



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ciencias Físico
Matemáticas

Calidad del Aire del Estado de Puebla 2010-2021

Tesis presentada al

Colegio de Física

como requisito para la obtención del grado de

**Licenciada en
Física**

Presenta:

Karime Sosa Díaz

Asesorado por

Dr. Roberto Ramírez Sánchez

Puebla, Pue.

Junio 2021

Título: Calidad del Aire del Estado de Puebla 2010-2021

Estudiante: Karime Sosa Díaz

COMITÉ

Dra. Honorina Ruiz Estrada
Presidente

Dr. Eduardo Moreno Barbosa
Secretario

Dr. Juan Nieto Frausto
Vocal

Dr. Marco Antonio Herrera García
Suplente

Dr. Roberto Ramírez Sánchez
Asesor

Isaac Newton decia que él había podido ver más lejos porque se sentaba en hombros de gigantes.

Dedico esta tesis a los gigantes que siempre han estado conmigo porque si estoy donde estoy es gracias a ellos:

Con amor a mis padres

Agradecimientos

Agradezco profundamente al **Dr. Roberto Ramírez Sánchez** por su paciencia y entrega en el asesoramiento de este trabajo, así tambien a todos mis familiares y amigos que han sido parte de este exitoso trayecto de mi vida.

Así también agradezco al CONCYTEP por el apoyo brindado.

Índice general

Resumen	IV
Introducción	v
1. Marco teórico	1
1.1. Medidas de tendencia central	1
1.2. Medidas de dispersión	2
1.3. Dispersión de contaminantes	4
2. Evaluación normativa.	12
2.1. Partículas Menores a 10 y 2.5 micrómetros	12
2.2. Partículas Menores a 2.5 micrómetros (PM-2.5)	13
2.3. Partículas menores a 10 micrómetros (PM-10)	16
2.4. Ozono	19
2.5. Monóxido de Carbono	22
2.6. Dióxido de Nitrógeno	23
2.7. Dióxido de Azufre	24
3. Resultados y análisis	26
3.1. Análisis de datos de PM-2.5	26

ÍNDICE GENERAL
ÍNDICE GENERAL

3.1.1. PM-2.5 y lluvia.	28
3.1.2. Dispersión de PM-2.5	29
3.2. Análisis de datos para PM-10	31
3.2.1. PM-10 y lluvia	33
3.2.2. Dispersión de PM-10	34
3.3. Análisis de datos para ozono	36
3.3.1. Ozono y temperatura.	38
3.3.2. Dispersión de Ozono	39
3.4. Análisis de datos para CO	42
3.5. Análisis de datos para NO_2	44
3.6. Análisis de datos para SO_2	46
3.7. Temperatura	48
4. Conclusiones	49
A. Dispersión de contaminantes	50
B. Días fuera de norma por año y contaminante	53
C. Dirección y velocidad del viento por estación	55
D. R-STUDIO	58

Resumen

El Estado de Puebla cuenta con cinco estaciones de monitoreo atmosférico que conforman la Red Estatal de Monitoreo Atmosférico, estas tienen la finalidad de monitorear de manera continua la Calidad del Aire de los municipios que forman parte de la Zona Metropolitana del Valle de Puebla, los contaminantes criterio que se encuentran monitoreados son: PM-10, PM-2.5, O_3 , CO, NO_2 y SO_2 .

En esta tesis se estudia y analiza el comportamiento de los contaminantes criterio en cada estación de monitoreo por 12 años dentro del periodo 2010-2021, el cual nos muestra las concentraciones de cada contaminante, su comportamiento durante el día y en cada estación del año, así mismo se presenta una modelación realizada con el programa R-STUDIO de la dispersión de los contaminantes bajo las variables meteorológicas: temperatura, lluvia, dirección y velocidad del viento, logrando localizar zonas con más afectaciones donde se concentra o se logra transportar la contaminación debido al arrastre del viento.

Se reportan resultados explícitos por contaminante de cada estación.

Introducción

Se ha encontrado que diversos estudios experimentales y epidemiológicos en humanos, donde señalan que la exposición a contaminantes en el aire ambiente se encuentra asociada con una amplia gama de efectos adversos (agudos y crónicos), que afectan la salud y la calidad de vida de la población. [1, 2]

En 2019, obtiene que el 99 % de la población mundial vive en lugares donde no se respetan las directrices de la OMS sobre la calidad del aire. [1]

La exposición a sustancias tóxicas aumenta el riesgo de muerte prematura, intoxicación aguda, cáncer, enfermedades cardíacas, accidentes cerebrovasculares, enfermedades respiratorias, efectos adversos en los sistemas inmunológico, endocrino y reproductivo, anomalías congénitas y secuelas en el desarrollo neurológico de por vida. La Organización Mundial de la Salud estima que aproximadamente el 58 % de las muertes prematuras relacionadas con la contaminación atmosférica que se produjeron en 2016 se debieron a cardiopatías isquémicas y accidentes cerebrovasculares, mientras que el 18 % de las muertes se debieron a enfermedades pulmonares obstructivas crónicas e infecciones respiratorias agudas, y el 6 % de las muertes se debieron al cáncer de pulmón. [1]

La organización Mundial de la Salud estima que en 2021 la contaminación atmosférica en las ciudades y zonas rurales de todo el mundo provoca cada año 9 millones de muertes prematuras.

Los contaminantes pueden definirse como sustancias artificiales que en concentraciones superiores a ciertos niveles causan daños a la vida vegetal, animal y humana. Pueden verse afectados el aire, agua y suelo, y ser transportados de un lugar a otro, entre las fuentes principales de contaminación que se encuentran son: el sector industrial, el transporte, la producción de electricidad, los procesos de combustión y procesos agrícolas. [3]

Con el fin de proteger la salud de la población, los gobiernos en muchos países del mundo regulan los niveles de concentración de los contaminantes en el aire ambiente estableciendo diversas normas bajo las recomendaciones establecidas por la Organización Mundial de la Salud. En México la Secretaría de Salud es responsable de establecer los límites permisibles de concentración de los contaminantes atmosféricos.

El calentamiento global y el cambio climático son consecuencia del incremento de la contaminación ambiental. La NASA: Climate Change reporta un incremento de temperatura global desde finales del siglo XIX hasta el 2021 de 1.18°C considerando los últimos 40 años con mayor aportación [4], el Programa de Investigación en Cambio Climático de la UNAM reporta en enero de 2022 un incremento de temperatura nacional arriba de 1.6°C hasta el 2020, considerando así que nuestro país se calienta mucho más rápido que el promedio global [5], en los últimos 12 años Puebla muestra un incremento de temperatura media anual de 1.4°C del 2010 al 2021. Dentro de estos 12 últimos años Puebla presenta una primera contingencia ambiental el 13 de mayo de 2019 [6] y una pre contingencia el 1 de abril de 2021 [7]

La Red Estatal de Monitoreo Atmosférico (REMA) cuenta con 5 estaciones de monitoreo atmosférico fijas (Figura 1), monitoreando los contaminantes criterio: monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2), Ozono (O_3) y Partículas Menores a 10 micrómetros (PM-10) y Partículas Menores a 2.5 micrómetros (PM-2.5). Adicionalmente se cuenta con un sistema de monitoreo meteorológico obteniendo datos de: temperatura, velocidad y dirección del viento, lluvia, radiación solar y presión atmosférica. Las estaciones se encuentran localizadas dentro de la Zona Metropolitana del Valle de Puebla (ZMVP) la cual comprende a los municipios de Amozoc, Coronango, Cuautlancingo, Puebla, San Andrés Cholula y San Pedro Cholula.

En esta tesis se estudian y analizan los datos obtenidos de la REMA del 2010 al 2021 [8] bajo los criterios establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas de Calidad del Aire, análisis estadísticos y modelación de dispersión con el sistema R-STUDIO, obteniéndose así un estatus particular para cada una de las estaciones, un perfil de comportamiento en distintos periodos (horario, por días de la semana, mensual, anual y por estación del año) y su dispersión alrededor del punto de ubicación.

CAPÍTULO 0 INTRODUCCIÓN

Se ha encontrado que las estaciones carecen de información en el monitoreo de los contaminantes, con gran frecuencia encontramos que no cumplen con la obtención del 75 % de datos recolectados por año de acuerdo a la norma. Lo cual dificulta presentar una tendencia de comportamiento eficiente para cada contaminante y estación. Cabe mencionar que este problema ha estado presente al menos desde el 2005 de acuerdo a lo que se muestra en el "Programa de Gestión de la Calidad del Aire del Estado de Puebla 2012-2020 en el capítulo 2 "Diagnóstico y tendencia de la calidad del aire en zonas urbanas y rurales del Estado de Puebla"[9]

Mediante el análisis realizado se obtuvo que Puebla presenta problemas con los niveles de concentración para PM-10, PM-2.5 y O_3 , de acuerdo a los parámetros establecidos en las normas. Localizando así las concentraciones más elevadas de PM-10 en NINFAS y AGUA SANTA, PM-2.5 en BINE y AGUA SANTA, O_3 en UTP y VELODROMO

Este trabajo se encuentra estructurado de la siguiente forma. En el capítulo 1 se estudian las medidas de tendencia central y de dispersión, además de la difusión a través de la ley de Fick y la ecuación de continuidad, obteniendo como solución la ecuación de Gauss que nos lleva a la descripción de dispersión de contaminantes desde una fuente puntual instantánea hasta una fuente puntual en tres dimensiones con viento uniforme. En el capítulo 2 se evalúan cada uno de los contaminantes de acuerdo a las Normas Oficiales de Calidad del Aire. En el capítulo 3 se presenta un análisis de comportamiento y dispersión de los contaminantes y, finalmente en el capítulo 4 las conclusiones de esta tesis.



Figura 1: Mapa de ubicación y radio de alcance de las estaciones de monitoreo. Elaborado con Google Earth Pro

Capítulo 1

Marco teórico

1.1. Medidas de tendencia central

Las medidas de tendencia central son comúnmente usadas para describir una colección amplia de datos, estas nos permitirán evaluar las Normas Oficiales Mexicanas de la Calidad del Aire de acuerdo a lo que se establece para cada contaminante. Las medidas que más comúnmente se emplean son la media, la mediana y la moda.

La **media aritmética** se considera ser el punto de equilibrio central de nuestra colección de datos. Para un conjunto con n elementos etiquetados $x = x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, encontramos la media de la siguiente manera:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.1)$$

La **mediana** tiene la característica principal de dividir un conjunto de datos ordenado de menor a mayor o viceversa en dos grupos iguales; la mitad del conjunto tendrá valores menores que la mediana, y la otra mitad tendrá valores mayores que está.

La **moda** es el valor que se repite con más frecuencia o el más común del conjunto de datos, comúnmente cuando trabajamos funciones de densidad de probabilidad, es posible que para el conjunto de n datos, donde más de un valor se repite cierta cantidad de veces se tabula la frecuencia de cada medición.

1.2. Medidas de dispersión

Las medidas de dispersión indican si los valores están relativamente cercanos uno del otros o si se encuentran dispersos. Todas las medidas de dispersión toman a la media como punto de referencia. En cada caso, un valor cero indicaría que no hay dispersión, en tanto que la dispersión aumenta a medida que se aleja del valor de la media.

Variancia

La variancia de una muestra es la desviación promedio de los valores obtenidos a partir de la media, elevada al cuadrado y calculada mediante $n - 1$ en lugar de n , se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\sigma_x^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (1.2)$$

Desviación estándar

La desviación estándar es la raíz cuadrada positiva de la variancia, las unidades de la desviación estándar son las mismas que las de la media.

Gráfica de Densidad de Datos

Para la generación de graficos de densidad el sistema R-STUDIO toma la Estimación de Densidad Kernel (KDE) que es un método que nos permite producir una estimación uniforme de una función de densidad de probabilidad, basada en los datos observados. La Estimación de la Densidad de Kernel consiste en asignar una función de probabilidad escalada (núcleo) a cada observación en un conjunto de datos y sumarlos todos para mostrar la distribución del conjunto de datos. Es básicamente una versión sofisticada de un histograma.

La **grafica de densidad Kernel** de un conjunto de datos nos da información y es un método no paramétrico utilizado para calcular la función de la densidad de probabilidad de una variable de la que se desconoce su distribución. Lo que realiza la función es adaptar una línea suavizada y continua a la distribución obtenida de densidades de un conjunto de datos. Para ello utiliza los siguientes elementos:

a) La función de ponderación K (Kernel) utiliza como base para la estimación de la función de densidad del conjunto de datos. La cual debe satisfacer ciertas condiciones de simetría y regularidad. Se utilizan comúnmente un rango de funciones Kernel básicas entre las que se encuentran la función uniforme o función rectangular, la función triangular, la función Epanechnikov, la función gaussiana, cuártico o biponderado, triponderado, tricubo o arco-coseno.

b) La cantidad en KDE que se le conoce como ancho de banda es similar al rango en los histogramas, es un parámetro suavizado que establece el ancho de la ventana para el ajuste de la función de núcleo. De forma predeterminada, el ancho de banda se elige automáticamente mediante una técnica basada en datos de ejemplos predeterminados del sistema. Un ancho de banda mayor impone una mayor suavidad en el rango de datos con poca varianza y mucho sesgo, y un ancho de banda pequeño dará lugar a todo lo contrario. [10, 11]

La Gráfica Polar: polarPlot

La gráfica polar obtenida con la función polarPlot nos permite representar un contaminante con relación de algún parámetro como velocidad o temperatura en función de la dirección y velocidad del viento. Este tipo de gráficas nos permiten identificar con detalle fuentes potenciales de origen de la contaminación y su influencia respecto a los niveles globales de contaminación detectados por una estación.

La Gráfica Temporal Polar o Función Anular: polarAnnulus

Esta función representa la concentración alcanzada del contaminante que se selecciona en función de alguna división temporal que se indique (semanal, mensual o por estaciones del año), en relación de la dirección del viento. Con esta función se puede ver a qué horas del día se producen las mayores concentraciones de un contaminante, la escala del tiempo se representa en los ejes de la gráfica.

1.3. Dispersión de contaminantes

Difusión y advección

El proceso más simple de dispersión es la difusión, la dispersión es provocada por el gradiente de la concentración, si el medio de dispersión se esta moviendo la principal causa de la dispersión es el movimiento del medio y la difusión es sólo una pequeña corrección.

Difusión

La concentración $C(x, y, z, t) = C(\mathbf{r}, t)$ de una sustancia en difusión, se define como su masa M dividido por el volumen del solvente V de la muestra en la que se dispersa

$$C(\mathbf{r}, t) = \frac{M}{V} \quad (1.3)$$

Suponemos que $C(\mathbf{r}, t)$ es continua y diferenciable.

El flujo $\mathbf{j}(\mathbf{r}, t)$ por definición apunta en la dirección en que fluyen las partículas contaminantes. La relación entre el flujo $\mathbf{j}$ y la concentración C se conoce como la ley de Fick.

$$\mathbf{j} = -D\nabla C \quad (1.4)$$

El coeficiente de difusión traslacional es igual a $D = \frac{k_B T}{6\pi\eta r}$, donde k_B es la constante de Boltzmann, T es la temperatura absoluta, r es el radio de la partícula y η el coeficiente de viscosidad del medio.

Para obtener una ecuación diferencial para la concentración $C(\mathbf{r}, t)$ consideremos un volumen arbitrario V . El flujo de partículas contaminantes que salen de este volumen esta dado por $\int \nabla \cdot \mathbf{j} d\mathbf{r}$. Por conservación de masa de las partículas contaminantes esto implica que este flujo de partículas que salen deben ser igual a la disminución de la masa dentro del volumen por segundo.

$$\frac{dm}{dt} = - \int_V d\mathbf{r} \frac{\partial C}{\partial t} \quad (1.5)$$

$$\frac{dm}{dt} = \int_{\partial V} ds \hat{\mathbf{n}} \cdot \mathbf{j} = \int_V d\mathbf{r} \nabla \cdot \mathbf{j} \quad (1.6)$$

Esta relación es válida para cualquier volumen V que este fijo en el espacio. Esto nos lleva a encontrar la ecuación de continuidad [12]

$$- \int_V d\mathbf{r} \frac{\partial C}{\partial t} = \int_V d\mathbf{r} \nabla \cdot \mathbf{j} \quad (1.7)$$

$$\int_V \left(\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j} \right) d\mathbf{r} = 0 \quad (1.8)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j} = 0 \quad (1.9)$$

Esta ecuación se mantiene siempre que C representa el flujo de partículas contaminantes. Consideremos que las partículas contaminantes en el medio de dispersión se mueven con una velocidad $\mathbf{u}$. El flujo $\mathbf{j}$ tiene componentes $\mathbf{u}C$ ya que que las partículas contaminantes se mueven en el medio. Este fenómeno se llama advección, y junto con la difusión obtenemos:

$$\mathbf{j} = \mathbf{u}C - D\nabla C \quad (1.10)$$

combinando las dos ultimas ecuaciones

$$\frac{\partial C(\mathbf{r}, t)}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}C - D\nabla C) = 0 \quad (1.11)$$

$$\frac{\partial C(\mathbf{r}, t)}{\partial t} + (\nabla \cdot \mathbf{u})C + \mathbf{u} \cdot \nabla C - \nabla \cdot (D\nabla C) = 0 \quad (1.12)$$

Para muchos fluidos $\nabla \mathbf{u} = 0$, que incluye el caso donde $\mathbf{u} = 0$. Para los casos en el coeficiente de difusión D es independiente de la posición, uno encuentra que:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla C = D\nabla^2 C \quad (1.13)$$

La concentración C , en este caso se puede escribir como $C = C(x(t), y(t), z(t))$, por lo tanto

$$dC = \frac{\partial C}{\partial x} dx + \frac{\partial C}{\partial y} dy + \frac{\partial C}{\partial z} dz \quad (1.14)$$

donde $\frac{dx(t)}{dt} = u_x$, $\frac{dy(t)}{dt} = u_y$, $\frac{dz(t)}{dt} = u_z$, es el cambio de concentración en el tiempo mientras seguimos el flujo del medio.

$$\frac{dC}{dt} = \frac{dC}{dx} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial C}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial C}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial C}{\partial t} = \nabla C \cdot \mathbf{u} + \frac{\partial C}{\partial t} \quad (1.15)$$

La expresión $\frac{dC}{dt}$ es la derivada total de C con respecto del tiempo t.

Donde $\nabla C = \frac{\partial C}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial C}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial C}{\partial z} \hat{k}$ y $\mathbf{u} = u_x \hat{i} + u_y \hat{j} + u_z \hat{k}$

Si $\mathbf{u} \neq 0$

$$\frac{\partial C(\mathbf{r}, t)}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla C(\mathbf{r}, t) = D \nabla^2 C(\mathbf{r}, t) \quad (1.16)$$

esta ecuación es válida para medios donde $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$ y donde el coeficiente de difusión D es independiente de la posición.

Fuente plana instantánea en tres dimensiones

Consideraremos un medio homogéneo en reposo es decir $\mathbf{u} = \mathbf{0}$ y tomemos D como constante. Sea el caso en el que la concentración $C = C(x, t)$ es una función de x y t solamente e independiente de y y z .

La ecuación diferencial se simplifica y obtenemos lo siguiente.

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x, t)}{\partial x^2} \quad (1.17)$$

Una solución a esta ecuación es la función de Gauss, la cual se obtiene hallando la transformada de Fourier de $C(x, t)$, ver el apéndice A (A17).

$$C(x, t) = \frac{Q}{2\sqrt{\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}} \quad (1.18)$$

Donde Q es la cantidad de partículas contaminantes liberadas en $t=0$.

La Figura 1.1 muestra la gráficamente la ecuación (1.19), lo que describe la difusión de la concentración en una dimensión.

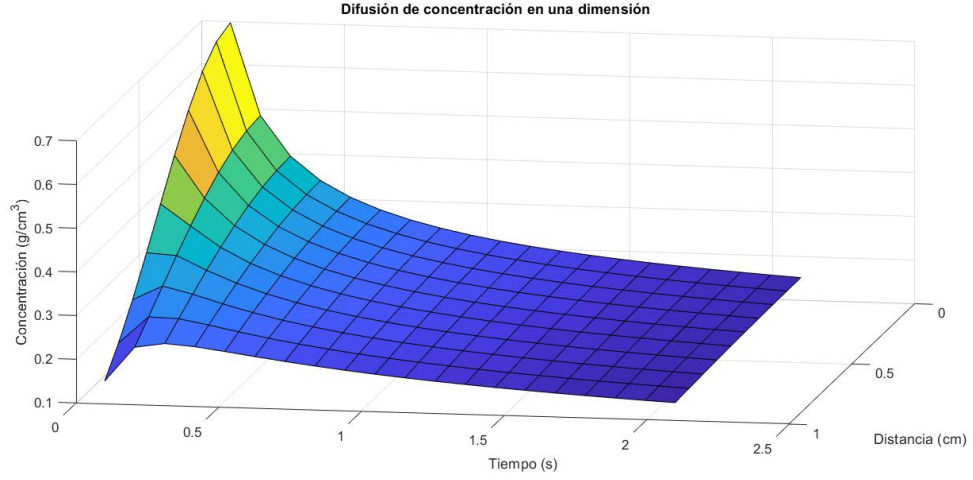


Figura 1.1: Gráfica de la solución de la ecuación 1.19

De la ecuación 1.18 donde Q es la cantidad de partículas liberadas en $t = 0$, el factor $2\sqrt{\pi Dt}$, se elije de tal manera que $C(x, t)$, sea igual a la función de Gauss normalizada.

Sea $\sigma = \sqrt{2Dt}$

$$C(x, t) = \frac{Q}{2\sqrt{\pi Dt}} e^{\frac{-x^2}{4Dt}} = \frac{C_0}{\sqrt{2\pi}\sqrt{2Dt}} e^{\frac{-x^2}{2\sigma^2}} = \quad (1.19)$$

Obtenemos

$$C(x, t) = \frac{C_0}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (1.20)$$

donde C_0 es la concentración en $t = 0$.

Sea $\sigma^2 = 2Dt$, $2\sigma^2 = 4Dt$.

Establecemos las condiciones cuando $\sigma \rightarrow \infty$ y $C(x, t) = \delta(x)$ donde $\delta(x)$ es la función delta y el límite cuando $t \rightarrow 0$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) dx = 1 \quad (1.21)$$

$$\langle x(t) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} C(x, t) dx = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{C_0}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right)} dx = C_0 \quad (1.22)$$

Para el desplazamiento cuadrático medio

$$\langle x^2(t) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} C(x, t) x^2 dx = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{C_0}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{(\frac{-x^2}{2\sigma^2})} x^2 dx = 2QDt \quad (1.23)$$

Una nube de tamaño finito.

Considere una "nube" de partículas liberadas en $t = 0$, con $\mathbf{u} = 0$ y D constante. Las condiciones iniciales para este caso pueden expresarse como $C = C_0$ en $-\frac{b}{2} < x < \frac{b}{2}$, $C = 0$, $t = 0$, en otro caso. Esto puede interpretarse como una nube homogénea liberada al rededor del plano $x = 0$, que se extiende hasta el infinito en las direcciones y y z .

La ecuación diferencial que describe esta nube esta dada por $\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$.

La nube se difundirá perpendicularmente al plano $x = 0$, para resolver esta ecuación diferencial con las condiciones iniciales dadas, se podría interpretar esta nube como una superposición de un gran número de funciones delta, donde $C_0 dx'$ representa una fuente plana instantánea en una franja entre x' y $x' + dx'$.

Por lo que

$$c(x, t \rightarrow 0) = C_0 \delta(x - x') dx' \quad (1.24)$$

Entonces la solución de la ecuación diferencial en términos de σ , es:

$$C(x, t) = \frac{C_0 dx'}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x')^2}{2\sigma^2}} \quad (1.25)$$

donde el origen de la fuente se movio a x' la solución completa es la siguiente:

$$C(x, t) = \frac{C_0}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} e^{-\frac{(x-x')^2}{2\sigma^2}} dx' \quad (1.26)$$

La solución de la ecuación integral es,

$$C(x, t) = \frac{C_0}{2} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{\frac{b}{2} + x}{\sqrt{2}\sigma}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{\frac{b}{2} - x}{\sqrt{2}\sigma}\right) \right] \quad (1.27)$$

Fuentes lineales y puntales instantáneas en tres dimensiones

En $x = 0$ y en $t = 0$, la solución para una fuente lineal o una fuente puntual instantánea

se escribe como:

$$C(\mathbf{r}, t) = \frac{Q}{(\sigma\sqrt{2\pi})^n} e^{(\frac{-r^2}{2\sigma^2})} \quad (1.28)$$

Donde r es la distancia a la fuente y n es el número de coordenadas cartesianas necesarias para definir $\mathbf{r}$. Para una fuente puntual instantánea en tres dimensiones $n=3$ y $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$.

Consideremos una fuente puntual en el origen que, comenzando en $t = 0$, emite continuamente partículas contaminantes a razón de q . Por lo tanto en un intervalo de tiempo dt' emite qdt' , en un cierto tiempo t y posición $\mathbf{r}$ se puede encontrar la concentración integrando $C(\mathbf{r}, t)$ para $n = 3$

Debemos observar que $\sigma = \sqrt{2Dt}$, debe escribirse experimentalmente ya que en el momento t la contribución de una emisión en t' , se encontrará colocando $\sigma^2 = 2D(t - t')$

$$(\sigma\sqrt{2\pi})^3 = (2)^3(\pi D)^{\frac{3}{2}}(t - t')^{\frac{3}{2}} \quad (1.29)$$

$$C(\vec{r}, t) = \frac{q}{8(\pi D)^{\frac{3}{2}}} \int_0^t e^{(\frac{-r^2}{4D(t-t')})} \frac{dt'}{(t - t')^{\frac{3}{2}}} \quad (1.30)$$

Se tiene como solución la ecuación (1.33),

$$C(\mathbf{r}, t) = \frac{q}{4\pi Dr} \operatorname{erfc}\left(\frac{r}{\sqrt{2Dt}}\right) \quad (1.31)$$

Fuente puntual en tres dimensiones con viento uniforme

Considere una fuente puntual de partículas contaminantes en un flujo de velocidad (del medio) uniforme $\mathbf{u}$, que puede ser el aire, agua o cualquier otro medio. El eje x se toma en la dirección del flujo del medio.

Fuente puntual instantánea

Para una fuente puntual instantánea de partículas contaminantes en el origen en $t = 0$ usamos un sistema de coordenadas x', y', z' que se mueve con el flujo del medio (aire, agua, etc.). La relación de este sistema x, y, z esta dado por las transformaciones de Galileo.

$$x' = x - ut, y' = y, z' = z, t' = t \quad (1.32)$$

En este sistema de coordenadas, la ecuación de la concentración esta dada por,

$$C(\mathbf{r}, t) = \frac{Q}{(\sigma\sqrt{2\pi})^n} e^{\frac{-r^2}{2\sigma^2}} \quad (1.33)$$

Por lo tanto,

$$C(x', y', z', t) = \frac{Q}{(\sigma\sqrt{2\pi})^3} e^{\frac{-(x'^2+y'^2+z'^2)}{2\sigma^2}} \quad (1.34)$$

Q es la masa de las partículas contaminantes en $t = 0$ y $\sigma^2 = 2Dt$. Con las transformaciones de Galileo, la solución en el medio de referencia fijo, se convierte en

$$C(x, y, z, t) = \frac{Q}{(\sigma\sqrt{2\pi})^3} e^{\frac{-((x-ut)^2+y^2+z^2)}{2\sigma^2}} \quad (1.35)$$

Esta solución obedece a la ecuación

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{C} = \mathbf{D} \nabla^2 \mathbf{C}. \quad (1.36)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{C} = \mathbf{D} \nabla^2 \mathbf{C} \quad (1.37)$$

$$C(x, y, z, t) = \frac{Q}{(\sigma\sqrt{2\pi})^3} e^{\left(\frac{-[(x-ut)^2+y^2+z^2]}{2\sigma^2}\right)} \quad (1.38)$$

Fuente puntual continua.

Para encontrar la concentración $C(x, y, z, t)$ en la ubicación x, y, z y al tiempo t de una fuente puntual continua de partículas contaminantes en el origen fijo, comenzando en $t = 0$ en un flujo uniforme. Comenzamos con una emisión de delta en el tiempo $t' < t$ con magnitud $Q = qdt$. Usando un sistema de coordenadas que se mueve con el flujo del medio. En este caso el nuevo marco de coordenadas comienza a moverse con el sople (emisión) en el tiempo t .

$$C = \frac{q}{8(\pi D)^{\frac{3}{2}}} \int_0^t e^{\frac{-r^2}{4D(t-t')}} \frac{dt'}{(t-t')^{\frac{3}{2}}} \text{ haciendo } \beta = \frac{r^2}{4D(t-t')} \quad (1.39)$$

Ya que las partículas contaminantes se mueven con el flujo del medio y se dispersan durante

un tiempo $t - t'$, para volver al sistema de coordenadas de Galileo, debemos escribir ahora la ecuación como,

$$x' = x - u(t - t')$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

Esta transformación la sustituimos en la ecuación (1.35), con $Q = qdt'$ y $\sigma^2 = 2D(t - t')$, la suma de todos los soplos (emisiones) conduce a la integral.

$$C(x, y, x, t) = \frac{q}{(8\pi D)^{\frac{3}{2}}} \int_0^t e^{-\frac{(x - u(t - t'))^2 + y^2 + z^2}{4D(t - t')}} \frac{dt'}{(t - t')^{\frac{3}{2}}} \quad (1.40)$$

Simplificando la integral y haciendo $\beta = \frac{r^2}{4D(t - t')}$, el integrando ya no contiene explícitamente el tiempo, obteniendo un resultado analítico, tomando el límite $t \rightarrow \infty$, obtenemos

$$C(x, y, z, t) = \frac{q}{4\pi r D} e^{-\frac{u(r-x)}{2D}} \quad (1.41)$$

Este resultado es simétrico para la rotación al rededor del eje x . Puede visualizarse dibujando líneas de concentraciones constantes, ver Figura 1.2.

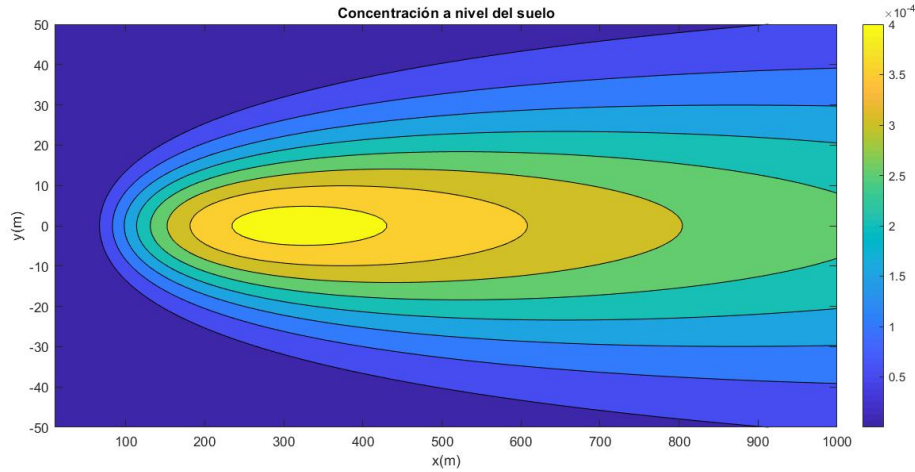


Figura 1.2

Las líneas de concentración constante C definidas en la ecuación (1.43), se muestran con el plano $z = 0$ para una fuente puntual continua en el origen, comenzando en $t = 0$ dentro de un campo de velocidad uniforme en la dirección x , cuando $t \rightarrow \infty$

Capítulo 2

Evaluación normativa.

2.1. Partículas Menores a 10 y 2.5 micrómetros

El material particulado es una mezcla compleja de sustancias en estado líquido o sólido, que permanece suspendida en la atmósfera por periodos variables de tiempo. Las partículas pueden tener un origen natural y también antropogénico. Diversos estudios han encontrado que dentro de la composición química se encuentran componentes como Sulfatos (SO_4), Nitratos (NO_3), Amonio (NH_4), Sodio (Na), Cloro (Cl), Carbón elemental y orgánico, componentes minerales, y en menor proporción también se han encontrado compuestos orgánicos y elementos como plomo, mercurio, níquel, zinc, magnesio, entre otros.

Dentro de las principales causas de contaminación atmosférica por causa de partículas del tipo PM-10 y PM-2.5 son los procesos industriales como las cementeras, actividades de combustión que contribuyen a las emisiones de partículas en las que sobresalen las plantas generadoras de electricidad, especialmente aquellas que emplean carbón, las plantas industriales y comerciales. También se encuentran las fuentes antrópicas que abarcan las emisiones generadas por las actividades humanas, entre ellas se encuentran las emisiones provenientes de fábricas, automóviles, construcciones, tortillerías, quemas agrícolas, entre otros.

De forma natural provienen de erupciones volcánicas, tormentas de polvo (tolvaneras), incendios forestales o rocío marino. [13]

2.2. Partículas Menores a 2.5 micrómetros (PM-2.5)

La Norma Oficial Mexicana **NOM-025-SSA1-2014** establece dos valores límite para las concentraciones ambientales de PM-2.5, con el fin de protección a la salud.

1. Límite de 24 horas: $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$, como promedio de 24 horas.

2. Límite anual: $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$, como promedio anual.

La figura 2.1 muestra una gráfica de promedios diarios del 2010 al 2021 para cada estación y en la gráfica 2.2 se presentan las concentraciones agrupadas de las 5 estaciones donde se aprecian valores sobre los establecidos en la norma.

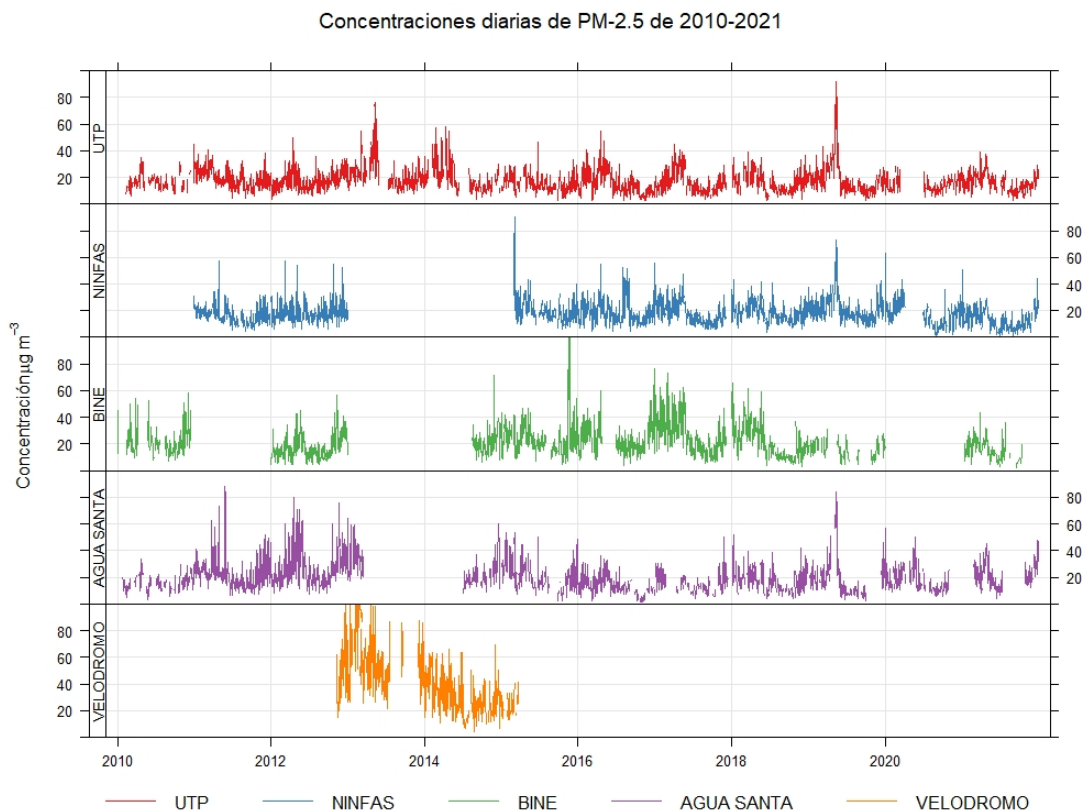


Figura 2.1

CAPÍTULO 2 EVALUACIÓN NORMATIVA.

2.2. PARTÍCULAS MENORES A 2.5 MICRÓMETROS (PM-2.5)

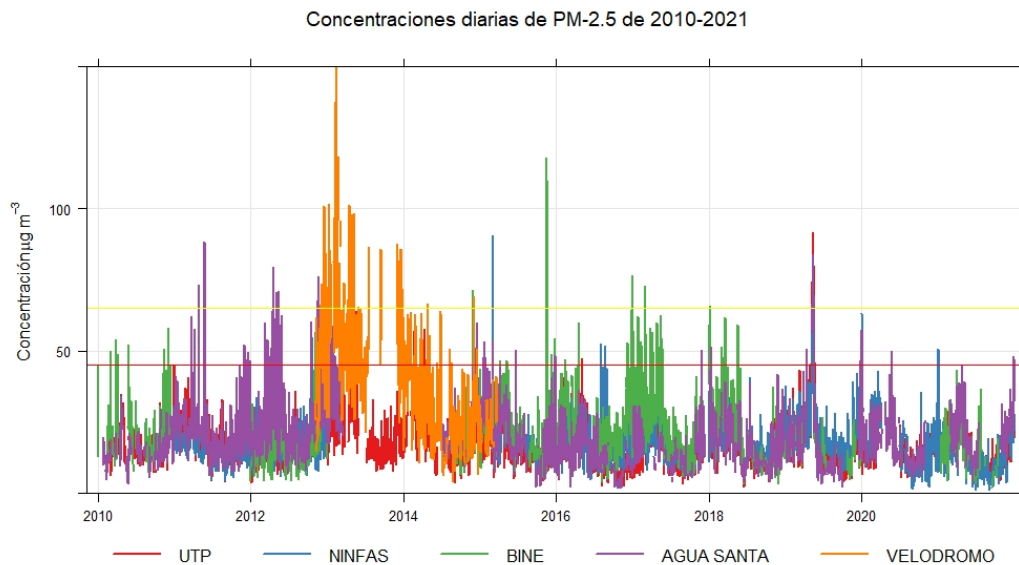


Figura 2.2

Bajo los parámetros normativos se obtuvieron cuantos días las concentraciones de los contaminantes superan los valores límites establecidos, de esta manera se obtuvo el número de días por año y por estación. En la gráfica podemos observar que la estación VELODROMO predomina con mayor número de días excediendo el valor límite de la calidad del aire seguido de las estaciones AGUA SANTA, BINE, UTP y NINFAS.

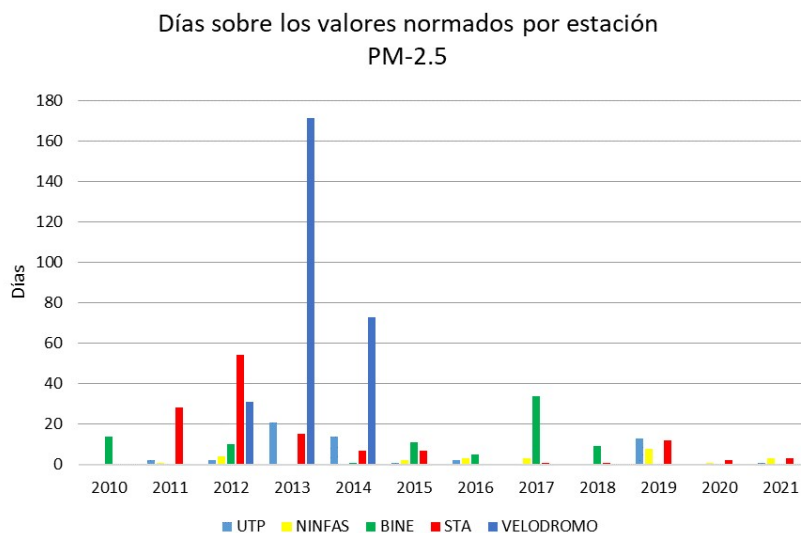
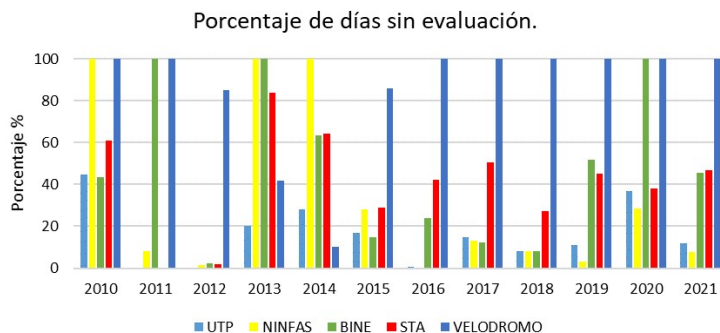


Figura 2.3: Días fuera de norma para PM-2.5 por estación de monitoreo

CAPÍTULO 2 EVALUACIÓN NORMATIVA.

2.2. PARTÍCULAS MENORES A 2.5 MICRÓMETROS (PM-2.5)

La gráfica anterior no proporciona una información suficiente, esto se debe a que muchos días no pueden ser evaluados por no contar con el 75 % de información, por ello la siguiente gráfica muestra el porcentaje de días no evaluados para cada año y estación.



En la gráfica 2.4 se presenta el segundo criterio de evaluación de PM-2.5 de cada estación, podemos apreciar que todos los promedios se encuentran por arriba de lo que indica la norma correspondiente vigente a cada año, la línea amarilla corresponde al límite de $15 \mu g/m^3$ que corresponde a la evaluación anual de la NOM-025-SSA1-1993 vigente 2010-2014, la línea roja corresponde a $12 \mu g/m^3$ que corresponde a la evaluación anual del 2015-2021. Como resultado se obtiene que ninguna estación cumple con el criterio de evaluación durante el periodo de análisis.

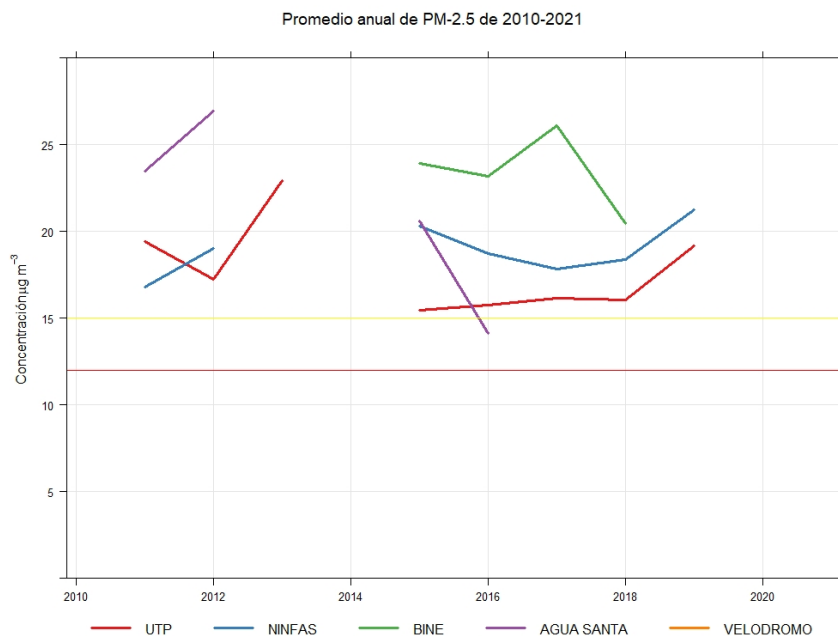


Figura 2.4

2.3. Partículas menores a 10 micrómetros (PM-10)

La Norma Oficial Mexicana **NOM-025-SSA1-2014** establece dos valores límite para las concentraciones ambientales de PM-10, con el fin de protección a la salud.

1. Límite de 24 horas: $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$, como promedio de 24 horas.

2. Límite anual: $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, como promedio anual.

En la gráfica se muestra de manera histórica los promedios de 24 horas de PM-10 de acuerdo a lo establecido en el criterio 1 de la norma.

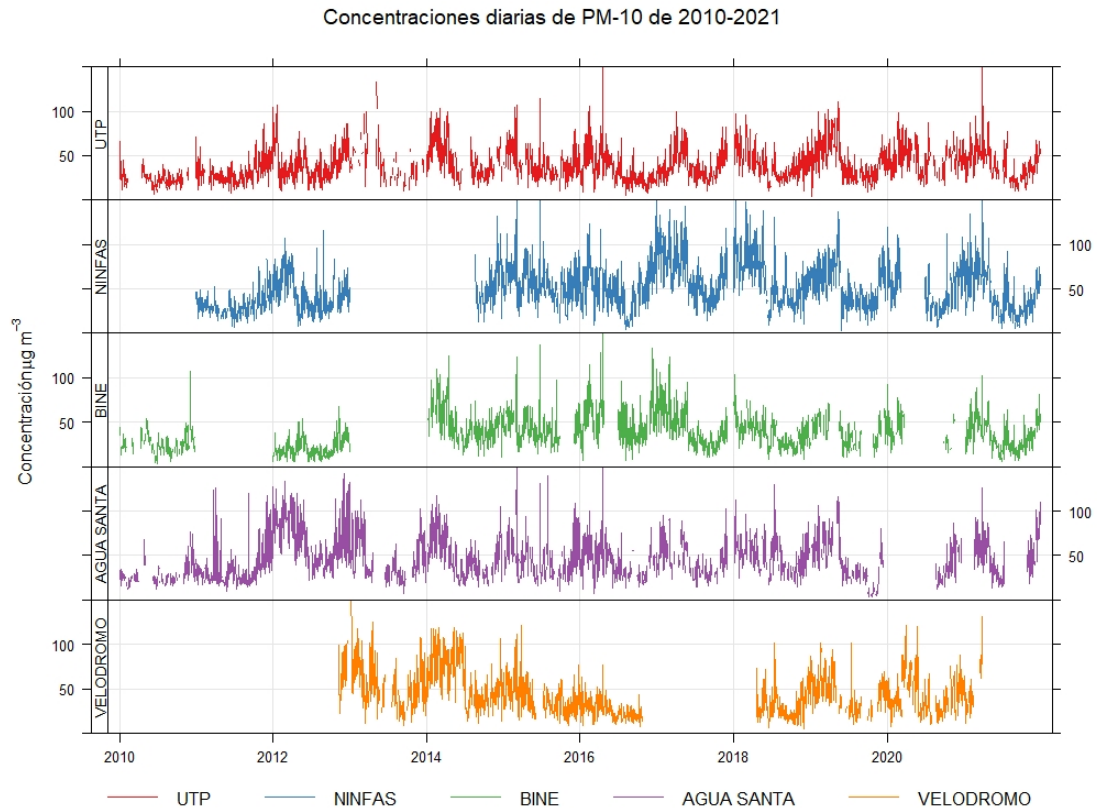


Figura 2.5

La gráfica 2.6 muestra de manera agrupada las concentraciones de las 5 estaciones, consideramos las normas: NOM-025-SSA1-1993 que representa la línea amarilla con el valor límite de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los años 2010-2014 y la NOM-025-SSA1-2014 con valor de $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de 2015-2021 que representa la línea roja.

CAPÍTULO 2 EVALUACIÓN NORMATIVA.

2.3. PARTÍCULAS MENORES A 10 MICRÓMETROS (PM-10)

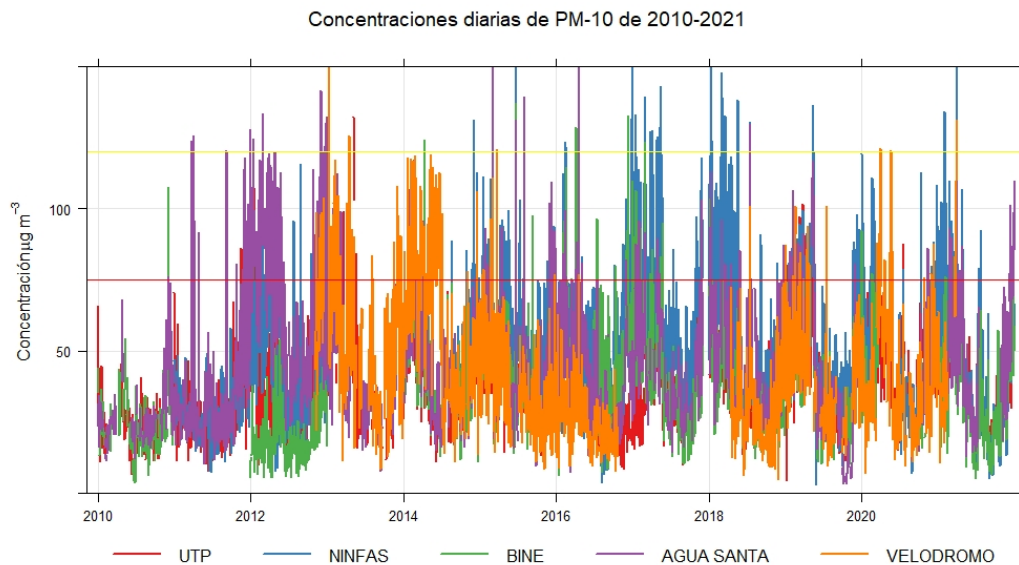


Figura 2.6

En las gráficas de la figura 2.6 y 2.7 se observa que la estación NINFAS predomina con mayor número de días excediendo el valor límite con un total de 406 días, seguido de las estaciones AGUA SANTA con 191, VELODROMO 109, UTP con 92 y BINE con 60 días, ver el apéndice B (B2).

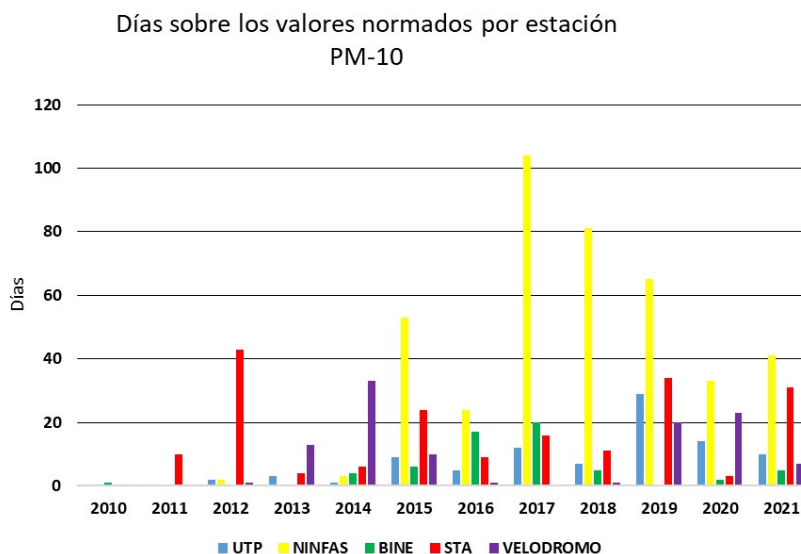


Figura 2.7

CAPÍTULO 2 EVALUACIÓN NORMATIVA.

2.3. PARTÍCULAS MENORES A 10 MICRÓMETROS (PM-10)

En la siguiente gráfica se muestra el porcentaje de días sin evaluación de la norma.

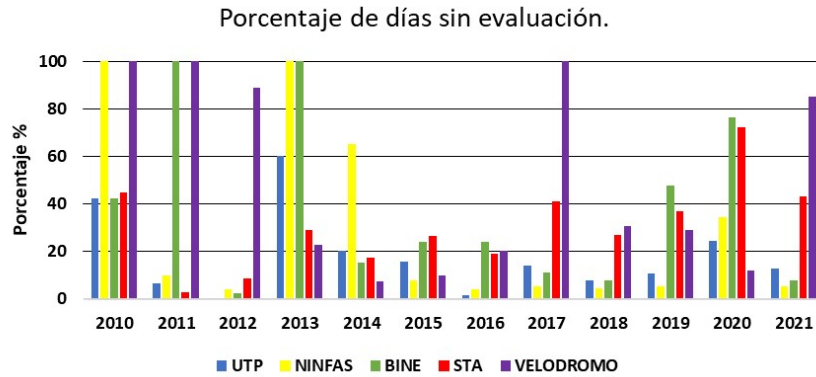


Figura 2.8

La gráfica de la figura 2.9 muestra los promedios de las concentraciones anuales como esta esblecido en la norma. Se muestran las cinco estaciones y se puede observar los años en que las concentraciones anuales se encuentran por arriba de lo que indica la norma correspondiente vigente a cada año, la línea amarilla corresponde a $50 \mu g/m^3$ valor establecido en la NOM-025-SS1-1993 para los años 2010-2014, la línea roja corresponde a $40 \mu g/m^3$ valor de la norma NOM-025-SS1-2014 del 2015-2021.

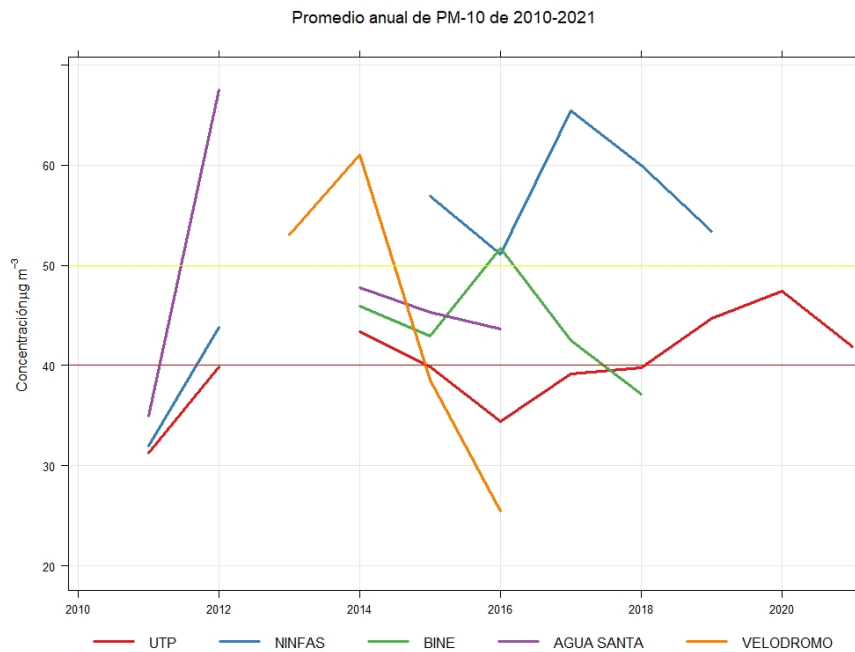


Figura 2.9

2.4. Ozono

El ozono es un contaminante secundario que se forma por una reacción fotoquímica entre emisiones primarias de óxidos de nitrógeno (NOx), compuestos orgánicos volátiles (COVs) o hidrocarburos (HCs) en presencia de la radiación solar, aunado a las condiciones geográficas, climatológicas y meteorológicas del medio ambiente. El tiempo de vida del ozono en la atmósfera depende de la presencia y abundancia de sus precursores y de las condiciones antes mencionadas, registrándose las concentraciones más elevadas durante las horas del día en que se registra la mayor temperatura. [15]

Normatividad

La Norma Oficial Mexicana **NOM-020-SSA1-2014** establece dos valores límite para las concentraciones ambientales de O_3

- 1. La concentración de O_3 debe ser menor o igual a 0.095 ppm (95 ppb), como promedio horario.**
- 2. La concentración del promedio móvil de ocho horas de O_3 debe ser menor o igual a 0.070 ppm (70 ppb), tomando como referencia el máximo en un periodo de un año calendario.**

Las concentraciones horarias de O_3 del 2010 al 2021, se encuentran en la gráfica de la figura 2.10 Los espacios en blanco reflejan la falta de datos, las estaciones con la información más completa son UTP y AGUA SANTA.

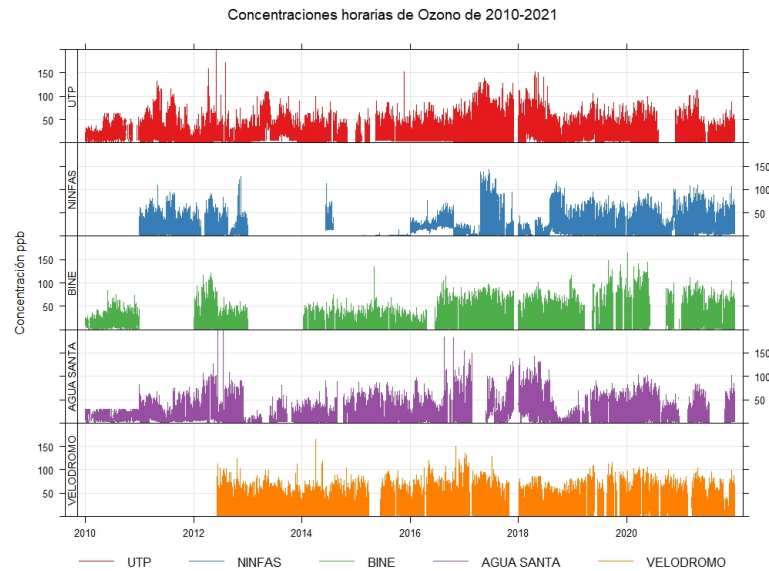


Figura 2.10

En la gráfica de la figura 2.11 podemos observar los días en que las concentraciones de los contaminantes superan los valores límites establecidos, por año y por estación.

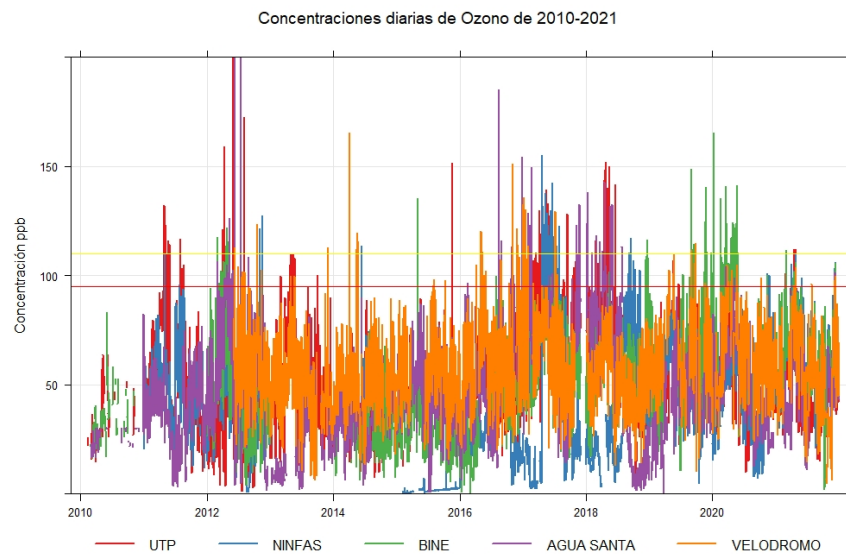


Figura 2.11

CAPÍTULO 2 EVALUACIÓN NORMATIVA.

2.4. OZONO

Para el caso de O_3 de acuerdo a nuestros resultados se observa, como es que los días de mala calidad del aire muestran un incremento del 2016 al 2020 comparado con el periodo de 2010-2015 que cuenta con pocos días fuera de norma.

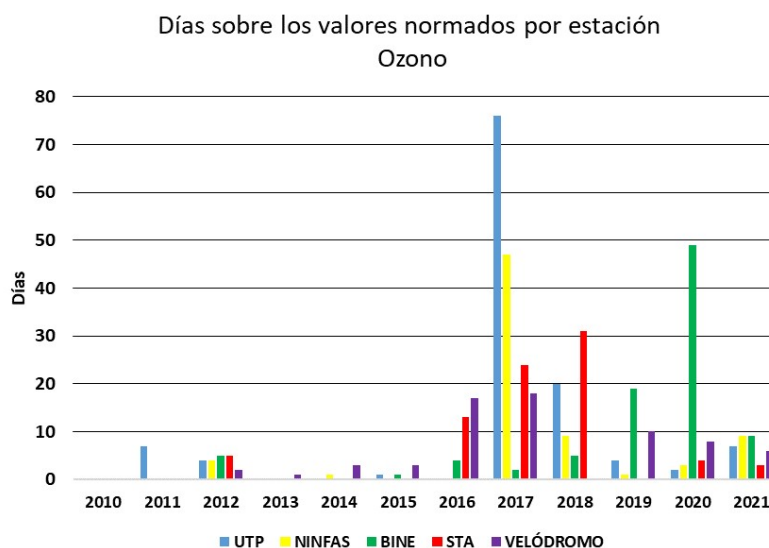


Figura 2.12

Sin embargo la gráfica 2.12 no nos presenta un panorama completo debido a la falta de datos que se tiene por ello en la gráfica 2.13 se presentan en porcentaje los días que no se pudieron evaluar para cada año y estación, notamos que del 2010-2014 hay mayor insuficiencia de información.

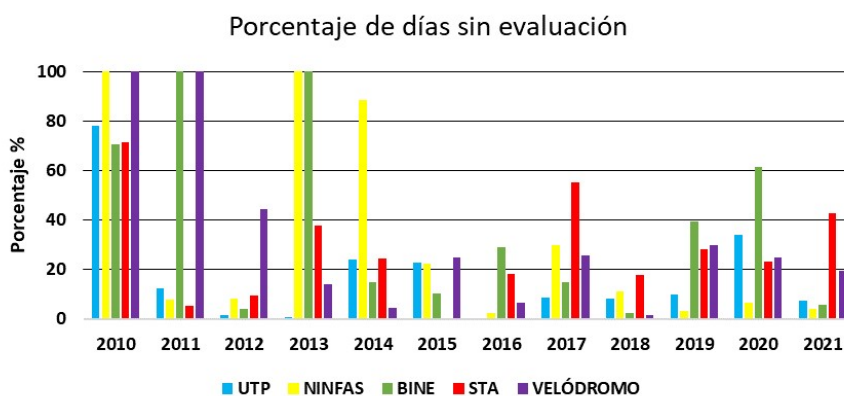


Figura 2.13

2.5. Monóxido de Carbono

El monóxido de carbono es el contaminante más abundante en la capa inferior de la atmósfera y, su origen antropogénico es debido a la combustión incompleta de materias orgánicas (gas, carbón, madera, etc.), en especial los carburantes de los automóviles. Al oxidarse en la atmósfera genera dióxido de carbono (CO_2). Algunos procesos naturales en los que se produce son los incendios forestales y emisión de los procesos naturales que se llevan a cabo en los océanos. [16]

Normatividad

La Norma Oficial Mexicana NOM-021-SSA1-1993 establece el valor permisible para la concentración de monóxido de carbono en el aire ambiente.

La concentración de monóxido de carbono, como contaminante atmosférico, no debe rebasar el valor permisible de 11.00 ppm en promedio móvil de ocho horas una vez al año.

La siguiente gráfica de la figura 2.14 muestra los promedios móviles de 8 horas del 2010 al 2021, notandose que en ninguna estación de monitoreo el valor límite es superado.

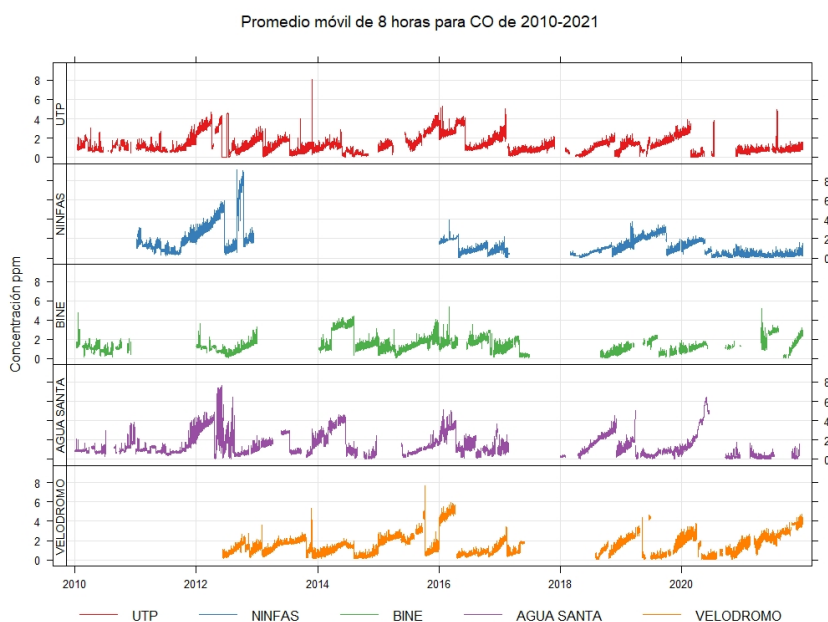


Figura 2.14

2.6. Dióxido de Nitrógeno

Los óxidos de nitrógeno, NO y NO_2 son causantes del smog fotoquímico. Los NO_x se forman como resultado de la quema a altas temperaturas de combustible fósiles como petróleo, carbón o gas natural y/o cuando este contiene compuestos nitrogenados. Las principales fuentes antropogénicas de NO_x , son los vehículos, plantas de electricidad, fuentes industriales, comerciales y residenciales que realizan quema de combustibles fósiles. [17]

Normatividad

La Norma Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-1993 establece el valor permisible para la concentración de dióxido de nitrógeno en el aire ambiente.

1. La concentración de dióxido de nitrógeno, como contaminante atmosférico, no debe rebasar el límite máximo normado de 0.21 ppm(210 ppb) en una hora una vez al año.

En la figura 2.15 podemos apreciar que la Norma se cumple y las concentraciones se encuentran por debajo de los límites establecidos.

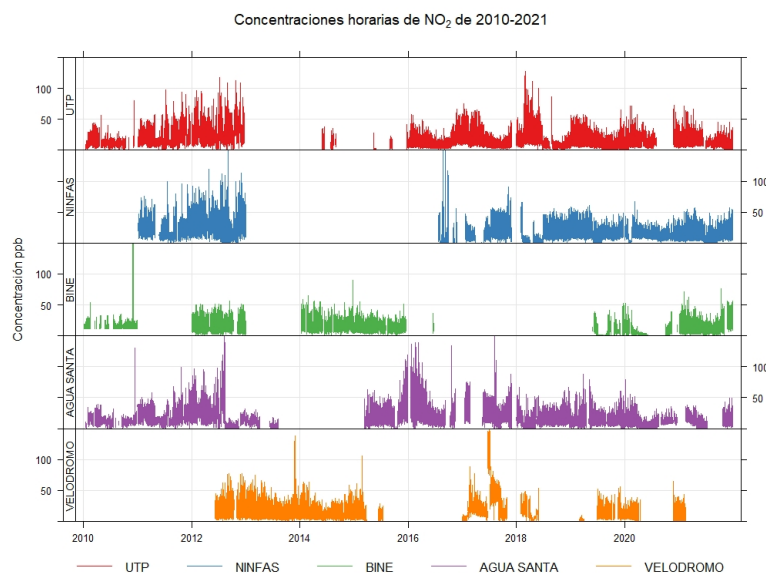


Figura 2.15

2.7. Dióxido de Azufre

El dióxido de azufre se genera de fuentes naturales como de la combustión de compuestos ricos en azufre, erupciones volcánicas y la actividad geotérmica que libera grandes cantidades de dióxido de azufre, conjuntamente con cantidades en menor proporción de trióxido de azufre, azufre elemental, sulfuro de hidrógeno y sulfatos en forma de partículas.

De fuentes antropogénicas proviene de la quema de combustibles que contienen azufre tales como carbón y petróleo, en la producción de ácido sulfúrico o cuando los metales son extraídos de las menas de algunos minerales como el aluminio, cobre, zinc, hierro y plomo.

Se señala desde hace décadas al dióxido de azufre (SO_2) y a los óxidos de nitrógeno (NO_x) como responsables en buena medida de las lluvias ácidas y de la contaminación del aire que afectan a las zonas urbanas e industriales. Recientemente, se han reconocido a las emisiones de SO_2 por su contribución a la formación de aerosoles inorgánicos secundarios, partículas finas que son perjudiciales para la salud humana. [18]

Normatividad

La Norma Oficial Mexicana **NOM-022-SSA1-2010** establece los valores límites permisibles de concentración de dióxido de azufre (SO_2) en el aire ambiente.

1. La concentración de dióxido de azufre como contaminante atmosférico no debe rebasar el límite máximo normado de 0.110 ppm (110 ppb) promedio en 24 horas, una vez al año, para protección a la salud de la población.

2. La concentración de dióxido de azufre como contaminante atmosférico no debe rebasar el límite máximo normado de 0.025 ppm (25 ppb) promedio anual, para protección a la salud de la población.

CAPÍTULO 2 EVALUACIÓN NORMATIVA.

2.7. DIÓXIDO DE AZUFRE

La gráfica de la figura 2.16 muestra los promedios de 24 horas del 2010 al 2021, notandose que en ninguna estación de monitoreo el valor límite es superado. Sin embargo se observa que 2013 se presentó un suceso atípico que generó un incremento considerable en las concentraciones de SO_2 en las estaciones UTP, Ninfas y Agua Santa.

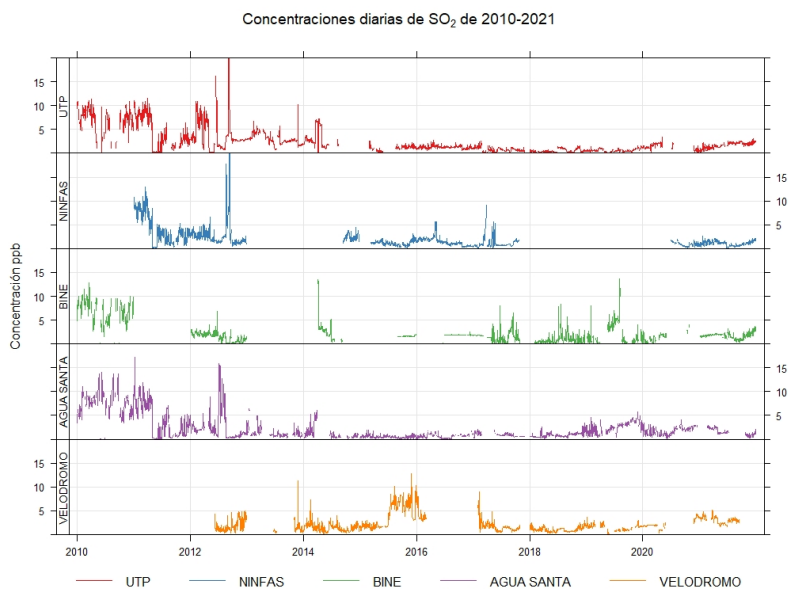


Figura 2.16

En la figura 2.17 muestra de manera gráfica el segundo criterio de evaluación de la norma, notando que en ninguna estación se incumple.

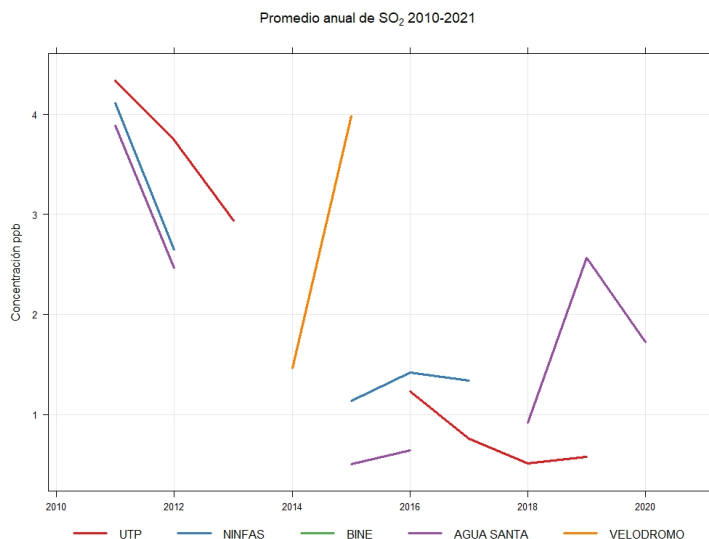


Figura 2.17

Capítulo 3

Resultados y análisis

3.1. Análisis de datos de PM-2.5

Una de las estaciones que presenta problemas de contaminación por partículas es AGUA SANTA en la gráfica de la figura 3.1 se observa como del 2010 al 2013 las concentraciones aumentan después disminuyen hasta el 2016, los siguientes años presentan una tendencia de crecimiento. El porcentaje de datos obtenidos dentro de los 12 años es de: 65.97 %

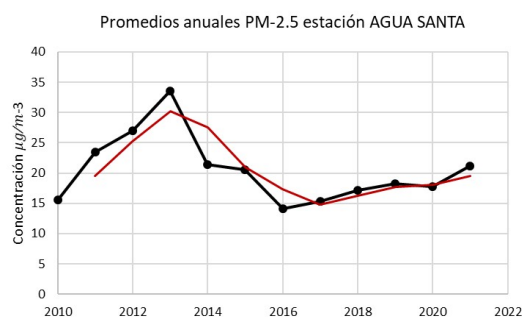


Figura 3.1

La figura 3.2 presenta una gráfica analizando el comportamiento del contaminante durante el día, la semana y a lo largo del año. La primera gráfica nos permite observar en que días se producen las principales concentraciones de PM-2.5 y la distribución en horas del día, dando un patrón detallado de la evolución horaria de las concentraciones, de esta primera podemos decir que de las 8:00-11:00 hrs. se presenta un crecimiento de concentración de PM-2.5, lo mismo sucede de 18:00-22:00 pero de manera más suavizada. La gráfica donde se establece la evolución en concentraciones horarias podemos observar que el pico más alto se

CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1. ANÁLISIS DE DATOS DE PM-2.5

da entre 8:00 y 11:00 horas. La gráfica donde se muestra la evolución del PM-2.5 en función de los meses del año, vemos de junio a octubre una disminución de las concentraciones esto es debido a la temporada de lluvias. Finalmente logramos observar que la estación BINE presenta las concentraciones más elevadas siguiendole AGUA SANTA, NINFAS y UTP.

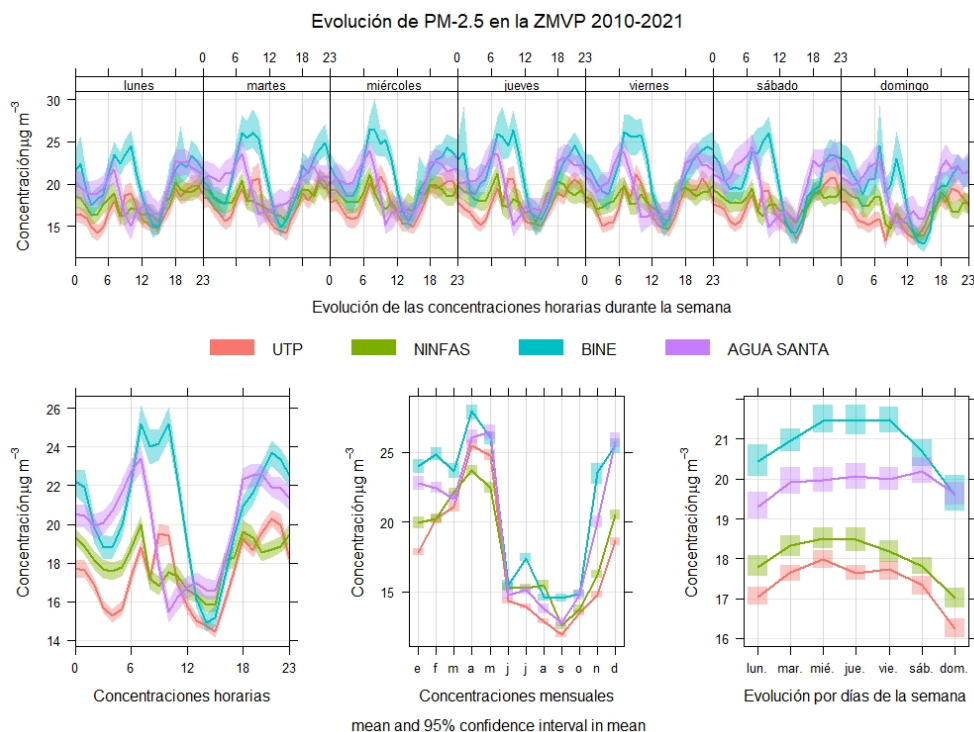


Figura 3.2: Gráfica resumen de las concentraciones de los promedios mensual, semanal y horaria.

En la tabla siguiente se muestra información estadística general, podemos observar el total de datos obtenidos, el porcentaje, la media, la varianza, la desviación estándar y el ancho de banda.

Estación	Total de datos	Porcentaje	Media $\bar{x}$	Varianza σ^2	Desviación Estándar σ	Bandwidth
UTP	90048	85.60%	17.38	169.12	13.00	0.99
NINFAS	71044	67.53%	18.02	185.54	13.62	1.07
BINE	57072	54.45%	20.87	311.32	17.64	1.30
AGUA SANTA	69404	65.97%	19.88	291.32	17.07	1.44
VELODROMO	16056	12.26%	39.96	1386.41	37.23	3.49

Notamos que la estación BINE y AGUA SANTA, presentan información parecida entre

CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1. ANÁLISIS DE DATOS DE PM-2.5

sí, a demás de ser estas las que presentan las concentraciones más elevadas después de VELODROMO.

La siguiente gráfica de podemos visualizar la distribución de datos de acuerdo al valor de la concentración, se tiene que para primeras 4 estaciones el ancho de banda es pequeño lo que nos indica poca dispersión de datos, en el caso de Velodrómo tiene un ancho de banda mayor que refleja una mayor dispersión de datos de la media.

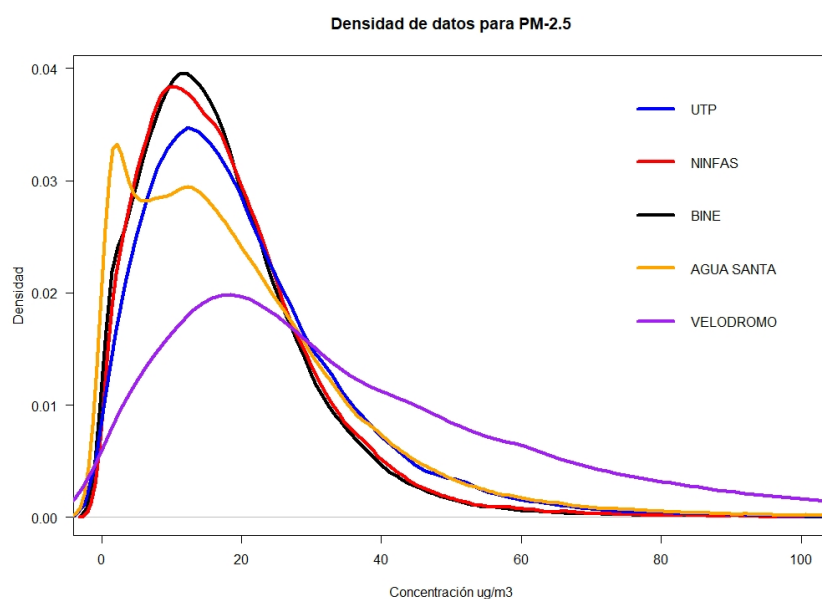


Figura 3.3

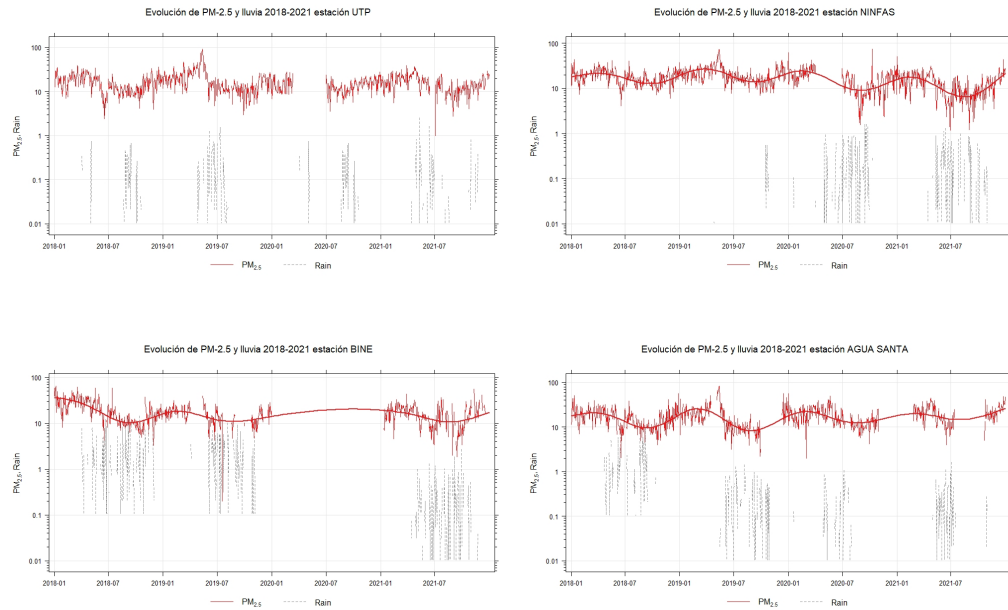
3.1.1. PM-2.5 y lluvia.

Durante la temporada de lluvias las partículas tienden a sedimentarse como consecuencia permanecen poco tiempo suspendidas en el aire lo que se refleja con la disminución de la contaminación. Las siguientes gráficas a escala logarítmica presentan los promedios diarios de los datos obtenidos en cada estación de monitoreo junto con los datos de lluvia con lo cual podemos observar que efectivamente durante la temporada de lluvias la contaminación que proveniente de las partículas disminuye.

Para la estación Velodrómo, no contamos con información de PM-2.5 para los años 2018-2021

CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1. ANÁLISIS DE DATOS DE PM-2.5



3.1.2. Dispersión de PM-2.5

Para conocer el comportamiento y dispersión de PM-2.5 alrededor de la zona de donde se encuentra ubicada la estación de monitoreo, se realizó un modelo para cada estación con el sistema R-STUDIO usando la función polarAnnulus que nos permite representar de acuerdo a la dirección del viento las mayores concentraciones alcanzadas del contaminante en función de las estaciones del año, adicionalmente la hora en que estas se producen.

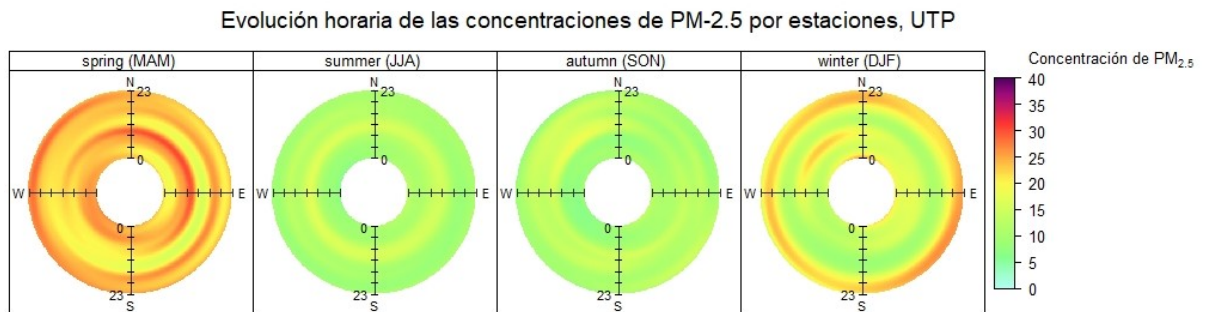


Figura 3.6

CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1. ANÁLISIS DE DATOS DE PM-2.5

Evolución horaria de las concentraciones de PM-2.5 por estaciones, NINFAS

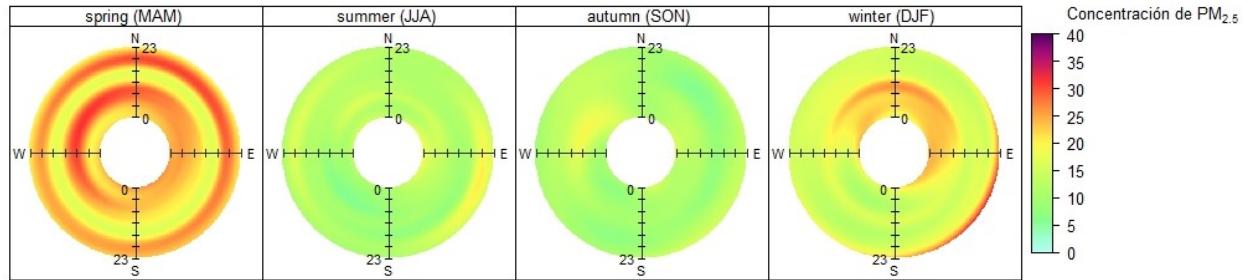


Figura 3.7

Evolución horaria de las concentraciones de PM-2.5 por estaciones, BINE

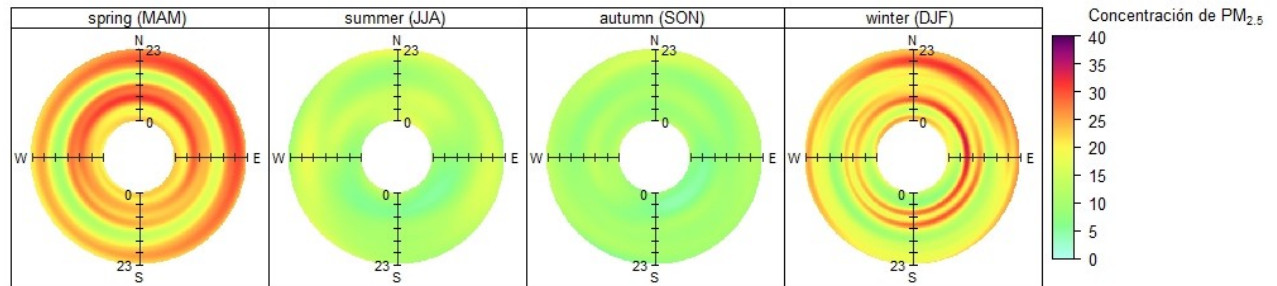


Figura 3.8

Evolución horaria de las concentraciones de PM-2.5 por estaciones, AGUA SANTA

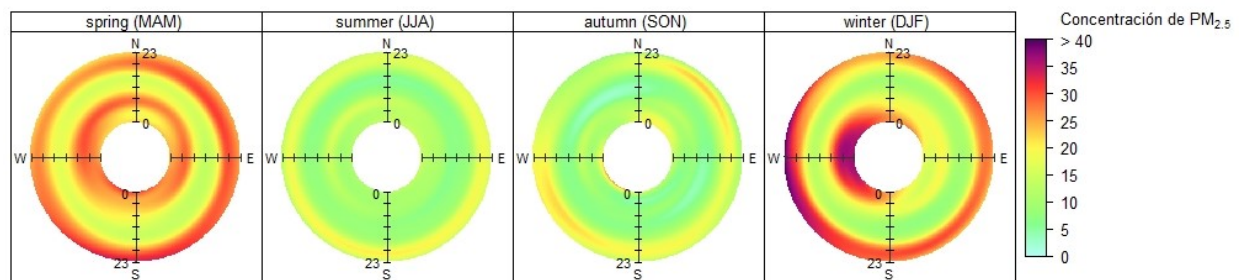


Figura 3.9

Los modelos anteriores fueron contruidos con datos del 2018 al 2021, muestran que durante invierno y primavera se presentan las concentraciones más altas de partículas, esto es debido a que esta es una temporada seca-fría y las partículas tienden a mantenerse más dispersas en el aire, durante el verano y el otoño estas tienden a sedimentarse en el suelo debido a la temporada de lluvias.

3.2. Análisis de datos para PM-10

La gráfica que se muestra en la figura 3.10 presenta una linea de tendencia en crecimiento de los promedios anuales de PM-10, la estación UTP tiene el mayor porcentaje de información obtenido de todas las estaciones, teniendo así el 84.87 % del 2010-2021.

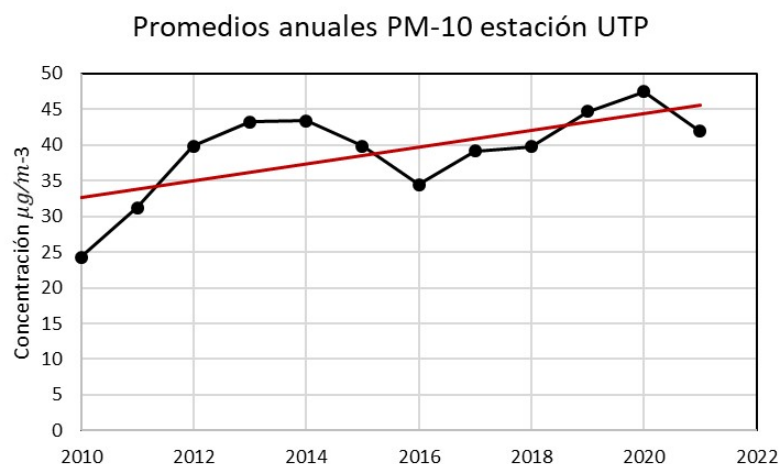


Figura 3.10

En la figura 3.11 se analiza la evolución de PM-10 a lo largo de la semana, de manera horaria y mensual. Esta gráfica nos permite localizar en que horas, días y meses las concentraciones de PM-10 se encuentran en su punto más alto. Se observa que las concentraciones más elevadas se dan entre las 7:00 y 11:00 horas, de lunes a sábado las concentraciones son semejantes, sólo el domingo disminuyen y de diciembre a junio se encuentran más elevadas y estas bajan en el periodo de lluvias.

De las 5 estaciones analizadas NINFAS presenta las concentraciones más elevadas con respecto a las demás.

CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.2. ANÁLISIS DE DATOS PARA PM-10

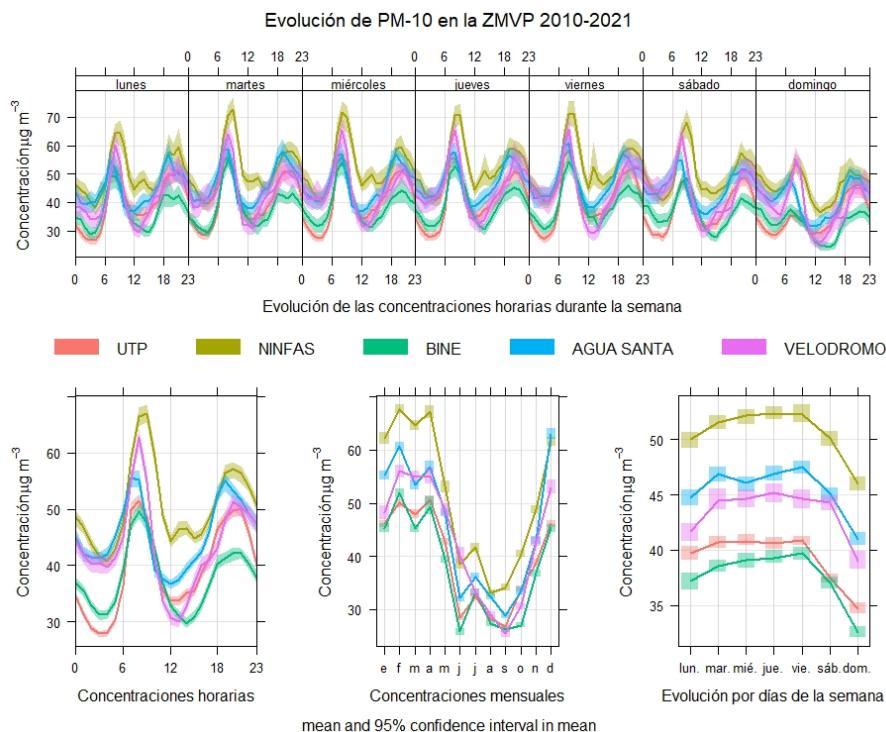


Figura 3.11

En la siguiente tabla encontramos la cantidad de datos obtenidos durante el periodo de tiempo analizado, porcentaje, media, varianza, desviación estándar y el ancho de banda.

Estación	Total de datos	Porcentaje	Media $\bar{x}$	Varianza σ^2	Desviación Estándar σ	Bandwith
UTP	89280	84.87%	39.27	948.25	30.79	2.19
NINFAS	74914	71.21%	50.62	1468.07	38.32	2.96
BINE	66409	63.13%	37.64	900.58	30.01	2.12
AGUA SANTA	76463	72.68%	45.5	1271.60	35.66	2.80
VELODROMO	53151	50.52%	43.43	1416.18	37.63	2.86

Figura 3.12

Se tiene que NINFAS presenta la media más elevada y una desviación estándar mayor a las demás estaciones, lo cual concuerda con las gráficas anteriormente mostradas en que NINFAS tiene las concentraciones mayores.

La gráfica 3.13 de distribución de probabilidad para PM-10 de las 5 estaciones, muestra un ancho de banda similar entre las estaciones: UTP, BINE, AGUA SANTA y VELODROMO, para la estación NINFAS se tiene un ancho de banda ligeramente más grande lo cual con cuerda con la información anterior el tener concentraciones más elevadas en mayor

CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.2. ANÁLISIS DE DATOS PARA PM-10

porcentaje, esto se ve reflejado en la dispersión de datos.

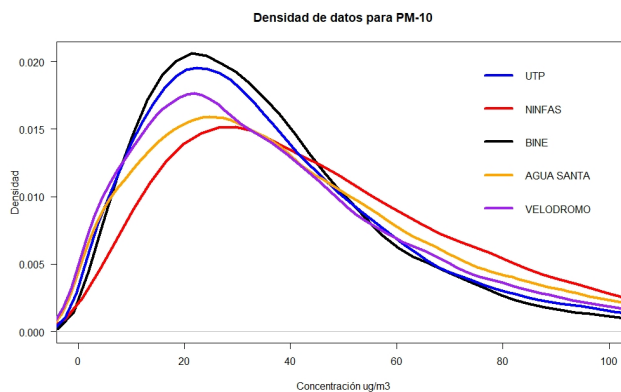


Figura 3.13

3.2.1. PM-10 y lluvia

Como lo habíamos mencionado anteriormente, las partículas tienden a sedimentarse con la temporada de lluvias lo cual hace que disminuya la contaminación. Las siguientes gráficas a escala logarítmica presentan los promedios diarios de los datos obtenidos en cada estación de monitoreo durante 2018-2021 junto con los datos obtenidos de lluvia.

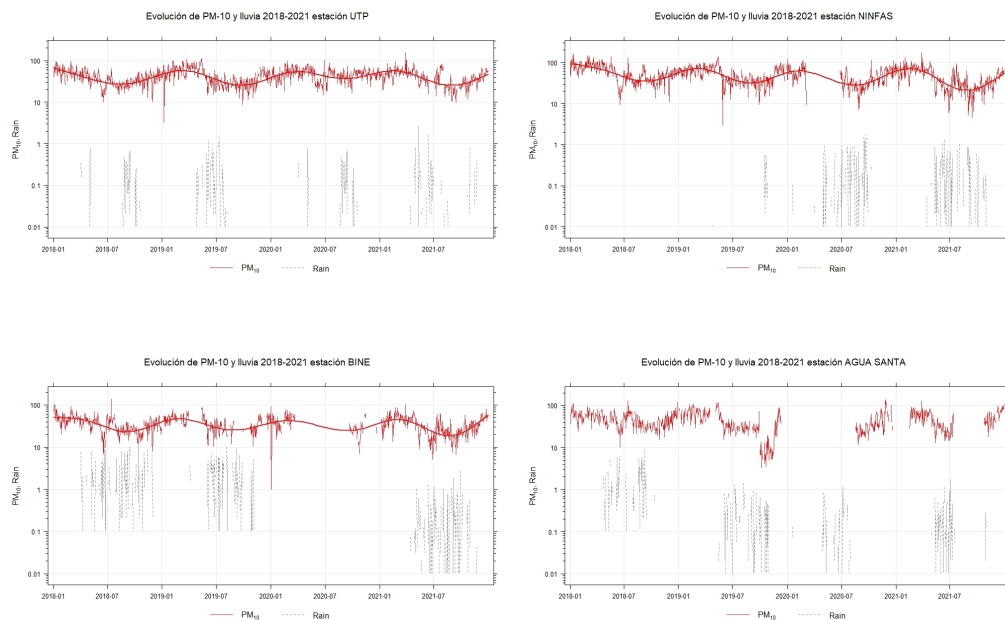


Figura 3.15

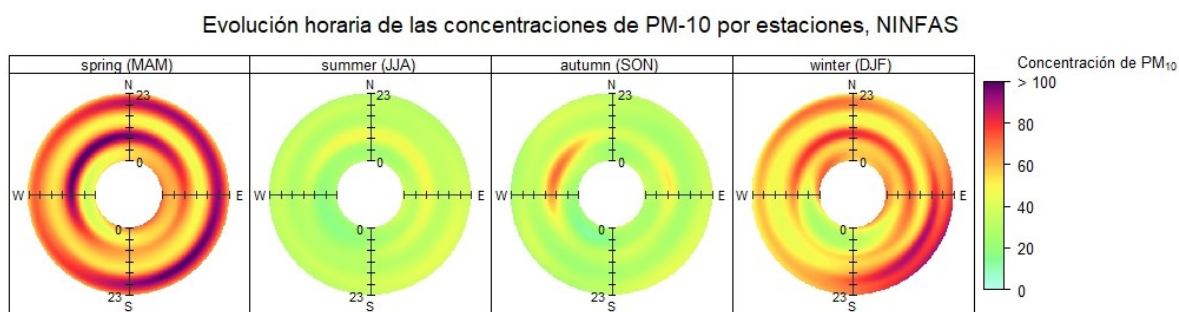
3.2.2. Dispersión de PM-10

Los siguientes modelos representan de acuerdo a la dirección del viento las mayores concentraciones alcanzadas de PM-10 en función de las divisiones temporales adicionalmente la hora en que estas se producen. Muestran que durante invierno y primavera se presentan las concentraciones más altas de partículas, esto es debido a que esta es una temporada seca-fría y las partículas tienden a mantenerse más tiempo en el aire ambiente, durante el verano y el otoño estas tienden a sedimentarse en el suelo debido a las lluvias.

De las 5 estaciones se tiene que en la estación NINFAS durante la temporada seca fría se presentan las concentraciones más altas entre las 8am-12pm y de 8pm a 12am.



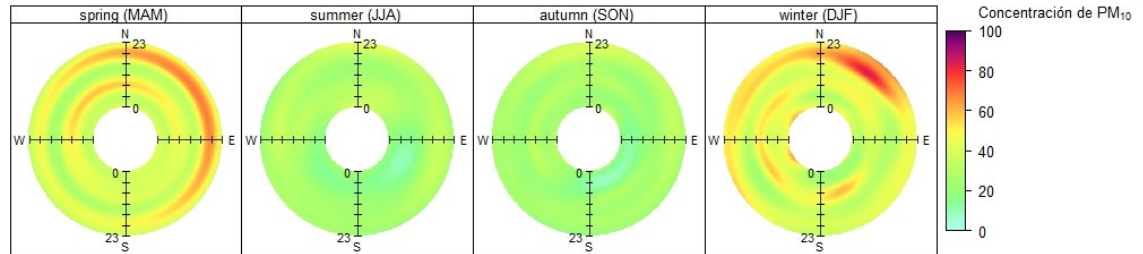
Figura 3.16



CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.2. ANÁLISIS DE DATOS PARA PM-10

Evolución horaria de las concentraciones de PM-10 por estaciones, BINE



Evolución horaria de las concentraciones de PM-10 por estaciones, AGUA SANTA

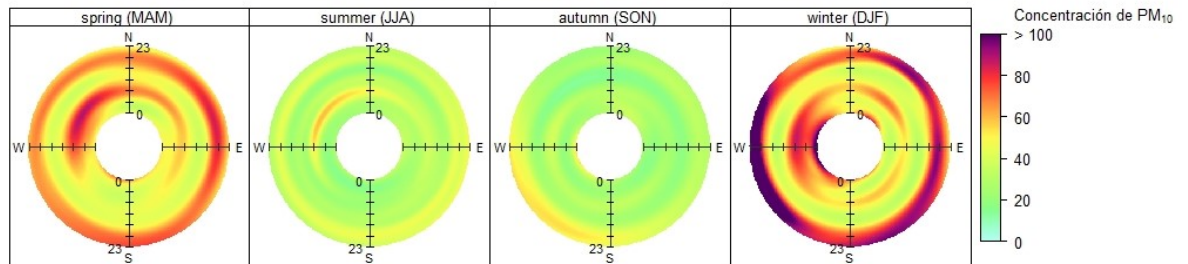


Figura 3.17

Evolución horaria de las concentraciones de PM-10 por estaciones, VELODROMO

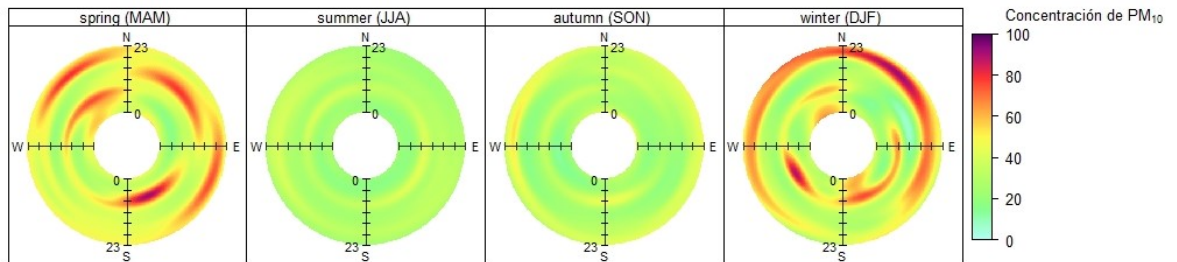
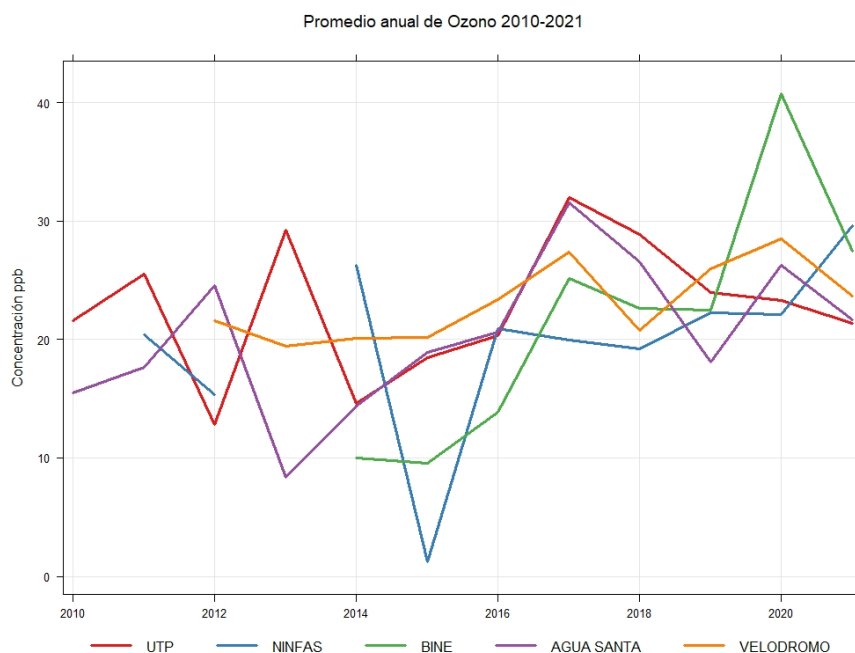


Figura 3.18

3.3. Análisis de datos para ozono

La siguiente gráfica muestra los promedios anuales de ozono en las 5 estaciones, se observa de manera evidente que los niveles de concentración están aumentando, los porcentajes de información eficiente se encuentran entre el 65 % y el 85 %



La figura 3.19 nos permite visualizar el comportamiento del contaminante ozono, la gráfica que muestra la evolución por días de la semana tiene un comportamiento periódico, todos los días se repite, durante el día este alcanza punto más alto a partir del medio día después de este comienza a descender. Esto concuerda con la formación de O_3 a través de la luz solar. A lo largo del año O_3 alcanza las concentraciones más altas en primavera. Las estaciones UTP y VELODROMO presentan en promedio las concentraciones más elevadas con respecto a las demás.

CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.3. ANÁLISIS DE DATOS PARA OZONO

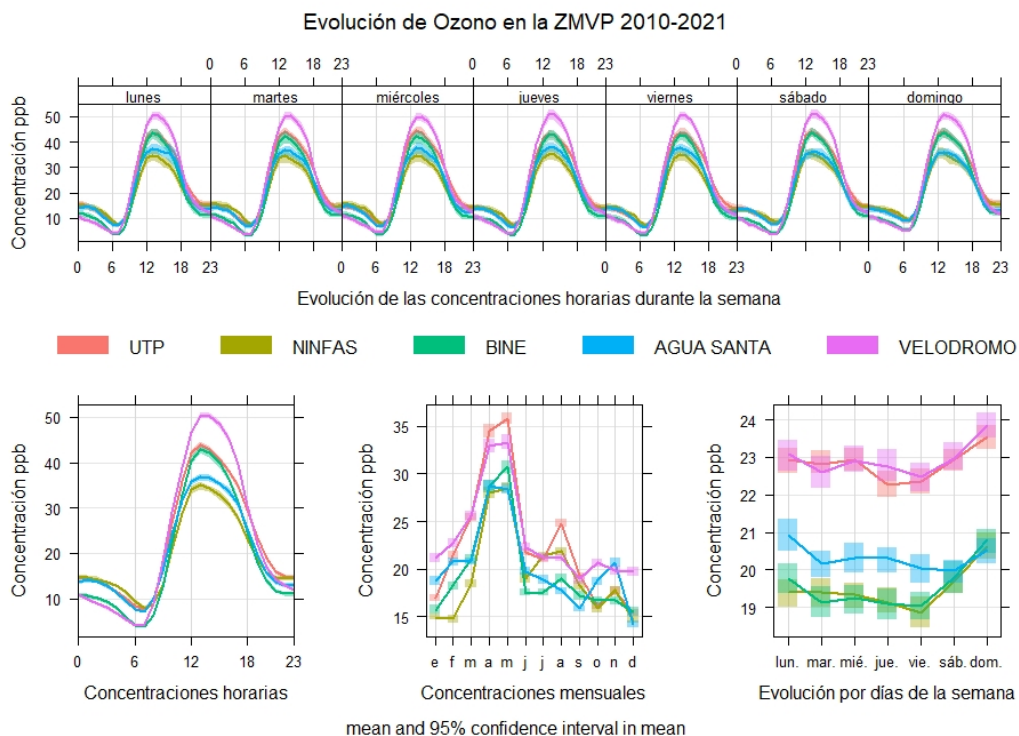


Figura 3.19

En la siguiente tabla se presentan medidas estadísticas, se tiene que el promedio y el ancho de banda más elevados están en las estaciones UTP y VELODROMO.

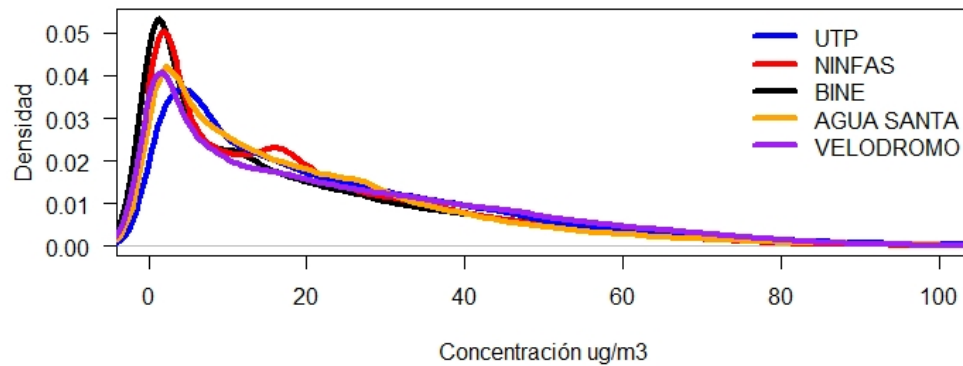
Estación	Total de datos	Porcentaje	Media $\bar{x}$	Varianza σ^2	Desviación Estándar σ	Bandwidth
UTP	90369	85.91%	22.83	426.66	20.66	1.87
NINFAS	72490	68.91%	19.49	356.77	18.89	1.79
BINE	69213	65.79%	19.55	430.78	20.76	1.95
AGUA SANTA	80953	76.95%	20.32	403.45	20.09	1.70
VELODROMO	72198	68.63%	22.95	448.29	21.17	2.03

La gráfica de la función de densidad para ozono nos muestran que en la estación VELODROMO se encuentran las concentraciones mayores y más dispersas de la media.

CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.3. ANÁLISIS DE DATOS PARA OZONO

Densidad de datos para Ozono



3.3.1. Ozono y temperatura.

Las gráficas siguientes muestran la relación que existe entre las concentraciones de ozono y el incremento de temperatura.

Se aprecia como las concentraciones de O_3 aumentan al incrementar la temperatura, las curvas de ajuste en general son similares.



CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.3. ANÁLISIS DE DATOS PARA OZONO

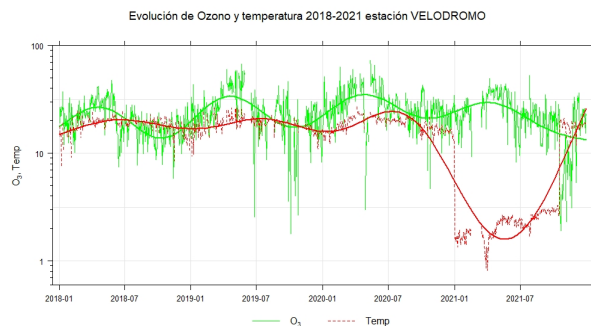


Figura 3.22

3.3.2. Dispersión de Ozono

Los modelos de la función polarAnnulus para ozono nos permite ver de acuerdo a la dirección del viento las mayores concentraciones alcanzadas del contaminante en función de las divisiones temporales y adicionalmente la hora en que estas se producen.

Evidentemente podemos ver en las cinco estaciones círculos concéntricos alrededor de las 12:00 y 18:00 horas, lo que nos indica que dentro de ese horario se presentan las mayores concentraciones del contaminante, durante el año estas se dan en primavera. Las concentraciones de ozono durante la noche y el amanecer a lo largo del año en promedio presentan valores menores a 20 ppb.

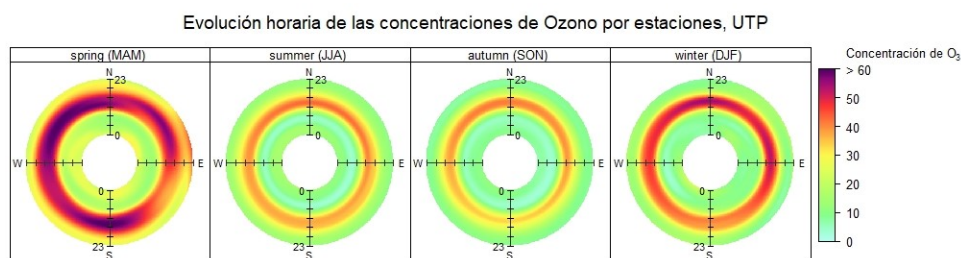


Figura 3.23



Figura 3.24

CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.3. ANÁLISIS DE DATOS PARA OZONO

Evolución horaria de las concentraciones de Ozono por estaciones, BINE

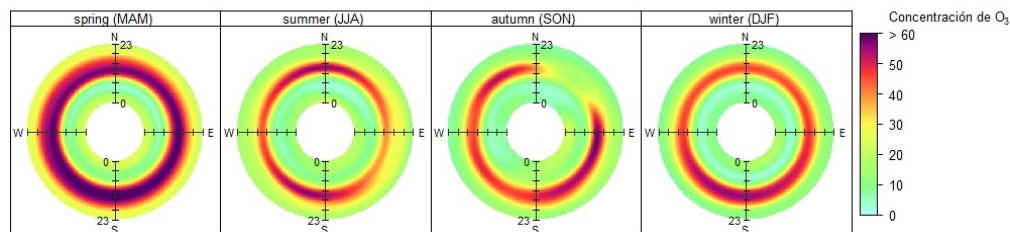


Figura 3.25

Evolución horaria de las concentraciones de Ozono por estaciones, AGUA SANTA

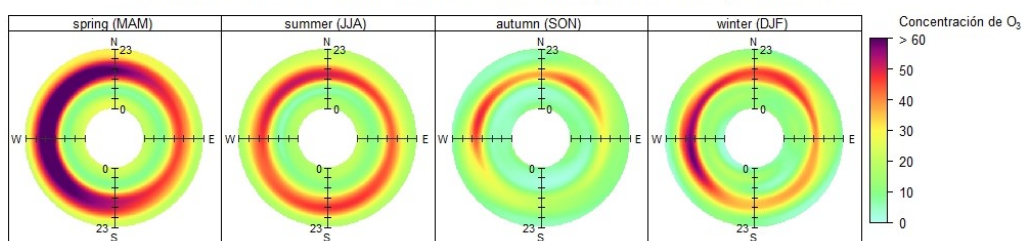
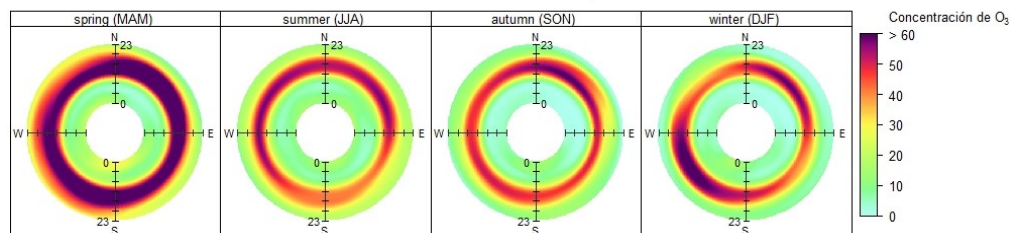


Figura 3.26

Evolución horaria de las concentraciones de Ozono por estaciones, VELODROMO

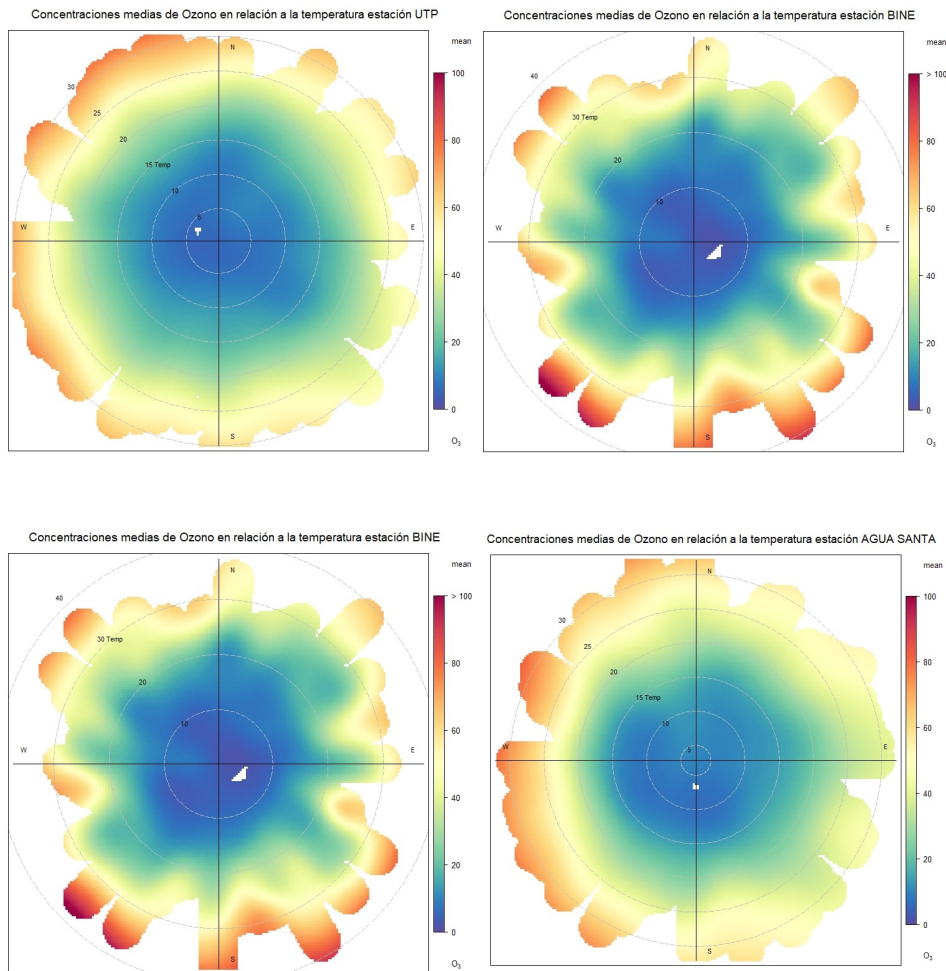


R-STUDIO contiene funciones como `polarplot` que nos permiten hacer modelos en donde se encuentren representadas las concentraciones del contaminante en relación al incremento de temperatura y adicionalmente a la dirección del viento.

Los siguientes gráficos de dispersión para cada estación muestran el comportamiento promedio de ozono, estos fueron realizados con los datos obtenidos durante 2018-2021, observamos que con el aumento de la temperatura las concentraciones de ozono aumentan, como lo habíamos visto en las gráficas anteriores.

CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.3. ANÁLISIS DE DATOS PARA OZONO



3.4. Análisis de datos para CO

La gráfica resumen para el monóxido de carbono nos permite ver el comportamiento a lo largo de los días de la semana que presenta este contaminante, notamos que el día domingo hay una considerable disminución de CO en todas las estaciones, también visualizamos las horas del día en que las concentraciones aumentan a lo largo del día que son de 6am a 6pm, es decir en las horas con actividades laborales de la mayor parte de la población.

La estaciones AGUA SANTA y NINFAS son las que se encuentran con valores promedios más elevados con respecto a las demás estaciones. A lo largo del año se nota que al igual que en los otros contaminantes la temporada de lluvia favorece a la disminución de la contaminación de CO.

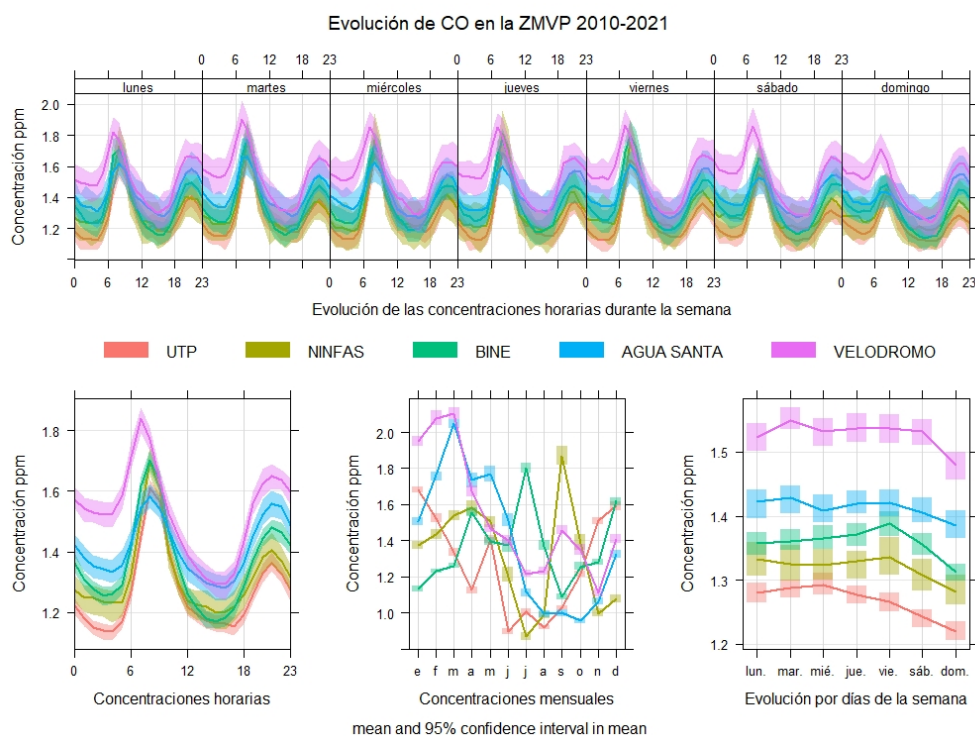


Figura 3.29

CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.4. ANÁLISIS DE DATOS PARA CO

Las medidas estadísticas que describen los datos obtenidos en este periodo de análisis se encuentran en la siguiente tabla.

Estación	Total de datos	Porcentaje	Media $\bar{x}$	Varianza σ^2	Desviación Estándar σ	Bandwidth
UTP	87628	83.30%	1.267	0.81	0.90	0.06
NINFAS	57920	55.06%	1.32	1.65	1.28	0.10
BINE	57472	54.63%	1.36	0.67	0.82	0.06
AGUA SANTA	72638	69.05%	1.41	1.43	1.20	0.09
VELODROMO	65708	62.46%	1.53	1.20	1.10	0.10

Figura 3.30

La figur 3.34 muestra las gráficas de funciones de densidad con las concentraciones horarias para las 5 estaciones de monitoreo de la ZMVP, de manera general las estaciones presentan un ancho de banda muy pequeño, lo cual nos dice que los datos obtenidos no se encuentran tan dispersos de la media y como podemos ver las concentraciones se encuentran entre 0 y 4 ppm.

La estación NINFAS es la que presenta un ancho de banda ligeramente mayor que las demás y presenta los niveles de contaminación más elevados de la ZMVP.

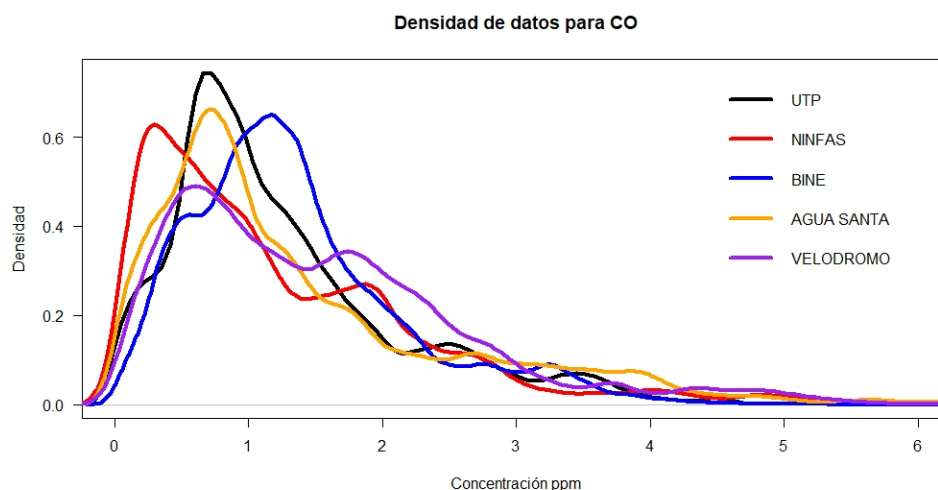


Figura 3.31

3.5. Análisis de datos para NO_2

La gráfica 3.35 para el dióxido de nitrógeno nos muestra el comportamiento de este a lo largo de la semana, mostrando que de lunes a sábado presenta comportamiento similar donde las horas del día que este incrementa que son de 6am a 12pm y de 6pm a 12am. El día domingo las concentraciones suelen ser más bajas esto debido a la disminución de actividades antropogénicas.

La estación con las concentraciones más elevadas nuevamente es NINFAS.

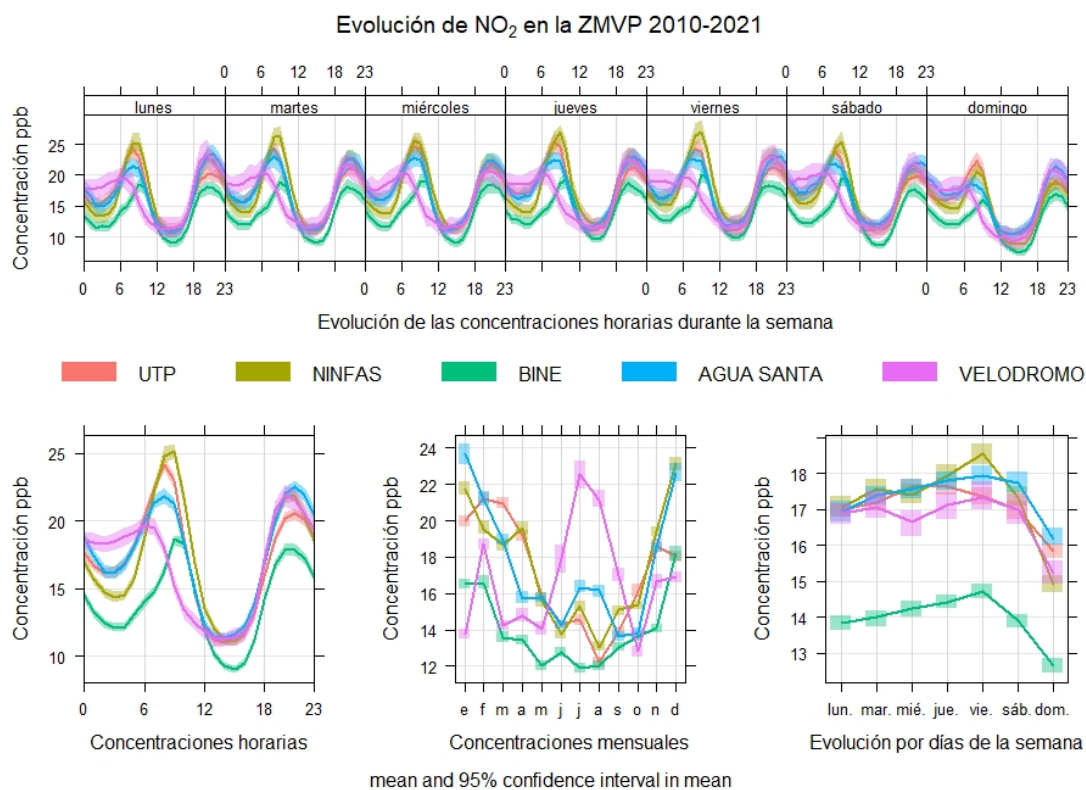


Figura 3.32

CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.5. ANÁLISIS DE DATOS PARA NO_2

La tabla concentra las medidas estadísticas que nos dan información relevante del contaminante en cada estación. Se tiene que en porcentaje de datos obtenidos durante el 2010-2021 ninguna estación llega al 70 % de información recolectada.

Estación	Total de datos	Porcentaje	Media $\bar{x}$	Varianza σ^2	Desviación Estándar σ	Bandwith
UTP	70352	66.88%	17.09	151.31	12.30	0.96
NINFAS	56192	53.42%	17.25	160.87	12.68	1.13
BINE	42675	40.56%	13.96	73.81	8.59	0.86
AGUA SANTA	68739	65.35%	17.37	187.83	13.71	1.02
VELODROMO	41619	39.56%	16.75	204.96	14.32	1.09

Figura 3.33

La gráfica de la función densidad muestra el ancho de banda para cada estación, notando que los más grandes están en NINFAS y AGUA SANTA, a pesar de que no rebazan los límites establecidos a la norma, estas estaciones ocasionalmente han presentado valores mayores a 150 ppb.

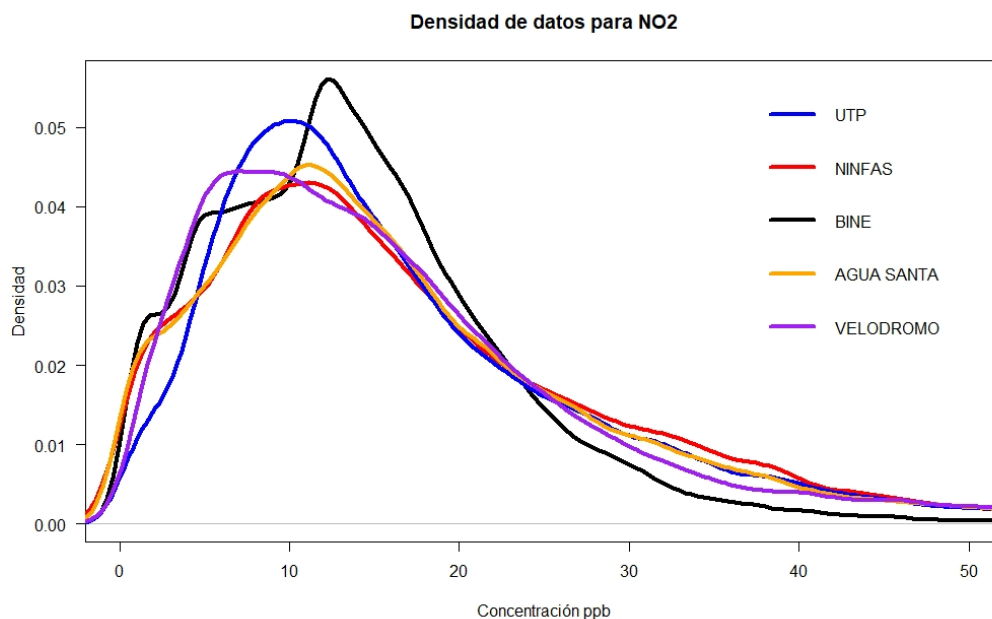


Figura 3.34

3.6. Análisis de datos para SO_2

La gráfica resumen para el Dióxido de Azufre nos permite ver un comportamiento para este contaminante, además de visualizar las horas del día que este incrementa que son de 6am a 12pm, es decir en las horas con actividades laborales de la mayor parte de la población.

La estación UTP se encuentran con valores promedios más elevados con respecto a las demás estaciones, durante el año se nota que al igual que en los otros contaminantes la temporada de lluvia favorece a la disminución de la contaminación de SO_2 .

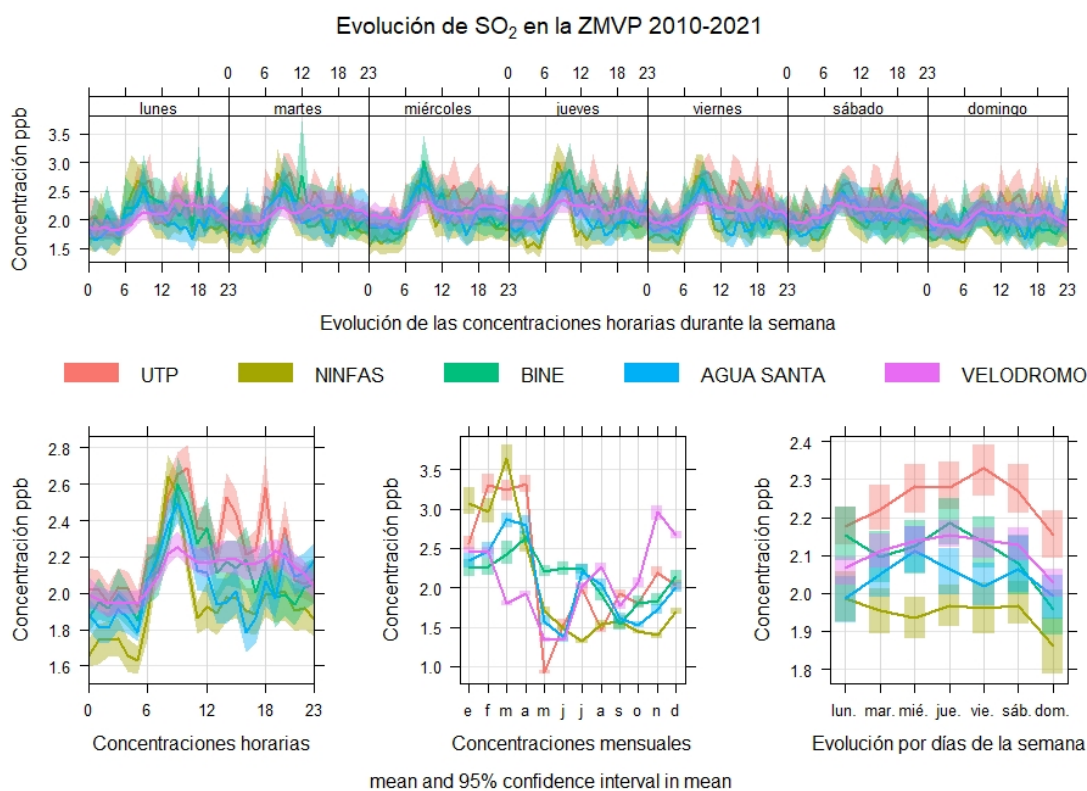


Figura 3.35

CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.6. ANÁLISIS DE DATOS PARA SO_2

Las medidas de análisis estadístico se muestran a continuación. Se tiene que para las estaciones NINFAS, BINE y VELODROMO una obtención de datos de poco más del 50 %, lo cual nos hace ver la falta de monitoreo para este contaminante.

Estación	Total de datos	Porcentaje	Media $\bar{x}$	Varianza σ^2	Desviación Estándar σ	Bandwidth
UTP	82960	78.65%	2.24	13.14	3.62	0.13
NINFAS	54341	51.65%	1.95	9.00	3.00	0.11
BINE	53877	51.21%	2.1	10.55	3.25	0.13
AGUA SANTA	81413	77.39%	2.04	11.06	3.33	0.12
VELODROMO	55062	52.34%	2.11	3.41	1.85	0.12

Figura 3.36

En la gráfica de la función de densidad para las 5 estaciones, se muestra que UTP y BINE presentan los anchos de banda más grandes, se llegan a presentar concentraciones entre 80 y 100 ppb que son mayores a las que se generan en las otras estaciones, aunque estas se presentan con menor frecuencia siguen siendo datos representativos por el incremento de las concentraciones contaminantes.

Densidad de datos para SO_2

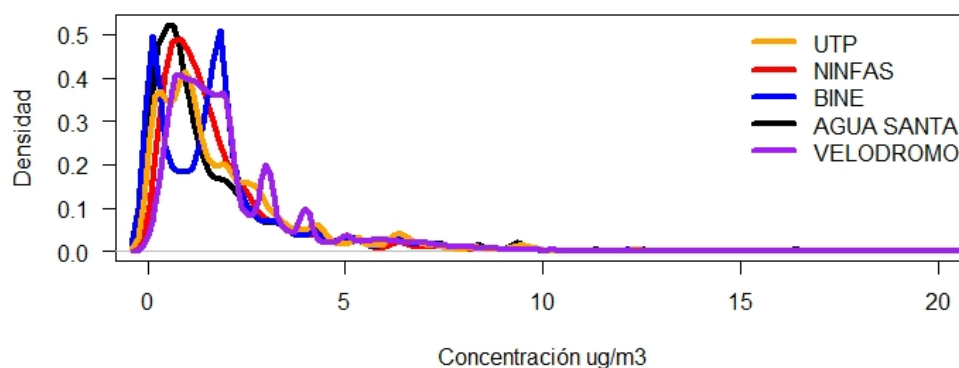


Figura 3.37

3.7. Temperatura

El incremento de temperatura en los últimos 12 años en el Estado de Puebla que se obtiene de acuerdo a los datos publicados por el Servicio Meteorológico Nacional es de 1.4°C hasta el 2021. [19]

En la gráfica se aprecia el comportamiento de la temperatura, se observa un decremento en 2021 pero esto es debido al fenómeno meteorológico de la niña que propicia temperaturas más bajas.

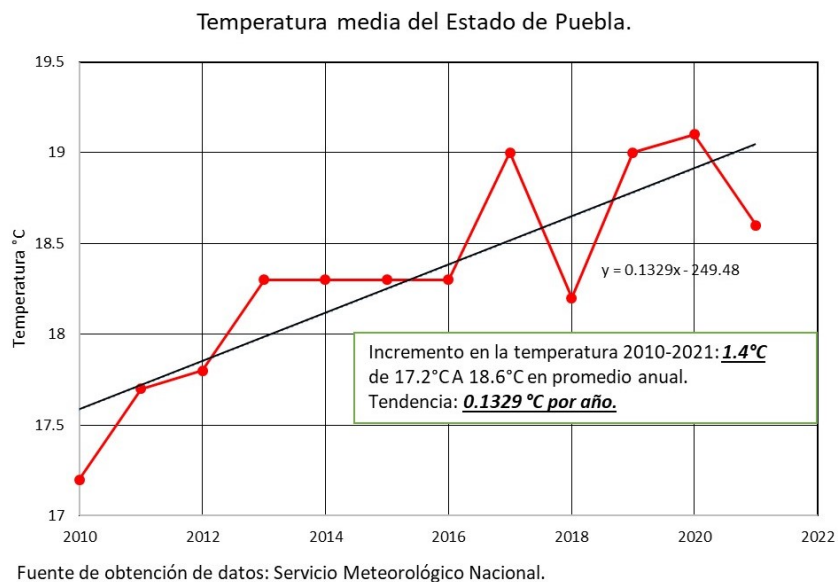


Figura 3.38

Capítulo 4

Conclusiones

De acuerdo a los análisis realizados se tiene que en promedio la estación UTP cuenta con la mayor información recolectada teniendo arriba del 75 % de manera general para todos los contaminantes. Para las demás estaciones regularmente encontramos porcentajes de información por debajo del 75 % lo cual impide obtener un panorama completo de los niveles de concentración de cada uno de los contaminantes.

Las 5 estaciones de monitoreo presentan niveles superiores a los establecidos en las normas para los contaminantes PM-2.5, PM-10 y Ozono, los picos más altos para todos los contaminantes se encuentran durante el desarrollo del día, por la mañanas debido al incremento de partículas, a medio por la generación de Ozono y durante el atardecer nuevamente por partículas.

Es necesario tener un mejor control de monitoreo para que logre obtener datos durante todo el año de manera eficiente, de esta forma se podra alertar en tiempo real a la población para que disminuya el tiempo de exposición a estos contaminantes, a demás de tener una mejor vigilancia en la generación de emisiones por parte de fuentes generadoras de contaminantes.

Los seres humanos somos los únicos responsables del cuidado de nuestro planeta por ende del medio ambiente en el que vivimos, sin embargo existen grandes empresas que generan mucha más contaminación que un ciudadano, es por ello que los gobiernos deben aplicar políticas más rigurosas y que se cumplan antes de que no podamos salvar a la Tierra.

Apéndice A

Dispersión de contaminantes

La ecuación de la difusión para la concentración unidimensional es

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (\text{A.1})$$

Una solución a esta ecuación es la función de Gauss la cual se obtiene introduciendo la transformada de Fourier en $C(x, t)$

$$\tilde{C}(k, t) = \int_{-\infty}^{\infty} dx C(x, t) \exp(ikx) \quad (\text{A.2})$$

$$(\nabla C(x)) = ikC(k) \text{ T. F.} \quad (\text{A.3})$$

$$(\nabla^2 C(x)) = i^2 k^2 C(k) = -k^2 C(k) \text{ T.F.} \quad (\text{A.4})$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} \left(\int_{-\infty}^{\infty} dx C(x, t) \exp(ikx) \right) = D \frac{\partial^2}{\partial x^2} \int_{-\infty}^{\infty} dx C(x, t) \exp(ikx) = \quad (\text{A.5})$$

$$D \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial^2}{\partial x^2} C(x, t) \exp(ikx) \quad (\text{A.6})$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \tilde{C}(k, t) = -Dk^2 \tilde{C}(k, t) \quad (\text{A.7})$$

$$\frac{d\tilde{C}(k, t)}{\tilde{C}(k, t)} = -Dk^2 dt \quad (\text{A.8})$$

$$\int_0^t d \ln \tilde{C}(k, t) = \int_0^t -Dk^2 dt \quad (\text{A.9})$$

$$\ln(k, t) \big|_0^t = -Dk^2 t \implies \ln C(k, t) - \ln C(k, 0) = -Dk^2 t \quad (\text{A.10})$$

APÉNDICE A DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES

Usamos el hecho de que $\tilde{c}(k, 0) = 1$, $C(x, t) = \delta(x)$

$$InC(k, t) = -Dk^2t \quad (A.11)$$

$$\exp(InC(k, t)) = \exp(-Dk^2t) \quad (A.12)$$

$$\tilde{C}(C, t) = \exp(-Dk^2t) \text{ esto en el espacio de Fourier.} \quad (A.13)$$

Tomando la transformada inversa de Fourier al resultado, obtenemos lo siguiente:

$$C(C, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dk e^{-ikx} e^{-Dk^2t} = \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}} \quad (A.14)$$

$$\langle x(t) \rangle, \langle x^2(t) \rangle \quad (A.15)$$

$$C(x, t) = \frac{Q}{2\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(\frac{-x^2}{4Dt}\right) \quad (A.16)$$

$$C(x, t) = \frac{Q}{2\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(\frac{-x^2}{4Dt}\right) \quad (A.17)$$

Es la función de Gauss, Q es la cantidad de partículas liberadas en $t = 0$ el factor $2\sqrt{\pi Dt}$ se elije de tal manera que $C(x, t)$ sea igual a la función de Gauss normalizada.

Sea $\sigma = \sqrt{2Dt}$, $\sigma^2 = 2Dt$, $2\sigma^2 = 4Dt$

Establecemos las condiciones cuando $\sigma \rightarrow \infty$ y $C(x, t) = \delta(x)$ donde $\delta(x)$ es la función delta y el limite cuando $t \rightarrow 0$

$$C(x, t) = \frac{C_O}{\sqrt{2\pi}\sqrt{2Dt}} e^{\frac{-x^2}{2\sigma^2}} = \frac{C_O}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (A.18)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) dx = 1 \text{ función delta.} \quad (A.19)$$

$$\langle x(t) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{C_O}{2\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-x^2}{4Dt}\right) x(t) dx \quad (A.20)$$

APÉNDICE A DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES

$$\int_{-\infty}^{\infty} C(x, t) dx = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{C_O}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{(\frac{-x^2}{2\sigma^2})} dx = \quad (\text{A.21})$$

$$\frac{C_O}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{(\frac{-x^2}{2\sigma^2})} dx = \frac{C_O}{\sigma\sqrt{2\pi}} \sqrt{2\pi\sigma^2} = C_O \quad (\text{A.22})$$

Para el desplazamiento cuadrático medio

$$\langle x(t) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} C(x, t) x^2 dx = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{C_O}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{(\frac{-x^2}{2\sigma^2})} x^2 dx = \quad (\text{A.23})$$

$$\frac{C_O}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} x^2 e^{(\frac{-x^2}{2\sigma^2})} dx = \frac{Q}{(\frac{1}{\sigma^2})^{\frac{3}{2}} \sigma} = \quad (\text{A.24})$$

$$\frac{Q}{\sqrt{\frac{1}{\sigma^6}} \sigma} = \frac{Q}{\sqrt{\frac{1}{\sigma^4}}} = Q\sigma^2 = Q2Dt \quad (\text{A.25})$$

Apéndice B

Días fuera de norma por año y contaminante

Las siguientes tablas muestran de manera histórica los días que los contaminantes superan los valores normados, presentando así el número de días de mala calidad del aire por año y por estación de monitoreo para PM-2.5, PM-10 y Ozono. Los demás contaminantes no presentan niveles fuera de lo establecido en las normas correspondientes.

DIAS SOBRE LOS VALORES NORMADOS POR ESTACIÓN					
PARA PM-2.5					
AÑO	UTP	NINFAS	BINE	STA	VELODROMO
2010	0	0	14	0	0
2011	2	1	0	28	0
2012	2	4	10	54	31
2013	21	0	0	15	171
2014	14	0	1	7	73
2015	1	2	11	7	0
2016	2	3	5	0	0
2017	0	3	34	1	0
2018	0	0	9	1	0
2019	13	8	0	12	0
2020	0	1	0	2	0
2021	1	3	0	3	0
TOTAL	55	22	84	127	275

Figura B.1

**APÉNDICE B DÍAS FUERA DE NORMA POR AÑO Y
CONTAMINANTE**

DIAS SOBRE LOS VALORES NORMADOS POR ESTACIÓN PARA PM-10					
AÑO	UTP	NINFAS	BINE	STA	VELODROMO
2010	0	0	1	0	0
2011	0	0	0	10	0
2012	2	2	0	43	1
2013	3	0	0	4	13
2014	1	3	4	6	33
2015	9	53	6	24	10
2016	5	24	17	9	1
2017	12	104	20	16	0
2018	7	81	5	11	1
2019	29	65	0	34	20
2020	14	33	2	3	23
2021	10	41	5	31	7
TOTAL	92	406	60	191	109

Figura B.2

DIAS SOBRE LOS VALORES NORMADOS POR ESTACIÓN PARA OZONO					
AÑO	UTP	NINFAS	BINE	STA	VELODROMO
2010	0	0	0	0	0
2011	7	0	0	0	0
2012	4	4	5	5	2
2013	0	0	0	0	1
2014	0	1	0	0	3
2015	1	0	1	0	3
2016	0	0	4	13	17
2017	76	47	2	24	18
2018	20	9	5	31	0
2019	4	1	19	0	10
2020	2	3	49	4	8
2021	7	9	9	3	6
TOTAL	116	67	96	92	75

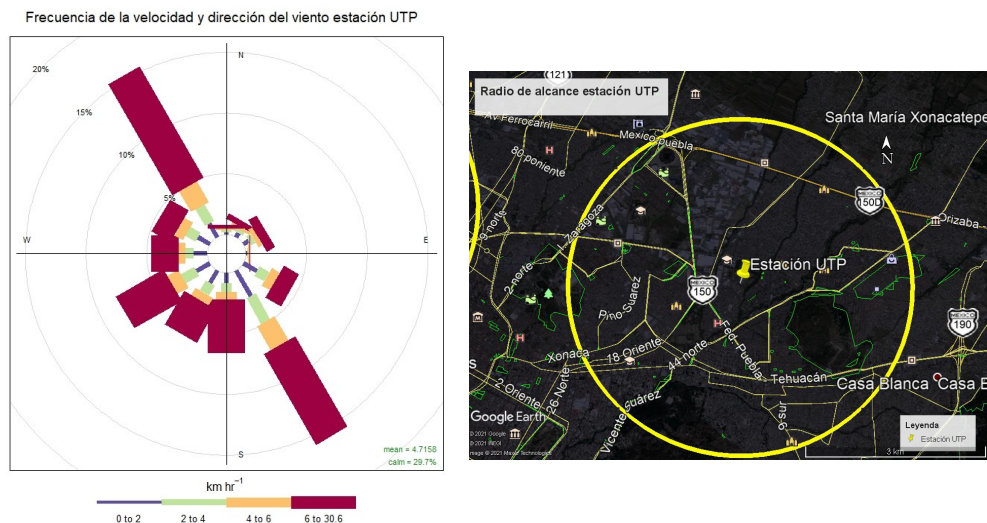
Figura B.3

Apéndice C

Dirección y velocidad del viento por estación

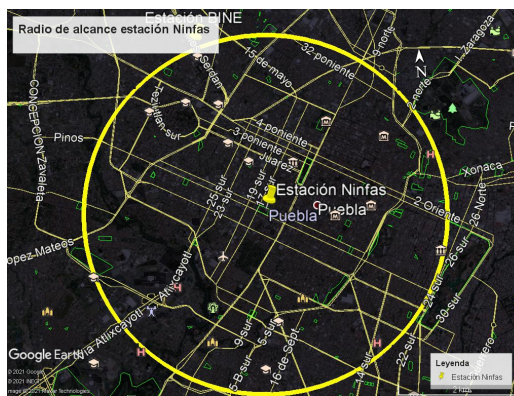
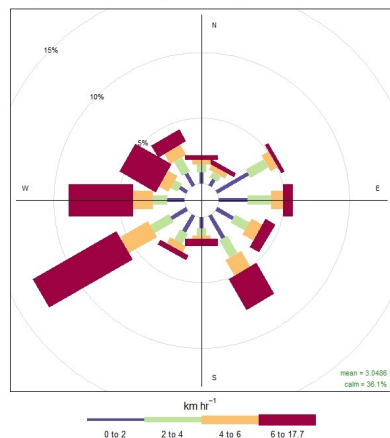
La rosa de los vientos permite la generación de gráficas polares. Las siguientes gráficas muestran la frecuencia de velocidad y dirección del viento, estas fueron diseñadas con los datos obtenidos de cada estación durante el periodo 2018-2021, estas nos permiten localizar las zonas afectadas por las emisiones contaminantes debido a las corrientes de aire que las dispersan.

A la derecha de la rosa de los vientos se encuentra el mapa de ubicación de la estación resaltando su radio de alcance, mostrando así la zona que se encuentra monitoreada.

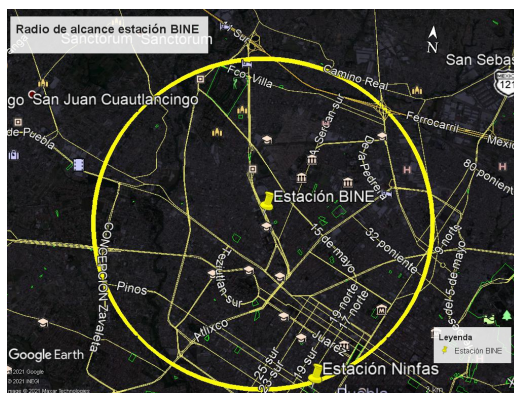
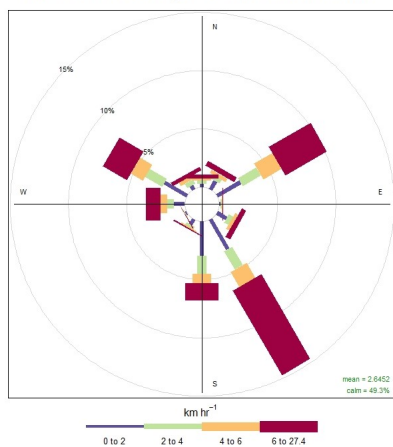


APÉNDICE C DIRECCIÓN Y VELOCIDAD DEL VIENTO POR ESTACIÓN

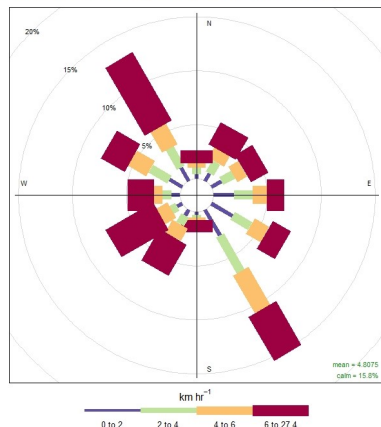
Frecuencia de la velocidad y dirección del viento estación NINFAS



Frecuencia de la velocidad y dirección del viento estación BINE

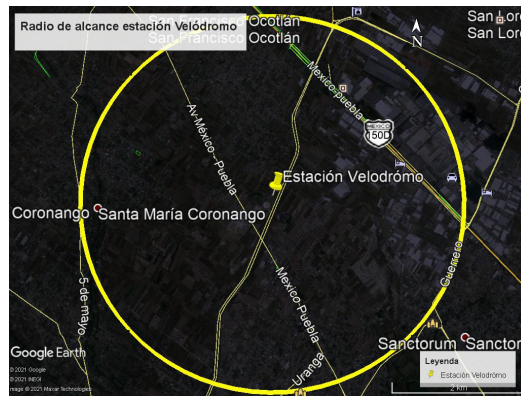
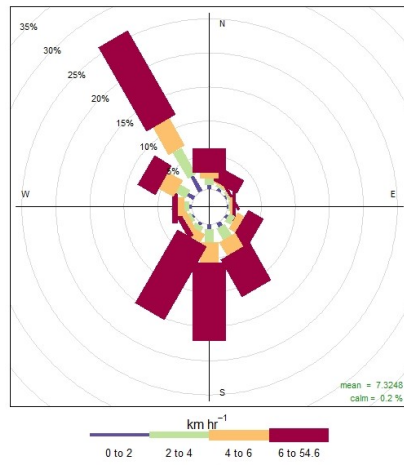


Frecuencia de la velocidad y dirección del viento estación AGUA SANTA



APÉNDICE C DIRECCIÓN Y VELOCIDAD DEL VIENTO POR ESTACIÓN

Velocidad y dirección del viento estación Velódromo



Apéndice D

R-STUDIO

R-STUDIO es un software que permite trabajar con grandes cantidades de datos para realizar diversas estadísticas de manera eficaz, dentro de las funciones de R se encuentra una paquetería especial para análisis de datos de la calidad del aire.

Para realizar su instalación la descarga se realiza desde la página oficial <https://www.rstudio.com/> y la paquetería OPENAIR la cual esta especialmente diseñada para datos de contaminación atmosférica se descarga desde <https://cran.r-project.org/package=openair>.

En la siguiente parte se muestran los comandos más importantes que fueron usados para la generación de gráficas y modelos de dispersión como se indica

Formato de fecha

```
DATE ← .POSIXct(strptime(DATOS$FECHA, format = "%d/%m/%Y %H :  
%M", "GMT"))
```

Concentraciones diarias

```
timePlot(DATOS, pollutant=c("UTP", "NINFAS", "BINE", "STA", "VELODROMO"),  
group=FALSE, avg.time="day", data.thresh = 75, ylab="Concentración  $\mu g/m_3$  ",  
main="Concentraciones diarias de PM-2.5 de 2010-2021", ylim=c(0,150), ci=FALSE)
```

Concentraciones anuales

```
timePlot(DATOS, pollutant=c("UTP", "NINFAS", "BINE", "STA", "VELODROMO"),  
group=TRUE, avg.time="year", ref.y = list(h = c("12", "15"),  
lty = 1, col=c("red", "yellow")), ylab="Concentración  $\mu g/m_3$  ", main="Promedio anual  
de PM-2.5 de 2010-2021", ylim=c(0,60), lwd=3, lty=1, ci=FALSE)
```

Gráficas de Evolución del contaminante

```
timeVariation(DATOS, pollutant="PM10", main="Evolución de PM-10 en la ZMVP
2010-2021", ylab=" Concentración  $\mu g/m_3$ ", xlab=c("Evolución de las concentraciones
horarias durante la semana", "Concentraciones horarias", "Concentraciones mensuales",
"Evolución por días de la semana"))
```

Función de densidad

```
f1 <- -density(DATOS$UTP, na.rm = TRUE)
> f2 <- -density(DATOS$NINFAS, na.rm = TRUE)
> f3 <- -density(DATOS$BINE, na.rm = TRUE)
> f4 <- -density(DATOS$AGUASANTA, na.rm = TRUE)
> f5 <- -density(DATOS$VELODROMO, na.rm = TRUE)
> plot(f1, main = "DensidaddedatosparaPM - 2,5", las = 1, lwd = 4, xlab =
"Concentración  $\mu g/m_3$ ", ylab = "Densidad")
> lines(f2, lwd = 4, col = "red")
> lines(f3, lwd = 4, col = "blue")
> lines(f4, lwd = 4, col = "orange")
> lines(f5, lwd = 4, col = "purple")
plot(density(DATOS, na.rm = TRUE), main = "Funcióndedensidad", ylab = "
Densidad", col = "blue", lwd = 2, xlim = c(0, 100))
```

Función Polar Anular

```
polarAnnulus(DATOS, pollutant="PM2.5", period="hour", type="season", width="fat",
exclude.missing=FALSE, cols="increment", layout=c(4,1), key.header="Concentración
de PM2.5", key.footer="", key.position="bottom", main="Evolución horaria por
estaciones")
```

Calendario

```
calendarPlot(DATOS, year= 2021, pollutant = "UTP", na.rm=TRUE, statistic =
"mean", data.thresh=75, breaks = c(0, 12, 45, 97.4, 150.4, 500), labels = c("Buena", -
egular", "Mala", "Muy mala", "Extremadamente mala"), cols = c("forestgreen", "yellow",
"orange", "red", "purple"), annotate = "value")
```

Gráficos de PM-2.5 y lluvia

```
timePlot(DATOS, pollutant=c("PM2.5", "Rain"), group=TRUE, avg.time="day",  
smooth=TRUE, log=TRUE, ci=FALSE, main="Evolución de PM-2.5 y lluvia")
```

Función polarplot

```
polarPlot(DATOS, pollutant = "O3", main= "Concentraciones medias de Ozono en  
relación a la temperatura")
```

Rosa de los vientos

```
windRose(DATOS, xlab="km/h", main="Frecuencia de la velocidad y dirección del  
viento")
```

Bibliografía

- [1] Organización Mundial de la Salud. (2021). Contaminación del aire ambiente, recuperado el 28 abril 2022 de [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)
- [2] Wael K. Al-Delaimy, Veerabhadran Ramanathan, Marcelo Sánchez Sorondo. (2020). Health of People, Health of Planet and Our Responsibility Climate Change-Air Pollution and Health. First Edition. Springer Open
- [3] Egbert Boeker and Rienk van Grondelle. (2011). Environmental PHYSICS Sustainable Energy and Climate Change, Third Edition. Wiley
- [4] NASA Global Climate Change. (2021). Cambio climático, Cómo sabemos lo que sabemos, recuperado el 30 de abril 2021 de <https://climate.nasa.gov/evidencia/>
- [5] Patricia López Suarez. (2022). México ya rebaso los 1.6 grados de aumento en la temperatura, recuperado de <https://www.gaceta.unam.mx/mexico-ya-rebaso-los-1-6-grad-de-aumento-en-la-temperatura/>
- [6] Periodico Central. (2019). Activan Contingencia Ambiental en Puebla, recuperado el 05 mayo de 2022 de <https://www.periodicocentral.mx/2019/gobierno/item/11083-activan-contingencia-ambiental-en-puebla-y-los-municipios-de-la-megalopolis-la-recomendacion-quedarse-en-casa>
- [7] PROCESO. (2021). Declaran pre contingencia ambiental en Puebla por incendios forestales, recuperado el 05 mayo de 2022 de <https://www.proceso.com.mx/nacional/2021/4/1/declaran-pre-contingencia-ambiental-en-puebla-por-incendios-forestales-261235.html>
- [8] Secretaría del Medio Ambiente Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial. (2022). Bases de datos de contaminantes criterio y meteorología 2010-2021.

- [9] Gobierno del Estado de Puebla. (2012). Programa de Gestión de la Calidad del Aire del Estado de Puebla 2012-2020, primera edición 2012
- [10] Fernando Follos Pliego. (2012). Lenguaje R aplicado al análisis de datos de Calidad del Aire- MANUAL BASICO para el tratamiento de datos de CALIDAD DEL AIRE mediante el lenguaje estadístico R y paquetes adicionales como OPENAIR.
- [11] Carslaw, D.C. (2019). The openair manual open-source tools for analysing air pollution data. Manual for version 2.6-3, University of York.
- [12] Jan. K. G. Dhont. (2003). An Introduction to Dynamics of Colloids, First edition 1993, Second impression 2003. ELSEVIER
- [13] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Instituto Nacional de Ecología. (2011). Guía metodológica para la estimación de emisiones de PM2.5. Primera edición 2011. Recuperado el 28 de abril 2022 de <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/225459.pdf>
- [14] Secretaría de Salud. (2014). Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, recuperado el 28 de enero 2022 de <http://200.33.112.174/archivo/noms/NOM-025-SSA1-2014%20PMs.pdf>
- [15] Segunda Sección, Poder Ejecutivo, Secretaría de Salud.(2014). Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-2014, recuperado el 28 de enero 2022 de <http://200.33.112.174/archivo/noms/NOM-020-SSA1-2014%20O3.pdf>
- [16] Filiberto Pérez Duarte. (1993). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SSA1-1993, recuperado el 28 de enero de 2022 de <http://200.33.112.174/archivo/noms/NOM%20021%20SSA%201993%20CO.pdf>
- [17] Filiberto Pérez Duarte. (1993). Norma Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-1993, recuperado el 28 de enero 2022 de <http://200.33.112.174/archivo/noms/NOM%20023%20SSA%201993%20NO2.pdf>
- [18] Miguel Angel Toscano Velasco.(2010). Norma Oficial Mexicana NOM-022-SS1-2010, recuperado el 28 de enero de 2022 de <http://200.33.112.174/archivo/noms/NOM%20022%20SSA%202010%20SO2.pdf>

BIBLIOGRAFÍA BIBLIOGRAFÍA

- [19] Servicio Meteorológico Nacional-Comisión Nacional del Agua. (2022). Resúmenes mensuales de Temperatura y lluvia, Temperatura promedio anual a nivel nacional y por entidad federativa (2010-2021), recuperado el 30 de abril de 2022 de <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>

- [20] Tilman M. Davies. (2016) THE BOOK OF R-A First Course In Programming And Statistics. First printing. No Starch Press, Inc.