

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**  
**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO**



Influencia de las variables meteorológicas en el aumento o disminución del ozono troposférico (O<sub>3</sub>) y material particulado (PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>) en el área de la UAAAN.

Por:

**Nayeli Angélica Velasco García**

**Presentado como Requisito Parcial para  
Obtener el Título de:**

**INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL**

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Diciembre, 2020.

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**  
**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO**

Influencia de las variables meteorológicas en el aumento o disminución del ozono troposférico (O<sub>3</sub>) y material particulado (PM2.5 y PM10) en el área de la UAAAN.

Por:  
**NAYELI ANGÉLICA VELASCO GARCÍA**

Tesis  
Se somete a la Consideración del H. Jurado Examinador como Requisito para  
Obtener el Título de:

**INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL**

Aprobada por el Comité de Asesoría

En el presente trabajo de investigación el M.C. Juan Manuel Cepeda Dovala Presidente Del Jurado, reconoce a la M.C. Juana María Mendoza Hernández como Directora de la Tesis y como coasesores al M.C. Jorge Enrique Canales Almendares y al Ing. Benito Gustavo Correa González de la alumna Nayeli Angélica Velasco García.

  
M.C. Juan Manuel Cepeda Dovala.  
Presidente Del Jurado

Buenvista, Saltillo Coahuila, México

Diciembre de 2020

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

Influencia de las variables meteorológicas en el aumento o disminución del ozono troposférico (O<sub>3</sub>) y material particulado (PM2.5 y PM10) en el área de la UAAAN.


Por:  
NAYELI ANGÉLICA VELASCO GARCÍA


Tesis

Se somete a la Consideración del H. Jurado Examinador como Requisito para  
Obtener el Título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Aprobada por:

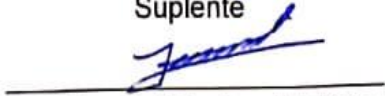
  
M.C. Juan Manuel Cepeda Dovala.  
Presidente del Jurado

  
M. C. Juana María Mendoza  
Hernández.  
Coasesor  
(Directora de Tesis)

  
M.C. Jorge Enrique Canales  
Almendares  
Coasesor

  
Ing. Benito Gustavo Correa González  
Suplente



  
M.C Sergio Sánchez Martínez  
Coordinador de la división de ingeniería

Buenavista, Saltillo Coahuila, México

Diciembre de 2020

## AGRADECIMIENTOS

A **Dios**, por la dicha de poder culminar una meta más en mi vida, por ser mi fuente de inspiración para seguir mis sueños hasta verlos cumplir.

A **mi familia**, que siempre me ha apoyado incondicionalmente y que han confiado en mí en este largo camino que culmine, a **mi Abuela Leonarda García Julián** por apoyarme y alentarme día a día. A **mi Abuelo Pedro Velasco Julián**, por su apoyo incondicional y enseñarme la disciplina y responsabilidad. A mis **Tíos: Efrén, Miguel Ángel, Felipa**: por su apoyo incondicional, desde su apoyo moral, hasta el económico, por confiar en mí en este proceso.

A mi papa: **Javier Velasco** por sembrar en mi la semilla del estudio y la preparación, por alentarme a lograr más cada día.

A mis **hermanos: Lizeth y Omar** por el apoyo moral y su cariño. Ustedes han sido mi inspiración y fuerza para seguir adelante.

A **la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, por abrirme sus puertas y darme la oportunidad de terminar con esta etapa de mis estudios profesionales, gracias ¡alma mater!

A los profesores: **M.C. Juan Manuel Cepeda Dovala, M. C. Juana María Mendoza Hernández., M. C. Jorge Enrique Canales., M. C. Benito Gustavo Correa Gonzales.**

Por haber confiado en mí, por el apoyo brindado para realizar esta tesis, y el conocimiento que cada uno de ellos me compartieron en esta etapa, para poder concluir con este trabajo de investigación.

A la **Lic. Leticia Villaseñor** por su apoyo desde que la conocí, por ser un ejemplo y guía en mis años de universidad.

A la Secretaria **Alma Guadalupe Ramírez** y al señor **Juan Luis Valenzuela** por todo el apoyo y hospitalidad recibidos en mis últimos años de universidad ¡gracias!

A **Luis Alberto Nava** por los consejos, el cariño y aprecio por siempre apoyarme a lograr mis objetivos y metas.

Y a **los profesores compañeros y personas** que se cruzaron durante mi carrera, con los cuales coincidí, por su apoyo, su compañía, su amistad, por reconfortarme en los momentos no agradables, por sus consejos y enseñanzas, los cuales me han servido como experiencia.

## DEDICATORIAS

A mi Abuela: **Leonarda García Julián.**

A ti abuela por ser parte de mi vida, de cuidarme, protegerme cuando más lo necesité, este logro es gracias a ti, a tu empeño y cariño.

A mi Abuelo: **Pedro Velasco Julián.**

Por inculcarme valores íntegros en mi día a día, por enseñarme a ser responsable, disciplinada, en mi entorno, gracias por el cariño incondicional, por impulsarme a ser mejor cada día, y seguir buscando más día con día.

A mi tío **Efrén Velasco García:** por su motivación constante día con día, por ser un padre para mí, por apoyarme siempre y creer en mí, por estar siempre ahí tendiéndome la mano cuando más lo necesite y por ser un ejemplo a seguir que con poco se pueden lograr grandes cosas.

A mis hermanos: **Lizeth y Omar.**

Porque este logro no es solo mío, si no de ustedes, por su comprensión y cariño.

A la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro:** Por el privilegio de forjarme como ingeniera en sus instalaciones, gracias por todo el apoyo recibido durante mis estudios.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO.....	VI
ÍNDICE DE CUADROS.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
RESUMEN.....	X
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS GENERALES.....	4
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	4
III. HIPÓTESIS.....	4
IV. ANTECEDENTES.....	5
V. REVISIÓN DE LITERATURA.....	10
5.1 Contaminación atmosférica .....	10
5.2 Ozono.....	11
5.3 Precursores del ozono troposférico.....	15
5.3.1 Principales precursores: los COV´S .....	15
5.3.2 Formación del ozono a partir de los COV´S .....	16
5.3.3 El ozono estratosférico y su papel en la atmosfera. ....	17
5.3.4 La disminución del O <sub>3</sub> estratosférico .....	18
5.3.5 Química del O <sub>3</sub> .....	20
5.4 Material particulado PM10 y PM 2.5 .....	21
5.4.1 En la salud humana.....	24
5.5 La meteorología y su interacción los contaminantes.....	26
5.5.1 Viento.....	26
5.5.2 Humedad relativa .....	27
5.5.3 Temperatura.....	27
5.5.5 Dispersión de los contaminantes del aire .....	28
5.6 Normatividad de los contaminantes .....	29
VI. MATERIALES Y MÉTODOS .....	30
6.1 Área de estudio.....	30
6.2 EQUIPOS DE MEDICION DE CONTAMINANTES Y PARAMETROS METEOROLOGICOS PARA LA RECOPIACION DE DATOS. ....	31
6.2.1 Monitoreo de ozono (O <sub>3</sub> ). ....	31
6.2.2 Monitoreo de Material Particulado PM10 Y PM2.5 .....	32

6.3 EQUIPOS UTILIZADOS POR LA ESTACION METEOROLOGICA PARA LA MEDICION DE PARAMETROS METEOROLOGICOS EN LA RECOLECCION DE DATOS.....	32
6.3.1 Descripción del sistema .....	32
6.3.2 Descripción de la información recabada.....	33
VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	35
VIII. CONCLUSIÓN .....	47
IX. BIBLIOGRAFÍA .....	48
X. ANEXO .....	54

## ÍNDICE DE CUADROS.

Tabla 1: Parámetros utilizados para el análisis. ....	33
Tabla 2: Datos de radiación en el año 2019. ....	54
Tabla 3 : Datos de humedad relativa en el año 2019. ....	55
Tabla 4: Datos de velocidad del viento en el año 2019. ....	56
Tabla 5: Datos de temperatura en el año 2019. ....	57
Tabla 6: Datos de temperatura en el año 2019. ....	58
Tabla 7: Datos de material particulado PM10 en el año 2019. ....	60
Tabla 8: Datos de material particulado PM2.5 en el año 2019. ....	61



## ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1: Potencial REDOX del ozono comparándolo con otros oxidantes. ....	13
Figura 2: Distribución vertical del ozono en la atmosfera. En términos absolutos (a) y en relación con el resto de las moléculas que constituyen el aire (b).. ....	14
Figura 3: Balance global de energía de la Tierra y la atmosfera.. ....	18
Figura 4. Distribución de partículas con relación al tamaño, distribución y composición química.. ....	23
Figura 5: Tiempo de permanencia de los contaminantes atmosféricos.....	28
Figura 6: Localización de la RUOA (Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos de la UNAM) en la UAAAN, de donde se obtuvieron los datos .....	30
Figura 7: Analizador de O <sub>3</sub> .....	31
Figura 8: Estación de Monitoreo Calidad del Aire y datos meteorológicos. ....	31
Figura 9: Analizador de material particulado (PM10 Y PM2.5). ....	32
Figura 10: Obtención de datos para su análisis. ....	33
Figura 11: Grafica múltiple de correlación de ozono y variables meteorológicas del año 2019.....	35
Figura 12: Coeficientes de correlación de ozono y variables meteorológicas del año 2019.....	36
Figura 13: Grafica de correlación de material particulado (PM10 Y PM2.5) y variables meteorológicas del año 2019. ....	37
Figura 14: Coeficientes de correlación de material particulado (PM10 Y PM2.5) y variables meteorológicas del año 2019. ....	38
Figura 15: Correlación de ozono y radiación del mes de marzo del 2019. ....	39
Figura 16: Correlación de ozono y radiación del mes de septiembre del 2019.....	40
Figura 17: Correlación de ozono y radiación del mes de noviembre de 2019. ....	41
Figura 18: Correlación de material particulado y velocidad del viento del mes de agosto de 2019. ....	43
Figura 19: Correlación de material particulado y velocidad del viento del mes de abril de 2019.....	44
Figura 20: Correlación de material particulado y velocidad del viento del mes de septiembre de 2019. ....	45

## RESUMEN

La contaminación ambiental y en especial la contaminación del aire, es un tema muy relevante a nivel mundial, que atrae a los organismos internacionales y a la comunidad científica. Esta investigación se centra en estudiar el comportamiento y correlación de la concentración de las partículas menores a 10 micrómetros (PM10 y PM2.5) y ozono troposférico como contaminantes del aire, en relación con las variables meteorológicas, presentes en el aire de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en la ciudad de Saltillo, Coahuila. Debido a la posible contaminación atmosférica, por su ubicación geográfica, donde ha llegado la industrialización y aglomeración poblacional debido a las residencias circundantes. La información de concentraciones utilizada corresponde a los registros meteorológicos y de contaminantes del Observatorio Atmosférico de la RUOA (Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos de la UNAM) ubicada en la UAAAN, de donde se obtuvieron los datos: ozono troposférico y material particulado como contaminantes, y a su vez las variables meteorológicas: radiación solar, velocidad del viento, temperatura y humedad relativa, se recabó información del año 2019. El análisis se realizó mediante el programa estadístico R, que arroja el coeficiente de correlación en base a los datos anuales de los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas. Los hallazgos muestran que anualmente la variable meteorológica radiación solar; tiene correlación con el ozono troposférico; y que en el caso del material particulado PM10 y PM2.5, la variable meteorológica; velocidad del viento tiene una correlación con el contaminante. Lo que trae como consecuencia, que; cuando mayor es la velocidad del viento, menor es la concentración del material particulado, al igual que, mientras aumente la radiación solar, se tendrán más índices de ozono troposférico, lo que conduce a tomar decisiones preventivas que permitan tener menores afectaciones en los cultivos y en la salud de la población.

**Palabras clave:** contaminación, coeficiente de correlación, viento, radiación solar.

# I. INTRODUCCIÓN

Desde la revolución industrial, las emisiones de gases que se derivan de las actividades humanas que provocan cambios capaces de alterar el complejo equilibrio de la atmósfera para que esta a su vez mantenga sus propiedades y funciones. Estos cambios se deben a la modificación de la proporción de sus componentes o mediante la introducción de elementos extraños de origen antrópico, lo que conocemos en su conjunto como contaminación atmosférica, este fenómeno afecta en gran medida tanto a la salud humana como animal y parte de esta contaminación afecta a la flora y fauna del planeta.

La contaminación atmosférica es un problema ambiental que puede tener efectos sobre una multitud de receptores y que además actúa a distintas escalas, desde cambios locales de la calidad del aire hasta procesos globales. Los efectos de la contaminación atmosférica sobre el medio ambiente suelen manifestarse en primer lugar en las especies que se encuentran en los primeros eslabones de la red trófica: los productores primarios. Esto tiene implicaciones muy importantes para el funcionamiento del ecosistema, al producirse una alteración de los flujos de materia y energía propios del mismo. (Fernández *et al.*, 2009).

De acuerdo con Ramírez (1986), el problema de la contaminación atmosférica que presentan las grandes ciudades actuales, tiene como característica principal el hecho de que en ellas se reúnen generalmente todas las clases de fuentes emisivas, en diversa proporción, de igual manera, los parámetros meteorológicos tienen una gran importancia durante la fase de dilución y transporte de las emisiones antropogénicas y naturales, puesto que los niveles de concentración en la atmósfera dependerán de ellos; los contaminantes durante su trayecto hacia lugares circundantes y en su recorrido, pueden reaccionar de manera física y/o química, entre sí mismos o con los elementos ambientales y producir nuevos compuestos.

El O<sub>3</sub> troposférico puede provocar efectos sobre la salud humana, produciendo irritación de ojos y vías respiratorias, aumentando la susceptibilidad a los alérgenos

respiratorios y reduciendo la función pulmonar. Pero además el O<sub>3</sub> puede provocar daños en los ecosistemas debido principalmente a la gran sensibilidad de las especies vegetales a este contaminante (Alonso *et al.*, 2009).

Se han mostrado valores permanentemente elevados de ozono por factores meteorológicos, como los regímenes de brisas que recirculan los contaminantes, mayormente en las zonas costeras y la llegada de vientos de levante, que arrastran los contaminantes. El intenso tráfico, típico de los lugares turísticos es una fuente de precursores mayúsculo. Todo ello se traduce en un perfil de contaminación crónica, cuyos efectos sobre la salud y la vegetación deben ser vigilados (Castro *et al.*, 2007).

A raíz de la contaminación atmosférica, la agricultura enfrenta cada vez más, nuevos retos, debido a cambios en el ecosistema, al crecimiento de la población, al bajo rendimiento y a los límites de sostenibilidad de los recursos naturales utilizados en la producción. Conocer adecuadamente la dinámica y los efectos de los principales factores involucrados en el desarrollo agrícola, servirá para poder elaborar alternativas viables de progreso, conservando los recursos naturales (Hernández *et al.*, 2009).

Díaz y Páez (2006), mencionan que hay un sinfín de contaminantes en el aire, entre ellos, el material particulado o bien conocido con el término PM, que hace referencia a partículas discretas (gotas de líquido o sólido) de un amplio rango de tamaños. Las partículas primarias son emitidas directamente al aire del ambiente, mientras las secundarias son formadas en la atmósfera por transformaciones de las emisiones gaseosas como los óxidos de azufre y nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles. Para fines regulatorios, el material particulado se designa comúnmente como PM<sub>2.5</sub> o PM<sub>10</sub> lo que refiere a partículas con diámetro aerodinámico menor de 2,5 µm y 10 µm, respectivamente.

Para material particulado existen estudios epidemiológicos que muestran incremento de mortalidad y morbilidad (admisiones hospitalarias, síntomas respiratorios, disminución de la función pulmonar, etc.). Desde este punto de vista, las partículas que mayor interés tienen, son las partículas con diámetros menores a 10 µm ya que son fácilmente respirables y penetran en los pulmones. Las partículas de

tamaño comprendido en el intervalo 2.5 - 10  $\mu\text{m}$  se depositan en la tráquea, bronquios y bronquiolos. Las partículas de tamaño inferior a 2.5  $\mu\text{m}$ , incluyendo las nanopartículas, con medidas del orden de micrómetros, son capaces de llegar al interior de los alvéolos pulmonares, donde las más hidrosolubles se disuelven y las menos hidrosolubles se depositan, estas partículas pueden acumularse en el sistema respiratorio y producir diversos efectos negativos en la salud facilitando el aumento de enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Por otro lado, el depósito de las partículas sedimentables de origen industrial sobre suelos agrícolas origina modificaciones frecuentemente perjudiciales para los cultivos, y como consecuencia, incide sobre la salud del hombre y los animales, provocan un deterioro más rápido de muchos materiales estructurales o de uso humano (Díaz y Páez, 2006).

#### Ozono en Saltillo, Coahuila.

En México, los principales problemas de contaminación del aire se encuentran en megaciudades como México, Monterrey y Guadalajara, y en estados industriales como Coahuila. En este último, la actividad industrial y energética relacionada con la combustión de carbón mineral lo coloca en el segundo lugar en emisiones de gases de efecto invernadero a nivel nacional. Además, los acuíferos tienen niveles considerables de sales minerales como el arsénico, que es un metal con una toxicidad considerable para los humanos (SEMA, 2012).

Considerando la importancia de la percepción de la contaminación ambiental y dado que existen pocos estudios en México y Saltillo sobre la contaminación del aire y el agua, crece la necesidad de estudios de monitoreo de la contaminación del aire para establecer los niveles de contaminación en el área estudiada, siendo que, la alta actividad minera en la región lo justifica (Martínez *et al.*, 2011).

## **II. OBJETIVOS GENERALES**

- Demostrar que la concentración del ozono troposférico es influida por las variables meteorológicas.
- Demostrar que la concentración del Material Particulado es influida por las variables meteorológicas.

### **2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar los valores de material particulado de tamaño 10 y 2.5 micras.
- Determinar la velocidad del viento (m/s) y el tamaño del material particulado (PM10 y PM2.5) ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).
- Comparar las variables meteorológicas en relación con el ozono y el material particulado (PM10 y PM2.5)

## **III. HIPÓTESIS**

Las variables meteorológicas afectan en la concentración del ozono y el material particulado a lo largo del tiempo, principalmente la radiación solar y la velocidad del viento.

## IV. ANTECEDENTES

La contaminación atmosférica es un fenómeno conocido y estudiado, en el mundo contemporáneo, cobrando gran importancia, a partir de una serie de episodios que tuvieron lugar en los países industrializados durante la primera mitad del siglo XX. Los casos ocurridos en el Valle de Mosa (Bélgica) en 1930, en Donora (Pennsylvania, EEUU) en 1948 y, sobre todo, la catástrofe de Londres, en diciembre de 1952, serían tal vez los más destacables y característicos. Estas situaciones excepcionales se tradujeron en un aumento de la mortalidad y la morbilidad, que no dejaron dudas acerca de que los niveles altos de contaminación atmosférica se asocian causalmente con un aumento de muertes tempranas (Ferran *et al.*, 1999).

Otros de los antecedentes que señalan Ferran *et al.*, (1999), es la presencia de una densa niebla que cubrió el área del Gran Londres durante 4 días, del 5 al 8 de diciembre de 1952, acompañándose de un brusco aumento en la mortalidad. El número de muertes en exceso atribuidas a este episodio fue entre 3.500 y 4.000. Estas evidencias llevaron a la adopción de políticas de control de la contaminación, especialmente en Europa Occidental y en los Estados Unidos, las cuales han conducido a una importante reducción de los niveles de contaminación atmosférica.

De acuerdo con Brenner, citado por Rodríguez (2012) “el ozono forma una capa protectora en la estratosfera contra los rayos solares, pero en la superficie terrestre se manifiesta como un gas producto de la contaminación ambiental, éste es denominado ozono troposférico (O<sub>3</sub>), el cual puede comportarse como un enemigo de la salud humana, animal y vegetal. Las pérdidas económicas en los cultivos forestales y otros pueden ser severas y se le ha atribuido hasta un 20% de la contaminación del aire. En algunos países han asociado la disminución de los bosques con su incidencia”.

Como menciona España (2000), científicos de Alemania, Brasil, Francia y Gran Bretaña comprobaron que la exposición sistemática a este gas provoca mutaciones genéticas en el cuerpo que conducen a enfermedades muy peligrosas; otros investigadores señalaron que se han detectado sus efectos nocivos sobre muchas especies de animales. Sobre esta temática no se han publicado muchos estudios, por

lo que la necesidad de su conocimiento es sumamente importante en momentos donde existe un consenso mundial sobre el cambio climático en el planeta que posibilitaría un incremento de sus volúmenes en la atmósfera.

De acuerdo con Andreu, citado por Rodríguez (2010) los efectos del gas contaminante, ozono, sobre las plantas se advierte sobre las hojas, esta afectación es producida por reacciones fotoquímicas que involucran elementos naturales de los vegetales y el O<sub>3</sub>. Durante tres campañas de hortalizas y de tabaco entre los meses de diciembre y febrero, se evaluaron diferentes aspectos sobre la sintomatología y epidemiología de la enfermedad originada por el O<sub>3</sub> siguiendo las metodologías establecidas por la Dirección Nacional de Sanidad Vegetal de Cuba en zonas productoras de la región central.

Pudo comprobarse en los estudios de la sintomatología, que los síntomas en el ajo y el tabaco fueron en forma de manchas grises a pardo de diferente tamaño y forma en las hojas; las que concurren antes de la entrada de los llamados “frentes fríos”, debido a los altos contenidos de ozono troposférico que presenta el aire. Las manchas pueden presentar un color blanquecino en la primera fase, aumentándose de tamaño y adquiriendo una coloración pardo-marrón. Puede ser considerada una fisiopatía de importancia a partir del grado de contaminación ambiental del aire, y representar un riesgo ecológico en las condiciones de Cuba y otros países del área del Caribe (Rodríguez, 2010).

Según la investigación de Rodríguez (2010), existen daños visibles en las plantas ocasionadas por el ozono, los mayores daños se localizan en el ápice de la hoja provocando lesiones, disminuyendo su afectación en la parte media del limbo y en la base. Los resultados que obtuvieron en su investigación indicaron que la afectación por O<sub>3</sub> troposférico, es mayor en aquel tejido de la hoja que emerge al medio (ápice), mientras que el restante queda resguardado en el resto del follaje cercano. Algunos investigadores han afirmado que el efecto del O<sub>3</sub> troposférico se ha debido a que penetra por las estomas necrosando el tejido adyacente e influyendo en el metabolismo celular, otros infieren al número de poros estomáticos que presentan las hojas de cada cultivo. Por otro lado, también puede estar relacionado con el tiempo en



que los estomas están abiertos debido a las condiciones ambientales y otros elementos físicos importantes.

Ramírez (1986), describe a la Ciudad de Saltillo, Capital del Estado de Coahuila, como, el lugar donde se concentra gran parte de la industria de la Entidad. Las principales actividades económicas comprenden desde las industrias manufactureras, el comercio, la industria de la construcción, hasta la agricultura y ganadería, tomando en cuenta a la población económicamente activa que participa en cada área de desarrollo comunitario. A fines de los setentas se inicia un proceso de crecimiento industrial de suma importancia para la región que comprende las ciudades de Saltillo y Ramos Arispe.

Las inversiones que genera dicha actividad productiva se ubican en el llamado "Corredor Industrial Saltillo-Ramos Arispe-Derramadero, cuyo principal énfasis económico está concentrado en la rama automotriz, en donde se encuentran dos grandes corporaciones: La General Motors, que ésta orientada a la fabricación de motores de 6 cilindros y el ensamble de automóviles; y la Chrysler Corporation, cuya producción abarca la construcción de motores de 4 cilindros.

De igual forma se han hecho estudios en Oaxaca, con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) arrojando que casi 355 mil oaxaqueños son vulnerables a padecer algún tipo de enfermedad respiratoria relacionada con la contaminación del aire, esto alcanza a poco más del 10% de los habitantes del estado, siendo la región de los Valles Centrales, con 300 mil 959 casos, la que mayor número de personas con enfermedades respiratorias agudas en el año 2011 (PROAIRE,2014).

### **Características de Saltillo, Coahuila**

- Situación Geográfica: El municipio de Saltillo se ubica al sureste de la entidad. Limitado al Norte por Ramos Arispe, al noroeste con Arteaga, al suroeste

con Parras de la Fuente, al noroeste con el de General Cepeda, al sur con el Estado de Zacatecas y al este con el de Nuevo León.

- Climatología: El tipo de clima, según Koeppen, modificado por Enriqueta García (1980) es BSo h x'(w) (e') n; árido, semicálido (templado con tendencia a cálido), lluvias escasas todo el año, más marcadas en verano, muy extremo y con nieblas frecuentes

- Vegetación: Los matorrales desérticos son los tipos más abundantes; distribuido en sierras, lomeríos y partes bajas; en suelos someros, aluviales y profundos. Existen áreas de pastizal de los tipos Natural e Inducido; el primero en el sur de la Ciudad de los géneros Bouteloua y Sporobolus; el segundo tipo está presente al este del municipio, en una extensión considerable compuesta de pastos de los géneros Bouteloua y Aristida principalmente.

- Depósito Municipal de Basura: Se localiza al oeste de la ciudad por la carretera a Torreón; en donde se aplica la práctica del relleno sanitario. El basurero municipal se encuentra a 3 kilómetros aproximadamente de la zona habitacional más cercana. (SEDDE, Delegación Saltillo).

### **Material particulado**

La contaminación ambiental producida por las fuentes móviles (vehículos) que circulan por la ciudad es uno de los graves problemas que afrontan sus habitantes. Uno de los contaminantes que producen las denominadas fuentes móviles es el llamado Material Particulado, conocido como polvo en suspensión. (Parra y Orozco.,2005).

Es de suma importancia conocer sobre la fracción respirable, que es aquella parte del aire que inhalamos y pasa a través de la tráquea e ingresa al tracto respiratorio, conocida como material particulado PM 10 (el tamaño de la partícula es de 10 micras). Aún más importante es conocer la concentración de las partículas que ingresan al organismo y se depositan en lo más profundo de las vías respiratorias

como son los sacos alveolares, estas partículas son conocidas como PM 2.5 (debido al tamaño de la partícula que son 2.5 micras). La fracción PM 2.5 es producida por la combustión de los vehículos que circulan por las ciudades en especial por aquellos que funcionan con motores Diesel. Las grandes capitales del mundo están muy preocupadas por la contaminación que emiten estos vehículos y es frecuente en estas ciudades el monitoreo del material particulado fracción respirable PM 2.5 (Parra y Orozco, 2005). Aproximadamente 76 millones de habitantes de ciudades latinoamericanas están expuestas a nivel de partículas suspendidas totales superiores (Weitzenfeld, 1992).

En México existen redes automáticas de monitoreo de calidad del aire y se difunde información diaria sobre la contaminación atmosférica, por, entre otros sitios: <https://aqicn.org/city/mexico/coahuila/saltillo/finanzas/es/>.

Las partículas se forman por procesos naturales como la polinización de las plantas e incendios forestales y por fuentes antropogénicas que abarca, desde la quema de combustibles hasta la fertilización de campos agrícolas. El material particulado forma una mezcla compleja de materiales sólidos y líquidos suspendidos en el aire, que pueden variar significativamente en tamaño, forma y composición, dependiendo fundamentalmente de su origen (PROAIRE, 2014).

Las partículas grandes son eliminadas normalmente por incrustarse en las vías respiratorias antes de llegar a la región traqueo bronquial. Por otro lado, las partículas PM10 o menores (fracción respirable) ingresan directamente al aparato respiratorio, lo que dificulta su expulsión natural. Lo anterior ocasiona afecciones pulmonares, bronquitis crónica. Entre más pequeñas sean las partículas pueden penetrar directamente hasta el interior de los pulmones con posibles efectos tóxicos debido a sus inherentes características fisicoquímicas. En varios estudios, llevados a cabo en Estados Unidos y en Europa, se ha encontrado que la exposición prolongada a partículas finas provenientes de la combustión es un factor importante de riesgo ambiental en casos de mortalidad por cáncer pulmonar y enfermedades cardiopulmonares (PROAIRE, 2014).

## V. REVISIÓN DE LITERATURA

### 5.1 Contaminación atmosférica

La atmosfera es la parte del ambiente con la que el organismo humano está permanentemente en contacto, muchas de sus reacciones pueden ser explicadas como la respuesta a los cambios en el estado físico y químico de la atmósfera (Ferrán *et al.*, 1999).

Se comprende que la contaminación atmosférica es la presencia en el aire de materias o formas de energía que impliquen riesgo, daño o molestia grave para las personas y bienes de cualquier naturaleza. Siempre ha existido contaminación atmosférica de origen natural, por erupciones volcánicas, incendios, tormentas de arena, descomposición de la materia orgánica o polen, pero es a partir del descubrimiento del fuego por el hombre cuando aparece la contaminación atmosférica antropogénica o contaminación atmosférica en sentido estricto, la cual ha cobrado importancia, sobre todo, a partir de la revolución industrial y el uso masivo de combustibles fósiles como fuente de energía. (Aránguez *et al.*, 1999).

Aránguez *et al.*, (1999), destacan que las fuentes de emisión de los contaminantes atmosféricos pueden ser de origen antropogénico: puntuales, generalmente fijas y de gran caudal de emisión, como es el caso de las grandes factorías aisladas de otras instalaciones industriales, o bien una mezcla de fuentes fijas y móviles de diferente entidad y agrupadas en el espacio, por otra parte, el conocimiento de los contaminantes y de las fuentes de emisión no abarca el complejo proceso de la contaminación atmosférica. Las características estructurales y dinámicas de la atmósfera y las características morfológicas del terreno determinan la dispersión de los contaminantes en el espacio y su evolución temporal, ya que la dispersión configura la diferente concentración de contaminantes en la atmósfera en la zona de influencia de la fuente emisora. La evolución de los contaminantes conlleva la aparición

de otros nuevos no emitidos por la fuente directamente que son los contaminantes secundarios, como el ozono formado a partir de los óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles en presencia de la luz solar, o el ácido sulfúrico formado a partir de la oxidación del dióxido de azufre. (Aránguez *et al.*, 1999).

Aunque la determinación de la exposición individual depende de múltiples factores (ritmos de actividad, relación entre exposición en ambientes exteriores y ambientes interiores, laborales y no laborales), se puede afirmar que el conocimiento de los valores de inmisión en el aire ambiente nos acerca al de la dosis a la que está expuesta la población posibilitando el estudio de sus efectos en salud. Este hecho ha justificado históricamente el control y la vigilancia de los niveles de inmisión de contaminación atmosférica (Aránguez *et al.*, 1999).

De acuerdo con Weitzenfeld (1992), en los últimos años los problemas de contaminación atmosférica se han agravado rápidamente en América Latina. La concentración máxima permisible (CMP) de contaminantes atmosféricos, fijada por la OMS, se sobrepasa en varias ciudades latinoamericanas.

La contaminación atmosférica y el cambio climático son dos de los principales problemas ambientales a los que se enfrenta la sociedad actual y que están promoviendo esfuerzos a nivel internacional para desarrollar políticas y estrategias de gestión comunes para mitigar sus impactos (Alonso *et al.*, 2009).

## **5.2 Ozono**

De acuerdo con Velázquez (2003) la existencia del ozono ya era supuesta desde 1781 al observar el físico holandés M. Van Marum (1750-1837) su olor típico en el aire cuando se producían descargas eléctricas. Su descubrimiento definitivo se realizaría en 1840 por C. E Schönbein (1799-1868) en la electrólisis del agua y le dio el nombre de ozono por su olor (del griego ozó: oler). En 1858, Houzeau comprueba la existencia de ozono en la troposfera y en 1860 Chappuis realiza su primera detección espectroscópica. Cuando en 1881 Hartley encuentra la banda de absorción

del ozono en torno a los 300 nm., sugiere que debe encontrarse de forma natural en la alta atmósfera en mayor proporción que en la superficie de la Tierra.

Así mismo Velásquez (2003) señala que el ozono ha sido estudiado, por Marignac, Becquerel y Fremy, así mismo su fórmula fue establecida por Soret y se describió como una forma alotrópica del oxígeno, empíricamente  $O_3$  y estructuralmente triangular, en donde el átomo de oxígeno central está implicado en un doble enlace covalente y un enlace covalente dativo. La estructura puede describirse como un híbrido de resonancia entre dos formas canónicas idénticas:

El ozono forma una capa protectora en la estratosfera contra los rayos solares ultravioleta, pero en la superficie terrestre se manifiesta como un gas producto de la contaminación ambiental y es denominado ozono troposférico ( $O_3$ ), el cual puede comportarse como un enemigo de la salud humana, animal y vegetal, siendo uno de los gases más contaminantes en la troposfera (Brenner *et al.*, 1989).

El ozono ( $O_3$ ) es una molécula triatómica que está formada por átomos de oxígeno. (Federico Velásquez del Castro Gonzales 2012). Es un componente natural de la atmósfera que se encuentra en bajas concentraciones y es vital para la vida. La mayor parte del ozono se encuentra en la parte superior de la atmósfera en una región de la estratósfera, a más de 20 km de la superficie.

Una de las características más relevantes del ozono, es que es fuertemente oxidante, siendo el mayor después del flúor; debido a esto, oxida en frío y casi todos los metales, específicamente el hierro, mercurio, plata y manganeso, desplazando al cloro, bromo y yodo de sus combinaciones con el hidrogeno y con los metales, actúa de igual forma al oxidar al máximo a los ácidos constituidos por azufre, fósforo y arsénico en frío: Por sus propiedades transforma el amoniaco en nitrato y nitrito, y destruye, por oxidación las materias orgánicas, como caucho o corcho (Federico Velásquez de Castro González 2012).

La OMS describe que la formación del ozono se lleva a cabo en la atmósfera mediante reacciones fotoquímicas en presencia de luz solar y contaminantes

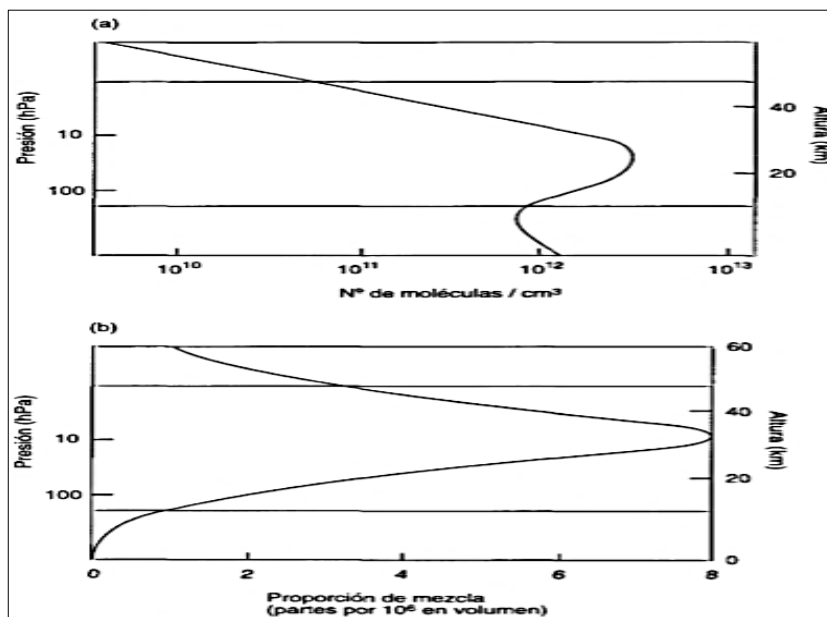
precursores, como los óxidos de nitrógeno (NOx) y diversos compuestos orgánicos volátiles (COV). Se destruye en reacciones con el NO<sub>2</sub> y se deposita en el suelo. En varios estudios se ha demostrado que hay una correlación entre las concentraciones de ozono y las de varios otros oxidantes fotoquímicos tóxicos procedentes de fuentes semejantes, como los nitratos de peroxiacilo, el ácido nítrico y el peróxido de hidrógeno. Las mediciones para controlar los niveles de ozono troposférico se concentran en las emisiones de gases precursores, pero es probable que también controlen los niveles y los efectos de varios de esos otros contaminantes (OMS, 2006).

Velásquez (2003), explica que su carácter fuertemente oxidante, (mayor después del flúor), se debe a su alta capacidad de cesión electrónica en donde uno sólo de los tres átomos de oxígeno interviene de modo activo, mientras que los otros dos se desprenden en estado molecular. Oxida en frío a casi todos los metales, especialmente al hierro, mercurio, plata y manganeso, que puede ser oxidado a pH de 6,5; desplaza al cloro, bromo y yodo de sus combinaciones con el hidrógeno y con los metales; oxida al máximo a los ácidos constituidos por azufre, fósforo y arsénico; en frío transforma el amoníaco en nitrito y nitrato amónicos. Su potencial redox en comparación con otros oxidantes, es el siguiente:

Potencial REDOX del ozono			
$F_2 + 2e^-$	$\text{---->}$	$2 F^-$	$E^\circ = 2,87 \text{ V.}$
$O_3 + 2H^+ + 2e^-$	$\text{---->}$	$O_2 + H_2O$	$E^\circ = 2,08 \text{ V.}$
$Cl_2 + 2e^-$	$\text{---->}$	$2 Cl^-$	$E^\circ = 1,40 \text{ V.}$

**Figura 1:** Potencial REDOX del ozono comparándolo con otros oxidantes. (Velásquez, 2003).

El ozono es absorbido por algunos compuestos orgánicos no saturados para dar productos de adición muy poco estables por ozonólisis. Estos procesos explicarán por qué los neumáticos de los automóviles en ciudades con un alto índice de contaminación fotoquímica se dañan seriamente porque el ozono destruye, el doble enlace C=C de la goma. El ozono existe en pequeñas cantidades junto al oxígeno producido por las plantas verdes en la fotosíntesis, aunque su fuente puntual la constituyen las descargas eléctricas en la atmósfera, desprendiéndolo también las reacciones químicas que liberan oxígeno en frío. No obstante, el origen natural más importante procede del generado en la estratosfera, tanto en procesos a escala regional como locales. En esta capa, el ozono suele distribuirse entre los 15 y 50 Km. de altura con un máximo sobre los 22 Km. (Fig.2), aunque también presenta valores apreciables a los 25 Km. sobre el ecuador y a los 15 Km. sobre los polos (Velázquez, 2003).



**Figura 2:** Distribución vertical del ozono en la atmósfera. En términos absolutos (a) y en relación con el resto de las moléculas que constituyen el aire (b). (Gil, 1990).

Velázquez (2003), explica que su distribución depende de las corrientes estratosféricas. Generado en la alta estratosfera de las regiones tropicales, los



movimientos circulatorios lo llevan hasta las altas latitudes del hemisferio que se encuentra en la estación invernal. La evolución de la concentración de ozono presenta un marcado carácter cíclico con periodicidad anual, coincidiendo los valores máximos al comienzo de la primavera y los mínimos en otoño.

### **5.3 Precusores del ozono troposférico**

Las principales fuentes y sumideros de ozono en la troposfera se corresponden con el intercambio de masas de aire entre la estratosfera y la troposfera, la producción o destrucción fotoquímica in-situ y la deposición seca. Sus niveles de fondo en la troposfera se han modificado durante el último siglo, debido a las emisiones antropogénicas de precusores de ozono, de modo que actualmente el ozono es un contaminante monitorizado en la mayoría de las regiones continentales industrializadas y con una elevada población. Además, durante los últimos años, se han registrado episodios de contaminación fotoquímica con elevadas concentraciones de ozono troposférico en muchas zonas rurales en diferentes regiones del planeta, situadas lejos de áreas industriales y urbanas (Vázquez *et al.*, 2010).

#### **5.3.1 Principales precusores: los COV'S**

Los COVs (Compuestos Orgánicos Volátiles) son producidos en diversos tejidos vegetales y mediante diferentes rutas fisiológicas. Los hay de muy diversos, incluyendo al asereno, terpenos, alcanos, alquenos, alcoholes, ésteres, carbonilos o ácidos (Peñuelas y Llusia, 2003). Los bosques tropicales (bosque lluvioso, estacional, caducifolio de sequía y sabana) contribuyen aproximadamente a la mitad de todas las emisiones globales de COV naturales. Las tierras de cultivo, los matorrales y otros bosques contribuyen con un 10-20% cada uno.

Muchos de los estudios de los impactos de las emisiones de COVs se han centrado en los cambios del potencial redox de la atmósfera ya que los COVs influyen

en el potencial de oxidación de la troposfera pues alteran las concentraciones de su principal oxidante, el radical hidroxilo (Peñuelas y Llusia, 1993). Menor importancia se les ha dado a estos compuestos en cuanto a los efectos directos que puedan ejercer sobre el clima ya que presentan un tiempo de residencia en la atmósfera muy corto. Sin embargo, cada vez hay mayor evidencia que esta influencia puede ser significativa a diferentes escalas espaciales, desde la local a la regional y la global, por la formación de aerosoles y por su efecto directo e indirecto en el efecto invernadero (Peñuelas y Llusia, 2003).

### **5.3.2 Formación del ozono a partir de los COV'S**

Los compuestos orgánicos volátiles (COV) son especies clave para la producción de ozono troposférico. (Rodríguez *et al.*, 2011).

Los CFC's (freones, o Compuestos Fluoro Carbonados) fueron desarrollados al principio de los años 30 y usados en una gran variedad de aplicaciones industriales, comerciales y productos para el hogar. Estas sustancias no son tóxicas ni inflamables y no reaccionan con otros compuestos químicos. Estas características y sus propiedades fisicoquímicas los hacen ideales para dichas aplicaciones. Debido a su poca reactividad tardó en aceptarse que fueran responsables de la pérdida de ozono.

Esta pérdida significativa de O<sub>3</sub> estratosférico fue un shock debido a las duras consecuencias que podría tener en todos los aspectos:

- Efectos perjudiciales por el aumento de radiación ultravioleta en sistemas biológicos.
- Alteraciones en la química troposférica.
- Efectos de la radiación en vegetales pudiendo causar pérdida de rendimiento, decrecimiento en la competitividad y en la actividad fotosintética.
- Cambios en la climatología global del planeta.

- La niebla fotoquímica en áreas urbanas aumenta debido a la mayor radiación, reduciendo la calidad del aire. Esta cantidad corresponde al número de moléculas de O<sub>3</sub> en una columna de área transversal unitaria (normalmente centímetros cuadrados) que abarca desde la superficie terrestre hasta la cima de la atmosfera. (Luque Jiménez, 2004).

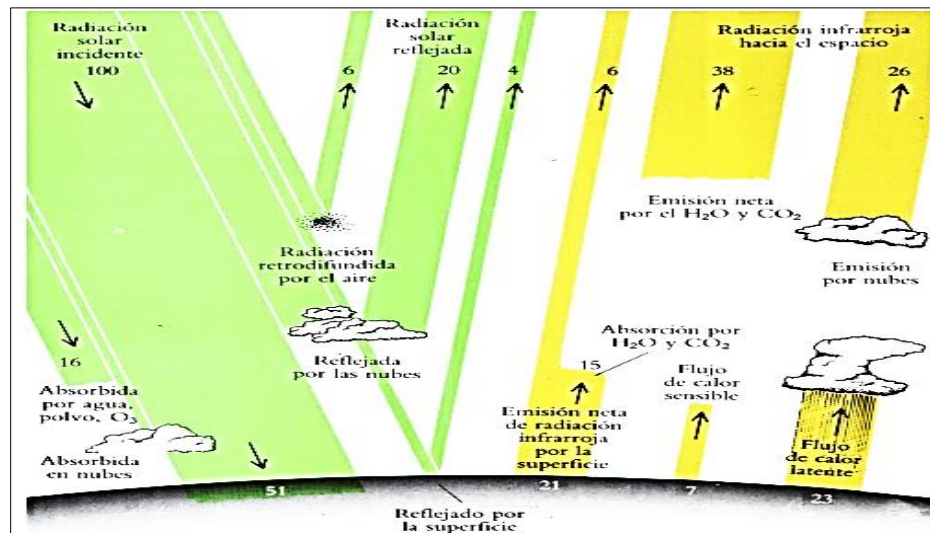
### **5.3.3 El ozono estratosférico y su papel en la atmosfera.**

De acuerdo con Luque (2004), el estudio del O<sub>3</sub> se ha convertido en tema de interés público desde que se realizó el descubrimiento de que las emisiones que se generan en la sociedad podrían llevarnos a una pérdida gradual de la capa de ozono, así mismo con la acumulación máxima de este, situada entre los 20 y 30 km de altura (ver figura 1). Si esto pasara, aumentaría la radiación ultravioleta en la superficie terrestre, en perjuicio de diversas formas de vida. Además, el ozono es uno de los componentes más importantes de la atmosfera también por otros motivos menos conocidos, como el papel que juega en el balance de energía estratosférico. La Tierra no absorbe toda la radiación solar que le llega, pues la atmosfera y la superficie terrestre devuelven al espacio aproximadamente un treinta por ciento de ella. Los principales reflectores son las nubes, el polvo atmosférico, las moléculas de los gases atmosféricos.

El porcentaje reflejado (llamado albedo del planeta) podría variar substancialmente y cambiar el clima; si las erupciones volcánicas inyectasen más polvo en la atmosfera o si se deforestase más terreno. Su disminución conduciría a un calentamiento neto de la Tierra y lo contrario sucedería si aumentase.

La Tierra se desprende de la radiación solar absorbida emitiendo radiación infrarroja o térmica. A su vez, los componentes atmosféricos que absorben radiación infrarroja la reemiten en todas las direcciones. Parte de esta radiación vuelve a ser absorbida por la superficie, sumándose a la energía térmica que ya posee, mientras que la otra es reabsorbida por la atmosfera y el resto escapa al espacio (Luque, 2004)

Si aumenta la cantidad de un elemento capaz de absorber radiaciones infrarrojas, como el dióxido de carbono, la superficie de la Tierra aumentaría su temperatura. La energía térmica almacenada aumentara también de modo que estos elementos contribuyen a su calentamiento (efecto invernadero).



**Figura 3:** Balance global de energía de la Tierra y la atmósfera. (Luque, 2004).

Afirmaciones de Luque (2004), indican que, el O<sub>3</sub> es, por lo tanto, una molécula importante en la estratosfera ya que desempeña un papel fundamental en el balance de energía de la Tierra y debido al papel que desempeña en muchos aspectos, el entendimiento del O<sub>3</sub> es de gran valor. No obstante, la gran cantidad de fenómenos que tienen lugar en la atmósfera requiere el desarrollo de una visión integral de los procesos químicos, físicos y dinámicos que se producen.

### 5.3.4 La disminución del O<sub>3</sub> estratosférico

En las últimas décadas, la abundancia del O<sub>3</sub> estratosférico ha ido disminuyendo. El interés científico y social de este hecho ha derivado en una fuerte dedicación para intentar entender y detener este fenómeno. Una rama de este estudio

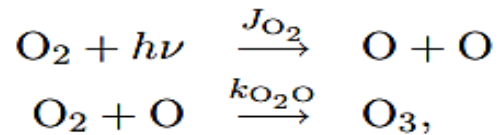
consiste en la elaboración de modelos matemáticos para describir los distintos procesos que tienen lugar. Una forma de validar estos modelos es enfrentarlos a datos experimentales, reproduciendo ciertas condiciones conocidas (Luque, 2004).

Desde hace unos años, insistentes campañas ecológicas y científicos a nivel mundial alertan a la humanidad sobre una de las causas más graves del deterioro ecológico: el agujero en la capa de ozono, el cual se dio a partir de los precursores: llamadas sustancias agotadoras del ozono (SAO), son sustancias químicas básicamente hidrocarburos clorados, fluorados o brominizados, que tienen el potencial para reaccionar con las moléculas de ozono en la estratosfera. a causa de las variaciones estacionales de temperatura, lo que provoca condiciones ambientales propicias para la destrucción del ozono, de igual forma las emisiones de ciertos gases, los clorofluorocarburos (CFC) que emanan de las fábricas están acabando con la capa de ozono, indispensable para mitigar los efectos dañinos que, las radiaciones ultravioletas de los rayos solares pueden provocar sobre la salud.

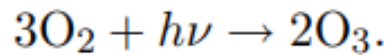
Uno de los más importantes eventos en la ciencia atmosférica fue el Premio Nobel al mexicano Mario Molina, Científico mexicano, descubridor del agujero en la capa de ozono, quien el 11 de octubre de 1995 recibió el Premio Nobel de Química, en reconocimiento de sus investigaciones en este campo. El galardón fue concedido también a su amigo y colaborador el químico Sherwood Rowland, de la Universidad de California, artífice con él de estos descubrimientos, y al danés Paul Crutzen, del Instituto Max-Planck de Química de Mainz, Alemania. El 4 de diciembre de 1995, Molina, Rowland y Crutzen fueron premiados además por el Programa de la ONU para el Medioambiente (UNED), por su contribución a la protección de la capa de ozono (PNI, 2002).

### 5.3.5 Química del O<sub>3</sub>.

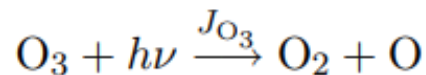
El primer antecedente para entender cuantitativamente la química del O<sub>3</sub> fue llevado a cabo por Chapman en 1930. Chapman propuso que el O<sub>3</sub> era creado por la disociación del O<sub>2</sub> para formar O, siguiendo las reacciones:



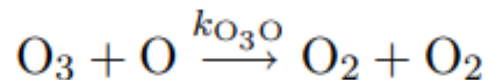
Que de forma global se pueden escribir como



El O<sub>3</sub> se destruye mediante fotones ultravioleta:



La última reacción del mecanismo es la reacción directa entre el ozono y un átomo de oxígeno:



El conjunto de estas cuatro reacciones recibe el nombre de ciclo de Chapman.

Su distribución depende de las corrientes estratosféricas. Generado en la alta estratosfera de las regiones tropicales, los movimientos circulatorios lo llevan hasta las altas latitudes del hemisferio que se encuentra en la estación invernal. La evolución de la concentración de ozono presenta un marcado carácter cíclico con periodicidad anual, coincidiendo los valores máximos al comienzo de la primavera y los mínimos en otoño. Aunque se encuentra difundido en una franja muy amplia, ocuparía una capa de sólo 3 mm de espesor si fuera comprimido (Fabry y Buisson, 1921).

## 5.4 Material particulado PM10 y PM 2.5

El material particulado PM, se define como un conjunto o mezcla compleja de partículas sólidas y/o líquidas, con características físicas y químicas, las cuales se encuentran suspendidas en la atmósfera. Este aerosol atmosférico como también se le conoce, es emitido por fuentes de origen natural o antropogénico (Arrieta, 2016), dentro de las PM se pueden distinguir los aerosoles, el hollín, la arena y el polvo. Son un conjunto de contaminantes de muy variadas características físicas y químicas y que son emitidos por fuentes muy diversas. En general su clasificación atiende al diámetro que alcanzan las partículas:

Material particulado ultrafino y fino, son las partículas con un diámetro inferior a 1 nm o inferior a 2,5  $\mu\text{m}$  respectivamente. A las partículas finas se las denomina PM 2.5, en general, son las consideradas más nocivas para la salud humana porque pueden penetrar directamente hasta los alvéolos pulmonares y provocar efectos en el sistema respiratorio y circulatorio. Además, en su composición se encuentran elementos tóxicos, como metales pesados. El material particulado fino lo constituyen cenizas, partículas orgánicas y partículas generadas por condensación de otros contaminantes en la atmósfera. Al ser tan pequeñas, su tiempo de residencia en suspensión en la atmósfera es elevado y pueden ser transportadas a miles de kilómetros de su origen.

De acuerdo con Trelles (2018) el material particulado grueso o PM10, se refiere al conjunto de partículas de tamaño inferior a las 10  $\mu\text{m}$ . La mayoría de estas partículas tienen su origen en procesos de erosión de la superficie terrestre o forman parte de las emisiones marinas y debido a su mayor tamaño suelen alcanzar la superficie por sedimentación. El material particulado suspendido en el aire se compone de fragmentos de minerales, cenizas, residuos de combustión de carbón, hollín, producto de combustión de, desechos orgánicos, granos de polen, esporas, materiales sintéticos, aerosoles de aceites, gotas de rocío de lluvias ácidas y líquidos diversos, los cuales presentan composiciones químicas y físicas diferentes (Restrepo, 2004).

Las partículas tienen un papel muy importante en la atmósfera. Por un lado, contribuyen a que se produzcan las reacciones entre gases en el aire, pero también sirven de núcleos de condensación del vapor de agua para permitir la formación de las nubes e influyen en el balance radiactivo de la Tierra. En zonas muy contaminadas, el material particulado es en gran medida el responsable de los descensos en la visibilidad. Las fuentes responsables de los niveles de inmisión arriba mencionados pueden de nuevo clasificarse en naturales y antrópicas. Las fuentes naturales engloban la producción tanto de PM primario como secundario. Las erupciones volcánicas, la actividad sísmica, la acción erosiva del viento y su transporte desde zonas áridas, así como la producción de polen, esporas y los microorganismos pueden considerarse fuentes primarias (Trelles, 2018).

El material particulado (PM) es el único contaminante atmosférico que no tiene una constitución química única, dependiendo esta de la fuente emisora: en términos generales, está formado por una mezcla de partículas sólidas y líquidas presentes en el aire y es especialmente sensible a combinarse con gases y con hidrocarburos, produciendo una mezcla que puede ser tóxica. Consta en general de una fracción soluble en agua y una fracción insoluble que contiene minerales derivados del suelo, carbón, gases absorbidos, dioxinas y otros. Las partículas se estudian en base a su tamaño, relacionado directamente con la superficie expuesta para combinarse con otras sustancias y la capacidad de sedimentación, ambos aspectos asociados con la potencialidad para generar daños (Barragán *et al.*, 2010).

Las actividades humanas, dentro de las cuales se encuentra la industria y el movimiento vehicular, se consideran las principales fuentes de emisión de material particulado que, en conjunto con factores meteorológicos y topográficos, hacen que el comportamiento del PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> varíe temporalmente, de manera irregular en la atmósfera. (Harrison, 2006).

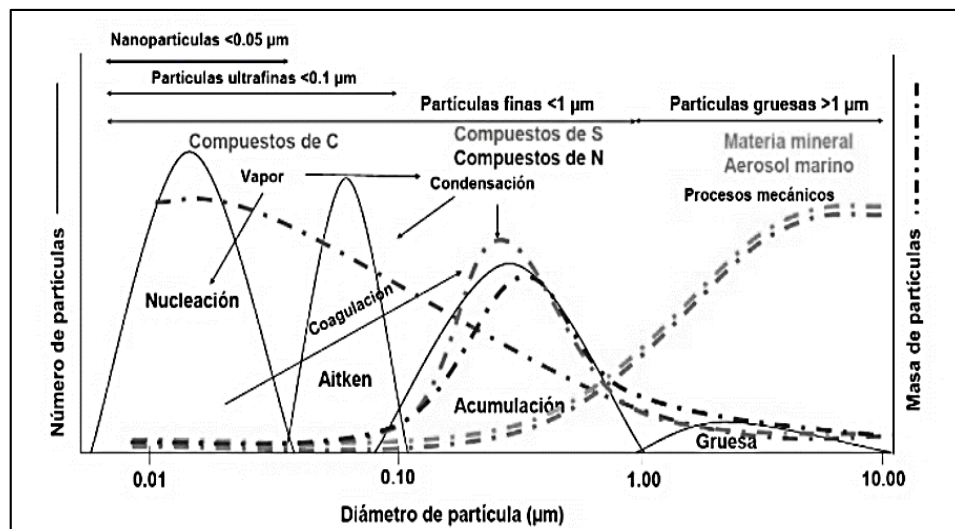
Tras su emisión o formación en la atmósfera, se produce la extracción del contaminante por vía seca o húmeda; este proceso se llama deposición atmosférica se define como la masa total de contaminante transferida desde la atmósfera a la superficie en un área y periodo determinados (Jomolca *et al.*, 2013).



De acuerdo con Pey (2007), las partículas se distribuyen con relación al tamaño, distribución y composición química donde ilustra en su gráfico (Figura 4).

Como señala Viana (2003), la eficacia de la deposición de las partículas depende fundamentalmente del diámetro, composición química y propiedades termodinámicas de las partículas y el tipo de fuente de emisión.

Las PM son un indicador representativo común de la contaminación del aire. Afectan a más personas que cualquier otro contaminante. Los principales componentes de las PM son los sulfatos, los nitratos, el amoníaco, el cloruro de sodio, el hollín, los polvos minerales y el agua. Consisten en una compleja mezcla de partículas sólidas y líquidas de sustancias orgánicas e inorgánicas suspendidas en el aire. Si bien las partículas con un diámetro de 10 micrones o menos ( $\leq$  PM 10) pueden penetrar y alojarse profundamente dentro de los pulmones, existen otras partículas aún más dañinas para la salud, que son aquellas con un diámetro de 2,5 micrones o menos ( $\leq$  PM 2.5).



**Figura 4.** Distribución de partículas con relación al tamaño, distribución y composición química (Pey, 2007).

Las PM 2.5 pueden atravesar la barrera pulmonar y entrar en el sistema sanguíneo. La exposición crónica a partículas contribuye al riesgo de desarrollar enfermedades cardiovasculares y respiratorias, así como cáncer de pulmón.

Generalmente, las mediciones de la calidad del aire se notifican como concentraciones medias diarias o anuales de partículas PM10 por metro cúbico (m<sup>3</sup>) de aire. Las mediciones sistemáticas de la calidad del aire describen esas concentraciones de PM expresadas en microgramos por metro cúbico, µg/m<sup>3</sup>. Cuando se dispone de instrumentos de medición suficientemente sensibles, se notifican también las concentraciones de partículas finas: PM2.5 o más pequeñas (OMS, 2018).

#### 5.4.1 En la salud humana

De acuerdo con Ballester (2005), la Organización Mundial de la Salud considera la contaminación atmosférica como una de las más importantes prioridades mundiales en salud. En un reciente informe se ha estimado que la contaminación ambiental debida a partículas es responsable de 1.4% de todas las muertes en el mundo. La contaminación atmosférica en interiores tendría un efecto aún mayor, especialmente en países en vías de desarrollo. En definitiva, importantes sectores de la población se encuentran expuestos a contaminantes atmosféricos con posibles repercusiones negativas sobre su salud.

Según Lacasaña *et al.*, (1999), existen estudios de toxicología experimental y epidemiológicos sugiriendo que la fracción de partículas más relevantes son las partículas finas procedentes de la combustión (PM2.5), por los daños que estas ocasionan a la salud y así mismo las partículas ultrafinas: que contienen sulfatos, nitratos, ácidos fuertes y elementos traza, tales como metales de transición, debido a que penetran en profundidad en los pulmones y pueden causar reacciones inflamatorias, el material particulado fino contiene una mayor superficie de agregación que la fracción gruesa (PM10-2.5), lo cual facilita la adsorción de componentes potencialmente tóxicos y la disolución o absorción de contaminantes gaseosos y su subsecuente depósito en la región torácica.

Por lo tanto, es extremadamente importante monitorear el material particulado fino y definir un estándar para su concentración en el ambiente con la finalidad de proteger la salud de la población.

El medio ambiente y la salud están íntimamente relacionados. En este sentido, el agua potable, el saneamiento, la vivienda y el aire tienen efectos considerables sobre la salud y el bienestar de las personas. La exposición a la contaminación ambiental sigue siendo una fuente importante de riesgo para la salud en todo el mundo. Este riesgo es generalmente mayor en los países en desarrollo, donde la pobreza, la falta de inversión en tecnología moderna y una legislación ambiental débil provocan altos niveles de contaminación. Sin embargo, las asociaciones entre la contaminación ambiental y los resultados para la salud son complejas y, a menudo, están mal caracterizadas (Briggs, 2003).

Existe una estrecha relación cuantitativa entre la exposición a altas concentraciones de pequeñas partículas (PM 10 y PM 2.5) y el aumento de la mortalidad o morbilidad diaria y a largo plazo. A la inversa, cuando las concentraciones de partículas pequeñas y finas son reducidas, la mortalidad conexas también desciende, en el supuesto de que otros factores se mantengan sin cambios. Esto permite a las instancias normativas efectuar proyecciones relativas al mejoramiento de la salud de la población que se podría esperar si se redujera la contaminación del aire con partículas (OMS, 2018).

La contaminación con partículas conlleva efectos sanitarios incluso en muy bajas concentraciones; de hecho, no se ha podido identificar ningún umbral por debajo del cual no se hayan observado daños para la salud. Por consiguiente, los límites de la directriz de 2005 de la OMS se orientan a lograr las concentraciones de partículas más bajas posibles. Sin embargo, la mayoría de estas enfermedades relacionadas con el medio ambiente no se detectan fácilmente y pueden adquirirse durante la niñez y manifestarse más tarde en la edad adulta (Kimani, 2007).

Estudios científicos muestran cómo la contaminación del aire genera efectos negativos en la salud humana. Tal es el caso de Medellín, Colombia: de acuerdo a los datos que se han registrado se presentan niveles altos de contaminación del aire por material particulado medido por Red aire , y un volumen elevado de enfermedades respiratorias, medidas por Metro salud, por contaminación de material particulado PM2.5 y PM10 y urgencias debidas a enfermedades respiratorias (asma, bronquitis, infecciones, rinitis), y en conclusión, la contaminación del aire por PM2.5 y PM10,

genera problemas respiratorios y representa un problema de salud pública que se debe considerar (Gaviria *et al.*, 2011).

Así mismo Ballester (1999), indica que se puede afirmar y confirmar que existe un amplio consenso en la aceptación de los efectos nocivos de la contaminación atmosférica en la salud. Sin embargo, este criterio no es tan amplio a la hora de establecer qué niveles pueden ser considerados como seguros para el conjunto de la población, ya que son individuos con distintas características, las cuales tienen diferentes posibles efectos crónicos a raíz de la contaminación.

## **5.5 La meteorología y su interacción los contaminantes**

La concentración de los contaminantes en la atmósfera se afecta por variables meteorológicas como, la temperatura, la humedad relativa y la radiación solar, que controlan a su vez la velocidad con la que se realizan las reacciones químicas atmosféricas. Por otro lado, la dispersión de estos contaminantes es influenciada por la velocidad y dirección de los vientos, así como la estabilidad que predomina en la atmósfera (Ramos *et al.*, 2010).

### **5.5.1 Viento**

En una investigación realizada por Arrieta y Fuentes (2016), la dispersión del contaminante (PM10), presentó una alta significancia con las tendencias en dirección de la rosa de los vientos. El radio de deposición del contaminante estudiado manifestó estar condicionado por la topografía y los vientos. La velocidad y dirección del viento se consideran como las variables meteorológicas que tienen un efecto directo en la dispersión de los contaminantes en el aire. La dispersión de los contaminantes en la atmósfera depende del viento, de la dirección del mismo y de la turbulencia del aire.

### **5.5.2 Humedad relativa**

En la investigación realizada por Sánchez et al., (2004), compararon entre las medias aritméticas de las concentraciones de diferentes contaminantes correspondientes a los periodos lluvioso y poco lluvioso del año, se obtuvo que los contaminantes presentaron valores medios superiores en el periodo poco lluvioso del año.

Los coeficientes de correlación tienen significado lógico del comportamiento de la contaminación con estas variables, es decir, a medida que aumenta la humedad relativa, la velocidad del viento y la lluvia, disminuye la concentración de la contaminación interior y exterior, mientras que al aumentar la temperatura se espera que aumente la contaminación (Montoya, 2013).

Existe correlación entre la humedad relativa (HR), la concentración de partículas suspendidas totales (PST) y las partículas de diámetro aerodinámico menor a 10  $\mu\text{m}$  (PM10) (Ramos *et al.*, 2010).

### **5.5.3 Temperatura**

De acuerdo con Ferran (2005), la contaminación fotoquímica referente a la contaminación producto de las reacciones de hidrocarburos y óxidos de nitrógeno, estimuladas por la luz solar intensa y el incremento o disminución de las temperaturas. El ozono es considerado generalmente como el componente más tóxico de esta mezcla. Es por ello que la temperatura influye directamente con los contaminantes como el ozono troposférico. En varios estudios se ha observado un mayor efecto de algunos de los contaminantes atmosféricos durante los meses más cálidos, los componentes relacionados con el clima, jugaban un papel modificador del efecto de la contaminación. El aumento de temperatura se correlaciona muy directamente con un incremento en las concentraciones de ozono.

#### 5.5.4 Radiación solar

En un estudio realizado en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), se mostró que la radiación solar tiene una relación con el ozono en la modelación del máximo diario. Mediante un análisis descriptivo comprobaron que, la radiación solar máxima se presentó antes de la hora del máximo de ozono registrado (Ramos *et al.*, 2010).

#### 5.5.5 Dispersión de los contaminantes del aire

Los contaminantes introducidos directa o indirectamente por el hombre en el aire ambiente sufren procesos de autodepuración debido a fenómenos de transporte, mezcla, transformación química o física y depósito; variando las características y concentración del efluente gaseoso con el tiempo y el espacio. En los años 60, la contaminación atmosférica era considerada un fenómeno local, siendo influenciados por las condiciones meteorológicas, geográficas o topográficas, sin posibilidad de diluirse en toda la troposfera y permaneciendo en la atmósfera un tiempo variable.

GASES	TIEMPO MEDIO DE PERMANENCIA
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	10 <sup>6</sup> años
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	10 <sup>3</sup> años
Vapor de agua (H <sub>2</sub> O)	810 días
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	50 200 años
Metano (CH <sub>4</sub> )	710 años
Óxido nitroso (N <sub>2</sub> O)	130 años
Monóxido de carbono (CO)	3 meses
Ozono (O <sub>3</sub> )	
Troposférico	Semanas o meses
Estratosférico	Meses

**Figura 5:** Tiempo de permanencia de los contaminantes atmosféricos. (Trelles, 2018).

Como se puede observar en la figura 5, cuando los tiempos de permanencia en la atmósfera de los constituyentes y contaminantes atmosféricos son superiores a 30 días a 6 meses afectar incluso a los intercambios hemisféricos, por lo que la contaminación atmosférica no puede considerarse sólo un problema local.

## 5.6 Normatividad de los contaminantes

**NORMA Oficial Mexicana NOM-172-SEMARNAT-2019:** Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud: La norma se basa en establecer los lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud, con el fin de informar de manera clara, oportuna y continua el estado de la calidad del aire, los probables daños a la salud que ocasiona y las medidas que se pueden tomar para reducir la exposición.

**NORMA Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-2014:** Salud ambiental. Valor límite permisible para la concentración de ozono ( $O_3$ ) en el aire ambiente y criterios para su evaluación: Esta Norma tiene por objeto establecer los valores límite permisibles de concentración de ozono en el aire ambiente. Donde el LMP del promedio horario de  $O_3$  es 0.095 ppm. Para promedio móvil de 8 horas de  $O_3$  el LMP es de 0.070 ppm.

**NORMA Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014:** Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente y criterios para su evaluación: Esta Norma tiene por objeto establecer los valores límite permisibles de concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente y los criterios para su evaluación.

- Estableciendo los LMP para PM2.5: En un promedio de 24 horas es de 45  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y anualmente de 12  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .
- Para PM10: el promedio de 24 horas el LMP es de 75  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  con un promedio anual de 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

## VI. MATERIALES Y MÉTODOS

### 6.1 Área de estudio

La presente investigación se realizó con la información generada en el Observatorio Atmosférico de la Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos de la UNAM (RUOA), ubicado en las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), ubicada en la Colonia Buenavista, al sur de la ciudad de Saltillo, Coahuila, México. Geográficamente se localiza entre las coordenadas  $25^{\circ}23' N$  y  $101^{\circ}1'47'' W$ . Con una altitud de 1,786 metros sobre el nivel del mar (msnm). La temperatura media anual es de  $18.2^{\circ}C$ , con una precipitación media anual de 369.3 milímetros (Mendoza, 2018).



**Figura 6:** Localización de la RUOA (Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos de la UNAM) en la UAAAN, de donde se obtuvieron los datos (Google Earth).



## 6.2 EQUIPOS DE MEDICION DE CONTAMINANTES Y PARAMETROS METEOROLOGICOS PARA LA RECOPIACION DE DATOS.

### 6.2.1 Monitoreo de ozono (O<sub>3</sub>).

En la estación meteorológica se utiliza un fotómetro que utiliza una cámara de absorción basada en la ley de Beer Lambert, la luz es dirigida a través de una cámara de absorción y al final de esta se mide su intensidad mediante foto-detectores, la muestra a medir, se hace pasar por dicha cámara y se mide su absorción comparándola con una muestra que tenga cero contenidos del gas a medir.

La característica de este fotómetro es la luz de baja divergencia que le permite la alineación y propagación a larga distancia y alto brillo, permitiendo acortar la longitud del camino óptico y tener mayores tasas de medición, así como la potencia de salida estable durante largo tiempo de vida y cuenta con una longitud de onda estable. La técnica absorción UV es la técnica aceptada como método de referencia por el Comité Europeo de Normalización (CEN) para el análisis y calibrado de los aparatos de medición de ozono.



**Figura 7:** Analizador de O<sub>3</sub>



**Figura 8:** Estación de Monitoreo Calidad del Aire y datos meteorológicos.

## 6.2.2 Monitoreo de Material Particulado PM10 Y PM2.5



**Figura 9:** Analizador de material particulado (PM10 Y PM2.5).

Es un sistema automatizado de monitoreo continuo de partículas, utiliza los principios en tiempo real de la atenuación beta, densidad y el rechazo del fondo beta para obtener una medición de masa refinada. Las características del equipo son: Fuente; radiación; Carbono 14 < 100  $\mu\text{Ci}$ , Rango; 0 a 5000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , Ciclo medición; 30 min a 24 horas, Flujo aire 16.67 LPM. Los muestreadores de bajo y medio volumen (LVS y MVS), recogen partículas finas en los filtros de muestreo según UNE-EN 12341: 2015 (PM10 y PM2,5). Para este propósito, una bomba de vacío aspira aire ambiente, y el muestreador fracciona las partículas finas en el aire a través de un cabezal de muestreo. El aire que contiene la fracción particulada fina deseada pasa a través del filtro, donde las partículas se depositan para su posterior pesada y/ o análisis. El caudal se mide con una precisión de  $\leq 2\%$ .

## 6.3 EQUIPOS UTILIZADOS POR LA ESTACION METEOROLOGICA PARA LA MEDICION DE PARAMETROS METEOROLOGICOS EN LA RECOLECCION DE DATOS.

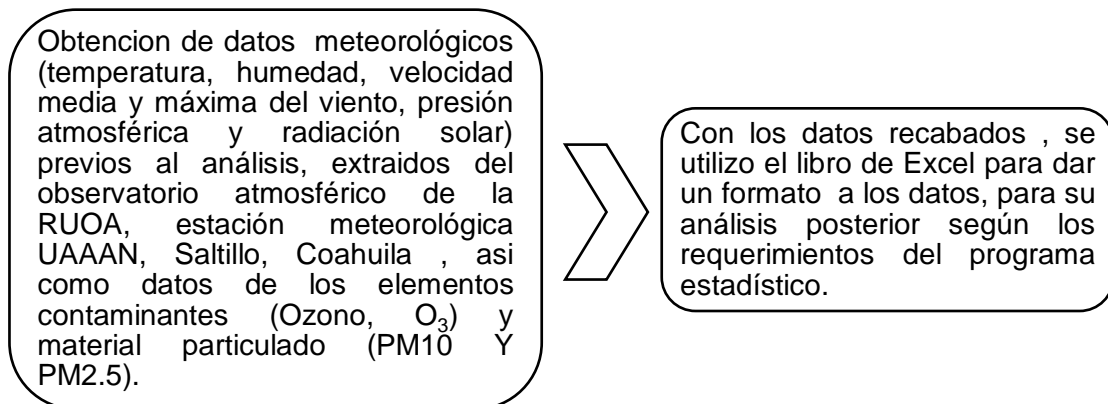
### 6.3.1 Descripción del sistema

El sistema cuenta con las siguientes partes:

- Torre de aproximadamente 10 metros de alto.

- Sensor de velocidad de viento.
- Sensor de dirección de viento.
- Sensores de temperatura y humedad relativa.
- Sensor de presión barométrica.
- Sensor de precipitación pluvial.
- Todos estos sensores vienen en un solo compartimiento, protegidos por discos contra la radiación solar. Todos estos datos se registran por hora de manera automática y son almacenados.

### 6.3.2 Descripción de la información recabada.



**Figura 10:** Obtención de datos para su análisis.

Tabla 1: Parámetros utilizados para el análisis.

Parámetros utilizados en el análisis	
Ozono	Ppb partes por billón
Temperatura	°C Grados Celsius
Humedad	% porcentaje
Velocidad del viento	m/s metros por segundo
Radiación solar	W/m <sup>2</sup> Vatios por metro cuadrado
Material particulado PM10 Y PM 2.5	ug/m <sup>3</sup> microgramos por metro cúbico

Parámetros utilizados en el análisis de datos, con sus unidades respectivamente.

Los parámetros mencionados en la tabla 1, se analizaron mediante un programa estadístico denominado R versión 3.6. con el cual se buscó obtener una posible

correlación de las variables meteorológicas y los contaminantes atmosféricos: OZONO TROPOSFERICO (O<sub>3</sub>) y material particulado (PM10 Y PM 2.5), y con ello poder observar la interacción entre los componentes climáticos y los contaminantes.

### **6.3.3 Análisis Estadístico.**

Se realizó un análisis del coeficiente de correlaciones de Spearman y su significancia estadística según LSD Fisher ( $p \leq 0.05$ ) utilizando el programa estadístico R versión 3.6.

## VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se muestra a continuación los resultados obtenidos de los datos analizados estadísticamente, los datos se recabaron en un periodo de enero-diciembre 2019. Se hizo un análisis estadístico principalmente para las variables radiación y velocidad del viento, en relación al ozono y material particulado respectivamente.

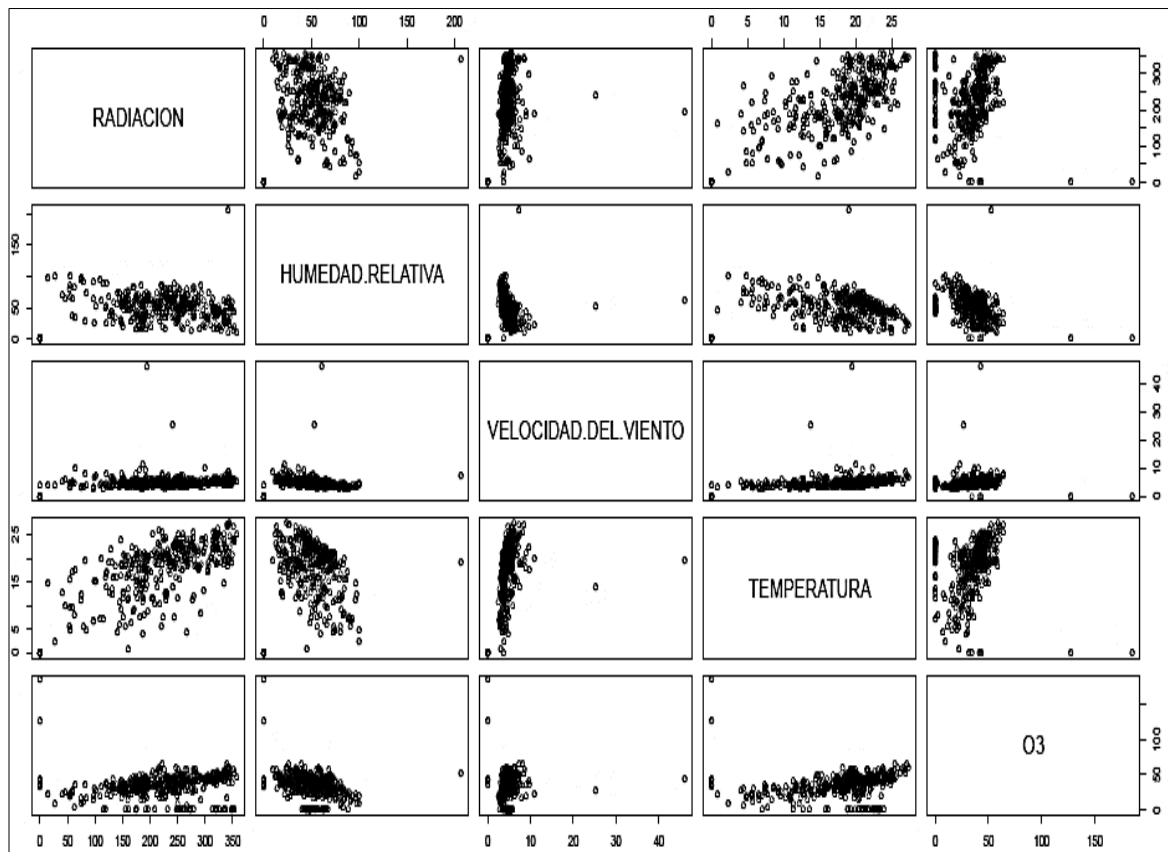
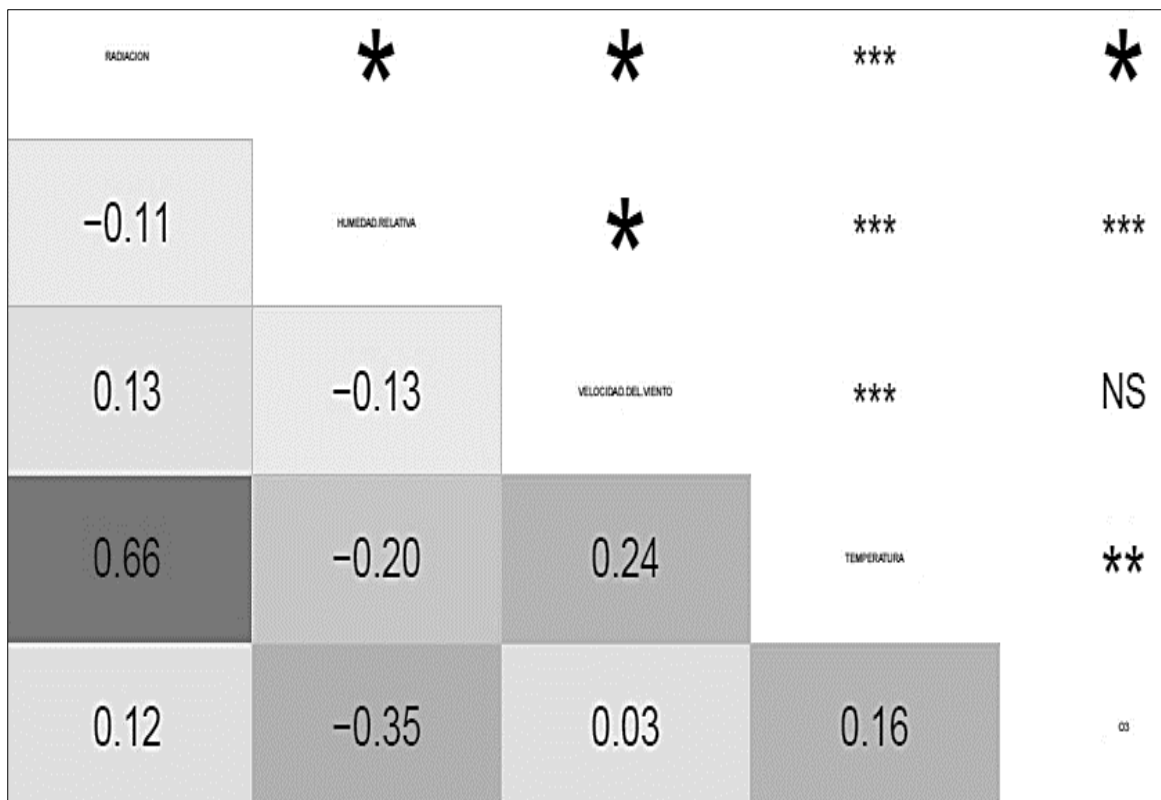


Figura 11: Grafica múltiple de correlación de ozono y variables meteorológicas del año 2019.



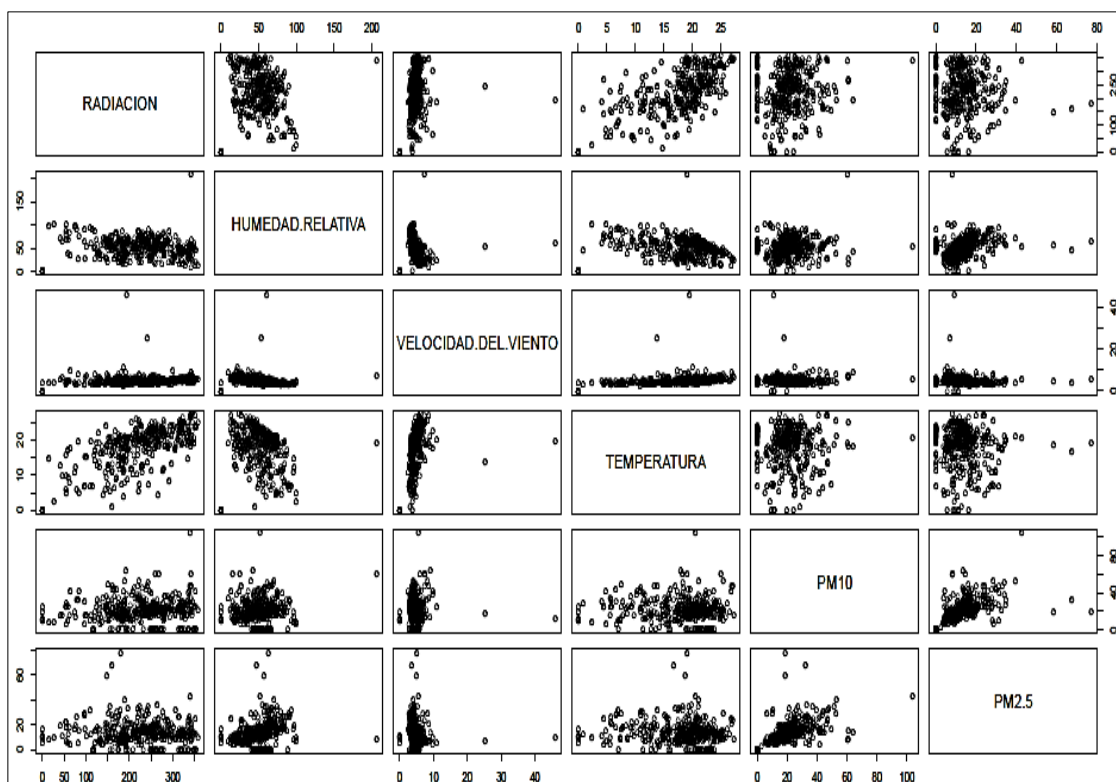
**Figura 12:** Coeficientes de correlación de ozono y variables meteorológicas del año 2019.

Se realizó la correlación con todas las variables meteorológicas en relación al ozono, como puede observarse (figura 11), a lo largo del año, las variables tienen distintos comportamientos a través del tiempo, la variable radiación solar y el ozono muestran un alto grado de asociación, como podemos observar existe una correlación positiva entre dichas variables anteriormente mencionadas.

La formación fotoquímica del ozono es inducida por los precursores primarios, fundamentalmente óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles en presencia

de radiación solar. Cuantitativamente es la más importante la radiación solar, pues se estima que representa el 80% de la producción de ozono troposférico (Wayne, 2000). Basados en la teoría se tomó a la radiación como una variable meteorológica significativa.

Posteriormente se hizo un análisis estadístico con las variables velocidad del viento y material particulado PM10 Y PM2.5, en relación al ozono y material particulado respectivamente.



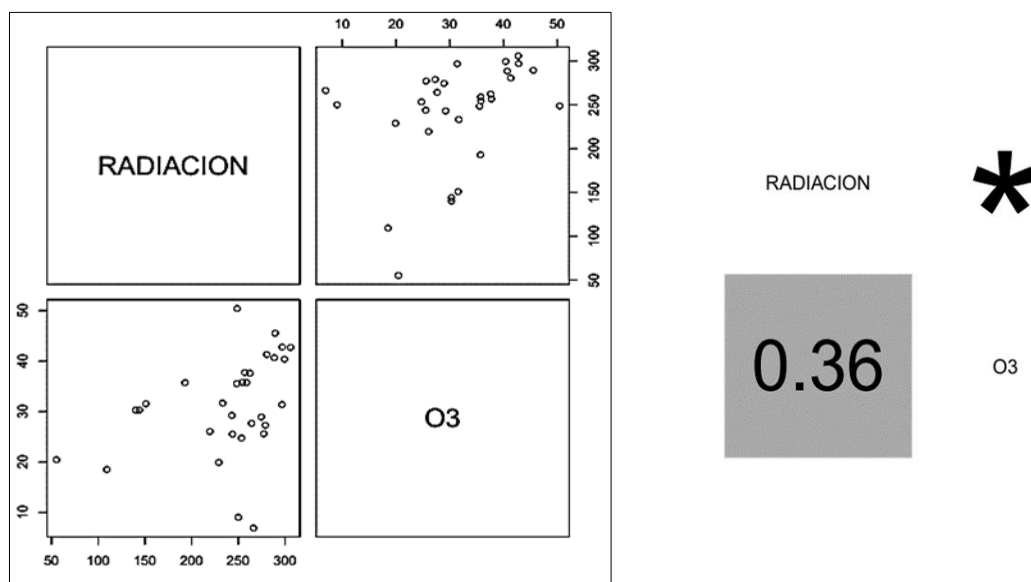
**Figura13:** Grafica de correlación de material particulado (PM10 Y PM2.5) y variables meteorológicas del año 2019.

RADIACION	*	*	***	*	NS
-0.11	HUMEDAD.RELATIVA	*	***	*	***
0.13	-0.13	VELOCIDAD.DEL.VIENTO	***	NS	*
0.66	-0.20	0.24	TEMPERATURA	NS	NS
0.10	0.10	0.01	-0.01	PM10	***
-0.05	0.31	-0.12	-0.07	0.57	PM2.5

**Figura 14:** Coeficientes de correlación de material particulado (PM10 Y PM2.5) y variables meteorológicas del año 2019.

Las gráficas (figura 13 y 14 ) se obtuvieron a lo largo del año 2019, donde se realizaron correlaciones de las variables meteorológicas con el material particulado; PM10 Y PM2.5, en el cual la variable meteorológica de acuerdo a los valores puede debajo de las significancias deseadas, se optó por analizar más a fondo la velocidad del viento en distintos meses, ya que, en base a los datos obtenidos en la gráfica de dispersión y su comportamiento, fue seleccionada siguiendo las recomendaciones propuestas en trabajos previos y basado en estudios anteriores, es muy significativo tomar en cuenta a esta como una de las principales variables meteorológicas que influyen directamente en la concentración del material particulado menor a 10 micras.





Umbral del 0.364 para la significancia estadística de  $\alpha \leq 0.05$ .

**Figura 15:** Correlación de ozono y radiación del mes de marzo del 2019.

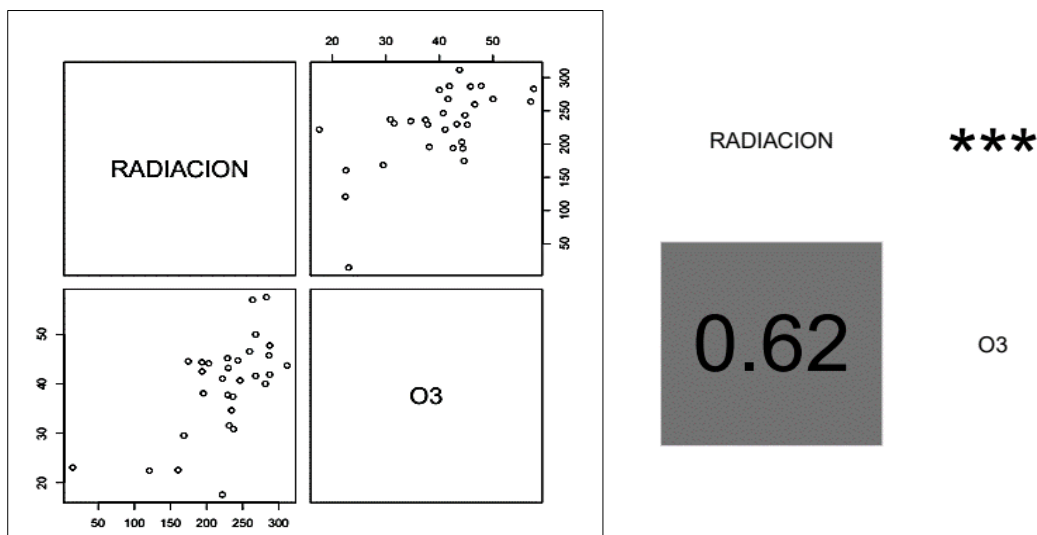
En el mes de marzo del 2019, los datos presentan una correlación numérica de 0.36, por lo cual existe una correlación media entre ambas variables, de acuerdo a la gráfica de correlación (figura 15).

En un estudio realizado por Bravo *et al.*, (2000), en el área metropolitana de la ahora ciudad de México, se encontró que la radiación solar es un parámetro meteorológico para el pronóstico de ozono, ya que la radiación es el causante de los valores máximos de ozono a través del día.

En los resultados obtenidos, la concentración de ozono asciende conforme la radiación solar se hace más intensa, alcanzándose un valor máximo entre las 15:00 y las 20:00 horas, según la época del año. Antes del anochecer la concentración comienza a decaer hasta que permanece más o menos estable a lo largo de la noche y la madrugada, debido a la estabilidad que predomina como consecuencia de la inversión térmica nocturna. A primera hora de la mañana (7.00 – 9.00 horas) se produce un descenso muy acusado en los niveles de ozono, llegando a registrarse el

mínimo diario como consecuencia del aumento de las emisiones de NO debido al tráfico rodado, que reacciona rápidamente con el ozono.

El comportamiento del ozono exhibe una evolución cíclica diaria asociada a la radiación solar, con un marcado carácter estacional. La evolución cíclica ha sido ampliamente detallada en trabajos previos sobre el ozono troposférico en ciudades y se asocia a la radiación solar y a las emisiones antropogénicas.



Umbral del 0.364 para la significancia estadística de  $\alpha \leq 0.05$ .

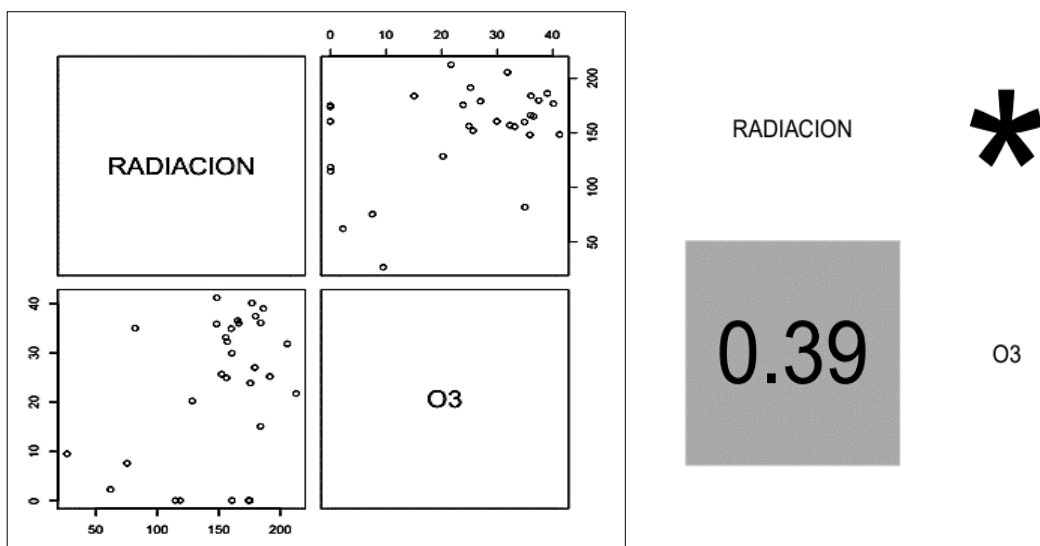
**Figura 16:** Correlación de ozono y radiación solar del mes de septiembre del 2019.

En este mes se observa en la gráfica que la correlación entre las variables es positiva, ya que el análisis arrojó un valor positivo numérico de 0.62, lo cual indica que es una relación medianamente fuerte entre ambas variables, indicando que se comportan de la misma manera.

A partir de los datos de la figura 16 y de acuerdo con Seinfeld (2004), la radiación provee la energía necesaria para iniciar la formación del ozono, siendo la radiación cercana al ultravioleta la que disocia moléculas estables para formar radicales libres, por ello existe una correlación entre ambas variables. Particularmente, cuando hay temperaturas elevadas, condiciones secas y hay poca

mezcla de las corrientes de aire, el ozono superficial puede acumularse a niveles tóxicos.

Comúnmente la radiación solar y la temperatura son más intensas al medio día y parte de la tarde y descienden al anochecer, la energía necesaria para iniciar la formación del ozono, siendo la radiación cercana a la ultravioleta la que disocia moléculas estables para formar radicales libres. En la presencia de óxidos de nitrógeno estos radicales libres catalizan la oxidación de hidrocarburos a dióxido de carbono y vapor de agua (Pavón,2012). En este caso tenemos un coeficiente de correlación alto entre la radiación y el ozono troposférico, ya que la radiación solar es un factor fundamental para la producción de ozono.



Umbral del 0.364 para la significancia estadística de  $\alpha \leq 0.05$ .

**Figura 17:** Correlación de ozono y radiación solar del mes de noviembre de 2019.

De acuerdo a la dispersión de los datos en este mes, la correlación numérica entre los dos factores es de 0.39, lo cual indica existe una correlación débil entre el ozono y la radiación solar para este mes.

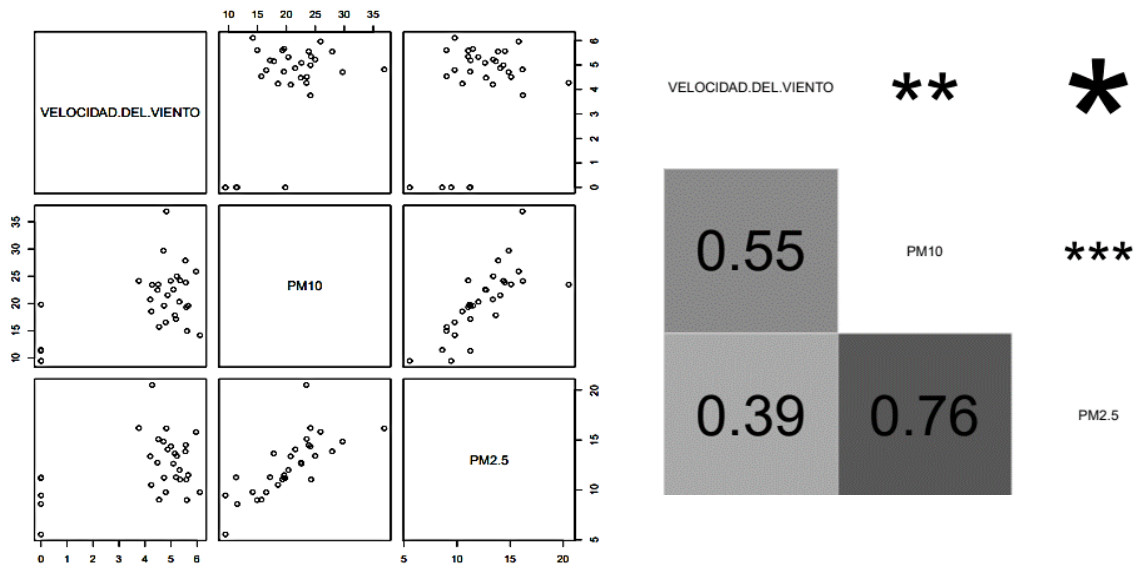
Las concentraciones más altas de ozono suelen producirse principalmente en las estaciones del año con mayor insolación, ya que en éstas se promueven los procesos fotoquímicos formadores de ozono. La estabilidad atmosférica promueve una mayor reactividad entre los precursores ya que no son dispersados en el aire y reaccionan con mayor facilidad. Por tanto, los episodios de mayor concentración de ozono suelen producirse bajo condiciones de altas presiones, baja o nulo movimiento de las masas de aire, alta temperatura y elevada radiación solar (NRC, 1991).

El efecto de la radiación también activa el mecanismo de recirculación conectiva, aportando ozono residual desde las capas más altas hacia la superficie (EPA, 2012).

En la investigación realizada por Pavón (2012) concluyo que el comportamiento de las concentraciones de ozono troposférico durante el ciclo diario muestra una estrecha relación directa con el comportamiento horario de la radiación solar total.

De acuerdo con Cotrina y Cabrera (2004), en su investigación de ozono troposférico y radiación solar en el año 2004 en Perú, correlacionaron ambos grupos de datos, los respectivos coeficientes de correlación de Pearson encontrados fueron 0,758; 0,752; y 0,66, demuestra la estrecha relación directa existente entre el comportamiento de la radiación solar total horaria y la generación del ozono troposférico durante el ciclo diario.

A continuación, se analiza el material particulado (PM10 Y PM2.5) con la variable meteorológica para el año 2019: velocidad del viento;



Umbral del 0.364 para la significancia estadística de  $\alpha \leq 0.05$ .

**Figura 18:** Correlación de material particulado y velocidad del viento del mes de agosto de 2019.

En la figura anterior se obtuvo un coeficiente de correlación para la materia particulado PM10 y velocidad del viento de 0.55 lo cual indica que hay una buena correlación entre ambas variables. De igual forma para el material particulado PM2.5 y la velocidad del viento, se obtuvo una correlación de 0.39 teniendo una significancia media según el programa Estadístico R.

En un estudio realizado por Arrieta *et al.*, (2016), en donde involucraron tiempos de exposición diario y anual de PM10, para los cuales realizaron una modelación. Los modelos de dispersión de PM10 realizados, dieron como resultado que la dirección y velocidad del viento está condicionada por la misma.

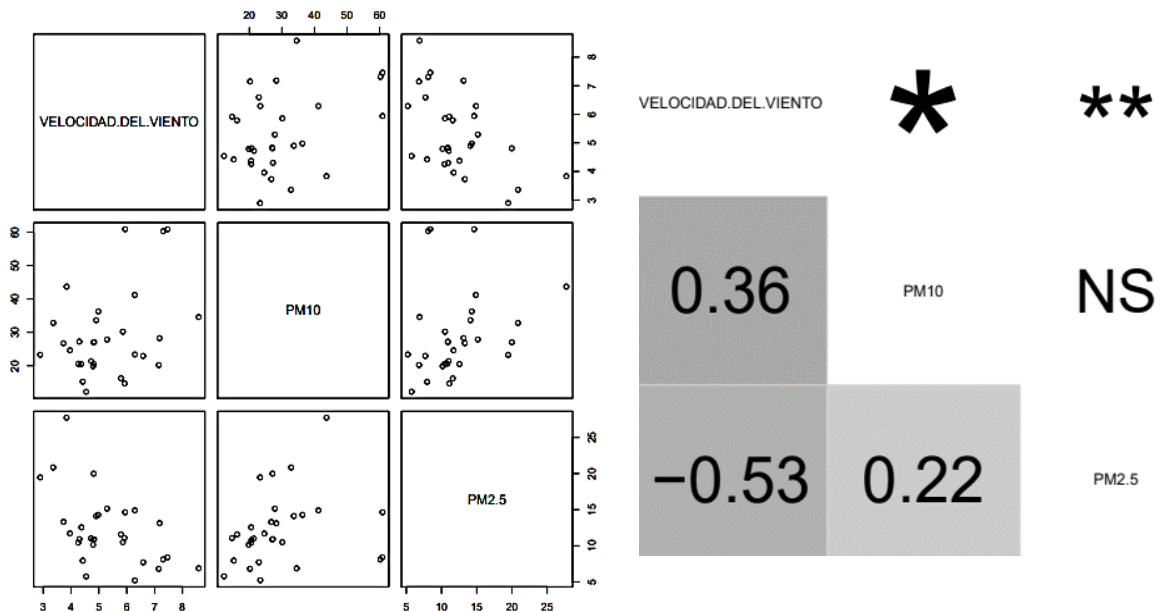
En Colombia, la información meteorológica permitió establecer que la velocidad del viento es el parámetro más influyente, en los niveles de contaminación por material particulado percibidos en la ciudad de Bogotá. A mayor velocidad del viento la

concentración por material particulado es menor. Para estas dos variables se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.65 (Gaitán *et al.*, 2007).

Por otro lado, Rojano *et al.*, (2018), realizaron un estudio de correlación entre la velocidad del viento y las concentraciones de partículas menores a PM10, y encontraron una correlación positiva que varía entre 0,356 a 0,620 y 0.219 a 0,453, respectivamente.

La velocidad del viento es importante en el estudio de las concentraciones de partículas, ya que es el factor principal que determina el transporte y dispersión de las partículas, a las diferentes zonas. Los PM10, pueden ser dispersadas a mayor velocidad de vientos. Las correlaciones observadas con la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, con partículas atmosféricas, han sido reportadas con iguales resultados por otros investigadores (Rojano *et al.*, 2018; Huertas *et al.*, 2014).

Solo se observó correlación significativa entre la velocidad del viento y las concentraciones de partículas PM10.



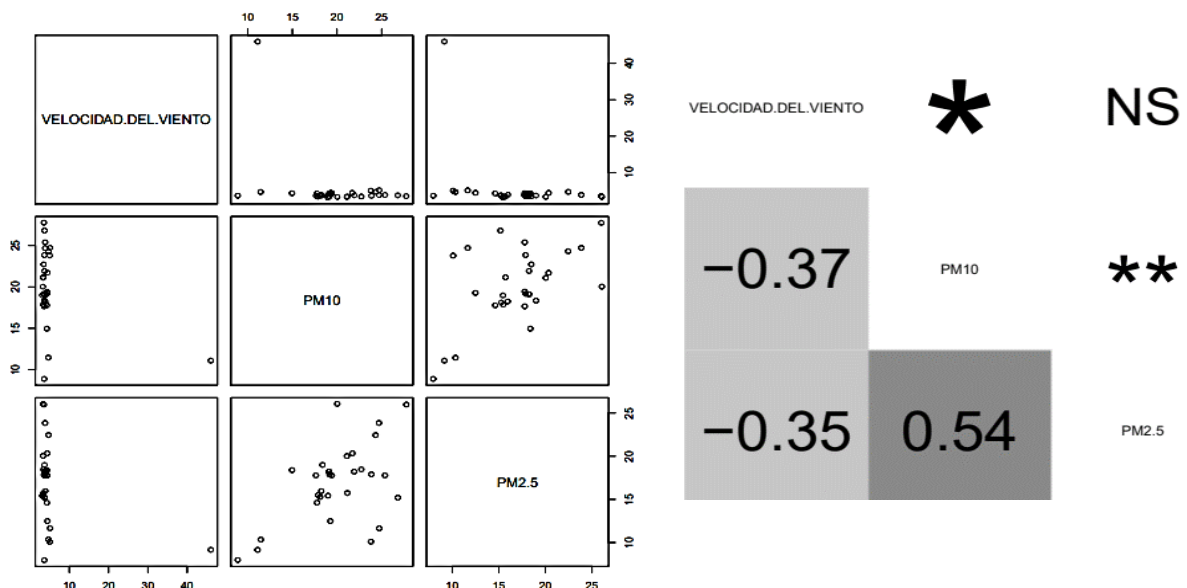
Umbral del 0.364 para la significancia estadística de  $\alpha \leq 0.05$ .

**Figura 19:** Correlación de material particulado y velocidad del viento del mes de abril de 2019.

En el mes de abril se obtuvo un coeficiente de correlación significativo entre la correlación de la variable velocidad del viento y el material particulado PM10.

Al observar la gráfica y revisando el coeficiente de correlación negativo para la variable velocidad del viento y material particulado PM2.5. se puede explicar que este valor negativo se debe a que en varios días el valor del material particulado fue nulo, ya que se presentaron condiciones no optimas, pudiendo estos datos nulos inferir en los resultados

De acuerdo con Camacho *et al.*, (2016), quienes realizaron un estudio para ver la relación existente entre el PM 10 (material particulado menor a 10 micras) y el comportamiento del viento desde el año 2012 hasta el año 2015. El resultado obtenido fue que el viento influye directamente en la dispersión y concentración de PM 10 en la atmósfera de la ciudad de Cajamarca; la relación que tienen la velocidad del viento y la concentración de PM 10 es inversamente proporcional puesto que a menor velocidad del viento es mayor la concentración, mientras que la relación con la dispersión es directamente proporcional puesto que a mayor velocidad existe una mayor dispersión.



Umbral del 0.364 para la significancia estadística de  $\alpha \leq 0.05$ .

**Figura 20:** Correlación de material particulado y velocidad del viento del mes de septiembre de 2019.

El coeficiente de correlación que arroja para el mes de septiembre se puede explicar ya que los valores negativos indican que mientras una variable aumenta la otra disminuye, de igual forma se puede explicar con los datos recabados ya que en algunos días se obtuvieron valores nulos para el material particulado debido a condiciones meteorológicas desfavorables. O bien se puede explicar con el siguiente estudio realizado en Colombia en el año 2013, donde se analizó el material particulado menor a PM10 dentro y fuera de los domicilios. En los cuales los coeficientes de correlación encontrados arrojaron significado lógico en relación con la velocidad del viento, es decir, a medida que aumenta la velocidad del viento, disminuye la concentración de la contaminación interior y exterior, mientras que al disminuir se espera que aumente la contaminación (Montoya *et al.*, 2013).



## VIII. CONCLUSIÓN

En este trabajo, se logró implementar de forma estadística por el método de correlación anualmente, mediante el programa Estadístico R, el cual muestra de manera gráfica los valores del coeficiente de correlación de los contaminantes; el ozono troposférico y material particulado PM10 y PM2.5 con las variables meteorológicas, la radiación solar y la velocidad del viento consecutivamente, en el aire de la UAAAN, Saltillo, Coahuila. De esa forma, se obtuvo una hipótesis aceptada ya que las variables meteorológicas, en especial la radiación solar y el viento, influyen en la concentración y dispersión de los contaminantes atmosféricos aquí señalados. Este trabajo abre la posibilidad de obtener información ambiental de manera sencilla, confiable y de fácil acceso, dirigido principalmente a estudiantes universitarios de ingenierías o carreras afines. Se acepta la hipótesis planteada, pues se encontró que al menos una variable meteorológica tiene correlación en el aumento o disminución del material particulado y ozono, ya que en el año 2019 el valor del coeficiente de correlación fue de arriba de 0.50, numérica y gráficamente lo cual indica una buena correlación entre las variables meteorológicas y los contaminantes.

Se propone estudiar un mayor número de años y buscar la correlación de la concentración de PM10 y PM2.5 y Ozono troposférico con la temperatura, humedad relativa y dirección del viento, además hacer proyecciones a futuro del comportamiento de este contaminante, con la finalidad de predecir el cumplimiento de los límites establecidos en la NOM-025-SSA1-2014.

Es necesario, además de realizar mediciones de la concentración de los contaminantes, evaluar su comportamiento en el espacio y el tiempo, asociándolo con los fenómenos meteorológicos, composición química y origen, los cuales permitan orientar estrategias de control y realizar seguimiento por parte de las autoridades ambientales interesadas dentro o fuera de la UAAAN. Es recomendable que los estudios relacionados con el material particulado y el ozono troposférico sean constantes ya que existen muy pocos estudios relacionados con estos contaminantes en México y en Saltillo Coahuila.

## IX. BIBLIOGRAFÍA

- Alonso, Roció., Bermejo, Victoria., Elvira, Susana., Alfaro, A. A., Sanz, J., Garraleta, M. D. H., ... & Gimeno, B. S. (2009). La contaminación atmosférica en la sierra de Guadarrama. Riesgos potenciales para la vegetación. Sextas Jornadas Científicas del Parque Natural de Peñalara y del Valle de El Pular.
- Alvaro Javier Arrieta Fuentes, Facultad de Posgrados Ingeniería, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, (Tunja-Boyacá, Colombia). (Recibido febrero 24 de 2016 y aceptado mayo 30 de 2016)
- Aránguez, E., Ordóñez, J. M., Serrano, J., Aragonés, N., Fernández-Patier, R., Gandarillas, A., & Galán, I. (1999). Contaminantes atmosféricos y su vigilancia. *Revista española de salud pública*, 73, 123-132.
- Arrieta-Fuentes, A. J. (2016). Dispersión de material particulado (PM 10), con interrelación de factores meteorológicos y topográficos. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 16(2), 43-54.
- Ballester, F. (2005). Contaminación atmosférica, cambio climático y salud. *Revista Española de Salud Pública*, 79(2), 159-175.
- Ballester Díez, F., Tenías, J. M., & Pérez-Hoyos, S. (1999). Efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud: una introducción. *Revista Española de Salud Pública*, 73, 109-121.
- Barragán, H., Pascual, A., Bourgeois, M. J., & Ojea, O. A. (2010). *Desarrollo, salud humana y amenazas ambientales*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP).
- Bravo, J. L., Nava, M. M., & Muhlia, A. (2000). Relaciones entre la magnitud del valor máximo de ozono, la radiación solar y la temperatura ambiente en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 16(2), 45-54.
- Briggs D. (2003). Contaminación ambiental y carga mundial de morbilidad. *Br. Medicina*. Toro.

CALIDAD DEL AIRE OMS 2018 : [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

Camacho, M., & Villegas, J.E. (2016). Análisis de la relación entre el comportamiento del viento y la concentración de material particulado pm10 del año 2012 al 2015 en la atmósfera de la ciudad de Cajamarca (Tesis de licenciatura). Repositorio de la Universidad Privada del Norte. Recuperado de <http://hdl.handle.net/11537/10669>.

CONAGUA, 2019: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>

Sánchez, P1. A. Wallo1, A. Roque2, O. Cuesta1, A. Collazo1, E. Echevarría2. Condiciones Meteorológicas Y Calidad Del Aire, en el Municipio HABANAVIEJA

Cotrina, J. S., & Cabrera, Z. M. (2004) Análisis del comportamiento del ozono troposférico y su relación con la radiación solar en las ciudades de Lima, Ica y Arequipa, 2004.

De Castro González, F. V., & Arcas, S. J. (2007). La contaminación por ozono troposférico. El caso de Motril (Granada)/Pollution by tropospheric ozone. The case of Motril (Granada). *Observatorio Medioambiental*, 10, 265.

SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES. Del Aire, Í. D. C., & a la Salud, R.

Díaz Suárez, V., & Páez Pérez, C. (2006). Contaminación por material particulado en Quito y caracterización química de las muestras. *Acta Nova*, 3(2), 308-322.

EPA. Environmental Protection Agency. <http://www.epa.gov/glo/health.html>. Marzo de 2012.

España. 2000. Caracterización de la respuesta fisiológica y bioquímica de dos cultivos a concentraciones de ozono. Universidad de Valencia. España.

Velázquez, del, Castro, Gonzales, Federico. 2012. La contaminación en España: Los efectos del ozono y del cambio climático. España. Ecu editorial clup universitaria. Vol. 1. Pp. 7-19

- Fernández, I. G. (2009). Flujos estomáticos de ozono y sus efectos sobre La vegetación. Relaciones dosis respuesta (Doctoral dissertation, Tese de Doutorado. Universitat Autònoma de Madrid, Madrid).
- Ferran et al 1999. EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA SOBRE LA SALUD: UNA INTRODUCCIÓN Ferran Ballester Díez (I), José María Tenías (1,Z) y Santiago Pérez-Hoyos.
- Gaitán, M., Cancino, J., & Behrentz, E. (2007). Análisis del estado de la calidad del aire en Bogotá. *Revista de Ingeniería*, (26), 81-92.
- Gaviria, C. F., Benavides, C., & Arroyave, C. (2011). Contaminación por material particulado (PM2, 5 y PM10) y consultas por enfermedades respiratorias en Medellín (2008-2009). *Facultad Nacional de Salud Pública: El escenario para la salud pública desde la ciencia*, 29(3), 13.
- Guenther, A., Hewitt, CN, Erickson, D., Fall, R., Geron, C., Graedel, T., ... y Pierce, T. (1995). Un modelo global de emisiones de compuestos orgánicos volátiles naturales. *Revista de investigación geofísica: Atmósferas* , 100 (D5), 8873-8892.
- Harrison, R. (2006). *An Introduction to Pollution Science*. London, United Kingdom: The Royal Society Chemistry. DOI: <http://dx.doi.org/10.1039/9781847555410>.
- Hernández, N., Soto, F., & Caballero, A. (2009). Modelos de simulación de cultivos: Características y usos. *Cultivos Tropicales*, 30(1), 00-00.
- Jomolca, Y., Lima, L., & Manduca, M. (2013). Determinación de concentraciones y flujos atmosféricos de metales pesados y radionucleidos de interés ambiental en deposiciones atmosféricas totales. *Revista Cubana de Química*, 25(3), 19.
- Kimani NG (2001). Contaminación ambiental e impactos en la salud pública: Implicaciones del vertedero municipal de Dandora en Nairobi, Kenia. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [en línea]. [http://www.nswai.com/pdf\\_HE/he\\_oct15/Environmental%20Pollution%20and%20Impacts%20on%20Public%20Health.pdf](http://www.nswai.com/pdf_HE/he_oct15/Environmental%20Pollution%20and%20Impacts%20on%20Public%20Health.pdf) [ Enlaces ].

- Lacasaña-Navarro, M., Aguilar-Garduño, C., & Romieu, I. (1999). Evolución de la contaminación del aire e impacto de los programas de control en tres megaciudades de América Latina. *Salud pública de México*, 41, 203-215.
- Luque Jiménez, A. (2004). Aplicación de la teoría de sistemas dinámicos al estudio cualitativo y cuantitativo de la evolución del ozono estratosférico y troposférico.
- Martínez VD, Vucic EA, Becker-Santos DD, Gil L. y Lam WL (2011). Exposición al arsénico e inducción de cánceres humanos. *J. Toxicol.* 2011, 1-13. DOI: 10.1155 / 2011/431287 [ Enlaces ]
- NORMA Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-2014, Salud ambiental. Valor límite permisible para la concentración de ozono (O<sub>3</sub>) en el aire ambiente y criterios para su evaluación. Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos. - Secretaría de Salud.
- Montoya-Rendon, M. L., Zapata-Saldarriaga, P. M., & Correa-Ochoa, M. A. (2013). Contaminación ambiental por PM<sub>10</sub> dentro y fuera del domicilio y capacidad respiratoria en Puerto Nare, Colombia. *Revista de Salud Pública*, 15, 103-115.
- Ferran Ballester Contaminación Atmosférica, Cambio Climático Y Salud, Unidad de Epidemiología y Estadística. V. N.º 2 - Marzo-Abril 2005 Escuela Valenciana de Estudios para la Salud.
- NRC - National Research Council, 1991. Rethinking the Ozone Problem in Urban and Regional Air Pollution. National Academy Press, Washington.
- Parra, A. Q., & Orozco, J. A. (2005). Monitoreo de material particulado-fracción respirable (PM 2.5) en Pamplona (Colombia). *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 3(2), 1-11.
- Pavón Domínguez, P. (2012). Estudio multifractal de la influencia de factores meteorológicos y químicos en la concentración de ozono troposférico.
- Peñuelas, J., & Llusià, J. (2003). Emisiones biogénicas de COVs y cambio global¿Se defienden las plantas contra el cambio climático?. *Revista Ecosistemas*, 12(1).

- Pey, J. (2007). Caracterización Físico-Química de los Aerosoles atmosféricos en el mediterráneo occidental. Barcelona, España.
- Premios Nobel Iberoamericanos: 08/04/2002-: <http://dialogo.ugr.es/contenidos/nobel/nb-molina.htm>
- PROAIRE DE OAXACA, Z. M. (2014). PROGRAMA DE GESTIÓN PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AIRE PROAIRE.
- Quiñones, M., y M. Asis. 1989. El Ozono troposférico y sus daños en la agricultura. Pp. 1-18. En Compendio Informativo sobre Desastres CIDA, La Habana.
- Ramos-Herrera, S., Bautista-Margulis, R., & Valdez-Manzanilla, A. (2010). Estudio estadístico de la correlación entre contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas en la zona norte de Chiapas, México. *Universidad y ciencia*, 26(1), 65-80.
- Ramírez Leal, R. (1986). *Estudio preliminar de evaluación de la calidad del aire, en la Cd. de Saltillo Coahuila, México* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).
- Ramos-Herrera, S., Bautista-Margulis, R., & Valdez-Manzanilla, A. (2010). Estudio estadístico de la correlación entre contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas en la zona norte de Chiapas, México. *Universidad y ciencia*, 26(1), 65-80.
- Restrepo, A. (2004). Método para la descripción de Material Particulado empleando microscopia asistida por computador. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Rojano, R. E., Arregoces, H. A., Angulo, L. C., & Restrepo, G. M. (2018). Análisis y Origen de las Concentraciones de TSP y PM10 en Minería de Carbón a Cielo Abierto usando Gráficos Polares. *Información tecnológica*, 29(6), 131-142.
- Rodríguez, C. M. A., Santana, R. C., Padrón, G. P., & Gómez, Y. M. (2012). Efectos del ozono troposférico sobre cultivos de ajo, *Allium sativum* y tabaco, *Nicotiana tabacum* en Cuba. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología*, 1(2), 49-54.
- Rodríguez A., Saavedra S., Souto JA, Casares JJ (2011) Simulación de la sensibilidad de los niveles de ozono troposférico rural a las emisiones de BVOCs sobre una región

costera atlántica europea (Galicia, NO de España). En: Steyn D., Trini Castelli S. (eds) Modelización de la contaminación del aire y su aplicación XXI. Ciencia para la paz y la seguridad de la OTAN Serie C: Seguridad ambiental. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8\\_69](https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_69)

SEMA (2012). Programa Estatal de Medio Ambiente 2011-2017. Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Urbano, Saltillo, Coahuila [en línea]. <http://coahuila.gob.mx/archivos/pdf/Publicaciones/MEDIO%20AMBIENTE.pdf> 5/12/2016 [ Links ]

Seinfeld, J. H. (2004). Air pollution: A half century of progress. *AIChE Journal*, 50(6), 1096-1108.

Trelles Motte, R. C. (2018). Determinación del material particulado (PM10 Y PM 2.5), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y monóxido de carbono (CO) en el Distrito de Ocoruro-Provincia Espinar-Región Cusco.

Vázquez, S. S. (2010). *Caracterización de episodios de ozono troposférico en Galicia mediante la aplicación de distintas técnicas de simulación e interpretación de datos de campo* (Doctoral dissertation, Universidade de Santiago de Compostela). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=108970>

Velázquez de Castro, F. (2003). Modelización y análisis de las concentraciones de ozono troposférico (Doctoral dissertation, Universidad Complutense de Madrid, Servicio de Publicaciones).

Viana, M. d. (2003). Niveles, composición y origen del material particulado atmosférico en los sectores Norte y Este de la Península Ibérica y Canarias. Barcelona, España.

Weitzenfeld, H. (1992). Contaminación atmosférica y salud en América Latina. *Boletín de la Oficina Sanitaria Panamericana (OSP)*; 112 (2), feb. 1992.

World Health Organization. (2006). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*.

## X. ANEXO

Tabla 2: Datos de radiación en el año 2019.

RADIACION (W/m <sup>2</sup> )		
Año 2019		
ENERO	PROMEDIO SEMANA 1	147.37
	PROMEDIO SEMANA 2	149.90
	PROMEDIO SEMANA 3	162.06
	PROMEDIO SEMANA 4	164.47
FEBRERO	PROMEDIO SEMANA 1	132.78
	PROMEDIO SEMANA 2	170.40
	PROMEDIO SEMANA 3	220.29
	PROMEDIO SEMANA 4	211.71
MARZO	PROMEDIO SEMANA 1	253.08
	PROMEDIO SEMANA 2	270.51
	PROMEDIO SEMANA 3	192.11
	PROMEDIO SEMANA 4	240.46
ABRIL	PROMEDIO SEMANA 1	296.06
	PROMEDIO SEMANA 2	318.71
	PROMEDIO SEMANA 3	297.79
	PROMEDIO SEMANA 4	254.84
MAYO	PROMEDIO SEMANA 1	256.29
	PROMEDIO SEMANA 2	332.36
	PROMEDIO SEMANA 3	334.23
	PROMEDIO SEMANA 4	269.69
JUNIO	PROMEDIO SEMANA 1	264.16
	PROMEDIO SEMANA 2	302.36
	PROMEDIO SEMANA 3	238.60
	PROMEDIO SEMANA 4	212.50
JULIO	PROMEDIO SEMANA 1	273.19
	PROMEDIO SEMANA 2	283.49
	PROMEDIO SEMANA 3	260.82
	PROMEDIO SEMANA 4	267.98
AGOSTO	PROMEDIO SEMANA 1	295.78
	PROMEDIO SEMANA 2	312.75
	PROMEDIO SEMANA 3	217.86
	PROMEDIO SEMANA 4	183.78
SEPTIEMBRE	PROMEDIO SEMANA 1	210.59
	PROMEDIO SEMANA 2	200.94
	PROMEDIO SEMANA 3	268.43
	PROMEDIO SEMANA 4	224.68
OCTUBRE	PROMEDIO SEMANA 1	244.47
	PROMEDIO SEMANA 2	241.27
	PROMEDIO SEMANA 3	189.85



	PROMEDIO SEMANA 4	195.73
NOVIEMBRE	PROMEDIO SEMANA 1	181.02
	PROMEDIO SEMANA 2	151.22
	PROMEDIO SEMANA 3	146.20
	PROMEDIO SEMANA 4	162.31
DICIEMBRE	PROMEDIO SEMANA 1	182.96
	PROMEDIO SEMANA 2	156.98
	PROMEDIO SEMANA 3	143.91
	PROMEDIO SEMANA 4	148.21

Tabla 3 : Datos de humedad relativa en el año 2019.

HUMEDAD RELATIVA (%)		
Año 2019		
ENERO	PROMEDIO SEMANA 1	46.42
	PROMEDIO SEMANA 2	149.90
	PROMEDIO SEMANA 3	162.06
	PROMEDIO SEMANA 4	164.47
FEBRERO	PROMEDIO SEMANA 1	34.61
	PROMEDIO SEMANA 2	51.01
	PROMEDIO SEMANA 3	39.02
	PROMEDIO SEMANA 4	211.71
MARZO	PROMEDIO SEMANA 1	51.95
	PROMEDIO SEMANA 2	29.61
	PROMEDIO SEMANA 3	78.84
	PROMEDIO SEMANA 4	58.26
ABRIL	PROMEDIO SEMANA 1	39.42
	PROMEDIO SEMANA 2	22.43
	PROMEDIO SEMANA 3	50.45
	PROMEDIO SEMANA 4	34.45
MAYO	PROMEDIO SEMANA 1	51.03
	PROMEDIO SEMANA 2	51.80
	PROMEDIO SEMANA 3	34.52
	PROMEDIO SEMANA 4	49.49
JUNIO	PROMEDIO SEMANA 1	61.32
	PROMEDIO SEMANA 2	50.45
	PROMEDIO SEMANA 3	44.21
	PROMEDIO SEMANA 4	53.08
JULIO	PROMEDIO SEMANA 1	49.98
	PROMEDIO SEMANA 2	55.02
	PROMEDIO SEMANA 3	49.12
	PROMEDIO SEMANA 4	57.40

AGOSTO	PROMEDIO SEMANA 1	50.29
	PROMEDIO SEMANA 2	43.39
	PROMEDIO SEMANA 3	34.35
	PROMEDIO SEMANA 4	33.06
SEPTIEMBRE	PROMEDIO SEMANA 1	72.70
	PROMEDIO SEMANA 2	71.74
	PROMEDIO SEMANA 3	64.87
	PROMEDIO SEMANA 4	70.02
OCTUBRE	PROMEDIO SEMANA 1	68.30
	PROMEDIO SEMANA 2	60.67
	PROMEDIO SEMANA 3	61.37
	PROMEDIO SEMANA 4	58.54
NOVIEMBRE	PROMEDIO SEMANA 1	59.42
	PROMEDIO SEMANA 2	77.66
	PROMEDIO SEMANA 3	55.46
	PROMEDIO SEMANA 4	45.93
DICIEMBRE	PROMEDIO SEMANA 1	47.41
	PROMEDIO SEMANA 2	44.67
	PROMEDIO SEMANA 3	49.23
	PROMEDIO SEMANA 4	39.37

Tabla 4: Datos de velocidad del viento en el año 2019.

VELOCIDAD DEL VIENTO		
Año 2019		
ENERO	PROMEDIO SEMANA 1	5.02
	PROMEDIO SEMANA 2	4.24
	PROMEDIO SEMANA 3	4.54
	PROMEDIO SEMANA 4	4.73
FEBRERO	PROMEDIO SEMANA 1	4.47
	PROMEDIO SEMANA 2	4.31
	PROMEDIO SEMANA 3	6.02
	PROMEDIO SEMANA 4	6.00
MARZO	PROMEDIO SEMANA 1	4.02
	PROMEDIO SEMANA 2	5.91
	PROMEDIO SEMANA 3	3.72
	PROMEDIO SEMANA 4	4.87
ABRIL	PROMEDIO SEMANA 1	4.62
	PROMEDIO SEMANA 2	5.62
	PROMEDIO SEMANA 3	5.90
	PROMEDIO SEMANA 4	5.13
MAYO	PROMEDIO SEMANA 1	5.09
	PROMEDIO SEMANA 2	4.63
	PROMEDIO SEMANA 3	5.63
	PROMEDIO SEMANA 4	5.65
JUNIO	PROMEDIO SEMANA 1	4.19
	PROMEDIO SEMANA 2	4.99

	PROMEDIO SEMANA 3	4.77
	PROMEDIO SEMANA 4	4.87
JULIO	PROMEDIO SEMANA 1	5.18
	PROMEDIO SEMANA 2	4.51
	PROMEDIO SEMANA 3	4.77
	PROMEDIO SEMANA 4	4.79
AGOSTO	PROMEDIO SEMANA 1	4.74
	PROMEDIO SEMANA 2	5.41
	PROMEDIO SEMANA 3	4.22
	PROMEDIO SEMANA 4	3.05
SEPTIEMBRE	PROMEDIO SEMANA 1	4.09
	PROMEDIO SEMANA 2	9.76
	PROMEDIO SEMANA 3	4.04
	PROMEDIO SEMANA 4	3.77
OCTUBRE	PROMEDIO SEMANA 1	3.97
	PROMEDIO SEMANA 2	4.15
	PROMEDIO SEMANA 3	4.20
	PROMEDIO SEMANA 4	4.77
NOVIEMBRE	PROMEDIO SEMANA 1	3.90
	PROMEDIO SEMANA 2	3.93
	PROMEDIO SEMANA 3	4.04
	PROMEDIO SEMANA 4	5.08
DICIEMBRE	PROMEDIO SEMANA 1	3.85
	PROMEDIO SEMANA 2	5.00
	PROMEDIO SEMANA 3	4.19
	PROMEDIO SEMANA 4	5.44

Tabla 5: Datos de temperatura en el año 2019.

TEMPERATURA (°C)		
Año 2019		
ENERO	PROMEDIO SEMANA 1	15.66
	PROMEDIO SEMANA 2	12.23
	PROMEDIO SEMANA 3	13.40
	PROMEDIO SEMANA 4	10.29
FEBRERO	PROMEDIO SEMANA 1	16.53
	PROMEDIO SEMANA 2	12.97
	PROMEDIO SEMANA 3	18.36
	PROMEDIO SEMANA 4	17.02
MARZO	PROMEDIO SEMANA 1	15.04
	PROMEDIO SEMANA 2	20.67
	PROMEDIO SEMANA 3	7.89

	PROMEDIO SEMANA 4	16.71
ABRIL	PROMEDIO SEMANA 1	17.28
	PROMEDIO SEMANA 2	19.12
	PROMEDIO SEMANA 3	21.09
	PROMEDIO SEMANA 4	21.76
MAYO	PROMEDIO SEMANA 1	21.00
	PROMEDIO SEMANA 2	20.23
	PROMEDIO SEMANA 3	23.94
	PROMEDIO SEMANA 4	23.90
JUNIO	PROMEDIO SEMANA 1	22.13
	PROMEDIO SEMANA 2	22.13
	PROMEDIO SEMANA 3	22.73
	PROMEDIO SEMANA 4	21.82
JULIO	PROMEDIO SEMANA 1	22.10
	PROMEDIO SEMANA 2	21.80
	PROMEDIO SEMANA 3	23.93
	PROMEDIO SEMANA 4	20.62
AGOSTO	PROMEDIO SEMANA 1	22.46
	PROMEDIO SEMANA 2	24.57
	PROMEDIO SEMANA 3	17.35
	PROMEDIO SEMANA 4	13.39
SEPTIEMBRE	PROMEDIO SEMANA 1	22.46
	PROMEDIO SEMANA 2	18.83
	PROMEDIO SEMANA 3	20.37
	PROMEDIO SEMANA 4	20.71
OCTUBRE	PROMEDIO SEMANA 1	18.97
	PROMEDIO SEMANA 2	18.79
	PROMEDIO SEMANA 3	19.24
	PROMEDIO SEMANA 4	16.27
NOVIEMBRE	PROMEDIO SEMANA 1	16.39
	PROMEDIO SEMANA 2	11.97
	PROMEDIO SEMANA 3	15.83
	PROMEDIO SEMANA 4	17.87
DICIEMBRE	PROMEDIO SEMANA 1	14.92
	PROMEDIO SEMANA 2	14.56
	PROMEDIO SEMANA 3	9.18
	PROMEDIO SEMANA 4	13.49

Tabla 6: Datos de temperatura en el año 2019.

OZONO TROPOSFÉRICO (O3)		
Año 2019		
ENERO	PROMEDIO SEMANA 1	32.94
	PROMEDIO SEMANA 2	26.94
	PROMEDIO SEMANA 3	23.25

	PROMEDIO SEMANA 4	29.02
FEBRERO	PROMEDIO SEMANA 1	29.42
	PROMEDIO SEMANA 2	25.56
	PROMEDIO SEMANA 3	27.01
	PROMEDIO SEMANA 4	32.40
MARZO	PROMEDIO SEMANA 1	24.37
	PROMEDIO SEMANA 2	29.42
	PROMEDIO SEMANA 3	34.98
	PROMEDIO SEMANA 4	36.25
ABRIL	PROMEDIO SEMANA 1	39.61
	PROMEDIO SEMANA 2	49.04
	PROMEDIO SEMANA 3	53.68
	PROMEDIO SEMANA 4	47.08
MAYO	PROMEDIO SEMANA 1	39.18
	PROMEDIO SEMANA 2	28.80
	PROMEDIO SEMANA 3	53.68
	PROMEDIO SEMANA 4	45.54
JUNIO	PROMEDIO SEMANA 1	34.43
	PROMEDIO SEMANA 2	28.80
	PROMEDIO SEMANA 3	46.55
	PROMEDIO SEMANA 4	27.29
JULIO	PROMEDIO SEMANA 1	0.00
	PROMEDIO SEMANA 2	0.00
	PROMEDIO SEMANA 3	0.00
	PROMEDIO SEMANA 4	41.31
AGOSTO	PROMEDIO SEMANA 1	42.04
	PROMEDIO SEMANA 2	43.45
	PROMEDIO SEMANA 3	53.05
	PROMEDIO SEMANA 4	59.40
SEPTIEMBRE	PROMEDIO SEMANA 1	34.97
	PROMEDIO SEMANA 2	36.20
	PROMEDIO SEMANA 3	48.01
	PROMEDIO SEMANA 4	38.40
OCTUBRE	PROMEDIO SEMANA 1	38.00
	PROMEDIO SEMANA 2	38.97
	PROMEDIO SEMANA 3	38.04
	PROMEDIO SEMANA 4	36.23
NOVIEMBRE	PROMEDIO SEMANA 1	32.52
	PROMEDIO SEMANA 2	14.77
	PROMEDIO SEMANA 3	11.55
	PROMEDIO SEMANA 4	32.29
DICIEMBRE	PROMEDIO SEMANA 1	38.16
	PROMEDIO SEMANA 2	35.77
	PROMEDIO SEMANA 3	26.82
	PROMEDIO SEMANA 4	33.94

Tabla 7: Datos de material particulado PM10 en el año 2019.

MATERIAL PARTICULADO PM10		
Año 2019		
ENERO	PROMEDIO SEMANA 1	15.62
	PROMEDIO SEMANA 2	19.98
	PROMEDIO SEMANA 3	11.40
	PROMEDIO SEMANA 4	20.25
FEBRERO	PROMEDIO SEMANA 1	18.54
	PROMEDIO SEMANA 2	27.34
	PROMEDIO SEMANA 3	28.33
	PROMEDIO SEMANA 4	26.68
MARZO	PROMEDIO SEMANA 1	30.75
	PROMEDIO SEMANA 2	29.08
	PROMEDIO SEMANA 3	27.26
	PROMEDIO SEMANA 4	22.27
ABRIL	PROMEDIO SEMANA 1	22.08
	PROMEDIO SEMANA 2	29.79
	PROMEDIO SEMANA 3	36.78
	PROMEDIO SEMANA 4	28.22
MAYO	PROMEDIO SEMANA 1	28.41
	PROMEDIO SEMANA 2	34.81
	PROMEDIO SEMANA 3	33.23
	PROMEDIO SEMANA 4	33.68
JUNIO	PROMEDIO SEMANA 1	19.00
	PROMEDIO SEMANA 2	21.97
	PROMEDIO SEMANA 3	18.15
	PROMEDIO SEMANA 4	15.12
JULIO	PROMEDIO SEMANA 1	0.00
	PROMEDIO SEMANA 2	0.00
	PROMEDIO SEMANA 3	0.00
	PROMEDIO SEMANA 4	23.00
AGOSTO	PROMEDIO SEMANA 1	25.17
	PROMEDIO SEMANA 2	18.52
	PROMEDIO SEMANA 3	23.90
	PROMEDIO SEMANA 4	15.82
SEPTIEMBRE	PROMEDIO SEMANA 1	19.76
	PROMEDIO SEMANA 2	17.12
	PROMEDIO SEMANA 3	20.71
	PROMEDIO SEMANA 4	21.81
OCTUBRE	PROMEDIO SEMANA 1	21.75
	PROMEDIO SEMANA 2	25.35
	PROMEDIO SEMANA 3	18.54
	PROMEDIO SEMANA 4	23.33

NOVIEMBRE	PROMEDIO SEMANA 1	25.72
	PROMEDIO SEMANA 2	12.60
	PROMEDIO SEMANA 3	7.73
	PROMEDIO SEMANA 4	26.89
DICIEMBRE	PROMEDIO SEMANA 1	28.56
	PROMEDIO SEMANA 2	19.35
	PROMEDIO SEMANA 3	27.06
	PROMEDIO SEMANA 4	16.22

Tabla 8: Datos de material particulado PM2.5 en el año 2019.

MATERIAL PARTICULADO PM2.5		
Año 2019		
ENERO	PROMEDIO SEMANA 1	9.28
	PROMEDIO SEMANA 2	15.48
	PROMEDIO SEMANA 3	7.60
	PROMEDIO SEMANA 4	13.19
FEBRERO	PROMEDIO SEMANA 1	9.30
	PROMEDIO SEMANA 2	27.34
	PROMEDIO SEMANA 3	12.17
	PROMEDIO SEMANA 4	13.56
MARZO	PROMEDIO SEMANA 1	20.98
	PROMEDIO SEMANA 2	13.90
	PROMEDIO SEMANA 3	22.24
	PROMEDIO SEMANA 4	15.07
ABRIL	PROMEDIO SEMANA 1	14.85
	PROMEDIO SEMANA 2	9.84
	PROMEDIO SEMANA 3	10.26
	PROMEDIO SEMANA 4	13.50
MAYO	PROMEDIO SEMANA 1	22.88
	PROMEDIO SEMANA 2	18.42
	PROMEDIO SEMANA 3	18.27
	PROMEDIO SEMANA 4	22.32
JUNIO	PROMEDIO SEMANA 1	13.83
	PROMEDIO SEMANA 2	15.39
	PROMEDIO SEMANA 3	10.18
	PROMEDIO SEMANA 4	14.05
JULIO	PROMEDIO SEMANA 1	0.00
	PROMEDIO SEMANA 2	0.00
	PROMEDIO SEMANA 3	0.00
	PROMEDIO SEMANA 4	14.05
AGOSTO	PROMEDIO SEMANA 1	13.69

	PROMEDIO SEMANA 2	10.92
	PROMEDIO SEMANA 3	13.75
	PROMEDIO SEMANA 4	12.78
SEPTIEMBRE	PROMEDIO SEMANA 1	15.37
	PROMEDIO SEMANA 2	14.76
	PROMEDIO SEMANA 3	17.67
	PROMEDIO SEMANA 4	19.25
OCTUBRE	PROMEDIO SEMANA 1	14.49
	PROMEDIO SEMANA 2	14.90
	PROMEDIO SEMANA 3	13.64
	PROMEDIO SEMANA 4	14.59
NOVIEMBRE	PROMEDIO SEMANA 1	27.92
	PROMEDIO SEMANA 2	18.59
	PROMEDIO SEMANA 3	14.52
	PROMEDIO SEMANA 4	12.01
DICIEMBRE	PROMEDIO SEMANA 1	12.70
	PROMEDIO SEMANA 2	11.79
	PROMEDIO SEMANA 3	13.06
	PROMEDIO SEMANA 4	8.28