del Magnesio a lo largo de la campaña de muestreo, la mayor parte de este elemento suele originarse por la brisa marina y la resuspensión de polvos (Argumedo, 2016). Se observa que su concentración en la atmósfera también se ve afectada por los cambios estacionales al igual que el sodio, siendo su concentración mayor en la temporada



de secas que en la de lluvias, aun así, se presentan dos picos altos durante la temporada de lluvias los días 29 de junio y 10 de julio con concentraciones de  $0.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . El primer pico presenta una alta correlación con la concentración de  $\text{PM}_{2.5}$  que se registran ese día, por lo cual puede considerarse que estas partículas probablemente forman parte del polvo mineral del desierto del Sahara que suele llegar entre los meses de Junio y Agosto a Mérida (Ramírez, 2014), mientras que el segundo pico máximo coincide con el máximo de sodio, lo cual permite atribuir este máximo a aerosoles de tipo marino.

En cuanto a los máximos en la temporada de secas, estos se presentaron en días muy cercanos, es decir entre el 21 y 26 de mayo con valores de  $0.12$  y  $0.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que el mínimo se presentó el 13 de junio alcanzando una concentración de  $0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . De igual manera podemos decir que este elemento se ve afectado por las épocas climáticas, pero en menor proporción que el sodio.

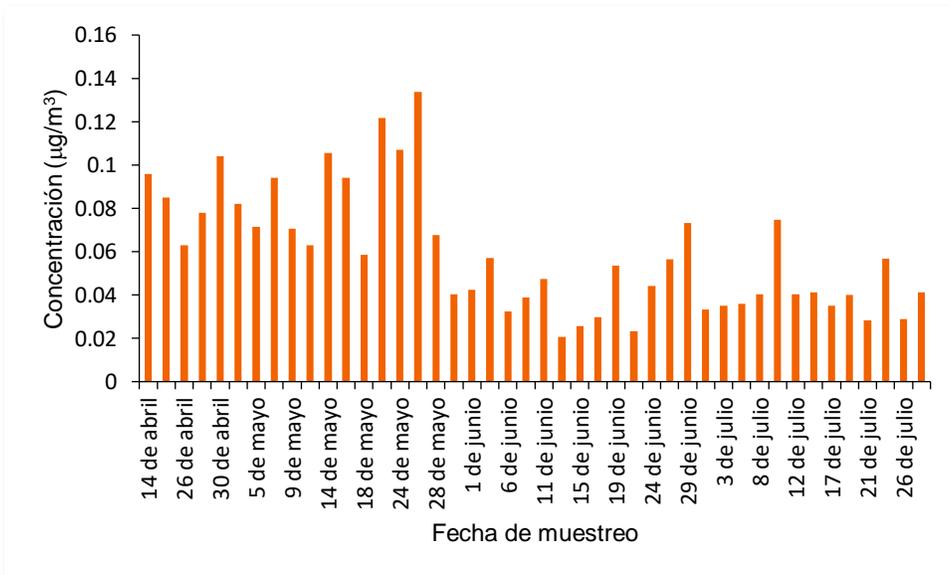


Figura 20. Serie de tiempo de magnesio durante toda la campaña de monitoreo.



### 6.2.3 Fósforo (P)

En el caso de la serie de tiempo del fósforo (figura 21), resulta evidente que el único período con picos altos es el de abril y mayo, este comportamiento coincide con el esperado dado que durante estos dos meses se realiza quema de biomasa en el estado de Yucatán, la cual es una de sus principales fuentes de emisión (Allen, 2010). Por otro lado, se observa que en la temporada de lluvias las concentraciones de este elemento disminuyen considerablemente. El máximo se presenta el 30 de abril con una concentración de  $0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , y los mínimos los días 28 de mayo y 24 de junio con concentraciones de  $6.6 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

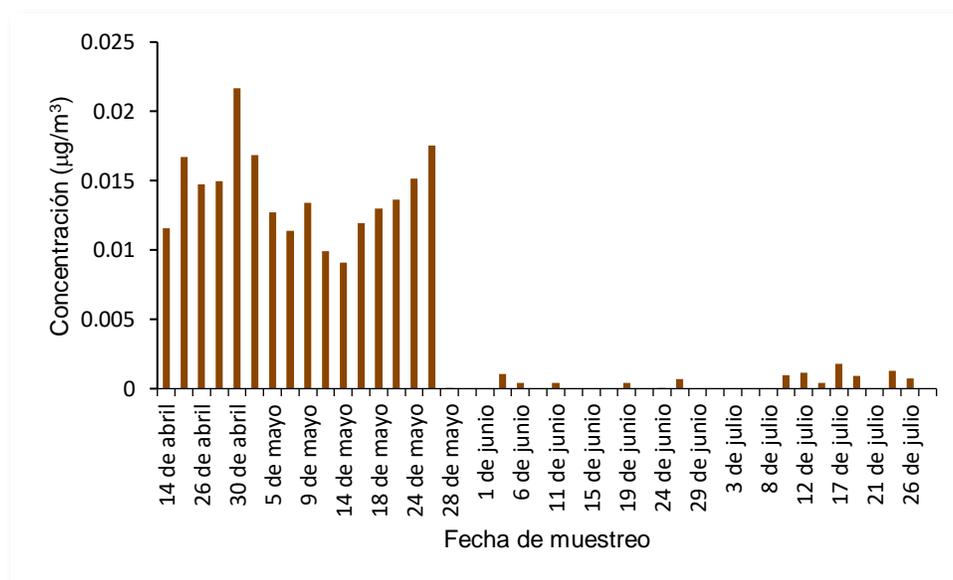


Figura 21. Serie de tiempo de fósforo durante toda la campaña de monitoreo.

### 6.2.4 Calcio (Ca)

En la figura 22, se presenta la serie de tiempo del calcio, en donde se observa que la concentración de este elemento se ve notablemente afectada de una temporada a otra tal como se apreció en el sodio y en el magnesio, con un comportamiento estable dentro de cada una, mostrando puntos máximos en la primer época los días 5 y 26 de mayo con valores de  $0.44$  y  $0.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y un



mínimo el 14 de mayo con  $0.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Los valores máximos de este elemento pueden relacionarse con la industria de la construcción, sin embargo, se atribuye principalmente a la resuspensión de suelo natural, uso de fertilizantes y aerosoles marinos (Barrera, 2005). La segunda temporada presento sus máximos el 29 de junio y el 15 de julio con valores de  $0.08$  y  $0.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y el mínimo el 19 de julio con  $0.004 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . El pico máximo en la temporada de lluvias, es decir el 29 de junio coincide con el máximo de magnesio y de  $\text{PM}_{2.5}$ , lo cual nos permite concluir que este día predominaron los aerosoles provenientes del desierto del Sahara (resuspensión de polvos).

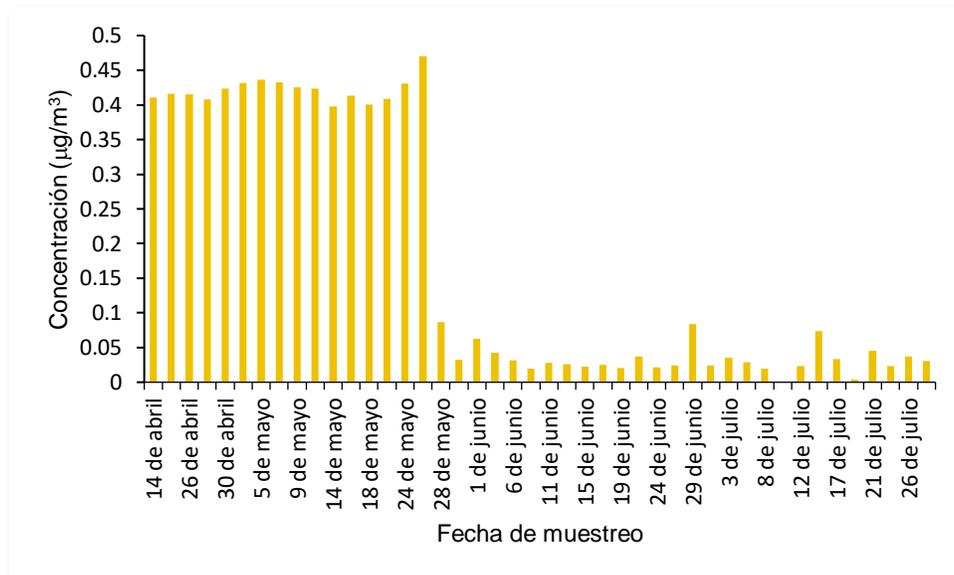


Figura 22. Serie de tiempo de calcio durante toda la campaña de monitoreo.

### 6.2.5 Cloro (Cl)

El origen del cloro atmosférico, al igual que el sodio, se atribuye principalmente a aerosoles marinos, sin embargo, como se aprecia en la figura 23, la concentración de este elemento no disminuyó considerablemente durante la temporada de lluvias como se observó para el sodio, por lo cual se puede decir que tienen dos orígenes diferentes en la temporada de lluvias haciendo que la correlación para estos dos elementos en esta temporada fuera baja. Sin embargo,



al promediar los valores en las dos temporadas notamos que el cloro paso de una concentración de 0.1 a 0.03  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Dado lo anterior se puede considerar que una cantidad (0.07  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de cloro proviene de otra fuente emisora como pueden ser emisiones de clorofluorocarbonados (CFCs) y/o por quema de combustibles (He *et al.*, 2018).

Se observa que en la primera parte del muestreo (temporada seca) se alcanzaron concentraciones altas el 30 de abril y 26 de mayo con valores de 0.10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , coincidiendo el día 30 abril con el máximo del sodio. Mientras, que los mínimos se cuantificaron en la temporada de lluvia durante los días 17 y 24 de junio con valores de 0.016 y 0.018  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente.

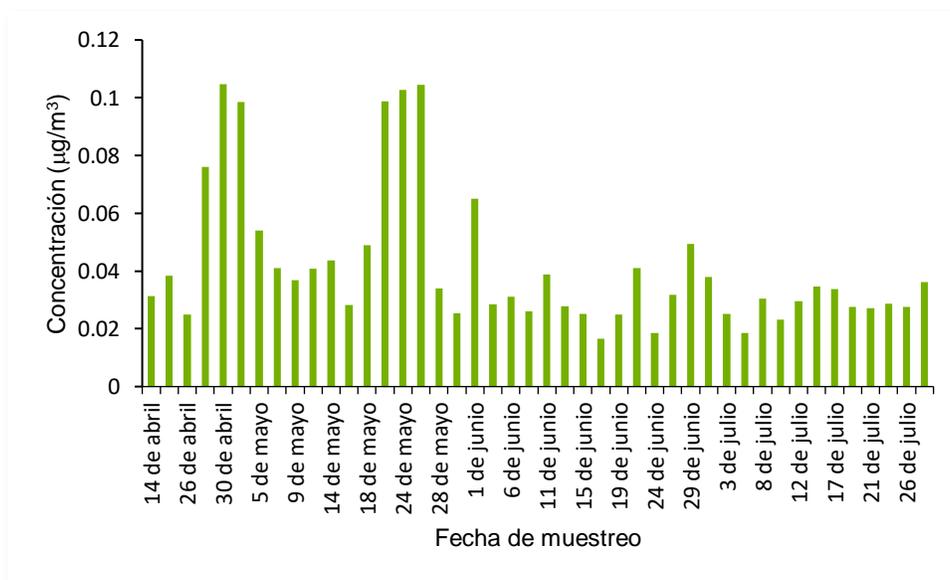


Figura 23. Serie de tiempo de cloro durante toda la campaña de monitoreo.

### 6.2.6 Azufre (S)

En la figura 24 se observa el comportamiento del azufre a lo largo de toda la campaña de monitoreo, siendo uno de los más constantes, es decir sin verse afectado por el cambio de temporada, ya que, si fuera así, como se puede notar en otros elementos, los picos en general tendrían valores notablemente más bajos



a partir de finales de mayo de acuerdo a la tendencia observada, lo cual nos indica que la fuente de emisión de este contaminante es local y posiblemente cerca del sitio de muestreo.

Los picos más altos de concentración se encontraron el 21 y el 26 de julio con valores de 0.12 y 0.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y los mínimos el 24 de junio y 5 de julio con concentraciones de 0.02 y 0.01  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente. La principal fuente de emisión del azufre a la atmósfera se atribuye a la combustión de carbón y productos petrolíferos como combustibles fósiles, seguido por la industria metalúrgica, los cuales son comunes en la zona (Gao *et al.*, 2018).

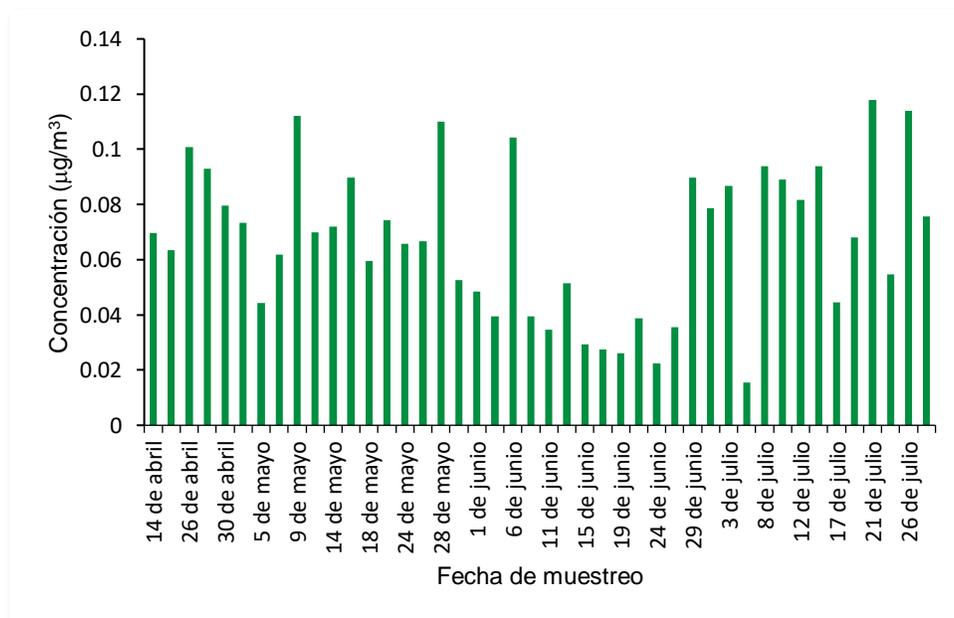


Figura 24. Serie de tiempo de azufre durante toda la campaña de monitoreo.

### 6.2.7 Potasio (K)

En la figura 25, se muestra la serie del tiempo del potasio, en donde se observa que la concentración máxima durante la campaña se presentó el 22 de junio con 0.09  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que el mínimo fue el 12 de mayo con 0.005  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . El comportamiento de este elemento fue muy variable a lo largo de todo el periodo



con máximos y mínimos durante las dos temporadas, lo cual nos indica que este elemento proviene principalmente de una fuente local y puntual cerca del sitio de muestreo como pueden ser la quema de biomasa para cocinar y/o el uso de fertilizantes, ya que, si su origen fuera regional, este se vería más afectado por el cambio de temporada climática.

### 6.2.8 Titanio (Ti)

El titanio es un elemento que se emite principalmente a la atmósfera por la industria de la pintura (se utiliza como pigmento) y por la resuspensión de polvos (Barrera, 2005). En cuanto a su comportamiento durante toda la campaña de monitoreo podemos observar en la figura 26 que en la temporada de secas se presentaron las concentraciones más altas y durante la temporada de lluvias la más baja, sin embargo, el día 29 de junio se cuantificó una alta concentración la cual coincide con un pico para magnesio y  $PM_{2.5}$ , lo cual nos hace pensar que ese día estuvo fuertemente relacionado con la resuspensión de polvos, posiblemente del desierto del Sahara. El máximo durante toda la campaña se alcanzó el 28 de mayo con una concentración de  $0.001 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y un mínimo el 12 de julio con un valor de  $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

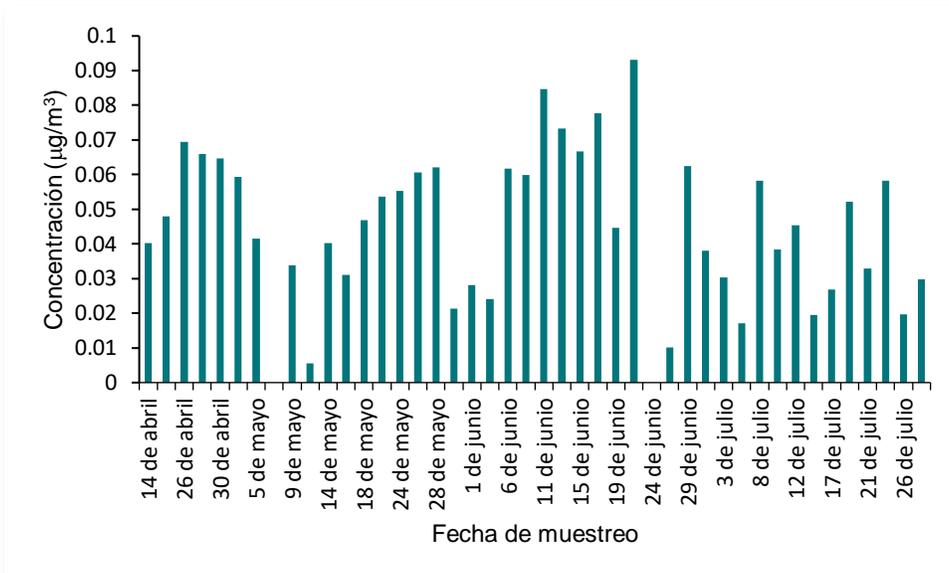


Figura 25. Serie de tiempo de potasio durante toda la campaña de monitoreo.

### 6.2.9 Cromo (Cr)

En la figura 27 se ilustra el comportamiento del cromo, que es un elemento que a pesar de estar en bajas concentraciones su comportamiento es constante a lo largo de toda la campaña de monitoreo indicando que el origen de este contaminante es local. Dentro de las principales fuentes de emisión esta las emisiones vehiculares resultados de procesos de combustión, además de que los aceites de los motores son una fuente importante de cromo, seguidas por la industria química y metalúrgica, sobre todo en la realización de aleaciones y procesos de cromado (Wang et al, 2018). El máximo registrado ocurrió el 28 de mayo con una concentración de  $0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y los mínimos fueron el 13 de junio y el 21 de julio con valores de  $0.005$  y  $0.003 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

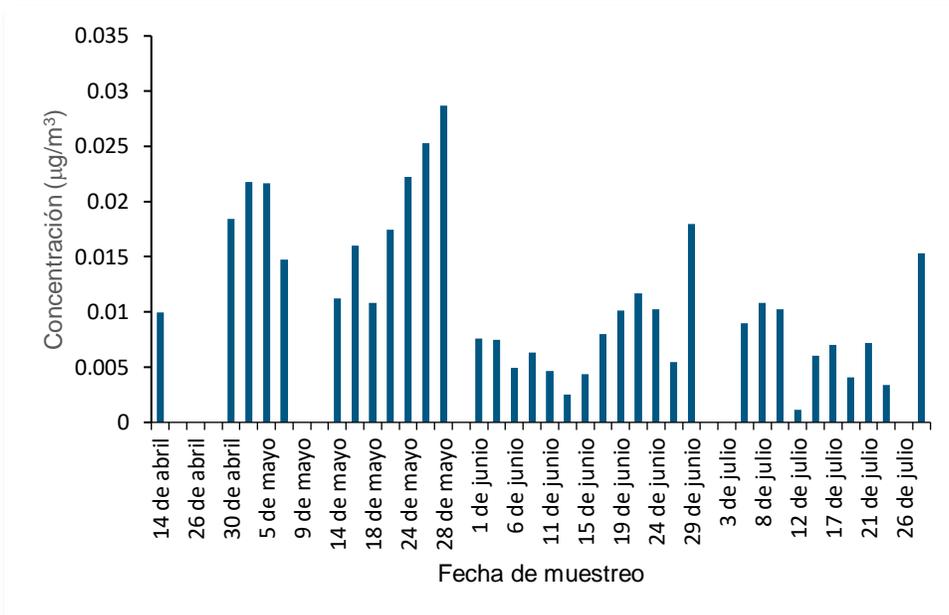


Figura 26. Serie de tiempo de titanio durante toda la campaña de monitoreo.

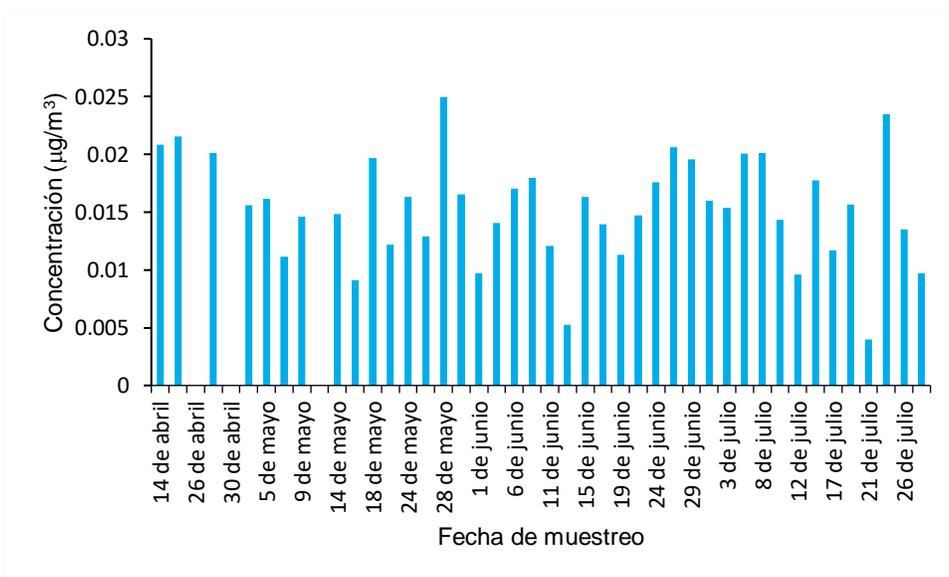


Figura 27. Serie de tiempo de cromo durante toda la campaña de monitoreo.

### 6.2.10 Hierro (Fe)

El hierro presenta un comportamiento constante a lo largo de toda la campaña de monitoreo similar al del cromo con concentraciones pequeñas, dentro de sus principales fuentes de emisión se encuentra la resuspensión de polvos y la



industria metalúrgica (Martínez, 2006). Los máximos para este elemento se presentaron los días 28 de mayo y 29 de junio con valores de  $0.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , este último máximo coincide con el valor más alto de concentración que se registra para el magnesio, titanio, calcio y  $\text{PM}_{2.5}$ , indicando como origen en común la resuspensión de polvos provenientes del Sahara. Mientras, que el primer máximo coincide con el máximo para el cromo, lo cual nos indica que el posible origen de este máximo se deba a la industria metalúrgica. Por otro lado, el mínimo que se presentó a lo largo de toda la campaña de monitoreo fue el día 19 de junio con  $0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

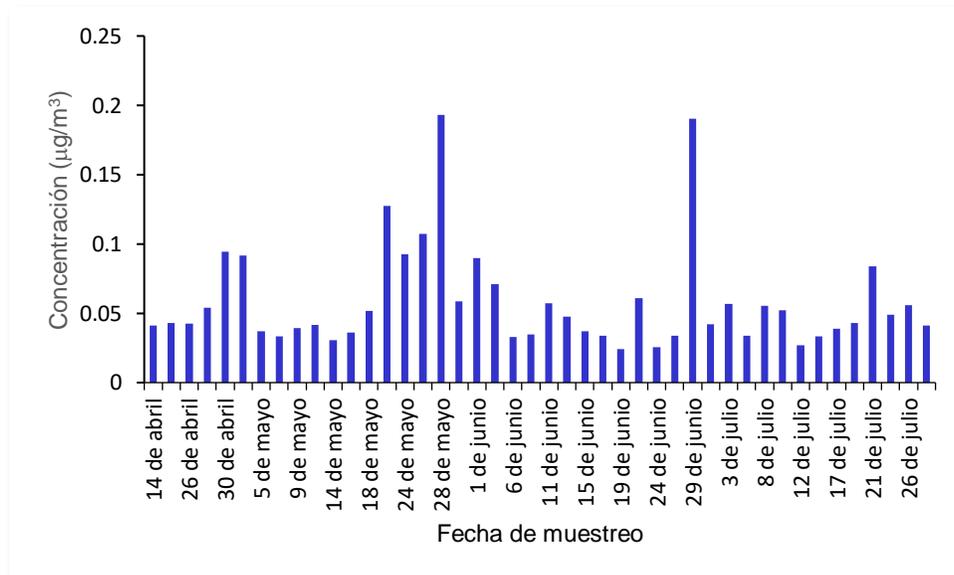


Figura 28. Serie de tiempo de hierro durante toda la campaña de monitoreo.

### 6.2.11 Níquel (Ni)

Como se muestra en la figura 29, el níquel es un elemento cuya concentración se mantuvo relativamente constante a lo largo de la campaña de muestreo de modo que no se vio afectada por los cambios de temporada climática. El mínimo se presentó el 16 de mayo con una concentración de  $0.006 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y el máximo el 18 de mayo con  $0.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , sin embargo, dichas concentraciones se obtuvieron en la temporada de secas. Esto se atribuye a que



probablemente sus fuentes antropogénicas de emisión son constantes sin importar el periodo.

Este elemento es liberado principalmente a la atmósfera por medio de la minería y las industrias que fabrican o utilizan níquel como parte de aleaciones o compuestos, al igual que por plantas de energía que queman petróleo o carbón y por la incineración de basura (Cheng *et al.*, 2016), esta última una práctica común en el Estado de Yucatán.

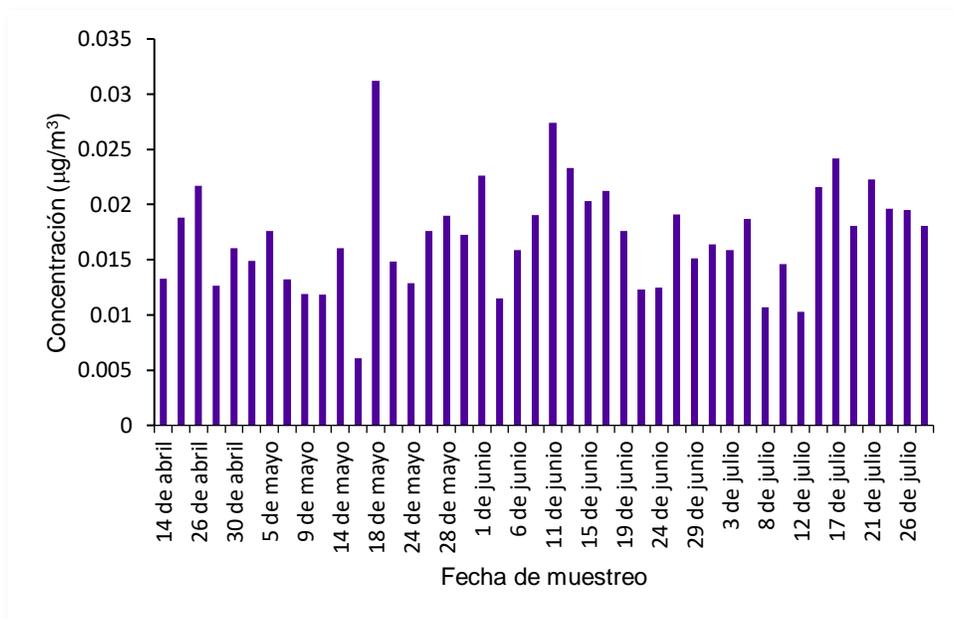


Figura 29. Serie de tiempo de níquel durante toda la campaña de monitoreo.

### 6.2.12 Cobre (Cu)

En la figura 30 se observa la serie de tiempo del cobre, en donde no se aprecian variaciones relacionadas con las temporadas climáticas, presentando un máximo el 13 de junio con un valor de  $0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y un mínimo el 3 de julio con  $0.001 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . A pesar de sus bajas concentraciones en la atmósfera, este elemento puede tener origen en diversas fuentes como la industria química y metalúrgica, fungicidas e insecticidas utilizados en la agricultura, pinturas y



colorantes (Cheng *et al.*, 2016). Dada las diversas fuentes y la nula variación podemos decir que este elemento es emitido localmente y por lo tanto no se ve afectado fuertemente por la temporada.

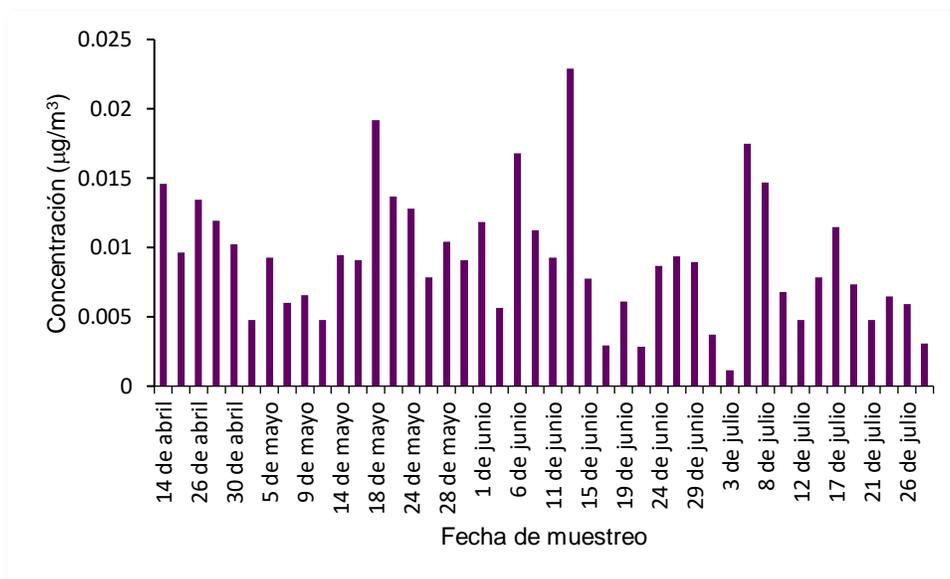


Figura 30. Serie de tiempo de cobre durante toda la campaña de monitoreo.

### 6.2.13 Zinc (Zn)

El zinc al igual que el cobre no presentó cambios notables relacionados al periodo estacional, siendo sus principales fuentes de emisión a la atmósfera la industria metalúrgica, las emisiones automovilísticas relacionadas con el uso y desgaste de los cauchos y frenos de los vehículos (Li *et al.*, 2017). El máximo de concentración para este elemento se cuantificó el día 24 de julio con un valor de  $0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y dos mínimos con valores de  $0.004 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para el 26 de junio y el 26 de julio, respectivamente.

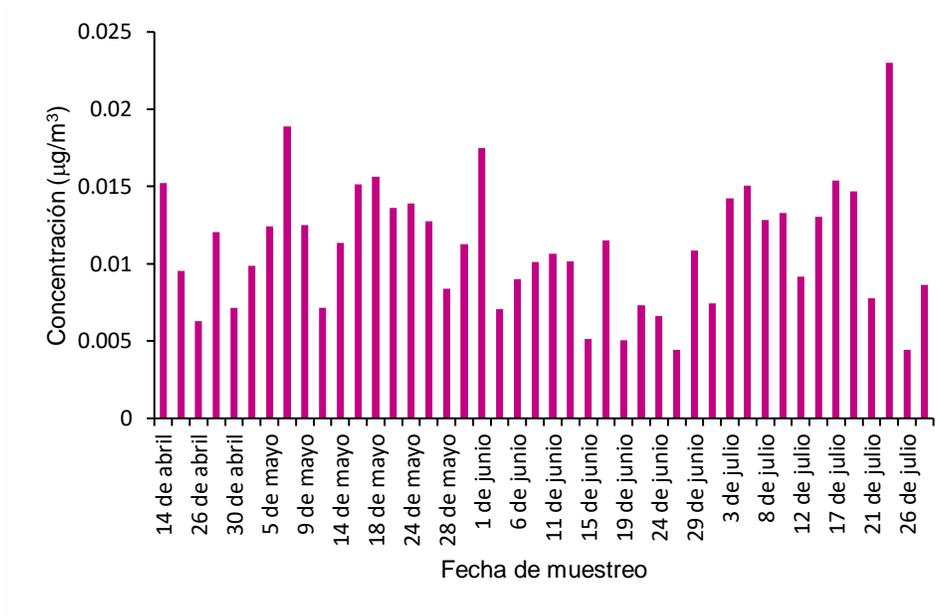


Figura 31. Serie de tiempo de zinc durante toda la campaña de monitoreo.

### 6.2.14 Plomo (Pb)

En la figura 32 se presenta la serie de tiempo del plomo, donde puede notarse que éste es uno de los elementos que mostró mayor constancia a lo largo de la campaña de muestreo con concentraciones un poco más altas que las presentadas por otros elementos, lo cual indica que probablemente haya más emisiones de plomo a la atmósfera de las que se esperaban y que fueran muy locales. El plomo es un elemento altamente tóxico que produce múltiples daños a la salud y que no suele degradarse ni química ni biológicamente, por lo tanto, puede permanecer durante largos periodos de tiempo en la atmósfera. A pesar de que en la actualidad la normativa inhibe la emisión de plomo mediante los vehículos de motor a gasolina, existen otras fuentes de tipo industrial como las pinturas y los esmaltes, la minería, procesos de fundición y recuperación de metales, la incineración de residuos, fabricación de baterías y óxidos de plomo (Zakey *et al.*, 2007; Dirección de Monitoreo Atmosférico, CDMX, 2018).

Cabe mencionar, que las emisiones gaseosas de compuestos inorgánicos que lo contienen provienen principalmente de la combustión de compuestos



alquílicos de Pb, y las orgánicas pueden originarse de cualquier tipo de fuente. El máximo se presentó el 19 de julio con  $0.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y los mínimos el 9 de mayo y 26 de junio con valores de  $0.097$  y  $0.092 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente.

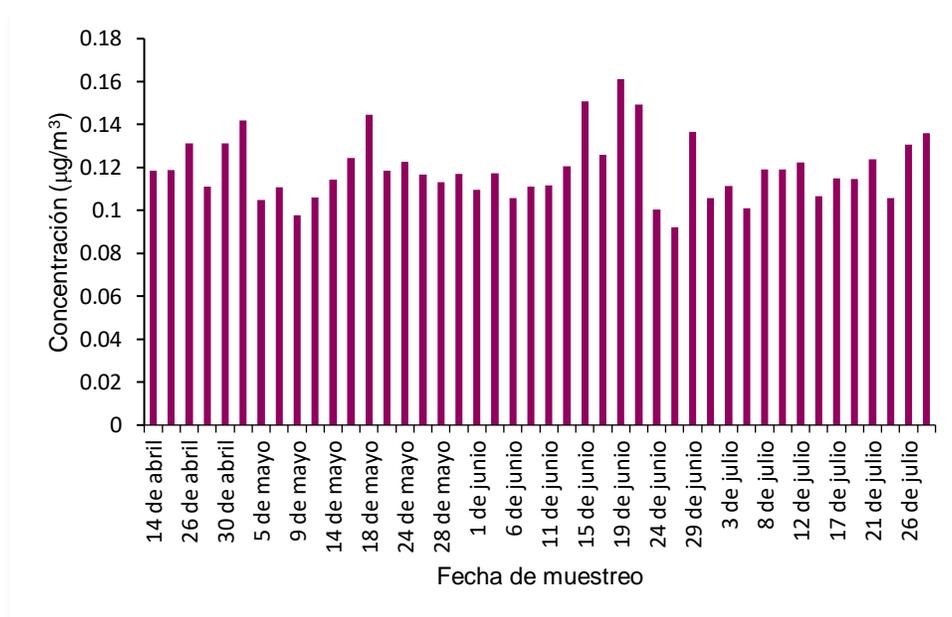


Figura 32. Serie de tiempo de plomo durante toda la campaña de monitoreo.

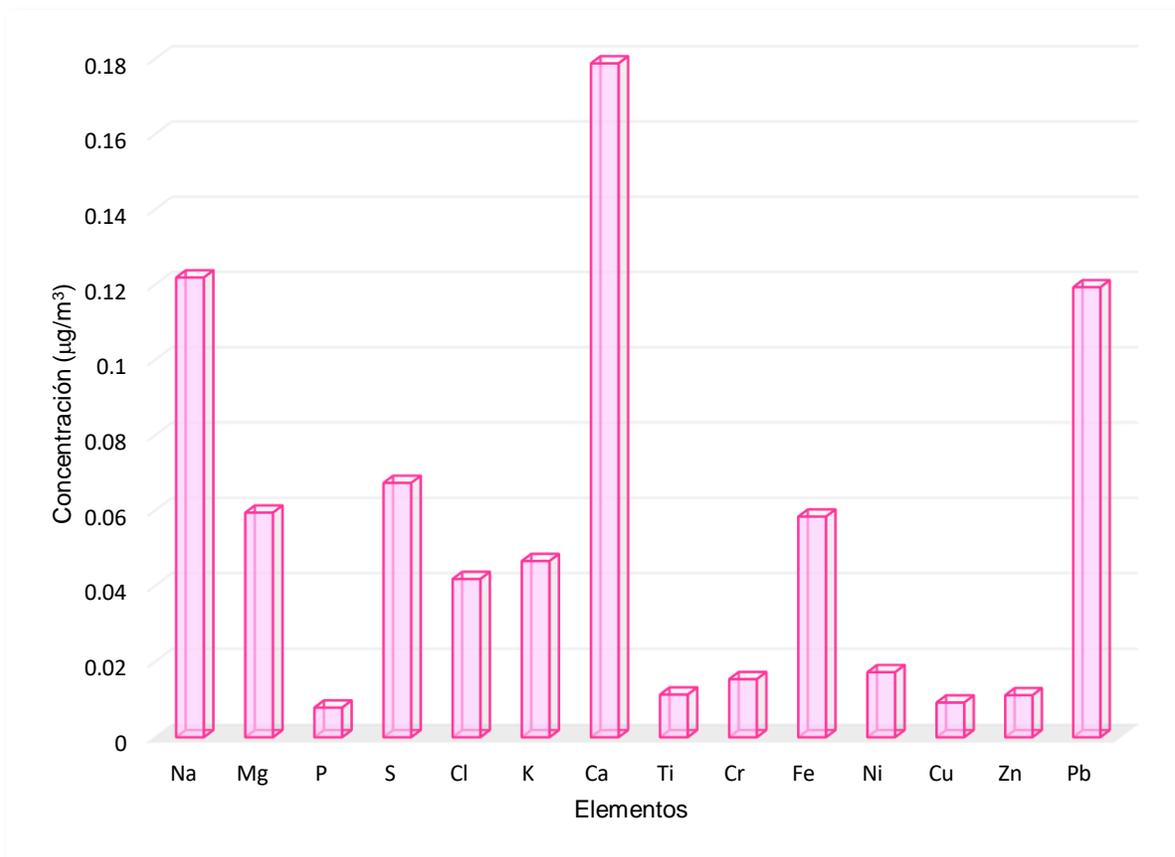
### 6.3 Concentración Promedio por Elemento

Con la finalidad de determinar cuáles de los elementos analizados por fluorescencia de rayos X (Na, Mg, P, S, Cl, K, Ca, Ti, Cr, Fe, Ni, Cu, Zn y Pb) estuvieron en mayor proporción se realizó un promedio de todas las concentraciones los cuales se presentan en la figura 33.

A partir de la figura 33 se observa que el elemento más abundante fue el calcio, seguido por el sodio y el plomo, mientras que los minoritarios fueron el cobre, titanio, zinc, fósforo y cromo. Estos resultados son congruentes, dado que nuestro sitio de muestreo se encuentra relativamente cerca a la costa, por lo cual puede haber un transporte de estos aerosoles marinos hacia nuestro sitio de muestreo provocando estas altas concentraciones de calcio y sodio. Algo notorio que se encontró en este estudio es la alta concentración de plomo, el cual es un



elemento no tan común (altas concentraciones) en la atmósfera, sin embargo, al comparar su valor promedio ( $0.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) con la Norma Oficial Mexicana (NOM) de Calidad del Aire Ambiente (NOM-026-SSA-1-1993) encontramos que es mucho menor que la norma ( $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). También algo interesante que se encontró en el presente trabajo es que existe presencia de algunos metales como cobre, titanio, zinc, fosforo y cromo en pequeñas concentraciones, pero con un origen en común como lo es la industria metalúrgica, haciéndonos pensar que en la Ciudad de Mérida esta industria está afectando considerablemente la calidad del aire.



**Figura 33.** Concentraciones promedio por elemento durante toda la campaña de monitoreo.

Por otro lado, con la finalidad de corroborar de mejor manera si existía una correlación o una disminución de concentración asociada a las temporadas climáticas (temporada seca y lluvias), se decidió realizar un promedio tomando en cuenta este parámetro y los resultados se presentan en la tabla 1 y figura 34.



Tabla 1. Concentraciones promedio por elemento para cada temporada climática.

Elemento	Concentración ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	
	Temporada seca	Temporada de lluvias
Na	0.150	0.030
Mg	0.080	0.040
P	0.010	0.001
S	0.070	0.060
Cl	0.060	0.030
K	0.050	0.050
Ca	0.380	0.030
Ti	0.020	0.007
Cr	0.020	0.010
Fe	0.070	0.050
Ni	0.020	0.020
Cu	0.010	0.008
Zn	0.010	0.010
Pb	0.120	0.120

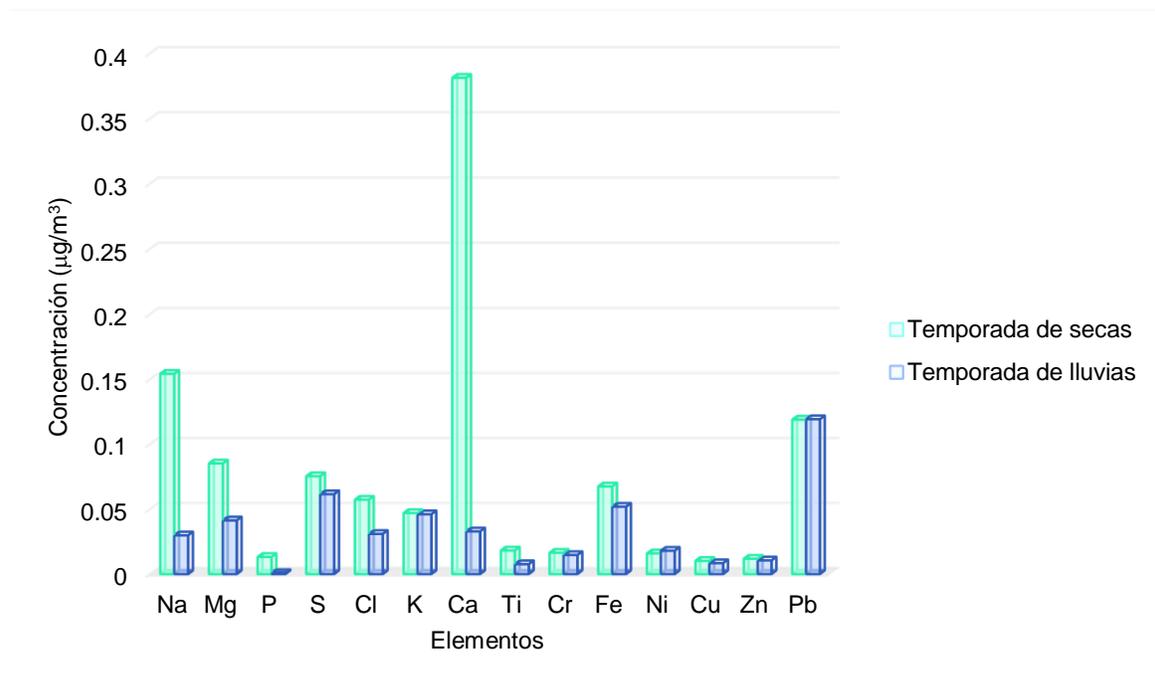


Figura 34. Gráfica comparativa de concentraciones promedio por elemento para cada periodo estacional.



A partir de la tabla 1 y figura 34, se comprueba que todos los elementos sufrieron una disminución, la cual se asocia al efecto de las precipitaciones (deposición húmeda), sin embargo, algunos elementos como el potasio, cromo, cobre y zinc, sus concentraciones no variaron mucho, lo cual a su vez nos confirma que cerca del sitio de muestreo hay una fuente local responsable de la emisión de estos elementos, sin embargo, sus concentraciones son del orden de  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , por lo cual se puede decir que su concentración no es considerable. Caso similar se observa para el plomo, el cual no varía y se mantiene muy por debajo de la norma ( $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), sin embargo, consideramos que sería importante realizar un monitoreo más constante de este elemento con el objetivo de identificar la fuente puntual del origen de este contaminante.

#### **6.4 Comparación de Resultados con Diferentes Estudios**

Con la finalidad de saber si las concentraciones de los elementos analizadas en este estudio están en el orden de las diferentes investigaciones que se han realizado alrededor del mundo tanto en grandes ciudades como en zonas costeras, se realizó una tabla comparativa (Tabla 2).

**Tabla 2.** Concentraciones promedio de elementos obtenidas en diferentes regiones en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Localización	Año de muestreo	Referencia	Elementos													
			Na	Mg	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Cr	Fe	Cu	Zn	CT	
Mérida	2017	Esta tesis	0.12	0.06	0.01	0.07	0.04	0.05	0.19	0.01	0.015	0.06	0.01	0.01	4.39	
CDMX	Xalostoc	2000-2002 Vega et al, 2004			0.16	2.63	2.84	1.39	5.08	0.29	0.02	3.05	0.13	1.05		
	La Merced	2000-2002 Vega et al, 2004			0.04	2.63	0.37	0.82	2.55	0.12	0.01	1.46	0.06	0.2		
	El Pedregal	2000-2002 Vega et al, 2004			0.02	2.29	0.07	0.44	1.33	0.08	0.01	0.84	0.02	0.06		
CDMX	Xalostoc	2003-2004 Vega et al, 2011	0.15	0.11				0.18	0.27		0.0003	0.32		0.15	0.15	
	La Merced	2003-2004 Vega et al, 2011	0.09	0.04				0.13	0.11		0.007	0.16		0.07	0.09	
	El Pedregal	2003-2004 Vega et al, 2011	0.05	0.03				0.11	0.11		0.006	0.14		0.02	0.05	
China (ciudades costeras)	Dalian	2004 Ma et al, 2016	0.3	0.15	0.08	3.13		0.21	1.02	0.006	0.004	0.63	0.05	0.14	0.3	
	Xiamen	2004 Ma et al, 2016	0.23	0.04	0.02	0.91		0.12	0.08	0.02	0.005	0.22	0.03	0.20	0.23	
China (Megaciudades)	Chengdu	2014 – 2015 Wang et al, 2018							2.81	0.32	0.06	4.56	0.19	2.38		
	Chongqing	2014 – 2015 Wang et al, 2018							8.24	0.47	0.11	5.86	0.11	1.13		
	Wuhan	2012 - 2013 Zhang et al, 2015							4.30		0.008	1.68	0.03	0.29		
	Zhengzhou	2010 Geng et al, 2013							0.75							

**Continuación de la tabla 2.** Concentraciones promedio de elementos obtenidas en diferentes regiones en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .



Localización	Año de muestreo	Referencia	Elementos													
			Na	Mg	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Cr	Fe	Cu	Zn	CT	
Mérida	2017	Esta tesis	0.12	0.06	0.01	0.07	0.04	0.05	0.19	0.01	0.015	0.06	0.01	0.01	4.39	
Beijing	Tumbas Ming	2014 - 2015	Li et al, 2017				1.2	1.2	0.8	0.2	0.04	0.03	1.2	0.03	0.1	
	Universidad de Tsinghua	2014 - 2015	Li et al, 2017													
	Centro de Análisis para Física y Química de Beijing	2014 - 2015	Li et al, 2017				1.1	1.9	0.9	0.3	0.03	0.04	0.4	0.04	0.1	
	Guta Park	2014 - 2015	Li et al, 2017				1.3	2.4	1.1	0.4	0.04	0.02	1.3	0.02	0.2	
	Área de desarrollo tecnológico-económico de Beijing	2014 - 2015	Li et al, 2017				1.2	2.4	1.1	0.4	0.03	0.03	0.4	0.03	0.2	
Siberia	Karasuk	1997	Koutsenogi et al, 2000				1.1	1.4	0.7	0.4	0.04	0.03	0.5	0.04	0.21	
	Kluchi	1997	Koutsenogi et al, 2000							2.11	0.374	0.02	1.65	0.002	0.03	
Turquía	Mar negro oriental	2011	Balcilar et al, 2013		0.44				0.43	2.04		0.03	0.91	0.08	0.07	

Continuación de la tabla 2. Concentraciones promedio de elementos obtenidas en diferentes regiones en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Localización	Año de	Referencia	Elementos													
--------------	--------	------------	-----------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--



		muestreo		Na	Mg	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Cr	Fe	Cu	Zn	CT
	Mérida	2017	Esta tesis	0.12	0.06	0.01	0.07	0.04	0.05	0.19	0.01	0.015	0.06	0.01	0.01	4.39
Argentina	Córdoba	2009 – 2010	López et al, 2011	0.04	0.08				0.13	0.63	0.11	0.07	1.7	0.02	0.03	0.04
	Barcelona	2011 - 2012	Salameh et al, 2014							5.7	0.43	0.02	1.7	0.002	0.02	
Cuenca del mediterráneo	Marsella	2011 - 2012	Salameh et al, 2014		0.05				0.13	0.14		0.001	0.15	0.007	0.04	
	Génova	2011 - 2012	Salameh et al, 2014		0.14				0.23	1.09		0.002	0.27	0.02	0.02	
	Venecia	2011 - 2012	Salameh et al, 2014		0.04				0.1	0.11			0.14	0.006	0.02	
	Tesalónica	2011 – 2012	Salameh et al, 2014									0.007	0.38	0.02	0.08	

A partir de la tabla 2, podemos decir que, comparando las concentraciones de elementos cuantificados en Mérida contra grandes ciudades como Beijing y la Ciudad de México, nuestras concentraciones estuvieron por debajo en la gran mayoría, sin embargo, hubo algunos elementos en los cuales las concentraciones estuvieron cercanas tales como calcio, cromo, cobre y sodio. Por otro lado, cuando realizamos la comparación con zonas costeras como Dalian y Xiamen en China, también se apreció que nuestras concentraciones eran más bajas y que solo algunos elementos como sodio, magnesio, cobre, fósforo y titanio estaban en el mismo rango. Finalmente, se decidió comparar nuestros resultados



contra ciudades en el mediterráneo y cerca del mar negro (Marsella, Venencia, Génova, Tesalónica, Barcelona, Turquía) apreciándose lo mismo que en los anteriores resultados, es decir nuestras concentraciones fueron menores y solo se presentaron algunas similitudes con magnesio, cobre y zinc.

Dado lo anterior, podemos afirmar que la concentración de elementos (contaminantes) en la Ciudad de Mérida están en concentraciones bajas comparadas con estudios que se han realizado en diferentes ambientes alrededor del mundo, sin embargo, la información obtenida no es suficiente para decir que la calidad del aire en Mérida es buena, esto dado que no existe normas específicas para cada elemento analizado por lo cual no sería adecuado llegar a esa conclusión, no obstante, podemos decir como conclusión que los valores son menores que otros estudios.

## **6.5 Análisis de la Fracción Carbonácea de las Partículas PM<sub>2.5</sub>**

Con el fin de conocer la composición química referente a la fracción carbonácea presente en las partículas atmosféricas PM<sub>2.5</sub> en Mérida, se realizó la cuantificación del carbono total y carbono orgánico utilizando un analizador de carbono UIC modelo CM5014.

### **6.5.1 Carbono Total (CT)**

El carbono total está conformado por la suma del carbono orgánico y el carbono elemental, la importancia de estudiar el carbono en las partículas atmosféricas radica en que estos compuestos son los más abundantes en los aerosoles y que algunos son muy reactivos con especies como hidroxilos u óxidos de nitrógeno, mientras que otros tienen una alta capacidad para absorber radiación ultravioleta e infrarroja, lo que ocasiona que la temperatura en un determinado lugar se vea incrementada, además que están fuertemente relacionados con la formación de ozono, que es un contaminante criterio muy



importante en la actualidad. Las principales fuentes antropogénicas de carbono atmosférico son la extracción de residuos fósiles y derivados del petróleo y el gas, el transporte, ya sea terrestre o aéreo y las plantas productoras de electricidad (Moreno, 2014; Peña, 2014). El máximo de concentración para el carbono total se presentó el día 21 de mayo con un valor de  $6.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que el mínimo se reportó el día 1 julio con un valor de  $2.82 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Figura 35), lo cual indica que durante la temporada de secas se presentó el máximo y en la de lluvias el mínimo.

En particular el análisis del carbono total se realizó con el objetivo de apreciar el efecto que tienen los incendios forestales tanto de origen natural como antropogénico en la concentración de este y del carbono orgánico en la atmósfera de la ciudad de Mérida durante las diferentes temporadas estudiadas (secas y lluvias), es decir, se quiso comprobar la influencia de la quema de biomasa en la concentración de partículas  $\text{PM}_{2.5}$ . En la tabla 3, se observa que la concentración promedio de carbono total fue de  $5.61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , en la temporada de secas y de  $3.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en la temporada de lluvias, lo cual nos indica que efectivamente durante las secas hay una mayor emisión de carbono y ese se puede atribuir a los incendios forestales, sin embargo, para comprobarlo es necesario analizar con mayor detalle lo que sucede en el carbono orgánico, ya que la quema de biomas da como principal producto compuestos orgánicos.

**Tabla 3.** Concentraciones promedio de carbono orgánico y total durante toda la campaña de monitoreo.

Elemento	Período de secas ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Período de lluvias ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
<b>Carbono Total</b>	5.61	3.83
<b>Carbono Orgánico</b>	4.39	3.38

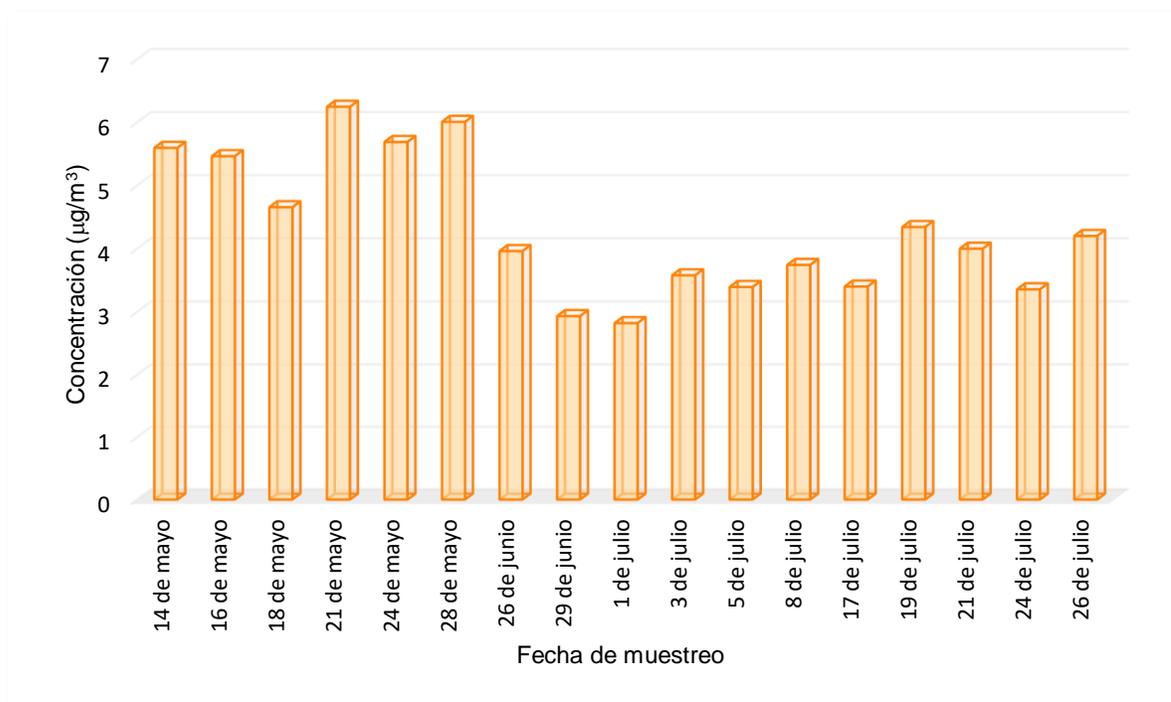


Figura 35. Serie de tiempo de carbono total durante toda la campaña de monitoreo.

### 6.5.2 Carbono Orgánico (CO)

En la figura 36 se presenta la serie de tiempo del carbono orgánico, en donde se observa que el 24 de mayo se registró la concentración más alta con un valor de  $5.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y el mínimo el 17 de julio con  $2.55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , lo cual nos confirma que la quema de biomasa tienen una influencia en la concentración de carbono orgánico, pero para estar seguros se compararon los promedios obtenidos durante la temporada secas y de frías (Tabla 3), encontrándose que en la temporada de secas la concentración total fue de  $4.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que en lluvias fue de  $3.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , por lo tanto, se puede concluir que la quema de biomasa afecta las mediciones de la calidad del aire en la ciudad de Mérida de manera considerable.

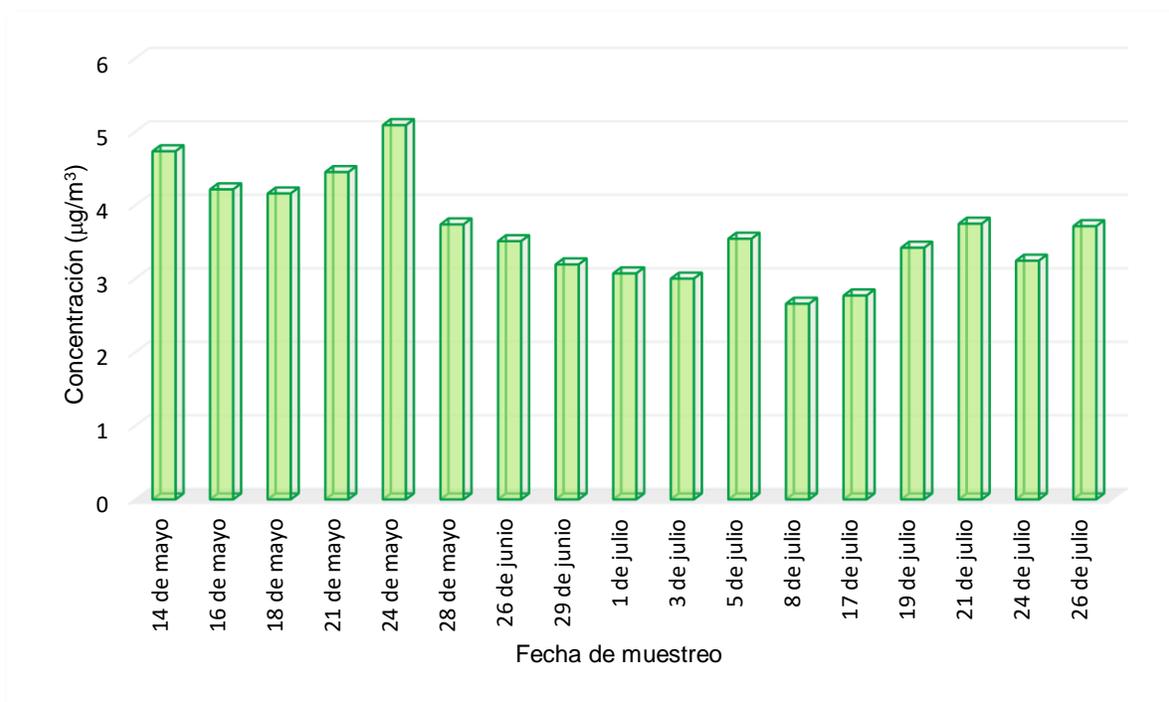
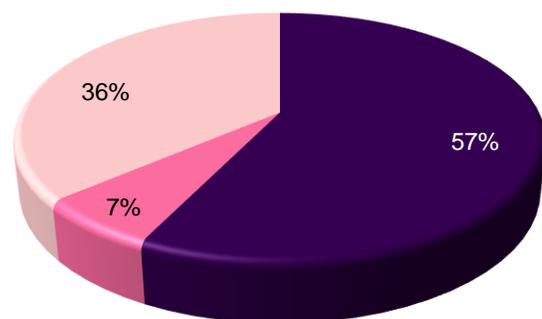


Figura 36. Serie de tiempo de carbono orgánico durante toda la campaña de monitoreo.

## 6.6 Distribución Química de las Partículas PM<sub>2.5</sub>

En La figura 37, se aprecia el porcentaje de distribución de los componentes (elementos, carbono total) cuantificados que conforman el aerosol atmosférico menor a 2.5 micras recolectado durante la campaña de medición en la ciudad de Mérida, del cual se pudo estimar que el aerosol está integrado principalmente por compuestos de tipo carbonoso, llegando a ser cercano al 36 %. Cabe mencionar que la caracterización química que se logró realizar en este caso fue cercana al 43 %, faltando un 57 % por analizar que corresponde a iones inorgánicos y otros elementos que se realizará a futuro por parte de otros compañeros involucrados en el proyecto. En cuanto a los elementos se observó que los mayoritarios fueron el sodio, plomo y el calcio, representado tan solo un 1.0, 1.0 y 1.5 % del porcentaje total del aerosol.



- Concentración promedio de PM2.5 sin analizar
- Concentración promedio de elementos analizados
- Concentración promedio de carbono total

**Figura 37.** Valores promedio considerando todas las PM<sub>2.5</sub> presentes en la atmósfera analizada.

Por otro lado, al tomar el 43% de la fracción analizada y asumiendo que este fue el total, se encontró que el componente mayoritario está conformado por la fracción orgánica, seguida del carbono elemental, sodio, calcio y plomo representan el 72, 13, 4, 2 y 2 %, respectivamente (Figura 38). Esta distribución nos hace pensar que la ciudad de Mérida se ve afectada en gran manera por la quema de biomasa que genera las especies carbonaceas, por los aerosoles marinos que emiten elementos como calcio y sodio y finalmente la industria a través de la emisión de plomo.



### Especiación Química de los Aerosoles Atmosféricos en la Ciudad de Mérida por Fluorescencia de Rayos X.

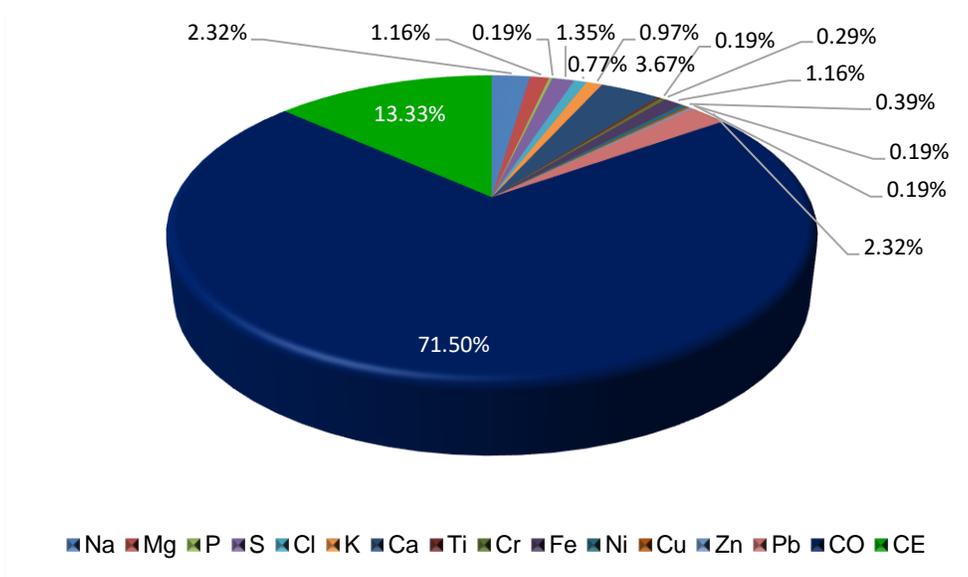


Figura 38. Valores promedio considerando solamente los elementos analizados.



## 7. Conclusiones

Mediante el análisis de las muestras recolectadas en la ciudad de Mérida entre el 14 de abril y 28 de julio del 2017 se encontró, que durante los días 28 de mayo y 29 de junio se presentaron los máximos de concentraciones con valores de 37.33 y 25.76  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente. Adicionalmente, se observó que ningún día, incluyendo los días en que se presentaron los máximos sobrepasaron la norma oficial mexicana NOM-025-SSA1-2014.

El elemento más abundante en las partículas  $\text{PM}_{2.5}$  fue el calcio, seguido del sodio y el plomo. Estos resultados fueron congruentes, dado que nuestro sitio de muestreo se encuentra cerca a la costa. En el caso del plomo a pesar de ser de los mayoritarios se comprobó que en ningún día sobrepasó la Norma Oficial Mexicana (NOM-026-SSA-1-1993).

Se encontró que en la temporada de lluvias la concentración de la mayoría de los elementos analizados disminuyó notoriamente, sin embargo, en el potasio, cromo, cobre y zinc, sus concentraciones no variaron mucho, lo cual nos confirma que cerca del sitio de muestreo hay una fuente local responsable de la emisión de estos elementos.

El análisis de la fracción carbonácea permitió encontrar la existencia de una correlación entre la quema de biomasa que ocurre en el estado de Yucatán y las altas concentraciones de carbono total y carbono orgánico, ya que en la temporada de Mayo (secas) se registraron los valores más altos de este los que coinciden con la temporada de quema de biomasa que va del 15 de febrero al 22 de mayo.

Al comparar los resultados obtenidos con los valores reportados en diversas ciudades del mundo, se pudo comprobar que nuestras concentraciones estuvieron por debajo de la gran mayoría, sin embargo, hubo algunos casos en los que la



concentración de algunos elementos fue similar a otros estudios, pero esta información no es suficiente para asegurar con precisión qué tan buena o mala pueda ser la calidad de la atmósfera de Mérida para la salud de los pobladores dado que no existen normas específicas para regular cada uno de los elementos analizados.



## 8. Bibliografía

### 8.1 Normas

Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en el aire ambiente y criterios para su evaluación. Diario Oficial de la Federación, 20 de agosto de 2014.

Norma Oficial Mexicana NOM-026-SSA1-1993, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al plomo (Pb). Valor normado para la concentración de plomo (Pb) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población. Diario Oficial de la Federación, 23 de diciembre de 1994.

### 8.2 Libros y artículos

Achad, M., López, M. L., Ceppi, S., Palancar, G. G., Tirao, G., Toselli, B. M. (2014). Assessment of fine and sub-micrometer aerosols at an urban environment of Argentina. *Atmospheric Environment*, 92, 522–532.

Álvarez, H. (2009). Calidad del aire de una región cafetalera, Pacho Viejo, Veracruz. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.

Argumedo, C. D., Castillo, J. F. (2016). Caracterización química de material particulado  $PM_{10}$  en la atmósfera de La Guajira, Colombia. *Revista Colombiana de Química*, (2), 19.

Barrera, V. (2005). Caracterización elemental de  $PM_{15}$  y  $PM_{2.5}$  para la identificación de fuentes contaminantes en la ZMCM. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.



Balcilar, Í., Zararsız, A., Kalaycı, Y., Doğan, G., Tuncel, G. (2014). Chemical composition of Eastern Black Sea aerosol—Preliminary results. *Science of the Total Environment*, 422–428.

Ballester, F., (2003). La evaluación del impacto en salud de la contaminación atmosférica. *Revista de Salud Ambiental*, 3, 102–107.

Ballester, F. (2005). Contaminación atmosférica, cambio climático y salud / Air Pollution, Climate Change and Health. *Revista Española de Salud Pública*, (2), 159.

Bravo H., Soto R., Sosa R., Sánchez P., Alarcón A.L. Kahl y Ruíz J. (2006). Effect of acid rain on building material of the El Tajín archaeological zone in Veracruz, Mexico. *Environmental Pollution*, en prensa.

Brockington, W. S., Jr. (2019). *Smog Kills Thousands of Londoners*. Salem Press

Buseck, P. R., Adachi, K., (2008), Nanoparticles in the Atmosphere. *Elements*, 4, 389–394.

Chiari, M., Yubero, E., Calzolari, G., Lucarelli, F., Crespo, J., Galindo, N., Nava, S. (2018). Comparison of PIXE and XRF analysis of airborne particulate matter samples collected on Teflon and quartz fibre filters. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B*, 417, 128–132.

Colbeck, I., Lizaridis, M. (2014). *Aerosol Science. Technology and applications*. Wiley, Reino Unido.

Dalmasso, A., Candia, R., Llera, J. (1997). La vegetación como indicadora de la contaminación por polvo atmosférico. *Multequina*, (6), 85–91.



Das, R., Taufiq Bin, A., Mohtar, M., Rakshit, D., Shome, D. (2018). Sources of atmospheric lead (Pb) in and around an Indian megacity. *Atmospheric Environment*, 193, 57–65.

Díaz, R. V., López-Monroy, J., Miranda, J., Espinosa, A. A. (2014). PIXE and XRF analysis of atmospheric aerosols from a site in the West area of Mexico City. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B*, 318 (Part A), 135–138.

Dockery, D., Pope, C., Xu, X., Spengler, J., Ware, J., Fay, M., Ferris, B., Speizer, F. (1993). An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. *N. Engl. J. Med.* 329: 1753–1759.

Erazo, A. M., (2016). Caracterización espacio-temporal de la contaminación atmosférica de partículas 2.5µm, carbono negro y óxidos de nitrógeno al lado del arroyo vehicular. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.

Espinosa, A. (2007). Determinación de la composición elemental de aerosoles atmosféricos mediante acelerador de iones en partículas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.

Fang, G., Xiao, Y., Zhuang, Y., Cho, M., Huang, C., Tsai, K. (2017). PM<sub>2.5</sub> particulates and metallic elements (Ni, Cu, Zn, Cd and Pb) study in a mixed area of summer season in Shalu, Taiwan. *Environmental Geochemistry and Health*, 39(4), 791–802.

Flores, J., López, S., Albert, L.A. (1995). La Contaminación y sus efectos en la Salud y el Ambiente. Centro de Ecología y Desarrollo, A. C., México.

Fonseca Duarte, A., Gioda, A., Ziolli, R., Duó, D. (2013). Contaminación atmosférica y deposición húmeda en la Amazonia brasileña. *Revista Cubana de Salud Pública*, 39 (4), 627–639.



Font, M., Hernández, F. (2011). Estudio de los principales procesos que originan emisiones de gases a la atmósfera. *Ciencias Holguín*, XVII (1), 1–9.

Forero, D. (2008). Análisis comparativo de la concentración de carbono orgánico (CO), carbono elemental (EC) contenido en el material particulado menor a 10 micrómetros (PM<sub>10</sub>) entre las áreas metropolitanas de Cali y Valle de Aburrá, el distrito de barranquilla y las ciudades de Bucaramanga, Nobsa (valle de Sogamoso) y Pereira; y algunas ciudades de Latinoamérica; estimación de las fuentes de emisión en el área metropolitana del valle de Aburrá. Tesis de Licenciatura. Universidad de la Salle. Bogotá.

Gao, Y., Ma, M., Yang, T., Chen, W., Yang, T. (2018). Global atmospheric sulfur deposition and associated impact on nitrogen cycling in ecosystems. *Journal of Cleaner Production*, 195, 1–9.

Harrison, R. M., Smith, D. J. T. (1992). The chemical composition of atmosphere aerosols: What can it tell us?. *Journal of Aerosol Science*, 23, 853–856.

He, Q., Yan, Y., Guo, L., Zhang, Y., Zhang, G., Wang, X. (2017). Characterization and source analysis of water-soluble inorganic ionic species in PM<sub>2.5</sub> in Taiyuan city, China. *Atmospheric Research*, 184, 48–55.

He, Z., Yang, G., Lu, X., Ding, Q., Zhang, H. (2013). Halocarbons in the marine atmosphere and surface seawater of the south Yellow Sea during spring. *Atmospheric Environment*, 80, 514–523.

Hoek, G.; Brunekreef, B.; Goldhohm, S.; Fischer, P.; van den Brandt, P.A. (2002). Association between Mortality and Indicators of Traffic-Related Air Pollution in the Netherlands: A Cohort Study; *Lancet*, 360, 1203–1209.

Horvath, H. (2000) Aerosols—An introduction. *Journal of Environmental Radioactivity* 51 5–25



Hunt, D. y Johnson, C. (1998). Sistemas de gestión medioambiental. Principios y práctica. Colombia: McGraw-Hill.

Jacobson M. Z. (2002). Atmospheric Pollution: History, Science, and Regulation. Cambridge Press, 399 pp.

Koutsenogii, K., Kovalskaya, G., Smirnova, A., Makarov, V., Kirov, E. (2000). Multielemental composition of atmospheric aerosol in the South of West Siberia. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A*, 448, 438–441.

Kumar, A., Mishra, M. K., Divkar, J. K., Rout, S., Narayanan, U., Hegde, A. G. (2010). Impact of particle size on distribution of major ions in acid- and water-soluble components of PM<sub>10</sub> atmospheric aerosols in the coastal region of Mumbai. *Atmospheric Research*, 98, 406–415.

Li, Y., Chang, M., Ding, S., Wang, S., Ni, D., Hu, H. (2017). Monitoring and source apportionment of trace elements in PM<sub>2.5</sub>: Implications for local air quality management. *Journal of Environmental Management*, 196, 16–25.

Liang, Z., Zhao, X., Chen, J., Gao, L., Zhu, A., Wang, Z., Zhang, K. (2018). Seasonal characteristics of chemical compositions and sources identification of PM<sub>2.5</sub> in Zhuhai, China. *Environmental Geochemistry And Health*.

Liu, J., Wu, D., Fan, S., Mao, X., Chen, H. (2017). A one-year, on-line, multi-site observational study on water-soluble inorganic ions in PM<sub>2.5</sub> over the Pearl River Delta region, China. *Science of the Total Environment*, 601–602, 1720–1732.

Liu, Z., Xie, Y., Hu, B., Wen, T., Xin, J., Li, X., Wang, Y. (2017). Size-resolved aerosol water-soluble ions during the summer and winter seasons in Beijing: Formation mechanisms of secondary inorganic aerosols. *Chemosphere*, 183, 119–131.



López, M. L., Ceppi, S., Palancar, G. G., Olcese, L. E., Tirao, G., Toselli, B. M. (2011). Elemental concentration and source identification of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> by SR-XRF in Córdoba City, Argentina. *Atmospheric Environment*, 45, 5450–5457.

M. Yang, Z. L. Fleming. (2019). Estimation of atmospheric total organic carbon (TOC) – paving the path towards carbon budget closure. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 459–471.

Ma, Y., Wang, Z., Tan, Y., Xu, S., Kong, S., Wu, G., Li, H. (2017). Comparison of inorganic chemical compositions of atmospheric TSP, PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in northern and southern Chinese coastal cities. *Journal of Environmental Sciences*, 55, 339–353.

Martínez Arroyo, M. C. (2006). Evolución del contenido en partículas totales en suspensión y en los metales, plomo, cinc, cadmio, cobre, hierro y manganeso, en el aerosol atmosférico de Cartagena, durante el periodo 1995-2000. Tesis de Doctorado. Universidad Politécnica de Cartagena.

Martínez, E., Díaz de Mera, Y. (2004). Contaminación atmosférica. Universidad de Castilla-La Mancha. España.

Mejía, L. V. (2017). Mejoras en el espectrómetro de rayos X del Laboratorio de Aerosoles, Tesis de Licenciatura. IFUNAM.

Moolgavkar, S. H. (2000) Air Pollution and Daily Mortality in Three U.S. Counties, *Environmental Health Perspectives*, 108 (8): 777–784

Moreno, L. (2014). Anteproyecto para la red de monitoreo atmosférico del carbono negro en aire ambiente para la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.



Peña, I. (2014). Determinación de carbono negro atmosférico mediante métodos ópticos. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.

Perrino, C., Tiwari, S., Catrambone, M., Torre, S. D., Rantica, E., Canepari, S. (2011). Chemical characterization of atmospheric PM in Delhi, India, during different periods of the year including Diwali festival. *Atmospheric Pollution Research*, 2, 418–427.

Pöschl, U. (2005). Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects. *Angewandte Chemie (International Ed. In English)*, 44(46), 7520–7540.

Pope, A y Dockery D. (2006). Health effects of fine particle air pollution: lines that connect. *JAir & Waste Manage Assoc.* 56: 709–742.

Scanza, R. A., Hamilton, D. S., Perez, C., Buck, C., Baker, A., Mahowald N. M. (2018). Atmospheric processing of iron in mineral and combustion aerosols: development of an intermediate-complexity mechanism suitable for Earth system models. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 14175–14196.

Ramírez, O. (2014). Intrusiones de polvo africano en la región Caribe de Colombia. *Gestión y Ambiente*, Vol 17, 11–29.

Rangel García, M. (2017). Análisis de mercurio en aerosoles atmosféricos de una zona urbana y una semi-rural. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.

Reyes, R., Galván, L., Aguiar, M. (2005). El precio de la contaminación como herramienta económica e instrumento de política ambiental. *Interciencia*, 30 (7), 436–441.



Reyes, J. A. (2005). Emisiones industriales a la atmosfera de metales pesados tóxicos y su determinación en partículas suspendidas. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.

Salameh, D., Detournay, A., Pey, J., Pérez, N., Liguori, F., Saraga, D., Marchand, N. (2015). PM<sub>2.5</sub> chemical composition in five European Mediterranean cities: A 1-year study. *Atmospheric Research*, 155, 102–117.

Salguero, J. (2016). Determinación de la concentración de material particulado en la avenida Rodolfo Baquerizo Nazur, entre las etapas III, IV, V, VII, VIII, IX de la Ciudadela la Alborada, de la Ciudad de Guayaquil. Tesis de Licenciatura. Universidad de Guayaquil.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología. (2011). Guía metodológica para la estimación de emisiones de PM<sub>2.5</sub>. México.

Segovia, J., Delgadillo, F., Lares, M., Huerta, M., Muñoz, A., Torres, E. (2009). Aporte atmosférico y concentración de hierro disuelto en la capa superficial del Golfo de California / Atmospheric input and concentration of dissolved iron in the surface layer of the Gulf of California. *Ciencias Marinas*, (1), 75.

Seinfeld, J., Pandis, S. (2006). Atmospheric Chemistry and Physics. From Air Pollution to Climate Change. (2° ed.). USA. John Wiley & Sons, Inc.

Shang, D., Hu, M., Guo, Q., Zou, Q., Zheng, J., Guo, S. (2017). Effects of continental anthropogenic sources on organic aerosols in the coastal atmosphere of East China. *Environmental Pollution*, 229, 350–361.

Sherma, J., Larkin, J. D., Larkin, F. H. (2007). X-Ray Fluorescence Spectrometry. *Journal of AOAC International*, 90(6), 163A–170A.



Schwartz, J., Zanobetti, A. (2002). Cardiovascular Damage by Airborne Particles: Are Diabetics More Susceptible?, *Epidemiology*, Vol. 13, Issue 5, pp. 588–592.

Vega, E., Reyes, E., Ruíz, H., García, J., Sánchez, G., Martínez-Villa, G. & González, U. (2004). Analysis of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in the Atmosphere of Mexico City during 2000–2002. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 54, 786–798.

Vega, E., Ruiz, H., Escalona, S., Cervantes, A., Lopez, V. D., Gonzalez, A. E., & Sanchez, R. G. (2011). Chemical composition of fine particles in Mexico City during 2003–2004. *Atmospheric Pollution Research*, 2, 477–483.

Vergaz, R. 2001. Caracterización de los aerosoles atmosféricos. *Óptica Pura y Aplicada*, 34.

Wang, H., Qiao, B., Zhang, L., Yang, F., Jiang, X. (2018). Characteristics and sources of trace elements in PM<sub>2.5</sub> in two megacities in Sichuan Basin of southwest China. *Environmental Pollution*, 242 (Part B), 1577–1586.

Yan, Y., Fu, P., Jing, B., Peng, C., Boreddy, S. K. R., Yang, F., Ge, M. (2017). Hygroscopic behavior of water-soluble matter in marine aerosols over the East China Sea. *Science of the Total Environment*, 578, 307–316.

Zhang, N., Cao, J., Liu, S., Zhao, Z., Xu, H., Xiao, S. (2014). Chemical composition and sources of PM<sub>2.5</sub> and TSP collected at Qinghai Lake during summertime. *Atmospheric Research*, 138, 213–222.

Zhao, Y., Yu, R., Hu, G., Lin, X., Liu, X. (2017). Chemical characteristics and Pb isotopic compositions of PM<sub>2.5</sub> in Nanchang, China. *Particuology*, 32, 95–102.



### 8.3 Páginas de Internet

Contaminación Atmosférica. Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT. Consultada en Junio de 2018 en [http://rama.edomex.gob.mx/contaminacion\\_atmosferica](http://rama.edomex.gob.mx/contaminacion_atmosferica).

Contaminación atmosférica. OMS (2012). Consultada en Junio de 2018 en [https://www.who.int/phe/health\\_topics/outdoorair/es/](https://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/es/)

Tipos de fuentes antropogénicas y naturales. Calidad del aire en el área metropolitana de Monterrey. Consultado en Junio de 2018 en <http://cienciauanl.uanl.mx/?p=5391>

Clasificación de los aerosoles según su origen. Contaminación atmosférica. Consultado en Julio de 2018 en <http://abelardo-monrroy.blogspot.com/2012/10/contaminacion-atmosferica.html>

Relación entre las secciones del Sistema Respiratorio y el tamaño de partícula. Consejos y purificadores para mejorar la calidad del aire al interior de su vivienda. Consultado en Julio de 2018 en <https://www.catorce6.com/actualidad-ambiental/bienestar/15451-consejos-y-purificadores-para-mejorar-la-calidad-del-aire-al-interior-de-su-vivienda>

Composición química de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>. Consultado en Agosto de 2018 en <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/695/queson.pdf>

Espectrómetro de fluorescencia de rayos X. Consultado en Septiembre de 2018 en [www.usc.es/export/sites/default/gl/.../riaidt/raiox/.../UNED\\_Curso\\_Fluorescencia.pdf](http://www.usc.es/export/sites/default/gl/.../riaidt/raiox/.../UNED_Curso_Fluorescencia.pdf)



Proceso de análisis por fluorescencia de rayos X. Consultado en Septiembre de 2018 en <https://www.911metallurgist.com/blog/wp-content/uploads/2013/08/XRF-Radiation1.jpg>