



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS AEROSOL  
ATMOSFÉRICOS EN SAN LUIS POTOSÍ**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**FÍSICO**

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

**JOSÉ EDUARDO IBAÑEZ MARTÍNEZ**



**DIRECTOR DE TESIS:  
DR. HARRY ALVAREZ OSPINA  
CIUDAD DE MÉXICO, 2023**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

## Hoja de datos del Jurado

1.- Datos del alumno.

Ibañez

Martínez

José Eduardo

55 73 46 93 06

Universidad Nacional Autónoma  
de México

Facultad de Ciencias

Física

315037700

2.- Datos del tutor.

Dr.

Harry

Alvarez

Ospina

3.- Datos del sinodal 1.

Dr.

Javier

Miranda

Martín del Campo

4.- Datos del sinodal 2.

M. en C.

Oscar Casimiro

Sánchez

Meneses

5.- Datos del sinodal 3.

Dr.

Giovanni Alberto

Carabalí

Sandoval

6.- Datos del sinodal 4.

M. en E.M.S.

Isabel

Mejía

Luna

*Para mis padres, Edgar y Verónica, los pilares más importantes en mi vida y mis ejemplos a seguir.*

*Para Estefanía, cuyo apoyo incondicional fue crucial para la creación de este trabajo.  
Para el Dr. Harry, cuyo consejo sentó las bases de esta investigación así como su culminación.*

*Para mis amigos, cuyas palabras me alentaron a seguir este camino.  
Para la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme una educación de calidad.*



# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>11</b>
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>13</b>
2.1. Aerosoles atmosféricos	13
2.1.1. Composición química de los aerosoles atmosféricos	15
2.1.2. Propiedades físicas de los aerosoles atmosféricos	16
2.1.3. Estudios previos en San Luis Potosí	19
<b>3. Objetivos</b>	<b>25</b>
3.1. Objetivo general	25
3.1.1. Objetivos específicos	25
<b>4. Metodología</b>	<b>27</b>
4.1. Zona de muestreo	27
4.2. Equipo de monitoreo	28
4.3. Calibración del equipo de monitoreo	30
4.4. Validación de datos	31
<b>5. Resultados y discusión</b>	<b>33</b>
5.1. Análisis del comportamiento anual coeficiente de absorción	33
5.2. Análisis de la variabilidad estacional del coeficiente de absorción	39
5.3. Análisis del comportamiento anual de la concentración de carbono negro	41
5.4. Análisis de la variabilidad estacional de la concentración de carbono negro	42
5.5. Análisis del coeficiente de Ångström	43
5.6. Comparación de resultados	45
<b>6. Conclusiones</b>	<b>47</b>
<b>A. Anexo 1</b>	<b>49</b>



# Índice de figuras

2.1. Representación esquemática de aerosoles primarios y secundarios [36]. . . . .	13
2.2. Aerosoles de tipo natural: a) Tormenta de arena. b) Acumulación de nubes. c) Fumarola proveniente de un volcán. [1]. . . . .	14
2.3. Aerosoles de tipo antropogénico: a) Smog fotoquímico en una ciudad. b) Humo proveniente de una fábrica. c) Tráfico vehicular. [2]. . . . .	14
2.4. Resumen de la clasificación de los aerosoles. . . . .	15
2.5. Representación de la dispersión de la luz blanca al pasar por un prisma. . . . .	17
2.6. Proceso de dispersión múltiple que involucra dispersión de primer (P), segundo (Q) y tercer (R) orden en la dirección indicada por $\mathbf{d}$ [43]. . . . .	17
2.7. Representación de absorción de un objeto emitiendo la energía absorbida en forma de radiación electromagnética. . . . .	18
2.8. Balance radiativo anual de la Tierra [3]. . . . .	19
2.9. Espectro de rayos X hecho con EDS [9]. . . . .	20
2.10. Comparación del modelo de emisión y los datos proporcionados por SINAICA. [55]. . . . .	22
4.1. Estado de San Luis Potosí, México ([4]). . . . .	27
4.2. División municipal de la zona metropolitana de San Luis Potosí ([34]). . . . .	28
4.3. El etalómetro modelo AE33 [61]. . . . .	28
4.4. Representación del análisis del aerosol [61]. . . . .	29
5.1. Serie de tiempo del coeficiente de absorción a 370 nm. . . . .	33
5.2. Serie de tiempo del coeficiente de absorción a 470 nm. . . . .	34
5.3. Serie de tiempo del coeficiente de absorción a 520 nm. . . . .	34
5.4. Serie de tiempo del coeficiente de absorción a 590 nm. . . . .	35
5.5. Serie de tiempo del coeficiente de absorción a 660 nm. . . . .	35
5.6. Serie de tiempo del coeficiente de absorción a 880 nm. . . . .	36
5.7. Serie de tiempo del coeficiente de absorción a 950 nm. . . . .	36
5.8. Ciclo diurno promedio del coeficiente de absorción a 880 nm. . . . .	37
5.9. Ciclo diurno semanal del coeficiente de absorción a 880 nm. . . . .	38



5.10. Ciclo diurno promedio y semanal para las demás longitudes de onda. . . . .	38
5.11. Temperatura a lo largo del año en San Luis Potosí. . . . .	39
5.12. Precipitación a lo largo del año en San Luis Potosí. . . . .	39
5.13. Ciclo por temporadas del coeficiente de absorción a 880 nm. . . . .	40
5.14. Serie de tiempo de la concentración de carbono negro. . . . .	41
5.15. Ciclo diurno promedio de la concentración de carbono negro. . . . .	42
5.16. Ciclo diurno semanal de la concentración de carbono negro. . . . .	42
5.17. Ciclo por temporada de la concentración de carbono negro. . . . .	43
5.18. Serie de tiempo del coeficiente de Ångstrom (520 nm y 880 nm). . . . .	44
5.19. Ciclo diurno general del coeficiente de Ångstrom (520 nm y 880 nm). . . . .	44
5.20. Ciclo diurno semanal del coeficiente de Ångstrom (520 nm y 880 nm). . . . .	45
A.1. Ciclo por temporadas del coeficiente de absorción a 370 nm. . . . .	49
A.2. Ciclo por temporadas del coeficiente de absorción a 470 nm. . . . .	49
A.3. Ciclo por temporadas del coeficiente de absorción a 520 nm. . . . .	50
A.4. Ciclo por temporadas del coeficiente de absorción a 590 nm. . . . .	50
A.5. Ciclo por temporadas del coeficiente de absorción a 660 nm. . . . .	50
A.6. Ciclo por temporadas del coeficiente de absorción a 950 nm. . . . .	51

# Índice de cuadros

2.1. Matriz de correlación de los elementos [8]. . . . .	19
2.2. Resultados de la concentración media anual de elementos pesados ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) [7]. . . . .	21
5.1. Datos promedio para cada longitud de onda. . . . .	37
5.2. Coeficiente de absorción a $880\text{ nm}$ durante los tres periodos de estudio. . . . .	40
5.3. Concentración de carbono negro durante los tres periodos de estudio. . . . .	43
5.4. Comparación del coeficiente de absorción en México. . . . .	45
5.5. Comparación de la concentración de carbono negro en México . . . . .	46
5.6. Comparación de la concentración de carbono negro alrededor del mundo. . . . .	46



# Capítulo 1

## Introducción

El rápido crecimiento de los sistemas urbanos e industriales, ha traído consigo diferentes problemas ambientales relacionados con la producción de desechos, la afectación de los ecosistemas acuáticos y terrestres, la contaminación visual y sobre todo las numerosas emisiones atmosféricas con sus impactos sobre la calidad del aire y la atmósfera. [45].

Este impacto sobre la calidad del aire se representa a través de la contaminación atmosférica. La contaminación atmosférica es la presencia que existe en el aire de pequeñas partículas o productos secundarios gaseosos que pueden implicar riesgo, daño o molestia para las personas, plantas y animales que se encuentran expuestas a dicho ambiente [32]. La importancia del estudio y control de la contaminación atmosférica está sustentada en la evidencia sobre su impacto negativo en la salud respiratoria y cardiovascular de las personas, así como con el deterioro de su calidad de vida [27].

La contaminación atmosférica viene de muchas y variadas fuentes, donde se incluyen automóviles, chimeneas y otros insumos industriales que se arrojan a la atmósfera, así como la erosión del suelo gracias al aire [14]. Por ejemplo, los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos, producidos por los automóviles, que son emitidos al aire cálido e iluminado por el sol, forman fácilmente moléculas de ozono ( $O_3$ ) [14].

Dentro de la contaminación atmosférica se encuentran los aerosoles atmosféricos. El estudio de estos últimos ha sido indispensable para medir los efectos de la salud [67]. Pero no solo afectan a la salud, sino que también pueden impactar sobre los ecosistemas y el balance radiativo de la Tierra. Siendo esta última afectación la que provoca un cambio en la energía presente en la atmósfera terrestre, dando origen a su vez a cambios tanto en el clima como en los ecosistemas [39].

Uno de los aspectos cruciales para comprender la influencia de los aerosoles atmosféricos sobre el clima es el estudio de los coeficientes de absorción. Estos coeficientes desempeñan un papel esencial al determinar cómo las partículas atmosféricas interactúan con la radiación solar, absorbiendo energía. La relación entre la absorción de la radiación solar por parte de los aerosoles y la contaminación atmosférica es una vía importante para evaluar la magnitud del impacto de las partículas en la composición y el comportamiento del aire que nos rodea [59].

En este contexto, el presente proyecto de investigación tiene como objetivo principal examinar los coeficientes de absorción a diferentes longitudes de onda e interpretar su relación con la contaminación atmosférica, también se explorará la posibilidad de correlacionar los resultados obtenidos con investigaciones previas en México. Esta comparación proporcionará un contexto valioso para evaluar si los resultados de nuestro trabajo de investigación están en concordancia con los patrones observados en el país.

## Capítulo 2

# Marco Teórico

### 2.1. Aerosoles atmosféricos

Los aerosoles atmosféricos son pequeñas partículas líquidas o sólidas con un diámetro menor que  $100\ \mu\text{m}$  y mayores que  $0.002\ \mu\text{m}$  suspendidas en la atmósfera y se caracterizan por tener material orgánico en diferentes proporciones [63]. En Ciencias Atmosféricas, el término de aerosoles tradicionalmente se refiere a las partículas suspendidas, que contienen mayor proporción de material condensado o material particulado (PM) que de agua, por lo que las nubes son consideradas un fenómeno separado [68].

Los aerosoles pueden ser de origen primario o secundario (Figura 2.1). Los de origen primario son formados y emitidos directamente desde su fuente, mientras que los de origen secundario se originan a partir de reacciones fotoquímicas [52], [38].

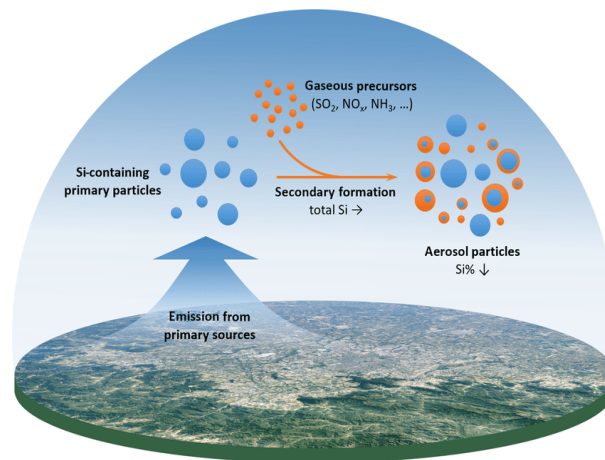


Figura 2.1: Representación esquemática de aerosoles primarios y secundarios [36].

Dado su origen, los aerosoles también se pueden clasificar en naturales y antropogénicos (Figuras 2.2 y 2.3). Los aerosoles naturales son aquellos que son emitidos directamente a la atmósfera sin intervención de la actividad humana. Ejemplo de ellos son el polvo mineral generado por

las tormentas sobre los desiertos y regiones áridas, sales marinas provenientes del rocío marino, compuestos orgánicos y carbono negro producto de incendios forestales, y sulfatos a partir de erupciones volcánicas. Por otro lado, los aerosoles antropogénicos son originados por actividades humanas; ejemplos de estos son los compuestos orgánicos y carbono negro emitidos a partir de la quema de combustibles fósiles y la quema de carbón, los polvos minerales producto de la desertificación debido a que se destruye o se acaba con las plantas que contribuyen a prevenir la erosión de los suelos por acción del viento [37].



Figura 2.2: Aerosoles de tipo natural: a) Tormenta de arena. b) Acumulación de nubes. c) Fumarola proveniente de un volcán. [1].



Figura 2.3: Aerosoles de tipo antropogénico: a) Smog fotoquímico en una ciudad. b) Humo proveniente de una fábrica. c) Tráfico vehicular. [2].

En referencia a su clasificación por tamaño es importante mencionar que debido a que los aerosoles no poseen una forma definida es muy difícil poder determinar su diámetro geométrico. Por esta razón, cuando se clasifica por tamaño se hace basándose en el diámetro aerodinámico, el cual, se define como el diámetro de una partícula esférica con una densidad igual a  $1 \text{ g cm}^{-3}$  que tendría la misma velocidad de depositación y comportamiento en un flujo de aire que la partícula

en cuestión [12].

De esta forma, dado su diámetro aerodinámico los aerosoles se clasifican en:

- Partículas suspendidas totales (PST,  $0.002 \mu m - 100 \mu m$ ).
- Partículas menores o iguales a  $10 \mu m$  ( $PM_{10} \leq 10$ ).
- Partículas menores o iguales a  $2.5 \mu m$  ( $PM_{2.5} \leq 2.5$ ).
- Partículas menores o iguales a  $1 \mu m$  ( $PM_1 \leq 1$ ).

De forma general se puede clasificar a los aerosoles de acuerdo con la figura 2.4

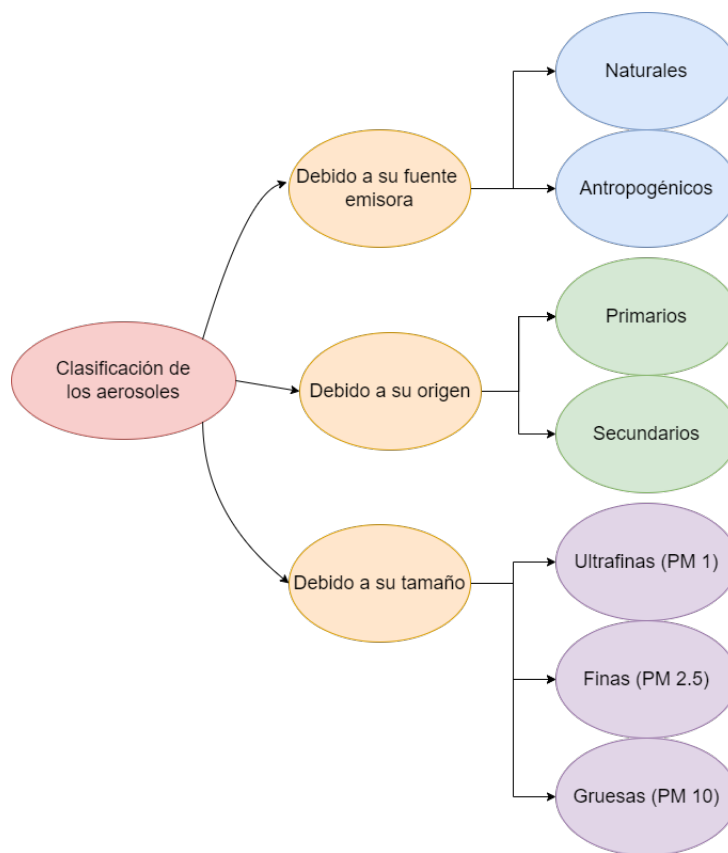


Figura 2.4: Resumen de la clasificación de los aerosoles.

### 2.1.1. Composición química de los aerosoles atmosféricos

La composición química de los aerosoles atmosféricos es muy variada y cambia dependiendo de la zona de estudio; sin embargo, de forma general se puede subdividir en elementos de tipo mineral



y de tipo marino [47].

Los componentes que comúnmente están presentes en el aerosol de tipo mineral son el carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), arcillas y feldspatos ([60], [5], [11], [29]). Los de tipo marino generalmente contienen compuestos como el cloruro de magnesio ( $\text{MgCl}_2$ ), sulfato de magnesio ( $\text{MgSO}_4$ ), sulfato de potasio ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ), sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ), cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ ) y sulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ).

Otro de los compuestos presentes en los aerosoles aunque en menor grado es el carbono negro (CN), el cual es un compuesto formado de partículas de carbono que son emitidas a la atmósfera durante procesos de combustiones incompletas de combustibles fósiles [30]. Este compuesto ha adquirido una gran importancia en los últimos años, debido a que sus concentraciones cada vez son más altas y que tienen la capacidad de absorber la radiación infrarroja y alterar de manera significativa la radiación global saliente. Debido a esta característica, el carbono negro calienta de forma directa a la atmósfera de la Tierra debido a dicha absorción y de manera indirecta reduce el albedo (fracción de radiación solar reflejada por una superficie) de la nieve y el hielo al depositarse sobre estos [65], [69]. Las grandes concentraciones de carbono negro aparecen generalmente en zonas urbanas donde existe una gran quema de combustibles fósiles [37]. Dada la importancia de que este compuesto presente en el aerosol puede absorber la radiación proveniente del sol, es importante estudiar este tipo de interacciones.

En el informe preparado por México para su Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, se calculó la cantidad de emisiones de gases de carbono desde 1990 hasta 2010. Se observó que en 1990, se liberaron al ambiente  $59.8 \text{ Gg}$  de gases de carbono, pero para el año 2010, esta cifra experimentó un incremento llegando a  $88.9 \text{ Gg}$  [22].

Mediante la evaluación de las emisiones de gases de carbono, se puede observar a lo largo del período que el sector del transporte ha sido la principal fuente de generación de esta contaminación, contribuyendo con un 54.4% en 1990 y un 63.4% en 2010. Aunque los porcentajes de otros sectores considerados han variado (aumentado o disminuido), la proporción total de emisiones de BC se ha mantenido constante. El sector residencial se posiciona como la segunda mayor fuente emisora de gases de carbono, seguido por el sector agropecuario, la industria manufacturera y de construcción, el consumo interno, la generación de electricidad y, por último, el sector comercial [22].

### 2.1.2. Propiedades físicas de los aerosoles atmosféricos

Una de las mejores formas de estudiar a los aerosoles es a través de sus propiedades físicas, tema principal de este escrito, por lo que se expondrán los conceptos físicos necesarios para su estudio.

La dispersión de la luz es el fenómeno por el cual la radiación electromagnética es desviada en su dirección de propagación debido al choque con pequeñas partículas presentes en el medio por el cual viaja la luz (Figura 2.5). La medida de la luz dispersada es útil en la determinación de la concentración de sustancias en suspensión, así como en la caracterización de la forma y el tamaño de las partículas presentes en el medio [43].

Existen dos rangos importantes sobre dispersión de la luz. El primer rango es la dispersión de Rayleigh, nombrada así en honor al físico británico J. S. Rayleigh (1842-1919), la cual se da

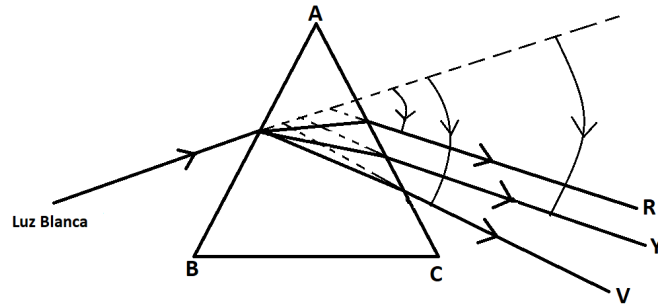


Figura 2.5: Representación de la dispersión de la luz blanca al pasar por un prisma.

cuando el diámetro de las partículas es menor que la longitud de onda de la radiación electromagnética y el segundo rango es la dispersión de Mie que se da cuando el diámetro de las partículas es comparable a la longitud de onda de la radiación electromagnética. El coeficiente de dispersión de la luz es la fracción de luz incidente que es dispersada por las partículas por unidad de longitud recorrida por el haz de luz [15]. Es importante mencionar que existe la posibilidad de que la luz sea dispersada por una sola partícula, lo cual se denomina dispersión simple, o que en su camino óptico se encuentren 2 o más partículas que la dispersen, a esto se le denomina dispersión múltiple (Fig. 2.6) [43]. La eficiencia de dispersión es una propiedad óptica importante de los aerosoles, a menudo denominada eficiencia de dispersión de la masa, y se evalúa como el cociente de dispersión de luz de las partículas dividido por la concentración en masa de materia particulada. A veces se utiliza la eficiencia de dispersión molar, dividiendo por la concentración molar de una especie de partículas de aerosoles [15].

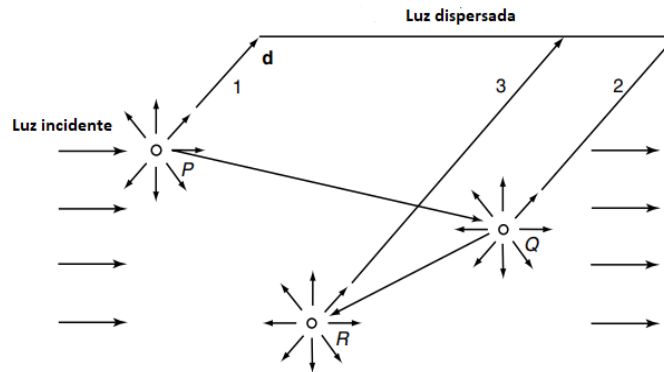


Figura 2.6: Proceso de dispersión múltiple que involucra dispersión de primer (P), segundo (Q) y tercer (R) orden en la dirección indicada por  $d$  [43].

Por otro lado, la segunda propiedad óptica más importante de los aerosoles es la absorción. Ésta se define como el fenómeno mediante el cual un cuerpo absorbe energía en forma de radiación electromagnética en determinadas longitudes de onda y esta radiación puede volver a ser emitida

o transformarse en otro tipo de energía (Figura 2.7). La absorción de un material siempre se dará en un rango o serie de frecuencias que depende totalmente de su composición así como de su temperatura, tal como dicta la ley de Stefan-Boltzman, la cual menciona que la energía radiada por un cuerpo por segundo, por unidad de superficie es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta y se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$\frac{P}{A} = \sigma T^4, \quad (2.1)$$

donde  $P$  es la potencia radiada,  $A$  es el área radiante y  $\sigma = 5.6703 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$  es la constante de Stefan [43].

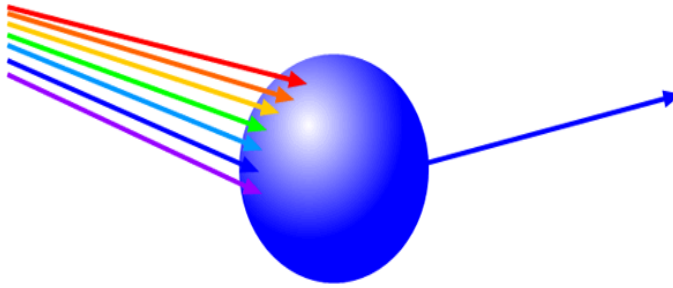


Figura 2.7: Representación de absorción de un objeto emitiendo la energía absorbida en forma de radiación electromagnética.

De la mano de estas propiedades físicas es posible calcular el coeficiente de Ångstrom. Este coeficiente fue originalmente presentado como una constante independiente de la longitud de onda para describir la extinción de la luz por aerosoles dependiente de la longitud de onda [6]. Sin embargo, el coeficiente de Ångstrom es extremadamente dependiente del tamaño de las partículas en los aerosoles. [6]. Esta dependencia del tamaño en el coeficiente de Ångstrom fue usada para deducir el diámetro aerodinámico promedio de los aerosoles [51].

El cálculo del coeficiente de Ångstrom,  $\alpha$ , está dado explícitamente por la siguiente ecuación [50]

$$\alpha(\lambda_1, \lambda_2) = -\frac{\ln(G(\lambda_1)) - \ln(G(\lambda_2))}{\ln(\lambda_1) - \ln(\lambda_2)}, \quad (2.2)$$

donde  $G(\lambda_i)$  con  $i \in 1, 2$  representa el coeficiente de absorción a la longitud de onda  $\lambda_i$ .

Junto con el cálculo del coeficiente de Ångstrom, se puede calcular el balance radiativo de la Tierra, el cual se define como el cambio en el flujo de energía proveniente de la radiación del espacio exterior hacia la superficie y atmósfera terrestre y éste se mide en unidades de  $\text{W m}^{-2}$  (Figura 2.8). La importancia de esta medida es que ayuda a determinar los factores más influyentes en el cambio climático como por ejemplo: el impacto de la actividad humana sobre el clima [66]. Se dice que el balance es negativo si la energía emitida es mayor que la absorbida en el sistema del clima mientras que el balance es positivo si la energía emitida es menor que la absorbida [40].

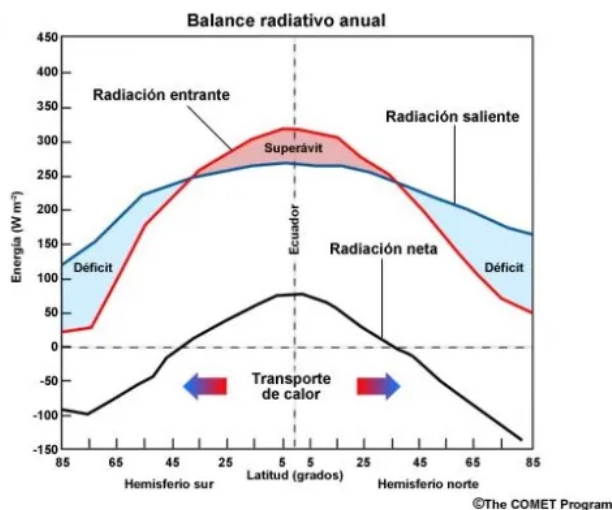


Figura 2.8: Balance radiativo anual de la Tierra [3].

### 2.1.3. Estudios previos en San Luis Potosí

La ciudad de San Luis Potosí a la fecha cuenta con varios estudios sobre calidad del aire dado que presenta una gran actividad metalúrgica ([8], [10]). El primer estudio se realizó en el año 1999, en el cual se encontró que la concentración total de partículas suspendidas fue de  $167.7 \mu\text{g m}^{-3}$ , y que la concentración de los mayores metales fue  $\text{Cu} = 1.81 \mu\text{g m}^{-3}$ ,  $\text{As} = 0.88 \mu\text{g m}^{-3}$ ,  $\text{Pb} = 0.68 \mu\text{g m}^{-3}$  y  $\text{Cd} = 0.03 \mu\text{g m}^{-3}$  [49], valores que excedían los recomendados por la Organización Mundial de la Salud, OMS.

En 1999 Aragón y colaboradores [8], realizaron un muestreo de los aerosoles urbanos en cinco sitios (situados a 10 - 15 km) alrededor de la zona metalúrgica de San Luis usando muestreadores de alto volumen, y la caracterización química por medio de absorción atómica, microanálisis por rayos X y microscopía electrónica de barrido. Los resultados por absorción atómica mostraron distintas asociaciones químicas, por ejemplo: Pb-As-Cd, Fe-Mn, Pb-Fe, Pb-Mn, Fe-As, Fe-Cd, Cd-Mn y As-Mn. Estas correlaciones se resumen en el cuadro 2.1 donde también se destaca que el Ni y Cu no tienen una correlación con los otros metales y esto posiblemente se deba al poco número de muestras analizadas para estos metales.

Cuadro 2.1: Matriz de correlación de los elementos [8].

	As	Cd	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb
As	1						
Cd	0.736	1					
Cu	0.075	0.054	1				
Fe	0.512	0.542	0.043	1			
Mn	0.430	0.504	0.049	0.773	1		
Ni	0.037	0.028	-0.006	0.043	0.042	1	
Pb	0.747	0.740	0.070	0.69	0.577	0.041	1

Por otro lado, se encontró que el tamaño de las partículas menores o iguales a 2 micrómetros representaban el 47.04 % de total de los metales pesados presentes en el aerosol, sin embargo, resalta que solo la fracción entre 1 micrómetro y 2 micrómetros es casi el 27.38 % y esto se puede explicar porque sulfatos de plomo, óxidos de hierro, cobre metálico, galena, sulfatos de cobre y minerales de zinc mostraron una mayor distribución de tamaño en este rango de tamaño de partículas.

Posteriormente en el año 2002, fue publicado otro estudio sobre la presencia de Pb en el aire de San Luis Potosí [9]. Este estudio mostró la alta relación de las actividades metalúrgicas y mineras con la alta concentración de Pb en aire a través de un microscopio de barrido acoplado a un microanálisis de dispersión de rayos X (SEM-EDS). Los resultados sugirieron que existe una diferencia en la composición química de las partículas de cualquier mineral de Pb en la corteza terrestre y las arrojadas por la industria metalúrgica, lo que refuerza en gran medida que las fundiciones de Cu y Zn son, en gran parte, responsables de la presencia de metales pesados en el aire. También se encontró que las partículas individuales más pequeñas de los cúmulos tenían una estructura cristalina correspondiente a la especie  $\text{PbCu}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ . Y, finalmente, la morfología y composición química de las partículas de plomo sugirieron que estas podrían haberse originado a partir de fuentes antropogénicas como las fundiciones de cobre y zinc. La Figura 2.9 muestra el espectro de rayos X, hecho con espectroscopia de rayos X por dispersión en energía (EDS por sus siglas en inglés), obtenido en el estudio.

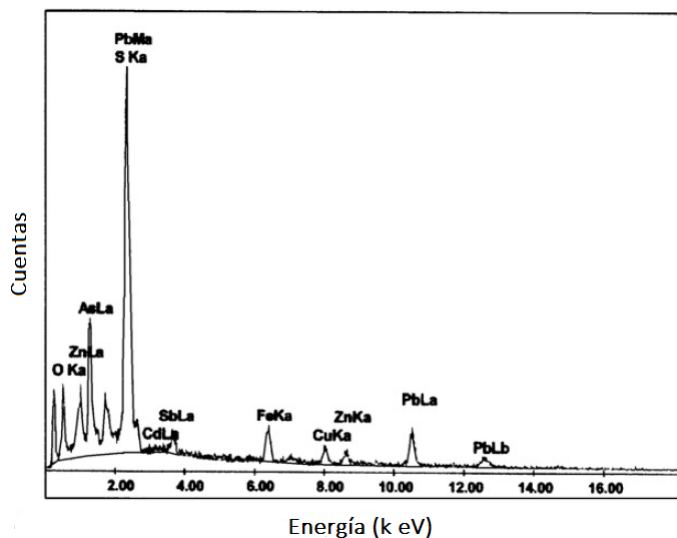


Figura 2.9: Espectro de rayos X hecho con EDS [9].

Otro estudio realizado entre 2003 y 2004 [7], mostró que la media anual de Partículas Suspendidas Totales en la ciudad de San Luis Potosí (PST),  $483 \mu\text{g m}^{-3}$ , superó con creces el límite permisible propuesto por la Organización Mundial de la Salud (OMS),  $90 \mu\text{g m}^{-3}$ , al igual que el límite establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-024-SSA-1993,  $75 \mu\text{g m}^{-3}$ . También como parte de sus resultados, el estudio, a través de absorción atómica, logró identificar y cuantificar la presencia de metales pesados, donde los elementos que superaron el límite permisible

propuesto por la OMS fueron Pb, Ni, Cu, Cd y As. Cabe destacar que la estación de medición ubicada en el Parque Tangamanga (T) fue la estación más alejada de las actividades industriales y aún así superó el límite permisible tanto en concentración media anual de PST ( $164 \mu\text{g m}^{-3}$ ), como en concentración media anual para algunos elementos pesados (As =  $0.30 \mu\text{g m}^{-3}$ , Cu =  $3.31 \mu\text{g m}^{-3}$ ). Es decir, la presencia de contaminantes ya no solo afectó a la zona industrializada, sino que se ha recorrido hasta zonas que antes se pensaban zonas casi libres de contaminantes. El cuadro 2.2 muestra los resultados obtenidos en la zona industrial y en el Parque Tangamanga para la concentración media anual de elementos pesados.

Cuadro 2.2: Resultados de la concentración media anual de elementos pesados ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) [7].

	Fe	Pb	Mn	Ni	Cu	Cd	As
<b>Promedio Zona Industrial</b>	6.79	0.26	0.26	0.08	1.70	0.09	0.26
<b>T</b>	1.51	0.23	0.05	0.04	1.30	0.04	0.30
<b>Límite permisible (OMS)</b>	32.00	0.20	1.00	0.025	0.60	0.01	0.01

La presencia de estos contaminantes en zonas que se creían libres de estos propició el estudio de la evolución espacial y temporal de las concentraciones del material particulado, es así que en el año 2013 se publicó un estudio en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, UASLP, el cual consistió en una comparación entre una serie de experimentos de modelación numérica y la evolución espacial y temporal de una serie de muestras recolectadas entre mayo del 2003 y abril del 2004 [55]. Los resultados de este estudio mostraron que existe una estrecha relación entre los valores altos de concentración de material particulado y características locales de la circulación atmosférica, es decir, existe una relación entre las partículas antropogénicas generadas en zonas industriales y las partículas encontradas en zonas libres de actividad industrial. La Figura 2.10 muestra la diferencia entre el modelo de emisión y los datos proporcionados por el Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire, SINAICA, donde se puede observar un ajuste bastante acertado a excepción de las últimas horas del día. Por último, en este estudio se menciona la importancia de tener un inventario de emisiones para entender realmente la dinámica de partículas de la atmósfera.

El primer reporte reciente por parte del gobierno que existe fue realizado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en el año 2013, en donde se realizó un inventario de emisiones de fuente móviles, fijas, área y naturales para todos los municipios del estado de San Luis Potosí [64]. Encontrándose que:

- Las fuentes fijas son la principal fuente emisora de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) contribuyendo con el 98 % de éste, además de ser emisoras del 39 % de las partículas  $\text{PM}_{2.5}$ .
- Las fuentes de área son responsables del 23 % de la emisión de compuestos orgánicos volátiles (COV), 57 % de partículas  $\text{PM}_{10}$ , 20 % de partículas  $\text{PM}_{2.5}$  y el 97 % de la emisión de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ).
- Las fuentes móviles son la principal fuente generadora de monóxido de carbono (CO) con el 65 % la emisión total, además de contribuir con el 28 % de la emisión de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ).
- Las fuentes naturales son la principal fuente emisora de compuestos orgánicos volátiles (COV) con el 74 % de emisiones, además de ser también la principal fuente de la emisión de

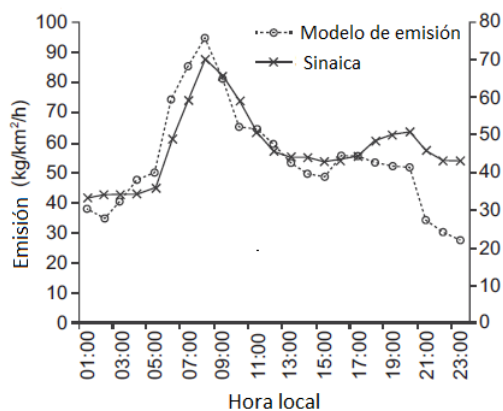


Figura 2.10: Comparación del modelo de emisión y los datos proporcionados por SINAICA. [55].

óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) con el 42% de las emisiones, ambas provenientes de emisiones biogénicas. Contribuyendo también con el 65% de emisiones de partículas  $\text{PM}_{10}$ .

Cinco años después, en el 2018, El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) publicó un reporte en donde a través del uso de muestreadores de aire de alto y bajo volumen lograron determinar los contaminantes predominantes en  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$  en la zona norte de la ciudad de San Luis Potosí [33]. Algunos de los contaminantes que se encontraron fueron:

- Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP).
- Bifenilos Policlorados (BPC) y Plaguicidas Organoclorados (POC).
- Metales y metaloides.
- Mercurio.
- Compuestos Orgánicos Volátiles (COV).

Este reporte, menciona que los contaminantes BPC y POC, no representan un riesgo para la población, es decir, están en bajas concentraciones; sin embargo, los HAPs se encuentran en altas concentraciones, destacándose la presencia de fluoreno, fenantreno, fluoranteno, pireno y criseno, cuyo origen son quema de biomasa y origen pirogénico y petrogénico.

El último artículo publicado fue realizado por [13] en el año 2023, en donde se logró caracterizar la composición química de las partículas  $\text{PM}_{2.5}$  en la zona norte de San Luis Potosí a través de un análisis por fluorescencia de rayos X, encontrando que en el año 2017 los componentes principales de los aerosoles atmosféricos fueron V, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn y Pb; mientras que en el año 2018 los principales componentes fueron Na, Al, Si y P. También se concluyó que las fuentes de emisión más importantes son:

- Polvo urbano (24.2%).
- Fuentes móviles (22.2%).

- Industria química (18.2%).
- Combustión de petróleo (16.3%).
- Industria de fundición (12.4%).
- Gasolina y la industria de cerámico (4.4%).
- Frenado de automóviles (2.3%).

Al observar estos grandes trabajos mencionados que existen para San Luis Potosí, se puede notar que las recomendaciones realizadas en el reporte de SEMARNAT [64] no han sido suficientes, ya que las concentraciones de los contaminantes siguen sin disminuir, por esta razón, es importante realizar más estudios en la ciudad de San Luis con la finalidad de poder tener una idea clara y valores exactos referentes a la composición química y propiedades físicas, para planear una mejor estrategia para reducir las emisiones.





## Capítulo 3

# Objetivos

### 3.1. Objetivo general

En el presente trabajo se tuvo como objetivo determinar y relacionar las magnitudes físicas de los aerosoles y la concentración de carbono negro en la ciudad de San Luis Potosí, así como brindar una breve explicación de los fenómenos que contribuyen al alza de estos parámetros.

#### 3.1.1. Objetivos específicos

Con la finalidad de alcanzar el objetivo general mencionado se trazó el siguiente plan de objetivos específicos.

- Entender el funcionamiento de un etalómetro.
- Determinar y analizar el coeficiente de absorción en San Luis Potosí.
- Determinar y analizar la concentración de carbono negro en San Luis Potosí con base en los coeficientes de absorción obtenidos.
- Obtener el comportamiento diario promedio, semanal y mensual tanto para el coeficiente de absorción como para la concentración de carbono negro.
- Comparar el resultado obtenido con estudios similares tanto en México como en otras partes del mundo.
- Determinar y analizar el coeficiente de Angstrom en San Luis Potosí.



## Capítulo 4

# Metodología

### 4.1. Zona de muestreo

Se realizó una campaña de medición de los coeficientes de absorción a diferentes longitudes de onda de los aerosoles atmosféricos menores o iguales a 2.5  $\mu\text{m}$  así como la estimación de la concentración de carbono negro, durante el periodo comprendido entre 21 septiembre de 2021 al 01 noviembre del 2022 en el Estado de San Luis Potosí (Figura 4.1), el cual, colinda al norte con Zacatecas, Nuevo León y Tamaulipas; al este con Tamaulipas y Veracruz; al sur con Hidalgo, Querétaro y Guanajuato; y al oeste con Zacatecas.



Figura 4.1: Estado de San Luis Potosí, México (4).

El lugar en específico en donde se realizó el estudio fue en el edificio central de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP) en el centro de la ciudad capital de San Luis Potosí (Figura 4.2) cuyas coordenadas son  $22^{\circ}09'06''$  N y  $100^{\circ}58'37''$  W con una altitud de 1854 metros sobre el nivel del mar (msnm). La ciudad de San Luis presenta una temperatura media anual de  $17.4^{\circ}\text{C}$ , una precipitación total anual de 392.5 milímetros (mm) y un clima seco/semiseco [35].



Figura 4.2: División municipal de la zona metropolitana de San Luis Potosí ([34]).

## 4.2. Equipo de monitoreo

Para la toma de los datos, coeficiente de absorción y concentración de carbono negro, se utilizó un etalómetro (Modelo AE33, Magee Scientific) (Fig. 4.3).



Figura 4.3: El etalómetro modelo AE33 [61].

El etalómetro es un instrumento que permite la obtención de los coeficientes de absorción de las partículas  $PM_{2.5}$  atmosféricas a diferentes longitudes de onda y trabaja, a un flujo de  $3 \text{ L min}^{-1}$ . En este instrumento se succiona continuamente una muestra de aerosol, la cual se hace pasar de forma continua por un punto definido de una cinta de fibra de vidrio. El análisis del coeficiente se logra al comparar la transmisión de la luz a través de la parte del filtro que contiene la muestra y la transmisión a través de la cinta del filtro que no contiene la muestra. (Figura 4.4). El instrumento toma mediciones a siete diferentes longitudes de onda abarcando desde el infrarrojo cercano hasta el ultravioleta cercano ( $370 \text{ nm}$ ,  $470 \text{ nm}$ ,  $520 \text{ nm}$ ,  $590 \text{ nm}$ ,  $660 \text{ nm}$ ,  $880 \text{ nm}$  y  $950 \text{ nm}$ ). El etalómetro calcula el coeficiente de absorción de aerosoles absorbentes a través del cambio de la atenuación de la luz transmitida por el filtro [61].

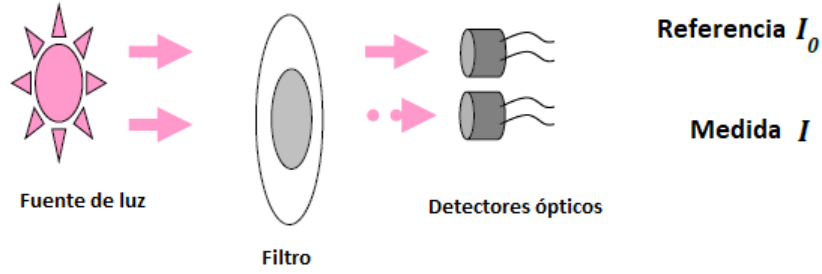


Figura 4.4: Representación del análisis del aerosol [61].

Para el cálculo del coeficiente de absorción se necesita el cambio de la atenuación óptica ( $\Delta ATN$ ), el flujo de entrada ( $F_{in}$ ) y el coeficiente de atenuación ( $b_{atn}$ ).

La atenuación óptica generalmente se da en valores de porcentaje y está dada por

$$ATN = -100 * \ln \left( \frac{I}{I_0} \right), \quad (4.1)$$

donde  $I_0$  es la señal de referencia,  $I$  es la señal del punto de la muestra y el factor de 100 brinda la parte porcentual.

Para el flujo se tiene que

$$F_{in} = F_{out} * (1 - \zeta), \quad (4.2)$$

donde  $F_{out}$  es el flujo medido por el aparato y  $\zeta$  es el factor de fuga.

Para el coeficiente de atenuación se parte de la ley de Beer-Lambert, la cual define que

$$I = I_0 e^{-b_{abs} x}, \quad (4.3)$$

donde  $x$  representa el espesor del medio atravesado.

De aquí, se puede despejar el coeficiente de absorción,  $b_{abs}$ . Definiendo este coeficiente de absorción de las partículas filtradas como el coeficiente de atenuación,  $b_{ATN}$ , se obtiene que

$$b_{atn} = \frac{S * (\Delta ATN / 100)}{F_{in} \Delta t}, \quad (4.4)$$

donde  $S$  es el área del punto de la muestra y  $\Delta t$  es el cambio en el tiempo.

Así, se puede calcular el coeficiente de absorción mediante

$$b_{abs} = \frac{b_{atn}}{C}, \quad (4.5)$$

donde  $C$  es el parámetro de dispersión múltiple, el cual tendrá un valor de 1.79 [71], siendo este parámetro el encargado de convertir las medidas de atenuación en coeficientes reales de absorción.

Para calcular la concentración de carbono negro se tiene que

$$BC = \frac{b_{abs(880)}}{\sigma_{air}}, \quad (4.6)$$

donde  $b_{abs(880)}$  representa al coeficiente de absorción a 880 nm y  $\sigma_{air}$  es la sección transversal de absorción de masa. La cual en este trabajo tendrá un valor de  $7.77 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  dado que es el usado por el fabricante [61].

### 4.3. Calibración del equipo de monitoreo

Para asegurar que los datos proporcionados por el etalómetro son fidedignos, se procedió a calibrar el instrumento previo al muestreo, llevando a cabo la metodología descrita por el fabricante [61], y se realizaron las siguientes calibraciones es específicamente:

- **Calibración de flujo manual:** Se calibró el flujo de trabajo, en este caso se aseguró que fuera de  $3 \text{ L min}^{-1}$ .
- **Prueba de fuga:** Se calcula  $\zeta = 1 - (F_{in}/F_{out})$ . Generalmente el promedio de fuga es del 3 %, y en nuestro caso fue de 2 %.
- **Prueba de estabilidad:** Se determinó el rendimiento de la fuente de luz y del detector sin flujo de aire en el sistema. Donde el control es que el valor promedio del CN, mostrado en el instrumento, fuera cercano a cero  $\pm 100$ .
- **Prueba de aire limpio:** Se determinó la estabilidad y el rendimiento del etalómetro cuando existe flujo de aire limpio de partículas. Aquí el control es colocar a la entrada del instrumento un filtro que captura todas las partículas y solo deja pasar el aire limpio, el valor promedio del CN fue de cero.
- **Calibración del sensor de la cinta:** Se verificó el correcto funcionamiento de los dos sensores ópticos en forma de pequeñas lentes ópticas, las cuales se encuentran a cada lado del marco de la unidad de análisis. Estos lentes determinan la cantidad de cinta de suministro y la cantidad de cinta recogida.
- **Prueba del Filtro Óptico de Densidad Neutra (NDOF):** Se verificó el rendimiento del sistema óptico, es decir, la respuesta de los detectores ópticos a diferentes intensidades de luz de las fuentes ópticas. La rutina comparó los valores de atenuación medidos para cada elemento de vidrio en cada longitud de onda con las calibraciones en el momento de la fabricación. Los datos se analizan como un ajuste lineal: si la pendiente difiere más del 10 % de la unidad, la prueba falla, en este caso la prueba fue un éxito.

## 4.4. Validación de datos

Con el fin de obtener datos de calidad se realizó el siguiente proceso de validación:

- Localización y eliminación de datos menores que cero.
- Localización y eliminación de datos nulos (NaN).
- Localización y/o eliminación de picos anómalos.

Se utilizó el lenguaje R a través de la IDE R-Studio para los tres procesos. Para el primer filtro se colocó un condicional de tal forma, que realizara una lectura de la base de datos y escribiera en una nueva base sólo los datos mayores que cero al igual que los datos nulos y los anómalos, con el fin de poder observar más adelante con una serie de tiempo los periodos con datos nulos y tratar de explicar a qué se debían.

Una vez observados los datos nulos y marcados los tiempos se realizó un condicional, parecido al primero, en el cual se escribió una nueva base sólo con datos con valores numéricos. Por último se realizó una serie de tiempo para la observación de picos anómalos. Ya localizados se decidió investigar fenómenos que tal vez hubiesen influido en las mediciones y se eliminaron aquellos picos a los que no se les pudo atribuir alguna causa lógica.

Ya con la base “limpia”, se procedió a graficar las series de tiempo, con ayuda de la biblioteca Open Air, así como sacar la media de datos para las diferentes longitudes de onda, todo realizado en R.





## Capítulo 5

# Resultados y discusión

### 5.1. Análisis del comportamiento anual coeficiente de absorción

Para ilustrar el comportamiento de los coeficientes de absorción obtenidos entre el 21 de octubre del 2021 al 01 de noviembre del 2022 en la ciudad de San Luis Potosí se realizó una serie de tiempo para cada longitud de onda (Figura 5.1 - 5.7).

La Figura 5.1 muestra el comportamiento para la longitud de onda de  $370\text{ nm}$ , observándose una tendencia muy constante con máximos y mínimos a lo largo de toda la serie de tiempo con una variación entre  $2.24\text{ Mm}^{-1} - 474.16\text{ Mm}^{-1}$  y un promedio anual de  $40.00\text{ Mm}^{-1}$ . Cabe mencionar que el periodo con los coeficientes de absorción más bajos fue del mes de julio a octubre y el periodo con los coeficientes más altos fue del mes de marzo a junio.

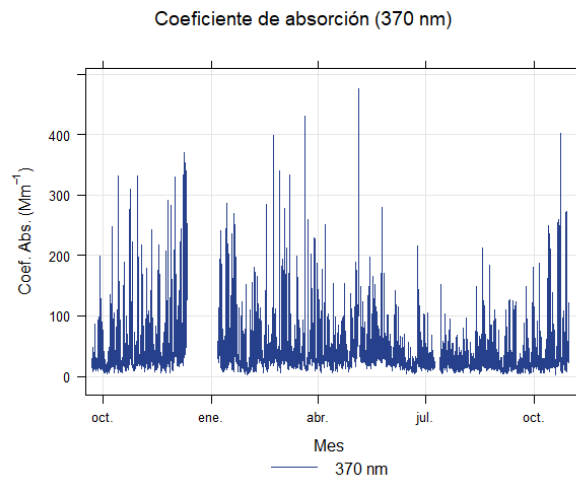


Figura 5.1: Serie de tiempo del coeficiente de absorción a  $370\text{ nm}$ .

Las Figuras 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 y 5.7 presentan las series de tiempo de los coeficientes para las longitudes de onda de 470 nm, 520 nm, 590 nm, 660 nm, 880 nm y 950 nm respectivamente (De la base de datos original se utilizó el 91.53% una vez aplicado el proceso de validación). En todas se observa un comportamiento similar al presentado en la Figura 5.1 que corresponde a la longitud de onda de 370 nm, es decir, se observan sus coeficientes más altos en el periodo del mes de marzo al mes de junio correspondientes a los meses de mayor radiación solar, y sus coeficientes más bajos del mes de julio al mes de octubre, correspondientes a los meses en los que se presentan un mayor número de precipitaciones.

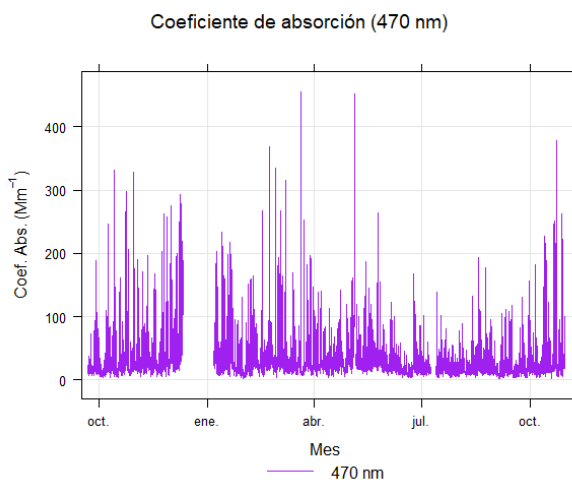


Figura 5.2: Serie de tiempo del coeficiente de absorción a 470 nm.

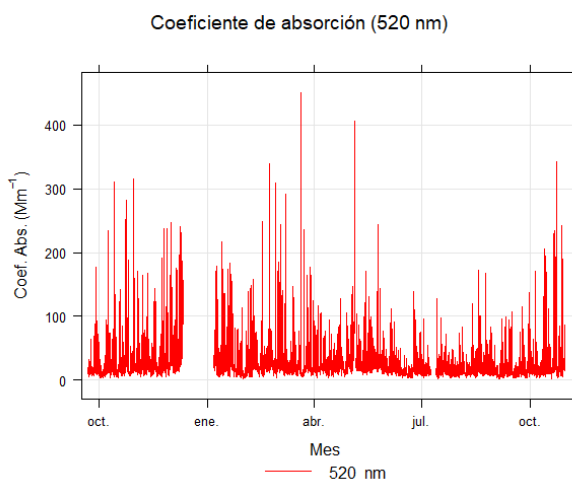


Figura 5.3: Serie de tiempo del coeficiente de absorción a 520 nm.

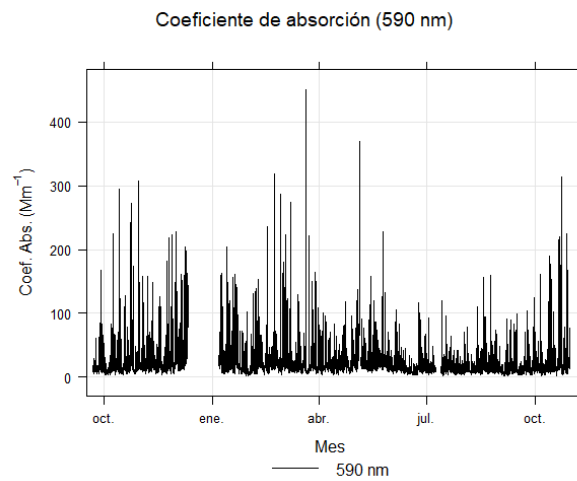


Figura 5.4: Serie de tiempo del coeficiente de absorción a 590 nm.

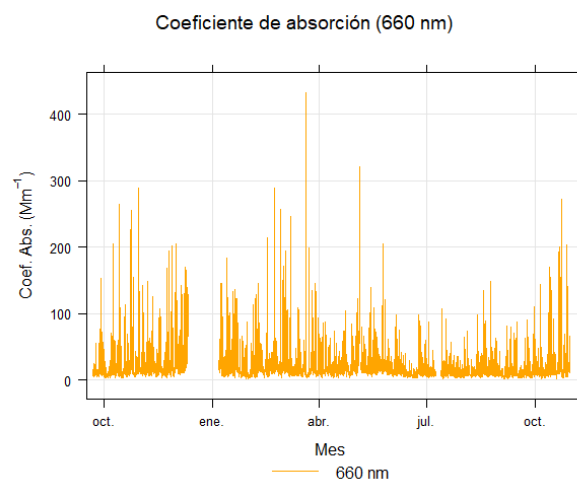


Figura 5.5: Serie de tiempo del coeficiente de absorción a 660 nm.

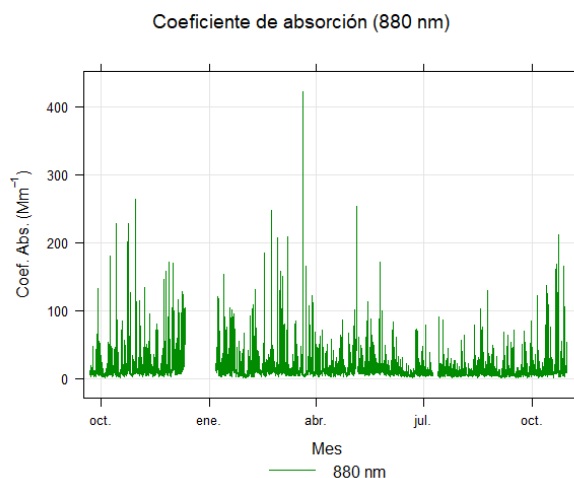


Figura 5.6: Serie de tiempo del coeficiente de absorción a 880  $\text{nm}$ .

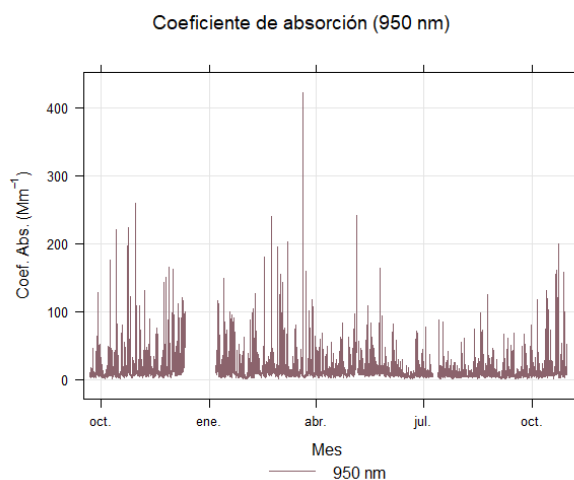


Figura 5.7: Serie de tiempo del coeficiente de absorción a 950  $\text{nm}$ .

El cuadro 5.1 muestra los promedios anuales, los valores mínimos y máximos para cada longitud de onda, destacándose que los valores promedio menores se obtienen a mayores longitudes de onda (880 nm y 950 nm) y los mayores valores promedio a menores longitudes de onda (470 nm y 370 nm) y esto se debe a que entre más pequeña sea la longitud de onda con la que se irradie la muestra atmosférica, es posible que existan más compuestos atmosféricos (gases) que absorban estas longitudes y por lo tanto un mayor coeficiente.

Cuadro 5.1: Datos promedio para cada longitud de onda.

Longitud de onda (nm)	Promedio ( $Mm^{-1}$ )	Valor mín. ( $Mm^{-1}$ )	Valor máx. ( $Mm^{-1}$ )
370	40.00 sd 40.46	2.24	476.16
470	32.55 sd 35.03	1.95	455.51
520	28.10 sd 31.27	1.64	450.80
590	24.92 sd 28.63	1.47	450.97
660	21.43 sd 25.38	1.21	432.25
880	16.40 sd 20.92	0.91	422.12
950	15.45 sd 20.06	0.86	421.77

Con la finalidad de observar cómo se comporta el coeficiente de absorción a lo largo del día, se realizó su ciclo diurno promedio anual junto a su variabilidad diaria observada. En la Figura 5.8 se presenta el correspondiente a la longitud de onda de 880 nm donde se logró apreciar que el punto máximo se alcanza a las 9:00 horas con un valor de  $33.60 Mm^{-1}$  (sd 32.58). Se seleccionó esta longitud de onda para ilustrar el comportamiento debido a que se asocia con la quema de combustibles fósiles [70], los ciclos de las demás longitudes de onda se pueden observar en la Figura 5.10. Al analizar la Figura 5.8 se observa que se trata de un comportamiento bimodal y al catalogar los datos por hora se identificó el primer pico a las 9:00 horas y el segundo pico a las 21:00 horas con un valor de  $11.52 Mm^{-1}$  (sd 9.96). Este comportamiento bimodal va de la mano con el movimiento vehicular, que es mayor en las mañanas que en la tarde noche, así como el inicio y el fin de las jornadas laborales. A pesar de las emisiones constantes de contaminantes por parte de las actividades humanas, se puede observar una disminución a partir de las 10:00 horas, y ésta se debe a la elevación de la capa límite y el recubrimiento de las partículas presentes en el aire, alcanzando su valor mínimo a las 18:00 horas con un valor de  $7.63 Mm^{-1}$  (sd 4.72).

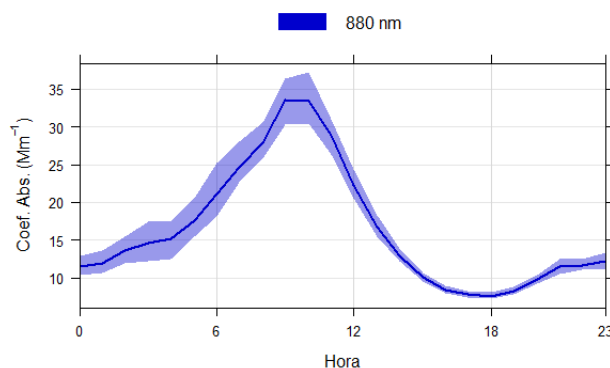


Figura 5.8: Ciclo diurno promedio del coeficiente de absorción a 880 nm.

Al separar el ciclo diurno promedio anual por días (Figura 5.9), se puede comprobar el alza en el coeficiente de absorción debido al inicio de las jornadas laborales y la afluencia vehicular, siendo los días más llamativos los martes y jueves, dado que son los que presentan un pico más alto. Sin embargo, cabe destacar que los fines de semana no existe una disminución significativa en comparación con los lunes, miércoles y viernes, y esto se puede atribuir a la actividad turística en la zona. De hecho, la Secretaría de Turismo (SECTUR) reporta una ocupación promedio de la zona centro del 48.5% durante los fines de semana [62].

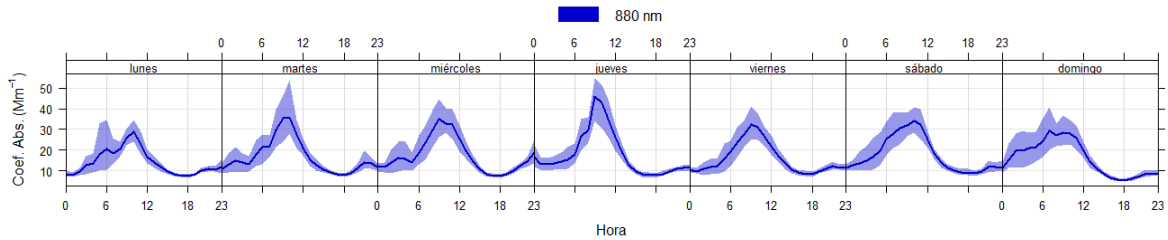


Figura 5.9: Ciclo diurno semanal del coeficiente de absorción a 880 nm.

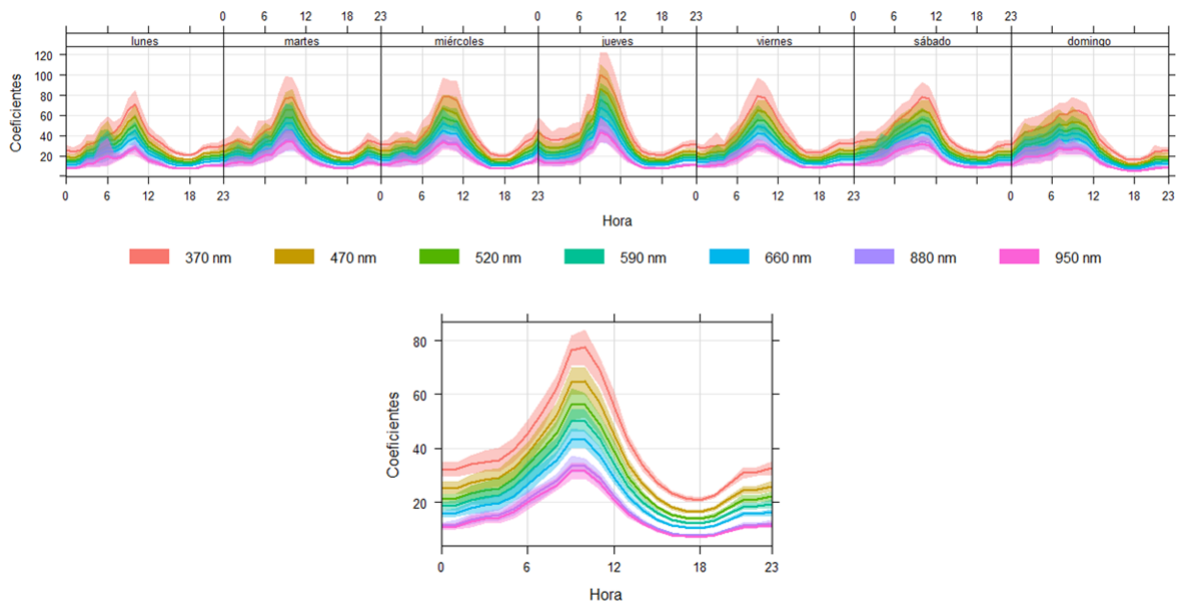


Figura 5.10: Ciclo diurno promedio y semanal para las demás longitudes de onda.

## 5.2. Análisis de la variabilidad estacional del coeficiente de absorción

Con el objetivo de conocer el comportamiento estacional del coeficiente de absorción en la Ciudad de San Luis Potosí, se decidió dividir el año de muestreo en tres periodos tomando en cuenta las similitudes de temperatura [16] (Figura 5.11) y la tasa de precipitación [16] (Figura 5.12).

- Periodo Frío-Seco (Octubre-Febrero).
- Periodo Cálido-Seco (Marzo-Mayo).
- Periodo de Lluvias (Junio-Septiembre).

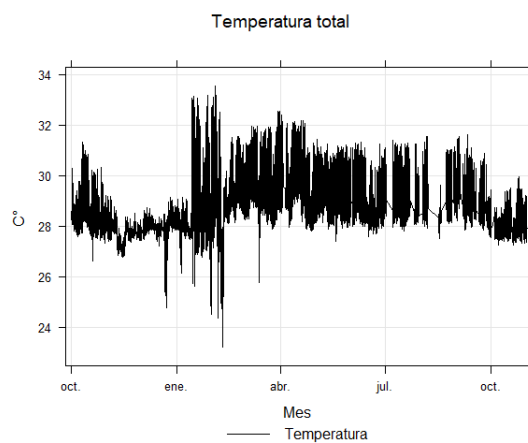


Figura 5.11: Temperatura a lo largo del año en San Luis Potosí.

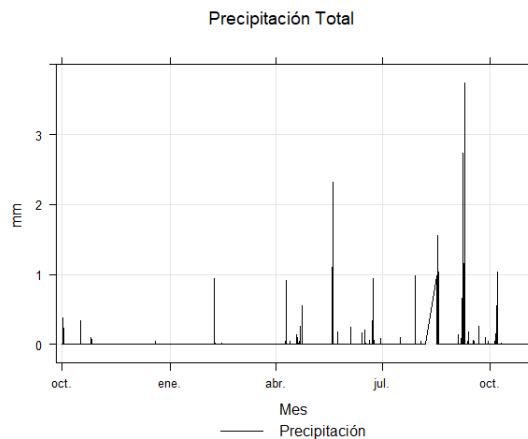


Figura 5.12: Precipitación a lo largo del año en San Luis Potosí.



Tomando en cuenta la división de periodos mencionada, se decidió realizar el análisis del comportamiento diurno (Figura 5.13) observándose en todos los periodos el mismo comportamiento bimodal; sin embargo, la diferencia más llamativa fue el cambio en la hora del primer pico, siendo la temporada Fría-Seca la que lo presenta a las 10:00 horas y no a las 9:00 horas como las otras dos, y esto se debe al cambio de horario que se dio el 31 de octubre del 2021 donde se retrasaba una hora el reloj, cuestión que no aplicó el etalómetro. Otra diferencia que resaltar es el comportamiento de las primeras horas en la temporada Fría-Seca, donde se observa una pequeña alza en los valores del coeficiente de absorción, aunque vuelve a bajar para seguir el comportamiento habitual. Por último, la diferencia en los valores de las distintas temporadas, siendo la temporada de lluvias la que muestra los valores más bajos ( $28.25 Mm^{-1}$ ) en comparación con la Cálida-Seca ( $35.15 Mm^{-1}$ ) y la Fría-Seca ( $41.59 Mm^{-1}$ ), siendo ésta última la que presenta los valores más altos. Esta observación de encontrar los picos más bajos en la temporada de lluvias se debe a la menor concentración de partículas de aerosoles presentes en la atmósfera debido al proceso de depositación húmeda, mientras que los picos más altos del periodo de frías secas se debe a que durante estos meses las emisiones de contaminantes y la baja altura de la capa límite provocan que la concentración de partículas de aerosoles se incremente drásticamente. Las gráficas por temporadas de las demás longitudes de onda se encuentran en el anexo A.

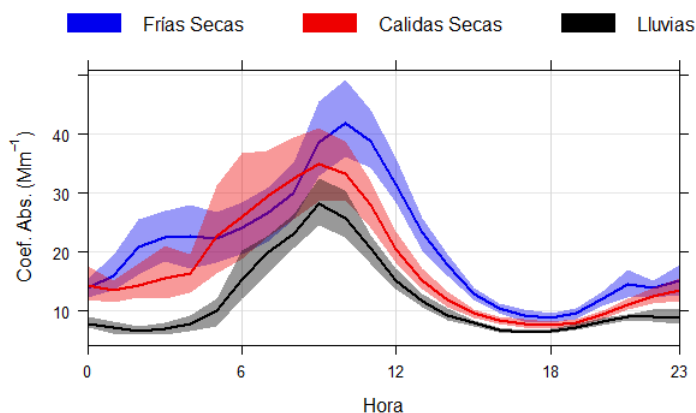


Figura 5.13: Ciclo por temporadas del coeficiente de absorción a 880 nm.

El cuadro 5.2 muestra los resultados obtenidos por temporada.

Cuadro 5.2: Coeficiente de absorción a 880 nm durante los tres periodos de estudio.

Temporada	Primer Máximo ( $Mm^{-1}$ )	Segundo Máximo ( $Mm^{-1}$ )	Mínimo ( $Mm^{-1}$ )
Frías-Secas	41.59 sd 37.34	14.56 sd 14.50	8.90 sd 5.29
Cálidas-Secas	35.15 sd 32.37	12.65 sd 9.15	7.53 sd 3.09
Lluvias	28.25 sd 27.14	9.05 sd 6.49	6.51 sd 3.15

### 5.3. Análisis del comportamiento anual de la concentración de carbono negro

De igual forma como se analizó el comportamiento anual de los coeficientes de absorción, se realizó el análisis de la concentración de carbono negro ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) (Figura 5.14), observándose que la concentración más baja de carbono negro se dio en el periodo de julio a octubre, mientras que la concentración más alta se dio en el periodo de marzo a junio. El CN presentó una variación entre  $0.11 \mu\text{g m}^{-3}$  -  $33.98 \mu\text{g m}^{-3}$  y un promedio anual de  $2.10 \mu\text{g m}^{-3}$  con una desviación estándar de 2.60. El comportamiento anual observado coincide con el reportado para los coeficientes de absorción, lo que demuestra la estrecha relación que existen entre estos dos parámetros [24] y [62].

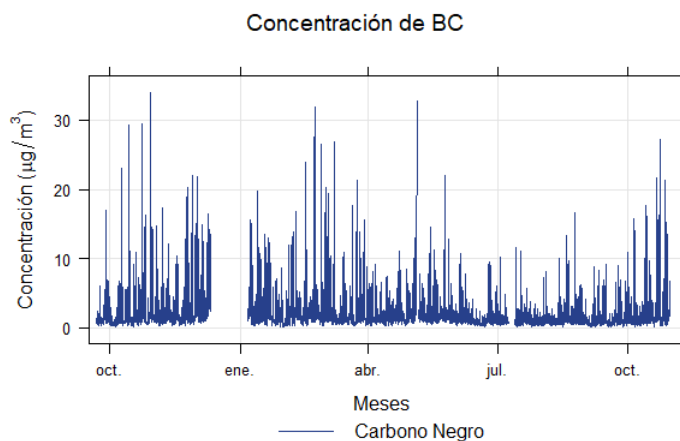


Figura 5.14: Serie de tiempo de la concentración de carbono negro.

El ciclo diurno promedio (Figura 5.15) muestra un comportamiento bimodal. Este comportamiento en la concentración se debe a las actividades humanas, tráfico vehicular y a la quema de combustibles fósiles por parte de los vehículos, siendo las mismas razones asociadas al comportamiento del coeficiente de absorción. El primer máximo se observa a las 9:00 horas con un valor de  $4.32 \mu\text{g m}^{-3}$  y una desviación estándar de 4.12, y el segundo máximo se da a las 21:00 con un valor de  $1.48 \mu\text{g m}^{-3}$  y una desviación estándar de 1.46; por último, el mínimo siendo a las 18:00 horas con un valor de  $0.98 \mu\text{g m}^{-3}$  y una desviación estándar de 0.54.

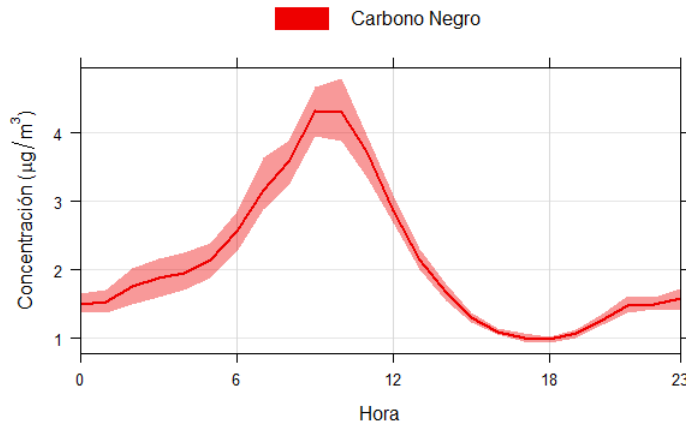


Figura 5.15: Ciclo diurno promedio de la concentración de carbono negro.

Por otro lado, el ciclo diurno semanal (Fig. 5.16) muestra que los fines de semana no existe una baja significativa en la concentración, siendo totalmente similar al ciclo semanal del coeficiente de absorción y demostrando que el flujo vehicular es la principal fuente de emisión en el centro de la ciudad de San Luis Potosí.

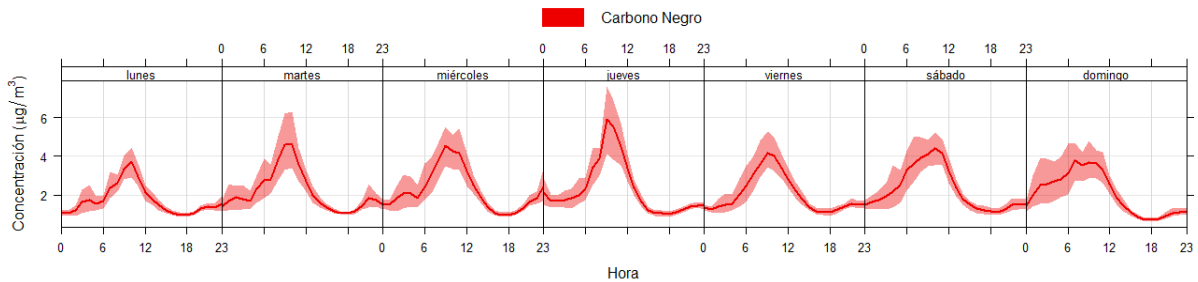


Figura 5.16: Ciclo diurno semanal de la concentración de carbono negro.

#### 5.4. Análisis de la variabilidad estacional de la concentración de carbono negro

Por último, se realizó una comparación de la concentración por las temporadas antes mencionadas. La figura 5.17 muestra que el periodo de frío-seco es el de mayor concentración mientras que el periodo de lluvias es el de menor. El comportamiento de las temporadas demuestra la gran relación que existe entre el coeficiente de absorción a  $880\text{ nm}$  y la concentración de carbono negro y esto se debe a que el máximo de absorción de las partículas de carbono negro se da a  $870\text{ nm}$ .

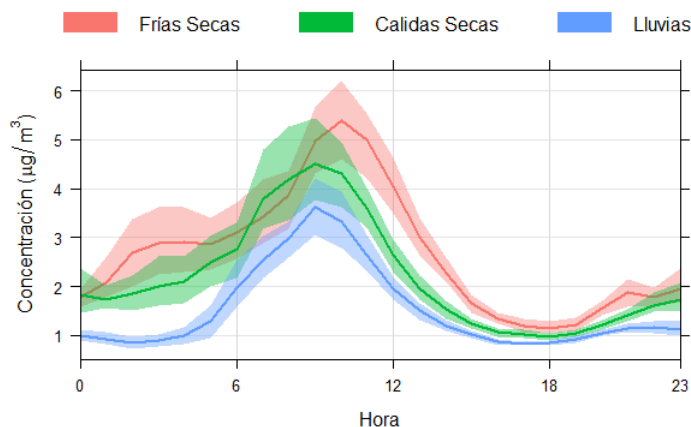


Figura 5.17: Ciclo por temporada de la concentración de carbono negro.

El cuadro 5.3 muestra los resultados obtenidos por temporada.

Cuadro 5.3: Concentración de carbono negro durante los tres periodos de estudio.

Temporada	Primer Máximo ( $\mu\text{g}/\text{m}^{-3}$ )	Segundo Máximo ( $\mu\text{g}/\text{m}^{-3}$ )	Mínimo ( $\mu\text{g}/\text{m}^{-3}$ )
Frías-Secas	5.35 sd 4.80	1.87 sd 1.94	1.14 sd 0.68
Cálidas-Secas	4.52 sd 4.17	1.63 sd 1.59	0.97 sd 0.39
Lluvias	3.64 sd 3.49	1.15 sd 0.82	0.84 sd 0.40

## 5.5. Análisis del coeficiente de Ångström

En la Figura 5.18 se muestra la serie de tiempo de todos los coeficientes de Ångström calculados, usando los coeficientes de absorción a  $520\text{ nm}$  y  $880\text{ nm}$ . El análisis arrojó un promedio de 1.12, lo cual indica que las partículas presentes son una mezcla entre partículas de carbono negro y partículas no absorbentes (compuestos orgánicos), es decir, las partículas que se encuentran en el aire de la ciudad de San Luis Potosí son propias del sitio de muestreo. Esta afirmación se debe a que si el coeficiente de Ångström es cercano a 1, se trata de partículas nuevas, mientras que un coeficiente cercano a 0 indica la presencia de partículas viejas con recubrimiento de compuestos orgánicos [18].

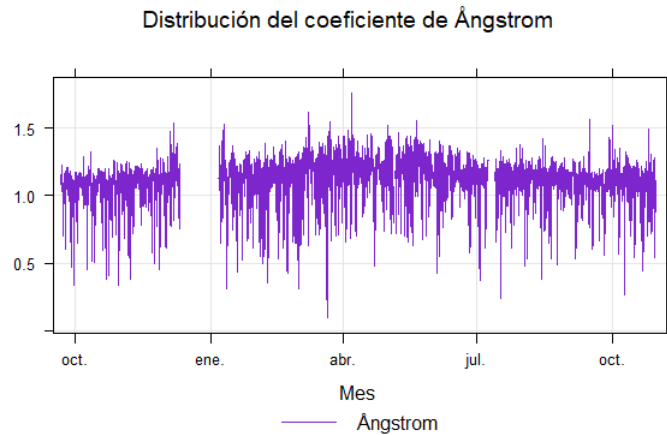


Figura 5.18: Serie de tiempo del coeficiente de Ångstrom ( $520\text{ nm}$  y  $880\text{ nm}$ ).

En el ciclo diurno promedio (Figura 5.19) se pueden observar valores por encima del 1 a todas horas, lo que nos indica la coexistencia de partículas recién emitidas y partículas recubiertas, siendo las 7:00 horas el punto donde existen en su mayoría partículas recién emitidas, mientras que a lo largo del día se pudo observar la acumulación de los dos tipos, siendo las 17:00 horas el punto máximo de coexistencia [54]. Por otro lado, en el ciclo diurno semanal (Fig. 5.20) se logró observar que los fines de semana había una baja de estos valores descendiendo más allá del 1, lo que nos indica que esos días sí existe un rezago mayor de partículas, es decir partículas emitidas durante la semana laboral que aún están presentes en el aire [54].

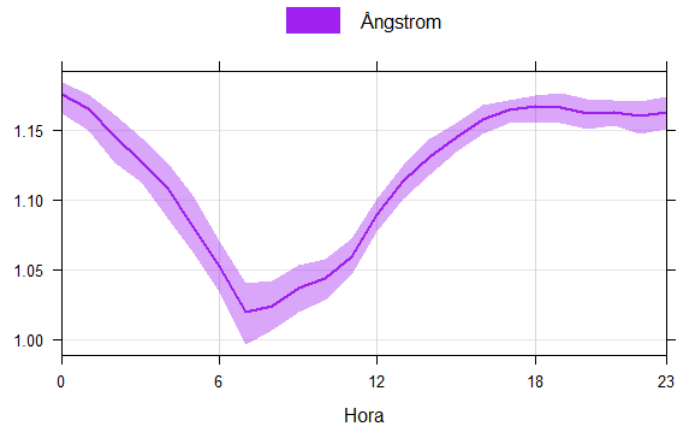


Figura 5.19: Ciclo diurno general del coeficiente de Ångstrom ( $520\text{ nm}$  y  $880\text{ nm}$ ).

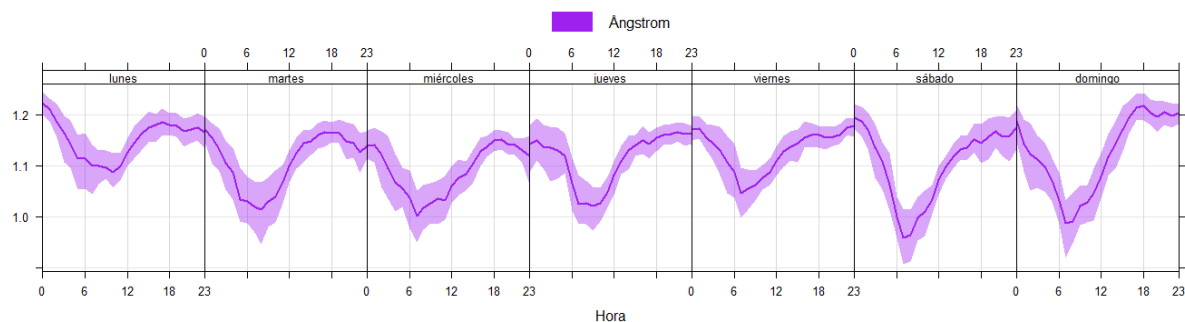


Figura 5.20: Ciclo diario semanal del coeficiente de Ångström (520 nm y 880 nm).

## 5.6. Comparación de resultados

Con el propósito de establecer si los resultados adquiridos en este proyecto de investigación concuerdan en términos generales con los hallazgos de otros estudios llevados a cabo en México, se optó por comprobar las diversas mediciones de los coeficientes de absorción.

La primera comparación fue del coeficiente de absorción obtenido en el presente estudio contra únicamente sitios en México (Cuadro 5.4), apreciándose que los valores obtenidos en este estudio entran en rangos aceptables al hacer la comparación con distintas zonas del país, siendo mayor que en zonas despobladas y protegidas como Juriquilla en Querétaro, y menor que en zonas de ciudades muy pobladas como al norte de la Ciudad de México y Tijuana en Baja California.

El cuadro 5.4 muestra la comparación contra distintos estudios realizados en México, usando una longitud de onda de 530 nm.

Cuadro 5.4: Comparación del coeficiente de absorción en México.

Sitio	Coefficiente de absorción ( $Mm^{-1}$ )	Estudios
CDMX	22.3	56
Norte, CDMX	22-80	53
Orizaba, Veracruz	16.74	46
Pedregal, CDMX	58	25
Tijuana, Baja California	63.07	41
Juriquilla, Querétaro	4.0	21
San Luis Potosí, SLP	28.1	Presente estudio

En el caso del carbono negro, se realizó una comparación tanto con estudios realizados en México (Cuadro 5.5) como en otras ciudades del mundo, encontrándose una diferencia importante entre la concentración reportada en Monterrey, Nuevo León y el estudio realizado, donde la concentración reportada en este estudio es claramente mucho mayor que en Monterrey. Por otro lado, la concentración reportada aquí es menor que la concentración reportada por distintos estudios

realizados en la Ciudad de México.

Cuadro 5.5: Comparación de la concentración de carbono negro en México

Sitio	Concentración de carbono ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	Estudios
CDMX	3.4 - 30.2	[19]
La Merced, CDMX	2.5	[20]
Chapultepec, CDMX	3.4	[48]
Guadalajara (Centro), Jalisco	1.3 - 8.7	[42]
Guadalajara (Miravalle), Jalisco	1.5 - 13.8	[42]
Monterrey	1.2	[44]
Chihuahua	1.33	[58]
San Luis Potosí, SLP	2.10	Presente estudio

Para distintas partes del mundo (Cuadro 5.6), se observó que la concentración de carbono negro aquí obtenido es menor que en ciudades como Hong Kong, Xián, Los Ángeles y Erfurt. Sin embargo, el resultado muestra que la concentración de carbono negro en San Luis Potosí es mayor que en ciudades como Vancouver y una parte focalizada de Los Ángeles.

Cuadro 5.6: Comparación de la concentración de carbono negro alrededor del mundo.

Sitio	Concentración de carbono ( $\mu\text{g m}^{-3}$ )	Estudios
Hong Kong, China	6.4	[31]
Xi'an, China	5 - 10	[17]
Los Ángeles, EE.UU.	3.6 - 27.6	[26]
Los Ángeles, EE.UU.	1.67	[23]
Vancouver, Canadá	1.19	[28]
Erfurt, Alemania	2.6	[57]
San Luis Potosí, México	2.10	Presente estudio

## Capítulo 6

# Conclusiones

El análisis de las propiedades físicas de los aerosoles en San Luis Potosí, San Luis Potosí mostró que la longitud de onda que mejor se adaptó a las finalidades de la investigación fue la de  $880\text{ nm}$ . Con ésta, se determinó un valor promedio de  $16.40\text{ Mm}^{-1}$ . Los valores más altos se presentaron en la temporada Fría-Seca dado a la baja altura de la capa límite, mientras que los valores más bajos se presentaron en la temporada de lluvias, por lo que se puede inferir que la humedad en el ambiente, así como las corrientes de aire ayudan en gran medida a la disminución de la contaminación presente en el aire. El coeficiente de absorción no muestra un comportamiento lineal, en cambio muestra un comportamiento bimodal mostrando dos máximos por día, uno a las 9:00 horas y el segundo a las 21:00 horas. Por otro lado, el mínimo se obtuvo a las 18:00 horas, siendo una muestra de que las actividades humanas, así como la industria y la quema de combustibles fósiles son los responsables de esta alza en el coeficiente de absorción.

Por otro lado, al comparar el promedio en la longitud de onda de  $530\text{ nm}$ , el cual fue de  $28.1\text{ Mm}^{-1}$ , se puede notar que no sólo hay existencia de partículas de carbono en la ciudad, sino que existen otros contaminantes que aportan cada vez más a que San Luis Potosí se haya catalogado como una de las ciudades más contaminadas del país actualmente.

La concentración de carbono negro arrojó un valor de  $2.10\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$ . Presentando sus valores más altos en el periodo Frío-Seco y sus valores más bajos en el periodo de lluvias, lo que muestra una estrecha relación entre el coeficiente de absorción medido a  $880\text{ nm}$  y la concentración de carbono negro.

El coeficiente de Ångström arrojó un valor promedio de 1.1176, mostrando en su mayoría valores por encima de 1, lo que nos indica la presencia de partículas nuevas de carbono, es decir emitidas de forma constante debido a las actividades humanas y la quema de combustibles fósiles y la presencia de partículas recubiertas por material orgánico.

En general, los resultados obtenidos a comparación de otras zonas del país, así como otras zonas del mundo muestran un grado de aceptación bastante buenos gracias al contexto geográfico del área de estudio, dado que arrojan un proceso de urbanización constante en San Luis Potosí. Sin embargo, la urbanización no ha sido extrema al grado de ser una megaciudad a palabras de Mario



Molina.

Es de preocupar este aumento en la concentración de carbono negro, dado que, aunque no sea extremadamente alta, sí muestra un indicio de un inicio de urbanización acelerada lo que de ser mal planeada puede derivar en daños en el medio ambiente, cosa de la cual se han visto las consecuencias cada vez más marcadas en el clima global.

Asimismo, es importante mencionar que la falta de datos en el mes de diciembre, así como una parte de enero, sesga la información interpretada en este trabajo para un análisis integral y más completo de lo que se presenta. Sin embargo, de acuerdo a todos los datos recuperados y al análisis que se hizo de los mismos, se encuentra que existen niveles importantes de contaminación atmosférica en San Luis Potosí a pesar de considerarse una ciudad pequeña.

Así pues, para mejorar este trabajo se sugiere la presencia de más etalómetros repartidos en distintas zonas de la ciudad capital de San Luis Potosí, además de la posibilidad de tomar de manera simultánea la temperatura, la humedad relativa y la precipitación, dando así lugar a una posible correlación que permita recrear lo sucedido en los periodos de datos faltantes.

# Apéndice A

## Anexo 1

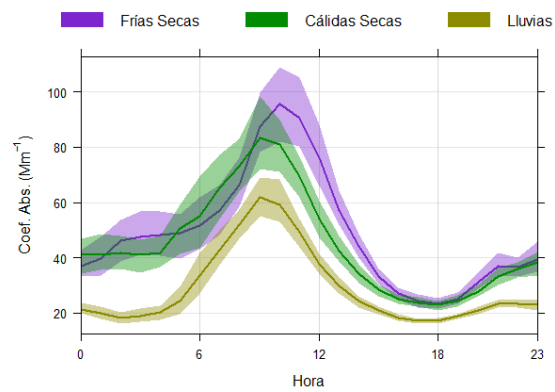


Figura A.1: Ciclo por temporadas del coeficiente de absorción a 370 nm.

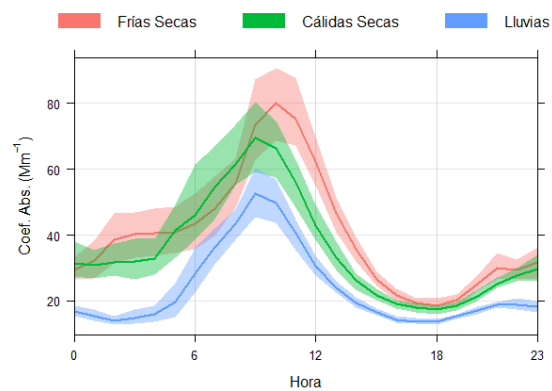


Figura A.2: Ciclo por temporadas del coeficiente de absorción a 470 nm.

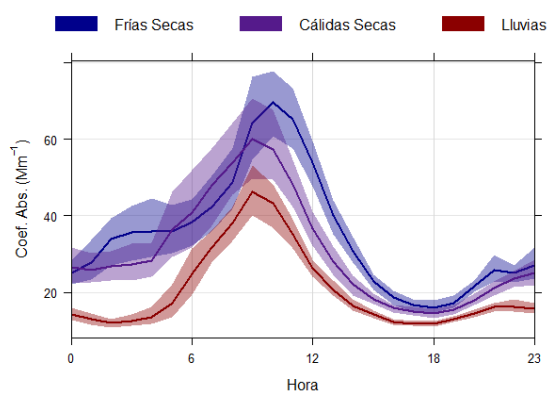


Figura A.3: Ciclo por temporadas del coeficiente de absorción a 520  $nm$ .

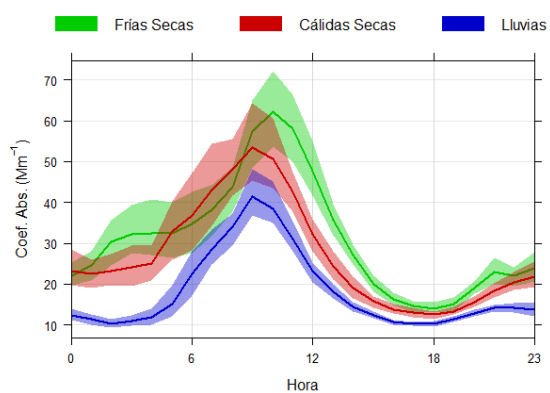


Figura A.4: Ciclo por temporadas del coeficiente de absorción a 590  $nm$ .

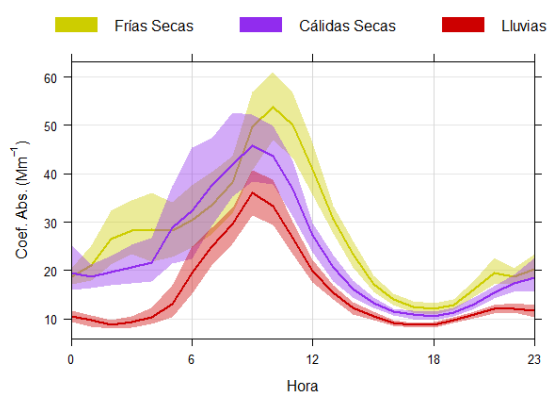


Figura A.5: Ciclo por temporadas del coeficiente de absorción a 660  $nm$ .

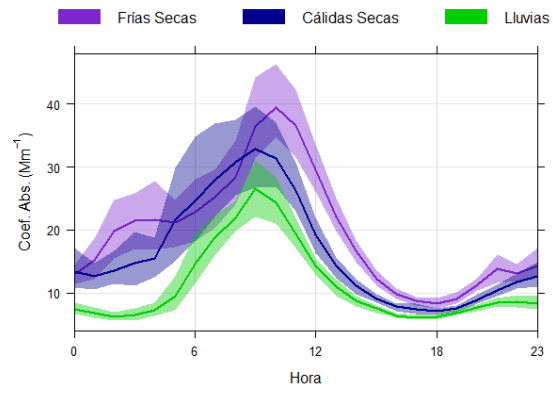


Figura A.6: Ciclo por temporadas del coeficiente de absorción a 950  $nm$ .



# Bibliografía

- [1] <https://josevicentediaz.com/teledeteccion/aerosoles-atmosfericos/>. [Online] Fecha de consulta: 06-07-2023.
- [2] <https://josevicentediaz.com/teledeteccion/aerosoles-atmosfericos/>. [Online] Fecha de consulta: 06-07-2023.
- [3] <https://aemetblog.es/2016/07/26/balance-radiativo-del-sistema-tierra/>. [Online] Fecha de consulta: 21-05-2023.
- [4] <https://mr.travelbymexico.com/732-estado-de-san-luis-potosi/>. [Online] Fecha de consulta: 29-06-2023.
- [5] Adedokun, J.A., Emofurieta, W.O. y Adedeji, O.A.: *Physical, mineralogical and chemical properties of harmattan dust at Ile-Ife, Nigeria*. Theoretical and Applied Climatology 40, páginas 161–169, 1989.
- [6] Angstrom, A.: *On the Atmospheric Transmission of Sun Radiation and on Dust in the Air*. Geogr. Ann., 11, páginas 156–166, 1929.
- [7] Aragón Piña, A., Campos Ramos, A.A., Leyva Ramos, R., Hernández Orta, M., Miranda Ortíz, N. y Luszczewski Kudra, A.: *Influencia de emisiones industriales en el polvo atmosférico de la ciudad de San Luis Potosí, México*. Rev. Int. Contam. Ambient. 22 (1), páginas 5–19, 2006.
- [8] Aragón Piña, A., Torres Villaseñor, G., Monroy Fernández, M., Luszczewski Kudra, A. y Leyva Ramos, R.: *Scanning electron microscope and statistical analysis of suspended heavy metal particles in San Luis Potosí, Mexico*. Atmospheric Environment 34, páginas 4103–4112, 2000.
- [9] Aragón Piña, A., Torres Villaseñor, G., Santiago Jacinto, P. y Monroy Fernández, M.: *Scanning and transmission electron microscope of suspended lead-rich particles in the air of San Luis Potosí, Mexico*. Atmospheric Environment 36, páginas 5235–5243, 2002.
- [10] Aragón Piña, Antonio: *Características fisicoquímicas y morfológicas del polvo suspendido en el aire de la ciudad de San Luis Potosí*. Tesis de Doctorado, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, 1999.
- [11] Avila, A., Queralt-Mitjans, I. y Alarcón, M.: *Mineralogical composition of African dust delivered by red rains over northeastern Spain*. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 102(D18), páginas 21977–21996, 1997.

- [12] Baird, C.: *Química ambiental*. Editorial Reverté. Barcelona, España, 2001.
- [13] Barrera, V., Contreras, C., Mugica-Alvarez, V., Galindo, G., Flores, R. y Miranda, J.: *PM<sub>2.5</sub> Characterization and Source Apportionment Using Positive Matrix Factorization at San Luis Potosi City, Mexico, during the Years 2017–2018*. *Atmosphere* 2023, 14, 2023.
- [14] Brusseau, M.L., Matthias, A.D., Comrie, A.C. y Musil, S.A.: *Chapter 17 - Atmospheric Pollution*. En *Environmental and Pollution Science*, páginas 293–309. Academic Press, tercera edición, 2019.
- [15] Buseck, P.R. y S.E. Schwartz: *Tropospheric Aerosols*. En Heinrich, D., Holland y Karl, K. Turekian (editores): *Treatise on Geochemistry*, páginas 91–142. Pergamon, Oxford, 2003.
- [16] Cambio Climático, Instituto Nacional de Ecología y: *Red de monitoreo: San Luis Potosí Estatal (SLP)*. <https://sinaica.inecc.gob.mx/red.php?redId=79>. [Online] Fecha de consulta: 18-06-2023.
- [17] Cao, G., Zhang, X. y Zheng, F.: *Inventory of black carbon and organic carbon emissions from China*. *Atmospheric Environment* 40, páginas 6516–6527, 2006.
- [18] Casasola, F., Pereyra, C., Prieto, M., Martonella, E., Busca, S., Raponi, M., Ristori, P. y Otero, L.: *Clasificación de los aerosoles en la estación Aeronet de Tucumán, Argentina*. *Anales AFA Vol. 31.*, páginas 39–45, 2020.
- [19] Chow, J., Watson, J., Crow, D., Lowenthal, D. y Merrifield, T.: *Comparison of IMPROVE and NIOSH Carbon Measurements*. *Aerosol Science and Technology* 34, páginas 23–34, 2001.
- [20] Chow, J., Watson, J., Edgerton, S. y Vega, E.: *Chemical composition of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in Mexico City during winter 1997*. *The Science of the Total Environment* 287, páginas 177–201, 2002.
- [21] Cienfuegos Riquelme, Naremi Cecilia: *Propiedades físicas de los aerosoles atmosféricos en Juriquilla, Querétaro*. [Tesis de licenciatura] Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, 2019.
- [22] Cruz Granado, Ana Karen De la: *Variación estacional de carbono negro atmosférico en Ciudad Universitaria durante 2015-2016*. [Tesis de licenciatura]. Instituto Politécnico Nacional, 2017.
- [23] Delfino, R. J., Staimer, N., Tjoa, T., Gillen, D. L., Polidori, A. y Arhami, M.: *Air pollution exposures and circulating biomarkers of effect in a susceptible population: clues to potential causal component mixtures and mechanisms*. *Environmental health perspectives* 117(8)., páginas 1232–1238, 2009.
- [24] Dumka, U. C., Kaskaoutis, D. G., Tiwari, S., Safai, P. D., Attri, S. D., Soni, V. K., Singh, N. y Mihalopoulos, N.: *Assessment of biomass burning and fossil fuel contribution to black carbon concentrations in Delhi during winter*. *Atmospheric Environment* 194, páginas 93–109, 2018.
- [25] Eidels-Dubovoi, S.: *Aerosol impacts on visible light extinction in the atmosphere of Mexico City*. *The Science of the Total Environment* 287, páginas 213–220, 2001.

- [26] Fanning, E., Yu, R.C., Lu, R. y Froines, J.: *Monitoring and Modeling of Ultrafine Particles and Black Carbon at the Los Angeles International Airport. Final Report ARB Contract 04-325*. Prepared for the California Air Resources Board and the California Environmental Protection Agency, Los Angeles., 2007.
- [27] Franco R., Juan Felipe: *Contaminación atmosférica en centros urbanos. Desafío para lograr su sostenibilidad: caso de estudio Bogotá*. Revista EAN, páginas 193–204, 2012.
- [28] Gan, W.Q., Koehoorn, M., Davies, H.W., Demers, P.A., Tamburic, L. y title = Long-term exposure to traffic-related air pollution and the risk of coronary heart disease hospitalization and mortality. journal = Environmental Health Perspectives 119(4). pages =501–507 Brauer, M., year = 2011.
- [29] Glaccum, R.A. y Prospero, J.M.: *Saharan aerosols over the tropical North Atlantic — Mineralogy*. Marine Geology, 37(3-4), páginas 295–321, 1980.
- [30] Guman, Singh Meena, Subrata, Mukherjee, Pallavi, Buchunde, Pramod, D. Safai, Vyoma, Singla, Mohammad, Y.Asalam, Sunil, M. Sonbawne, Raju, Made, Vrinda, Anand, Kundan, K. Dani y Govindan, Pandithurai: *Seasonal variability and source apportionment of black carbon over a rural high-altitude and an urban site in western India*. Atmospheric Pollution Research. 12 (2), páginas 32–45, 2021.
- [31] Ho, K.F., Cao, J.J., Harrison, R.M., Lee, S.C. y Bau, K.K.: *Indoor/outdoor relationships of organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) in PM<sub>2.5</sub> in roadside environment of Hong Kong*. Atmospheric Environment 38, páginas 6327–6335, 2004.
- [32] IDEAM.: *Contaminación Atmosférica*. <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion\protect\discretionary{\char\hyphenchar\font}{-}y\protect\discretionary{\char\hyphenchar\font}{-}calidad-ambiental/contaminacion\protect\discretionary{\char\hyphenchar\font}{-}atmosferica>. [Online] Fecha de consulta: 21-07-2023.
- [33] INECC: *Evaluación de Contaminantes Atmosféricos en San Luis Potosí, San Luis Potosí*, 2018. Documento Ejecutivo.
- [34] INEGI: *Marco Geoestadístico*, 2018.
- [35] INEGI: *Áreas geográficas*. Resumen 24., 2021.
- [36] Iu, Dawei, Tan, Jihua, Yang, Xuezhi, Sun, Xu, Liu, Qian, Jiang y Guibin: *Unraveling the role of silicon in atmospheric aerosol secondary formation: A new conservative tracer for aerosol chemistry*. Atmospheric Chemistry and Physics, 19, páginas 2861–2870, 2019.
- [37] Jacobson, M.Z.: *Atmospheric pollution. History, science and regulation*. Cambridge, E.U.A., páginas 50–116, 2002.
- [38] Jacobson, M.C., Hansson, H.C., Noone, K.J. y Charlson, R.J.: *Organic Atmospheric Aerosols: Review and State of the Science*. Rev. Geophys, 38, páginas 267–294, 2000.
- [39] Jesús Santamaría, Antonio: *Forzamiento radiativo y cambios químicos en la atmósfera*. Rev.R.Acad.Cienc.Exact.Fís.Nat. (Esp) Vol. 104., páginas 149–173, 2010.



- [40] Kump Lee R., Kasting, James F. y Crane, Robert G.: *The Earth System*. Prentice Hall 3rd ed., 2010.
- [41] Levy, E.M., Zhang, R., Zheng, J., Tan, H., Yuan Wang, Y., Molina, L., Takahama, S., Russell, L.M. y Guohui, L.: *Measurements of submicron aerosols at the California, Mexico border during the Cal-Mex 2010 field campaign*. Atmospheric Environment 88, páginas 308–319, 2014.
- [42] Limon-Sanchez, M.T., Carbajal-Romero, P., Hernandez-Mena, L., Saldarriaga-Norena, H., Lopez-Lopez, A., Cosio-Ramirez, R., Arriaga-Colina, J.L. y Smith, W.: *Black Carbon in PM<sub>2.5</sub>, data from two urban sites in Guadalajara, Mexico during 2008*. Atmospheric Pollution Research 2., páginas 358–365, 2011.
- [43] Liou, K.N.: *An Introduction to Atmospheric Radiation. Volume 84*. Academic Press., San Diego California, USA., 2002.
- [44] Lopez-Reyes, A., Orozco-Rivera, G., Acuna-Askar, K., Villarreal-Chiu, J. F. y Alfaro-Barbosa, J. M.: *Characterization of atmospheric black carbon in particulate matter over the Monterrey metropolitan area, Mexico, using scanning electron microscopy*. Air Quality, Atmosphere and Health 9(3), páginas 223–229, 2016.
- [45] Maldonado, Juan Mayr: *Ciudades y contaminación ambiental*. Revista de Ingeniería, páginas 66–71, 2009.
- [46] Marquez, C., Castro, T., Muhli, A., Moya, M., Martinez-Arroyo, A. y Baez, A.: *Measurement of aerosol particles, gases and flux radiation in the Pico de Orizaba National Park, and its relationship to air pollution transport*. Atmospheric Environment 39, páginas 3877–3890, 2005.
- [47] Marticorena, B., Bergamatti, G. y Aumont, B.: *Modeling the atmospheric dust cycle 2. Simulation of Saharan dust sources*. Journal of Geophysical Research 102, páginas 4387–4404, 1997.
- [48] Miranda, J., Morales, J., Cahill, T., Aldape, F. y Flores, J.: *A study of elemental contents in atmospheric aerosols in Mexico City*. Atmosfera 5, páginas 95–108, 1992.
- [49] Monsivais, J. y Flores, H.: *Air sampling monitoring in San Luis Potosí City*. [Tesis de licenciatura]. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 1995.
- [50] Moosmuller, H., Chakrabarty, R.K. y Arnott, W.P.: *Aerosol Light Absorption and its Measurement: A Review*. J. Quant. Spectrosc. Ra, 110, páginas 844–878, 2009.
- [51] Moosmüller, H., Chakrabarty, R.K., Ehlers, K.M. y Arnott, W.P.: *Absorption Angstrom coefficient, brown carbon, and aerosols: basic concepts, bulk matter, and spherical particles*. Atmos. Chem. Phys. 11, páginas 1217–1225, 2011.
- [52] Pandis, S.N., Harley, R.A., Cass, G.R. y Seinfeld, J.H.: *Secondary organic aerosol formation and transport*. Atmos. Environ., Part A, 26, páginas 2269–2282, 1992.
- [53] Paredes-Miranda, G., Arnott, W.P., Jimenez, J.L., Aiken, A.C., Gaffney, J.S. y Marley, N.A.: *Primary and secondary contributions to aerosol light scattering and absorption in Mexico City during the MILAGRO 2006 campaign*. Atmospheric Chemistry and Physics 9, páginas 3721–3730, 2009.

- [54] Park, Seungshik, Se Chang Son y Sangil Lee: *Characterization, sources, and light absorption of fine organic aerosols during summer and winter at an urban site*. Atmospheric Research 213, páginas 370–380, 2018.
- [55] Pineda Martínez, L.F., Carbajal, N., Campos Ramos, A., Aragón Piña, A. y García, A.R.: *Dispersion of atmospheric coarse particulate matter in the San Luis Potosí, Mexico, urban area*. *Atmósfera* 27 (1), páginas 5–19, 2014.
- [56] Raga, G.B., Castro, T. y Baumgardner, D.: *The impact of megacity pollution on local climate and implications for the regional environment: Mexico City*. Atmospheric Environment 35, páginas 1805–1811, 2001.
- [57] Ruckerl, R., Ibald-Mulli, A., Koenig, W., Schneider, A., Woelke, G., Cyrys, J., Heinrich, J., Marder, V., Frampton, M., Wichmann, H.E. y Peters, A.: *Air pollution and markers of inflammation and coagulation in patients with coronary heart disease*. American journal of respiratory and critical care medicine 173(4), páginas 434–441, 2006.
- [58] Salcedo, D., Castro, T., Bernal, J.P., Almanza-Veloz, V., Zavala, M., González-Castillo, E., Saavedra, M.I., Perez-Arvizu, O., Díaz-Trujillo, G.C. y Molina, L.T.: *Using trace element content and lead isotopic composition to assess sources of PM in Tijuana, Mexico*. Atmospheric Environment 132., páginas 171–178, 2016.
- [59] Schmidt, O., Artaxo, P., Arnott, W.P., Chand, D., Gatti, L.V., Frank, G.P., Hoffer, A., Schnaiter, M. y Andreae, M.O.: *Spectral light absorption by ambient aerosols influenced by biomass burning in the Amazon Basin. I: Comparison and field calibration of absorption measurement techniques*. Atmospheric Chemistry and Physics 6., páginas 3443–3462, 2006.
- [60] Schütz, L. y Seibert, M.: *Mineral aerosols and source identification*. Journal of Aerosol Science 18, páginas 1–10, 1987.
- [61] Scientific, Magee: *Aethalometer® Model AE33 User Manual*. Aerosol d.o.o., 2016.
- [62] SECTUR: *Perfil del Turista*. <https://slp.gob.mx/sectur/Paginas/Perfil-del-turista.aspx>. [Online] Fecha de consulta: 21-06-2023.
- [63] Seinfeld, J.H. y Pandis, S.N.: *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. Wiley-Interscience, Hoboken, NJ, USA., 2006.
- [64] SEMARNAT: *Inventario de Emisiones a la Atmósfera Estado de San Luis Potosí, México. (Fuentes fijas, de área, móviles y naturales)*, 2013. Documento Final.
- [65] Shichang, Kang, Yulan, Zhang, Yun, Qian y Hailong, Wang: *A review of black carbon in snow and ice and its impact on the cryosphere*. Earth-Science Reviews. 210, página 103346, 2020.
- [66] Shine, K.P. y Forster, P.M.F.: *The effect of human activity on radiative forcing of climate change: a review of recent developments*. Global and Planetary Change, páginas 205–225, 1999.
- [67] Smith, Kirk R. y Mehta, Sumi: *The burden of disease from indoor air pollution in developing countries: comparison of estimates*. International Journal of Hygiene and Environmental Health. 206, páginas 279–289, 2003.

- [68] Sons, Pöschl y John, Wiley: *Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate change and health effects*. *Angewandte Chemie International Edition*, 44, páginas 7520–7540, 2005.
- [69] Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. y Midgley, P.M.: (*IPCC, 2013: Glosario [Planton, S. (ed.)]. En: Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América., 2013.
- [70] Toquinto-Manjarrez, F.Y., Vázquez-Galvez, F.A., Hernández-García, Y.G., Bernadac-Villegas, L.G., Solid, S.S., Soto-Padilla, M.Y., Domínguez-Acosta, M., Velázquez-Angulo, G., Flores-Tavizón, E. y Granados-Olivas, A.: *Patrones de concentración de carbono negro y principales fuentes de emisión en Ciudad Juárez, Chihuahua, México*. 2020.
- [71] Weingartner, E., Saathoff, H., Schnaiter, M., Streit, N., Bitnar, B. y Baltensperger, U.: *Absorption of light by soot particles: determination of the absorption coefficient by means of aethalometers*. *Journal of Aerosol Science*. 34 (10), páginas 1445–1463, 2003.