



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

“VALIDACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE CONTAMINANTES
ATMOSFÉRICOS Y VARIABLES METEOROLÓGICAS EN LA ZONA
METROPOLITANA DEL VALLE DE PUEBLA (ZMVP), DE 2001-2005,
UTILIZANDO KRIGING ORDINARIO”

TESIS PROFESIONAL

Para obtener el grado de:

Licenciatura en Ingeniería Ambiental

Presenta:

Mauro Cortez Huerta

Director de Tesis:

Dr. Miguel Ángel Valera Pérez

Puebla, Pue. Enero 2020



BUAP.

Oficio No. FIQ/AC/829/2019
Asunto: Registro de Tema de Tesis

**C. MAURO CORTEZ HUERTA
PASANTE DE LA LICENCIATURA
EN INGENIERÍA AMBIENTAL
P R E S E N T E:**

Por medio del presente me permito informarle, de la aprobación del Registro de Tema de Tesis de la Licenciatura en Ingeniería Ambiental cuyo título es el siguiente:

**"VALIDACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS Y
VARIABLES METEOROLÓGICAS EN LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE
PUEBLA (ZMVP). DE 2001-2005, UTILIZANDO KRIGING ORDINARIO"**

Con el siguiente contenido:

INTRODUCCIÓN

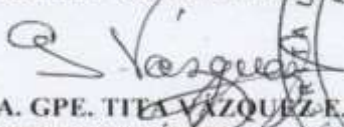
| | |
|-------------------|-------------------------------|
| CAPÍTULO 1 | ANTECEDENTES |
| CAPÍTULO 2 | METODOLOGÍA |
| CAPÍTULO 3 | RESULTADOS Y DISCUSIÓN |

**CONCLUSIONES
BIBLIOGRAFÍA**

Director de Tesis: Dr. Miguel Ángel Valera Pérez.

Lo cual me permito comunicarle para su conocimiento y fines consiguientes aclarando que la vigencia de este tema será **ÚNICAMENTE POR UN AÑO.**

ATENTAMENTE
"Pensar Bien, Para Vivir Mejor"
H. Puebla de Z., a 7 de Noviembre de 2019


**M.L.C. MA. GPE. TIZA VAZQUEZ E. DE LOS MONTEROS
SECRETARIA ACADÉMICA**



C.c.p. Director de Tesis: Dr. Miguel Ángel Valera Pérez
C.c.p. Minutario Facultad de Ingeniería Química

Facultad
de Ingeniería
Química

Av. San Claudio s/n, Col. San
Manuel, Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72590
01 (222) 229 55 00
Exts. 7250 y 7251

AGRADECIMIENTOS

A Dios

Quiero agradecer infinitamente por tener la dicha de estar vivo y por siempre tratar de rodearme de tantas personas extraordinarias para acompañarme en mi día a día y ayudarme a trazar este hermoso camino.

A mi familia

Principalmente a mi madre y padre (Alicia y Marcelino), mis hermanos (Alejandro, Aurelia†, Verónica), sobrinos (Alexander, Zoe, Oliver); los quiero con toda mi alma, ustedes son mi motivo de seguir adelante, de aprender cosas nuevas cada día, el de tratar de dejar una pequeña huella en este mundo, pero sobre todo de enseñarme a disfrutar los pequeños momentos que nos da la vida.

A mis amigos y compañeros

A todos mis compañeros de la ingeniería por el tiempo compartido, pero especialmente a mis amigos : Ivan, Kor, Alex, Abue, Yisus, Bren, La hechicera, Abi, Alma, Ara, Jan, Ale, Jandra, Vivi, Marthita, Jos, Vio y Betxi por todo el apoyo brindado en los buenos y malos momentos, por esas fiestas inolvidables o esos momentos desde una simple conversación, un viaje, un café, juegos en la Nintendo, la cascara, o los Martes de pelis, por eso y por mucho mas que no menciono “gracias”, enserio los adoro a todos.

A mis profesores

Pero en particular al Dr. Miguel Ángel Valera Pérez, Dr. Edgardo Torres Trejo†, Dra. Gladys Linares Fleites, por todas sus enseñanzas durante mi formación y estancia en el Instituto de Ciencias, a mis sinodales Miriam y Ángel por aceptar guiarme y evaluar este trabajo, a los demás profesores que no menciono pero que sin duda tengo una gran admiración, a todos ellos y a los mencionadas gracias por todo y espero seguir contando con vosotros.

A la BUAP

Por darme la oportunidad de formar parte de esta gran institución llena de conocimiento, competencias, deporte, arte y cultura.

“Nada es del todo seguro. La vida se debe vivir desafiando constantemente a lo desconocido, porque la vida no es estática, va cambiando constantemente.”

RESUMEN

El presente trabajo se estudia y se valida la dispersión de contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas en la Zona Metropolitana del Valle de Puebla (ZMVP) durante 5 años por medio de Kriging Ordinario.

La metodología que se utiliza se divide en tres etapas: la primera etapa delimita el área de estudio y aspectos generales como el clima e inventarios de emisiones de la ZMVP, mientras en la segunda etapa se obtuvieron, procesaron y validaron los datos de la Red de Monitoreo Atmosférico (REMA) de la ciudad de Puebla del 2001-2005, utilizando como herramientas para esta etapa los manuales del Sistema Nacional de la Calidad del Aire (SINAICA), y la NOM-156-SEMARNAT-2012 disponible en el Diario Oficial de la Nación (DOF), en la última etapa se realizó un análisis estadístico de correlación con las mediciones de concentración del REMA en las cuales se encuentran relaciones positivas y negativas, esto quiere decir que las variables aumentan en un mismo sentido o que mientras una incrementa la otra disminuye.

Se obtuvieron 30 mapas de dispersión (6 por cada año) a través del modelo geoestadístico Kriging Ordinario por medio del software Surfer 15, estos son de gran ayuda para analizar como los contaminantes se dispersan a través del Espacio-Tiempo por la ZMVP y como las variables meteorológicas intervienen en la dispersión, obteniendo una correlación de Pearson de carácter positivo de 0.446 con la temperatura, 0.273 con la radiación ultravioleta tipo A y 0.186 con la radiación ultravioleta tipo B, mientras que presenta una correlación negativa con el monóxido de carbono de - 0.325, y de -0.349 con la humedad relativa. Esto se debe a que el ozono cuenta con características fotoquímicas lo cual permite que sus concentraciones aumenten al interactuar durante el día con la temperatura, monóxido de carbono y radiación ultravioleta, mientras disminuye cuando hay un alto % de humedad relativa en el ambiente.

Finalmente se concluye que los mapas de dispersión ponen en evidencia como es el comportamiento de los contaminantes, así como las zonas más contaminadas, esto se colabora con las gráficas de comportamiento a través del tiempo donde podemos ver interactúan en todo el año y como estas se vuelven estacionales (un comportamiento casi idéntico durante el año). La varianza del Kriging no depende de los datos de las estaciones de monitoreo, si no de la posición de las estaciones del REMA, si hay una gran distancia entre las estaciones la variabilidad (error) será más grande. Una de las ventajas del Kriging es que la estimación que hace en los sitios de medición (estaciones de monitoreo) les vuelve a dar el mismo valor del dato de concentración dado en ese punto, dando una varianza del sitio es casi nula, lo que quiere decir que el modelo estadístico es muy confiable.

CONTENIDO

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Introducción..... | 1 |
| 1.1 | Justificación..... | 2 |
| 1.2 | Objetivos..... | 2 |
| 2 | Marco teórico | 3 |
| 2.1 | Conceptos básicos..... | 3 |
| 2.1.1 | Atmósfera | 3 |
| 2.1.2 | Contaminación atmosférica | 8 |
| 2.1.3 | Meteorología..... | 13 |
| 2.1.4 | Monitoreo de la calidad del aire..... | 16 |
| 2.2 | Sistema de modelación | 19 |
| 2.2.1 | Geoestadística..... | 19 |
| 2.2.2 | Kriging..... | 20 |
| 3 | Metodología | 27 |
| 3.1 | Área de estudio y contaminación atmosférica en Puebla..... | 27 |
| 3.1.1 | Localización y extensión | 27 |
| 3.1.2 | Clima..... | 28 |
| 3.1.3 | Contaminación atmosférica en la ciudad de Puebla..... | 30 |
| 3.2 | Obtención, procesamiento y validación de los datos de monitoreo del REMA..... | 33 |
| 3.2.1 | Disponibilidad, disposición, limpieza y verificación de los datos..... | 33 |
| 3.3 | Análisis estadístico de correlación de datos | 44 |
| 3.3.1 | Coefficiente de correlación de Pearson..... | 44 |
| 4 | Resultados y discusión | 46 |
| 4.1 | Evaluación de los datos de monitoreo de calidad del aire | 46 |
| 4.1.1 | Valores atípicos de Grubbs..... | 47 |
| 4.2 | Mapas de dispersión de contaminantes y variables meteorológicas en la ZMVP..... | 49 |
| 4.2.1 | Surfer 15..... | 50 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.2.2 | Combinación de mapas de dispersión obtenidos mediante Kriging ordinario | 55 |
| 4.3 | Comportamiento general de los datos a través del tiempo | 61 |
| 4.4 | Discusión de resultados..... | 64 |
| 5. | Conclusión..... | 65 |
| 6. | Referencias..... | 68 |
| | Anexo 1. Gráficas de serie de tiempo y de residuos para las variables... | 72 |
| | Anexo 2. Gráficas de valores atípicos de las variables | 77 |
| | Anexo 3. Girding Report..... | 79 |

Índice de figuras

| | | |
|----|---|----|
| 1 | Vista de la atmósfera desde el espacio..... | 4 |
| 2 | División en capas de la atmósfera y su cambio de temperaturas entre ellas..... | 6 |
| 3 | Perfil vertical de la presión atmosférica..... | 15 |
| 4 | Tipos de Kriging..... | 22 |
| 5 | Localización y límite de la ciudad de Puebla..... | 28 |
| 6 | Clima de la ciudad de Puebla en el 2005..... | 29 |
| 7 | Ubicación de las estaciones del REMA..... | 31 |
| 8 | Series de tiempo de las variables..... | 40 |
| 9 | Bloxplot / caja y bigote de las variables..... | 41 |
| 10 | Serie de tiempo de temperatura con tendencia | 42 |
| 11 | Gráfica de residuos 4 en 1 para temperatura del 2001-2005..... | 43 |
| 12 | Valores atípicos de Grubbs..... | 49 |
| 13 | Obtención de los mapas de dispersión..... | 50 |
| 14 | Ejecución del Software Surfer 15..... | 51 |
| 15 | Carga de carta topográfica E14B43 (Puebla, Puebla) y E14B53 (San Francisco Totímehuacan, Puebla)..... | 51 |
| 16 | Selección de libro de Excel que contiene los datos medidos de cada estación de monitoreo..... | 52 |
| 17 | Selección del método geoestadístico (Kriging Ordinario)..... | 52 |
| 18 | Análisis estadístico del modelo geoestadístico Kriging..... | 53 |
| 19 | Selección del Grip para aplicar contorno a las variables..... | 53 |
| 20 | Modificación de la opacidad del contorno a un 27%, criterio personal para poder distinguir tanto la carta topográfica como los colores de los contornos de las variables..... | 54 |
| 21 | Ubicación de las estaciones de monitoreo atmosférico del REMA | 54 |
| 22 | Dispersión de las variables en la ZMVP durante el 2001..... | 56 |
| 23 | Dispersión de las variables en la ZMVP durante el 2002 | 57 |
| 24 | Dispersión de las variables en la ZMVP durante el 2003 | 58 |
| 25 | Dispersión de las variables en la ZMVP durante el 2004 | 59 |
| 26 | Dispersión de las variables en la ZMVP durante el 2005 | 60 |
| 27 | Comportamiento del ozono vs humedad relativa..... | 61 |
| 28 | Comportamiento del ozono vs radiación ultravioleta del tipo a y b..... | 62 |

| | | |
|----|--|----|
| 29 | Comportamiento del monóxido de ozono vs monóxido de carbono..... | 63 |
| 30 | Comportamiento del monóxido de carbono vs temperatura..... | 63 |

Índice de tablas

| | | |
|---|---|----|
| 1 | Gases presentes en la atmósfera..... | 5 |
| 2 | NOM's: En materia de salud vigentes..... | 18 |
| 3 | NOM's: Técnicas vigentes | 18 |
| 4 | Ubicación de las estaciones de monitoreo de la REMA..... | 30 |
| 5 | Disponibilidad de datos del 2001-2005 obtenidos del REMA..... | 35 |
| 6 | Coefficientes de correlación de Pearson..... | 46 |
| 7 | Suficiencia de la base de datos..... | 47 |
| 8 | Prueba de valores atípicos de Grubbs | 48 |

1. INTRODUCCIÓN

Los problemas ambientales en su mayoría son provocados por un mal manejo de los recursos naturales, sobrepoblación, consumismo y actividades antropológicas principalmente (Mendoza, 2016). Por otro lado, la urbanización ha traído muchos problemas, en los que resaltan la contaminación del aire, cuyas consecuencias se están manifestando actualmente en todo el mundo. Puebla ocupa el tercer lugar como una de las metrópolis más contaminadas del país (Mena, 2019). Cada año, millones de personas son afectados por los contaminantes atmosféricos, las cuales sufren enfermedades respiratorias y otras asociadas por la contaminación del aire.

Existen grupos de poblaciones que se encuentran expuestos a fuentes fijas de contaminantes atmosféricos y en muchas de las ocasiones no disponen de medidas de control para la disminución de la contaminación de la atmósfera (Romero, Diego, & Álvarez, 2005). La atmósfera es un sistema muy complejo y reactivo donde tienen lugar de maneras simultáneas numerosos procesos físicos y químicos. Los contaminantes atmosféricos experimenta complejos procesos de transporte, mezcla y transformación química, que dan lugar a la distribución espacial y temporalmente variable (INE, 2010a).

Por otro lado, el crecimiento económico y la urbanización descontrolada asociados a los desarrollos de los servicios y productos traen como consecuencia el consumo de los combustibles fósiles; al mismo tiempo, la generación de elevados volúmenes de contaminantes que se relacionan con las condiciones ambientales que pueden dañar a los seres humanos, ecosistemas y recursos materiales. Por consiguiente la contaminación del aire o la contaminación atmosférica es una de las principales fuentes de degradado del medio ambiente (Romero et al., 2005). De no tomar acciones para mitigar las emisiones a la atmósfera seguirá habiendo problemas ambientales.

La mala gestión de las políticas ha recaído en la mala calidad del aire en Puebla, es urgente que los ciudadanos en particular, como también las autoridades implementen medidas para controlar las emisiones de sustancias a la atmósfera (Cancino, 2019). La organización mundial de la salud (OMS) hace mención que la contaminación del aire representa un importante riesgo medioambiental para la salud. Según estimaciones de 2012, la contaminación atmosférica en las ciudades y zonas rurales en todo el mundo provocara cada año 3.7 millones de defunciones prematuras (OMS, 2005).

La OMS dentro de sus directrices, propone medir la concentración de contaminantes atmosféricos para evaluar la calidad del aire tales como: partículas (PM), ozono

(O₃), dióxido de nitrógeno (NO₂) y dióxido de azufre (SO₂). En México, la Secretaría de Salud y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), se coordinan para evaluar la calidad del aire en las ciudades y zonas metropolitanas, midiendo la concentración de los contaminantes atmosféricos expuestos por la OMS, y, además, monóxido de carbono (CO) y el plomo (Pb).

Una herramienta que resulta imprescindible para los estudios de contaminación atmosférica son los modelos geoestadísticos, que como en otras disciplinas tiene como objetivo el analizar, estudiar los procesos involucrados y el comportamiento de las variables. Durante el último par de décadas, las instituciones han dejado de lado la geoestadística que les permitía estimar y cartografiar las sustancias potencialmente tóxicas en el medio ambiente y para identificar las fuentes de contaminación del agua, aire y suelo (Oliver Margaret A. & Webster Richard, 2015).

1.1 Justificación

Aunque existen estudios de las emisiones de los contaminantes atmosféricos en la ciudad de Puebla (Mendoza, 2016; SDRSOT, 2015; SSAOT, 2012), jamás se han modelado de manera cartográfica y mucho menos se ha analizado su distribución del monóxido de carbono (CO) y el ozono (O₃) con las variables meteorológicas, como la temperatura (T), radiación ultravioleta (UV) y humedad relativa (HR). En todas las ciudades se debe de conocer el comportamiento de los contaminantes atmosféricos los cuales proporcionan información acerca del estado que guarda el recurso aire en nuestras ciudades y, por lo tanto, constituye una herramienta indispensable en el desarrollo de los programas de gestión de la calidad del aire que aplican las autoridades ambientales y otros sectores involucrados.

1.2 Objetivos

General:

- Analizar y validar el comportamiento espacial del Ozono (O₃), el Monóxido de carbono (CO) y de los variables meteorológicas en la Zona Metropolitana del Valle de Puebla (ZMVP), del 2001-2005.

Específicos:

- Obtener y procesar los datos de monitoreo de calidad del aire del REMA.
- Crear mapas de dispersión espacial de los contaminantes y variables meteorológicas en el área de estudio utilizando el Kriging.
- Validar el comportamiento de las variables en el espacio-tiempo.

2. MARCO TEÓRICO

Este capítulo se divide en dos subcapítulos; conceptos básicos y el sistema de modelación de las variables que se analizan para la calidad del aire.

En la primera parte se abordan las definiciones esenciales de las variables utilizadas en la metodología, esto para acotar el tema y ubicar al lector en materia de contaminación atmosférica de la zona metropolitana, mientras en el segundo subcapítulo se describe de manera general el sistema de modelación que se usará para analizar el comportamiento de los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas que intervienen en su dispersión.

2.1 Conceptos básicos

El objetivo de este capítulo es que el lector conozca las variables analizadas para el comportamiento de los contaminantes atmosféricos y los variables meteorológicas que se contemplan para su dispersión.

2.1.1 Atmósfera

El planeta tierra contiene principalmente cuatro capas: la atmósfera, geosfera, hidrosfera y biosfera, en las cuales se llevan a cabo una serie de reacciones biogeoquímicas dando lugar a un gran número de ciclos de interacción entre sí (Mendoza, 2016). La atmósfera es la capa de interés de este trabajo, que está constituida principalmente por oxígeno y nitrógeno, no obstante, otros gases, pero en menor concentración. La capa fina azulada cerca del horizonte que se observa en la **Figura 1** que representa la parte más densa de la atmósfera. Aunque nuestra atmósfera tiene un espesor de varias centenas de kilómetros, cerca del 99% de su masa gaseosa se encuentra dentro de los primeros 30 km cercanos a la superficie terrestre (Camilloni & Vera, 2003).

En la **Tabla 1** se muestra la composición de la atmósfera donde resalta el nitrógeno porque representa cerca del 78% y el oxígeno el 21% del volumen total. En la atmósfera existe un balance entre la salida y la entrada de los gases. Por ejemplo, el nitrógeno es removido de la atmósfera principalmente por procesos biológicos que involucran bacterias presentes en el suelo, y retornados a la atmósfera por medio de la degradación de materia orgánica por la acción de microorganismos. El oxígeno a su vez es removido de la atmósfera por la degradación de la materia orgánica y por procesos de oxidación en los que se combina con otras sustancias. El oxígeno también es consumido por los seres vivos, por lo que se libera dióxido de carbono (CO₂). La incorporación del oxígeno a la atmósfera ocurre durante los procesos de fotosíntesis.



Figura 1. Vista de la atmósfera desde el espacio
Fuente: (Camilloni & Vera, 2003)

El CO_2 es un compuesto natural en la atmósfera, que ocupa alrededor del 0.036% del volumen del aire, lo que es un mínimo, pero importante porcentaje, el dióxido de carbono es removido de la atmósfera por los procesos de fotosíntesis.

Los océanos actúan como reservorios enormes del dióxido de carbono, debido a que el fitoplancton lo fija en sus células. Se estima que los océanos almacenan más de 50 veces el dióxido de carbono presente en la atmósfera (Camilloni & Vera, 2003).

Tabla 1. Gases presentes en la atmósfera

| Gas | Fórmula química | Porcentaje (por volumen) |
|---------------------------|------------------|--------------------------|
| Gases permanentes | | |
| Nitrógeno | N ₂ | 78,08 |
| Oxígeno | O ₂ | 20,95 |
| Argón | Ar | 0,93 |
| Neón | Ne | 0,0018 |
| Helio | He | 0,0005 |
| Hidrógeno | H ₂ | 0,00006 |
| Xenón | Xe | 0,000009 |
| Gases variables | | |
| Vapor de agua | H ₂ O | 0 a 4 |
| Dióxido de carbono | CO ₂ | 0,036 |
| Metano | CH ₄ | 0,00017 |
| Óxido nitroso | N ₂ O | 0,00003 |
| Ozono | O ₃ | 0,000004 |
| Partículas (polvo, etc.) | | 0,000001 |
| Clorofluorocarbonos (CFC) | | 0,00000002 |

Fuente: (Camilloni & Vera, 2003).

La atmósfera se divide en cuatro capas: troposfera, estratosfera, mesosfera y termosfera (**Figura 2**). Las capas de la atmósfera tienen tres zonas de transición: tropopausa, estratopausa y mesopausa. La mesosfera y troposfera se caracterizan por el descenso en las temperaturas con la altitud, mientras que la estratosfera y termosfera muestran un incremento de las temperaturas (Mendoza, 2016).

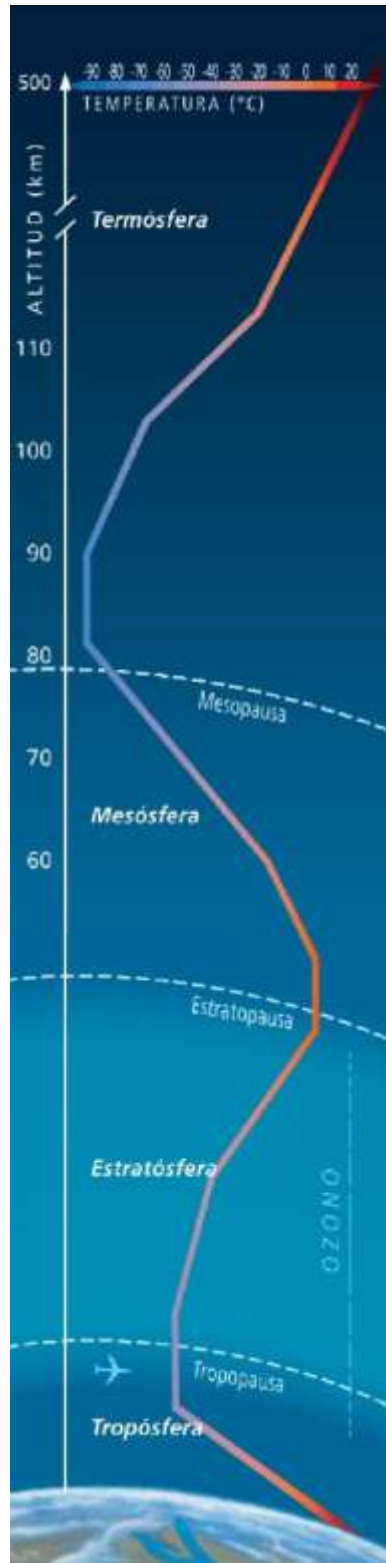


Figura 2. División en capas de la atmósfera y su cambio de temperaturas
Fuente: (Camilloni & Vera, 2003)

2.1.1.1 Troposfera

El espesor varía entre los 9 Km, sobre los polos hasta 18 Km y en el ecuador hasta los 12 Km. Contiene la mayor parte de gases de la atmósfera, a los 500 metros iniciales se le denomina capa sucia, porque en ellos se encuentran el polvo en suspensión procedentes de desiertos, volcanes y la contaminación. Hay importantes flujos convectivos de aire, verticales y horizontales, producidos por las diferencias de presión y temperatura que dan lugar a los fenómenos meteorológicos (precipitaciones, viento, nubes, etc.).

El aire de la troposfera se calienta a partir del calor emitido por la superficie terrestre. La temperatura de la troposfera es máxima en su parte inferior, alrededor de 15°C de media, y a partir de ahí comienza a descender con la altura según un gradiente térmico vertical (GTV) de 6.5 °C de descenso cada Km que se asciende en altura hasta llegar a -70°C en el límite superior de la troposfera: la tropopausa (Camilloni & Vera, 2003).

2.1.1.2 Estratosfera

Se extiende desde la tropopausa hasta los 50 Km de altura, límite de la estratosfera llamado estratopausa. En esta capa se genera la mayor parte del ozono atmosférico que se concentra entre los 15 y 30 Km de altura llamándose a esta zona capa de ozono u ozonofera. La temperatura asciende con la altura hasta llegar próximo a los 0 °C en la estratopausa. Este incremento de temperatura está relacionado con la absorción por el ozono de la radiación solar ultravioleta, por lo que esta capa actúa como pantalla protectora frente a los perjudiciales rayos ultravioleta. Camilloni en el 2003 detecto que en la capa hay movimientos horizontales de aire, pero no verticales como sucede en la troposfera.

2.1.1.3 Mesosfera

Se extiende hasta los 80 Km. de altura. La temperatura disminuye hasta alcanzar los -140 °C en su límite superior llamado mesopausa. Algunos autores dicen que en esta capa se desintegran los meteoritos por el rozamiento con las partículas de la mesosfera produciéndose las llamadas estrellas fugaces, pero otros autores responsabilizan de este fenómeno a la termosfera donde se alcanzan temperaturas muy altas

2.1.1.4 Termosfera o ionosfera

Se denomina así porque gran parte de las moléculas presentes están ionizadas por la absorción de las radiaciones solares de alta energía (rayos gamma, rayos X y parte de la radiación ultravioleta), provocando que el nitrógeno y el oxígeno pierdan electrones quedando ionizados con carga +, los electrones desprendidos originan campos eléctricos por toda la capa. La interacción de las partículas subatómicas procedentes del Sol con los átomos ionizados da lugar a fenómenos luminosos llamados auroras polares (aurora boreal en polo norte y aurora austral en polo sur) que suceden cerca de los polos magnéticos.

En la ionosfera rebotan las ondas de radio y televisión usadas en las telecomunicaciones. La temperatura de la termosfera va ascendiendo en altura al absorber las radiaciones de alta energía, pudiendo alcanzar más de 1000 °C (Curiosidad: la baja densidad de gases hace que esta temperatura realmente no signifique mucha energía). Su límite superior se denomina termopausa, entre los 600 – 800 Km de altura, continuándose con la exosfera.

2.1.2 Contaminación atmosférica

2.1.2.1 Calidad del aire

Una buena calidad del aire se puede definir como: el conjunto de componentes presentes en la atmósfera en un periodo dado, que no causan daño a la salud, el bienestar de la población, el equilibrio ecológico, y los materiales con valor económico (SSAOT, 2012). Mientras que la contaminación del aire puede ser definida como la situación en la cual las concentraciones de las sustancias presentes en la atmósfera son lo suficientemente altas sobre los niveles normales en el ambiente y estos producen efectos nocivos a los seres humanos, vegetación, animales o materiales. La calidad del aire depende de las emisiones naturales y antropogénicas. A lo largo de la historia la humanidad ha existido eventos de gran impacto de contaminación atmosférica, estos sucesos fueron parte importante para la elaboración e implementación de políticas a zonas urbanas para controlar la calidad del aire, principalmente en beneficio de la humanidad.

Cada zona urbana, de acuerdo a sus emisiones, características físicas en su entorno y meteorológicas tendrán una calidad del aire distinta a las demás, sin embargo, la contaminación atmosférica en muchas ciudades es causada por las emisiones de monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y varios compuestos orgánicos volátiles (Mendoza, 2016).

2.1.2.2 Contaminantes criterio y sus efectos a la salud

La organización mundial de la salud (OMS) propone medir las concentraciones de los contaminantes atmosféricos para evaluar la calidad del aire tales como: partículas (PM), ozono (O₃), dióxido de nitrógeno (NO₂) y dióxido de azufre (SO₂).

En México la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en conjunto con otras dependencias estatales, se coordinan para evaluar la calidad del aire en las ciudades, midiendo las concentraciones de contaminantes antes mencionados y además incluyen el monóxido de carbono (CO) y el plomo (Pb), mejor conocidos como los contaminantes criterio.

a) Monóxido de carbono (CO)

El monóxido de carbono (CO) es un gas incoloro e inodoro y altamente tóxico. El CO en el ambiente se produce a partir de la combustión incompleta de materiales que contienen carbono (Schwartz, 2019). Las fuentes antropogénicas de CO incluyen la combustión incompleta de los combustibles fósiles en motores de combustión interna, desde que se libera en el escape de los automóviles, chimeneas de plantas industriales, humo de cigarro, quema de biomasa y otros electrodomésticos que queman combustible, incluyendo estufas de leña, calentadores de agua, secadoras de ropa, hornos, chimeneas de casa y generadores. Por otro lado, las fuentes naturales de CO incluyen las minas de carbón, incendios forestales, volcanes, vegetación, suelo, el océano y la oxidación atmosférica de los hidrocarburos.

El CO influye en el cambio climático global a través de su capacidad ya sea directa o indirecta, de aumentar los niveles de otros gases en la atmósfera (Schwartz, 2019). Dichos otros gases, incluidos el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el ozono (O₃), afectan directamente al calentamiento global. El dióxido de carbono, el metano y el ozono tienen la capacidad de atrapar el calor terrestre, evitando que el calor se escape al espacio (Schwartz, 2019). Aunque el CO no es un gas efecto invernadero (GEI) si aumenta los niveles de los GEI en la tierra, en especial el O₃ troposférico y al CO₂ por participar en las diversas reacciones químicas en la atmósfera.

Por ejemplo, el CO afecta indirectamente los niveles de CH₄ y del O₃ al reaccionar con los radicales hidroxilos que es una molécula reactiva, que consiste en un átomo de oxígeno unido químicamente a un átomo de hidrógeno, que es el responsable de disminuir los niveles de muchos contaminantes atmosféricos.

Cuando el monóxido de carbono atmosférico reacciona con el radical hidroxilo, disminuye la cantidad de este radical disponible para reaccionar y eliminar el CH₄ y el O₃ troposférico, como resultado el CH₄ y el O₃ se acumulan en la atmósfera (Schwartz, 2019).

Los efectos a la salud a corto plazo (agudos) pueden producirse inmediatamente o poco tiempo después de su exposición al monóxido de carbono. Respirar el monóxido de carbono puede causar solo de cabeza, mareos, sensación de desvanecimiento y cansancio (Mendoza, 2016). A niveles muy altos el monóxido de carbono puede causar somnolencia, alucinaciones, convulsiones, pérdida de visión, reduce la capacidad de transportar oxígeno en la sangre, colapso, convulsiones y la muerte (Consejería de salud, 2005).

b) Ozono (O₃)

La atmósfera se encuentra en capas en la tierra, de las cuales la estratosfera y la troposfera son importantes para el cambio climático. El ozono (O₃) está presente en ambas capas. En la estratosfera, el ozono protege la vida al absorber la peligrosa radiación solar ultravioleta. En la troposfera el ozono es un contaminante que crea smog y afecta a la temperatura del aire, la evaporación, la humedad y la precipitación (Burchard, 2019).

La luz ultravioleta (UV) con alta energía divide los átomos de oxígeno, que en efecto crean moléculas de ozono, los clorofluorocarbonos (CFC) destruyen el gas y crean los agujeros de ozono. La radiación solar ultravioleta aumenta la temperatura en la superficie de la tierra. El O₃ se produce por la reacción entre compuestos orgánicos volátiles y óxidos de nitrógeno (Burchard, 2019). Una concentración de ozono en la atmósfera inferior y superior es el resultado de la temperatura y el cambio climático. Una de las principales preocupaciones de los científicos de hoy en día son los cálculos de equilibrio con respecto a los sumideros y fuentes de ozono.

El ozono es un gas tóxico que a concentraciones elevadas puede tener efectos en la salud humana graves, afectando principalmente al aparato respiratorio e irritando las mucosas, pudiendo llegar a producir afecciones pulmonares. El aparato respiratorio es el principal perjudicado por el ozono, teniendo como primeros síntomas el dolor de cabeza, tos, náuseas, dolores pectorales, y acotación de la respiración. Estos efectos dependen de distintas variables: la concentración de ozono, la ventilación durante la exposición y la duración de esta (Gobierno de Aragón, 2019).

El ejercicio físico al aire libre es una de las principales variables que influyen negativamente, ya que conlleva un aumento en la cantidad de ozono inhalado y una mayor penetración en los pulmones. Los niños, ancianos y quienes padecen de enfermedades respiratorias son los grupos con mayor riesgo.

c) Partículas menores a 10 y 2.5 micras (PM)

También conocidas como material particulado, estas son emitidas de manera natural o por actividades humanas y por las industrias (Lv et al., 2019), también se pueden formar en la atmósfera a partir de reacciones químicas. Las partículas suspendidas representan un problema a la salud pública, ya que sus efectos dependen de la concentración, composición química y el tamaño de la partícula. La presencia de material particulado está asociada con el riesgo de muerte por causas cardiovasculares en adultos (Arcinegas, 2012).

d) Dióxido de nitrógeno (NO₂)

El dióxido de nitrógeno (NO₂) es un gas marrón rojizo con un olor penetrante; también se puede aislar a temperatura ambiente y es reactivo pero estable. Además, el óxido nitroso (N₂O), un gas incoloro con un olor dulce, conocido como gas de la risa por su uso como anestésico, reacciona fácilmente con el oxígeno para convertirse en NO, y es una fuente importante de este gas de efecto invernadero.

Las principales liberaciones antropogénicas de NO y NO₂ incluyen la quema de combustibles fósiles en motores de automóviles y en plantas de energía. Los gases de escape de los automóviles producen alrededor de las tres cuartas partes de esas emisiones. Además, las refinerías y algunas instalaciones de fabricación del sector industrial pueden liberar dióxido de nitrógeno; y también por el sector residencial de estufas de gas y unidades de calefacción doméstica. La liberación de estos óxidos de nitrógeno proviene de la oxidación del aire, que es aproximadamente 78 por ciento de nitrógeno (Ahammad, 2018). De hecho, en la naturaleza, los rayos son generadores abundantes de óxidos de nitrógeno, al igual que los incendios naturales y los procesos biológicos en el suelo y el agua.

Las concentraciones específicas de algunos compuestos de nitrógeno, en particular NO₂, han demostrado efectos tóxicos. Los niveles altos incluso pueden ser fatales, mientras que los niveles más bajos afectan una variedad de sistemas corporales, especialmente el tejido pulmonar (Ahammad, 2018). También se sabe que la exposición a largo plazo a algunos compuestos de NO_x debilita la resistencia a las infecciones respiratorias.

e) Dióxido de azufre (SO₂)

El dióxido de azufre (SO₂) es un gas incoloro con un olor fuerte y picante que contribuye a la contaminación del aire. Se debe principalmente a la quema de combustibles fósiles (carbón, gas natural, petróleo) y a la fundición de minerales como el aluminio, el cobre o el hierro (Harmon, 2019). La actividad volcánica también libera el contaminante en el aire. El dióxido de azufre puede causar efectos nocivos para la salud humana, animal y vegetal. El gas no es inflamable, se puede mover al aire y disolverse en agua para formar ácido sulfúrico. La lluvia ácida contiene ácido sulfúrico y puede contaminar el suelo y las vías fluviales.

La mayoría de las personas están expuestas al dióxido de azufre al respirar aire contaminado o por contacto con la piel. El dióxido de azufre causa una serie de síntomas, puede irritar la piel, los ojos, la nariz, la garganta y los pulmones. Puede dañar e inflamar el sistema respiratorio y los pulmones, y provocar problemas respiratorios, dolor al respirar, tos e irritación de la garganta. El contaminante puede empeorar los síntomas asociados con asma, bronquitis crónica, enfisema y enfermedad cardíaca (Harmon, 2019). Los niños se ven afectados más adversamente porque sus pulmones aún se están desarrollando.

f) Plomo (Pb)

El plomo es un material natural que se encuentra en la corteza de la tierra y que fue descubierto en 1899. Prácticamente no existe un sector de la actividad humana que no utilice productos químicos. Todas las sustancias químicas son tóxicas en algún grado, por lo que el riesgo a la salud está en función de la severidad de la toxicología y magnitud de su exposición (Corza & Velásquez, 2014). El plomo ingresa al cuerpo a través de la absorción intestinal por ingestión, a los pulmones por la inhalación y por la piel. Una vez en el organismo es transportado por el torrente sanguíneo a todos los órganos y tejidos, una vez absorbido puede acumularse en los huesos, dientes, hígado, pulmones, riñones y el cerebro.

La preocupación con respecto al plomo se centra en los niños ya que son muy vulnerables a los efectos del metal durante el crecimiento y el desarrollo del sistema nervioso al parecer desnutrición, deficiencia de calcio, hierro, fósforo, zinc y vitamina D e infecciones gastrointestinales (Corza & Velásquez, 2014).

2.1.2.3 Tipos de emisiones de los contaminantes atmosféricos

La contaminación del aire en zonas urbanas proviene de la mezcla de miles de fuentes de emisiones que van desde chimeneas industriales, vehículos automotores, hasta el uso de productos de limpieza y pinturas e incluso de forma natural como los volcanes (INE, 2010a). De acuerdo con la (SEMARNAT & INE, 2005) existen cuatro categorías de fuentes de emisión.

a) Fuentes puntuales o fijas

Esta categoría se refiere a sectores industriales tal como el químico, petrolero y petroquímico, automotriz, celulosa y papel, acero y hierro, vidrio, generación de energía eléctrica, asbesto; cemento y cal, así como tratamiento de aguas residuales.

b) Fuentes de área

Las fuentes de área representan aquellas que son demasiadas numerosas y dispersas como para poder ser incluidas de manera eficiente en un inventario de fuentes puntuales, tales como las combustiones de fuentes fijas, uso de solventes; almacenamiento y transporte de derivados del petróleo, fuentes industriales, fuentes agrícolas, manejo de residuos, entre otras fuentes. Dentro de estas fuentes entran las empresas como gasolineras, restaurantes, almacenes u otras con actividades que involucren emisiones de contaminantes atmosféricos.

c) Fuentes móviles

Las fuentes móviles de emisiones están constituidas por los vehículos automotores que incluye los automóviles, camionetas y autobuses diseñados para circular en la vía pública. En la mayoría de las áreas urbanas, los vehículos automotores son los principales generadores de emisiones de CO, NO_x, SO_x, PM, contaminantes tóxicos en el aire y contaminantes que reducen la visibilidad.

d) Fuentes naturales

Además de las actividades humanas, los fenómenos naturales y la vida animal y vegetal pueden jugar un papel importante en el problema de la contaminación del aire. Es primordial comprender la contribución general de este tipo de fuentes, especialmente en las áreas en las que las emisiones naturales pueden ser significativas para elaborar un inventario de emisiones.

2.1.3 Meteorología

La Meteorología es la ciencia encargada del estudio de la atmósfera, de sus propiedades y de los fenómenos que en ella tienen lugar.

El estudio de la atmósfera se basa en el conocimiento de una serie de magnitudes, o variables meteorológicas, como la temperatura, la presión atmosférica, la humedad, dirección y velocidad del viento o la radiación ultravioleta, las cuales varían tanto en el espacio como en el tiempo (Mendoza, 2016; Rodríguez, Águeda, & Portela, 2004).

Tener conocimiento de estas variables ayuda a entender el comportamiento de los contaminantes atmosféricos que se emiten y se transportan en el área de estudio. La información de las variables meteorológicas resulta necesaria para el análisis de calidad del aire. La concentración de los contaminantes depende en gran medida de las condiciones meteorológicas que ocurren a diferentes escalas y temporalidades las cuales están vinculadas entre ellas.

a) Temperatura

Es de todos conocido que la temperatura es una de las magnitudes más utilizadas para describir el estado de la atmósfera. La información meteorológica que aparece en medios de comunicación siempre incluye un apartado dedicado a las temperaturas; sabemos que la temperatura del aire varía entre el día y la noche, entre una estación y otra, y también entre la ubicación geográfica. Formalmente la temperatura es una magnitud relacionada con la rapidez del movimiento de las partículas que constituyen la materia, cuanto mayor agitación presente esta, mayor será la temperatura (Rodríguez et al., 2004).

b) Presión atmosférica

El aire que nos rodea, aunque no lo notemos pesa y por lo tanto ejerce una fuerza sobre todos los cuerpos debida a la acción de la gravedad. Esta fuerza por unidad de superficie es la denominada presión atmosférica. La presión atmosférica depende de muchas variables, sobre todo la altitud.

Cuanto más arriba en la atmósfera nos encontramos la cantidad de aire por encima nuestro será menor, lo que hará que también sea menor la presión que este ejerza sobre un cuerpo allí. La **Figura 3** muestra los valores promedio de la presión atmosférica en función a la altitud, en el cual puede apreciarse como la presión atmosférica desciende con la altura de manera exponencial.

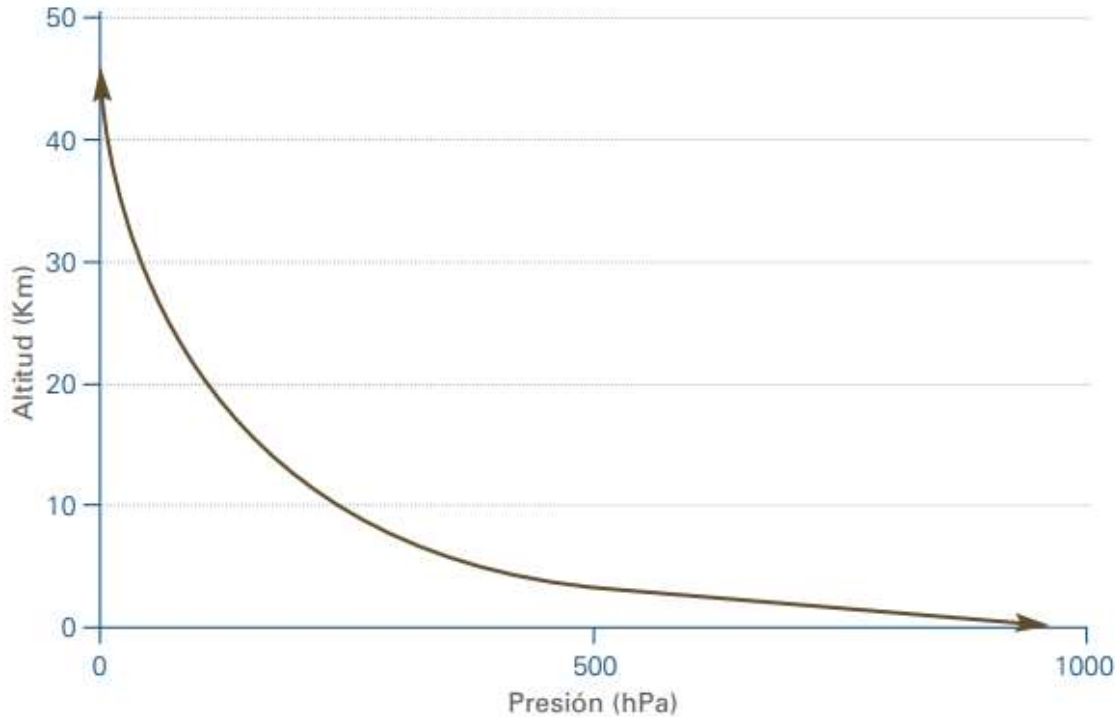


Figura 3. Perfil vertical de la presión atmosférica

Fuente: (Rodríguez et al., 2004).

c) Humedad relativa

La humedad es una propiedad que describe el contenido de vapor de agua presente en un gas, el cual se puede expresar en términos de varias magnitudes. Algunas de ellas se pueden medir directamente y otras se pueden calcular a partir de magnitudes medidas. La selección de una magnitud de humedad depende de la aplicación. En meteorología la humedad se expresa con la temperatura de bulbo húmedo, en cambio en un cilindro de gas, el contenido de humedad se expresa con la temperatura de punto de rocío (Martines, 2007). En otras aplicaciones como cámaras de humedad o cuartos limpios se usa la humedad relativa

La humedad relativa (HR): cociente entre la fracción molar de vapor de agua en un espacio dado y la fracción molar del vapor de agua en su condición de saturación (Wexler & Wildhack, 1962).

d) Radiación ultravioleta

La radiación UV producida por el sol se divide comúnmente en tres bandas: UV-A, con longitudes de onda de 320-400 nanómetros; UV-B, con longitudes de onda de 280-320 nanómetros; y UV-C, con longitudes de onda de 200-280 nanómetros. Aunque parte de esta radiación pasa a través de la capa de ozono y llega a la superficie, la capa de ozono absorbe la mayor parte de la radiación UV-B que ingresa a la atmósfera de la Tierra.

En consecuencia, más del 98 por ciento de la radiación UV que actualmente alcanza la superficie de la Tierra es radiación UV-A. Cuando la radiación UV-B encuentra una molécula de ozono (O_3), puede dividir O_3 en oxígeno molecular (O_2) y oxígeno atómico (O), que luego puede recombinarse con O_2 para formar O_3 en un equilibrio dinámico (Green & Whiteman, 2017). A medida que disminuye el ozono atmosférico, la radiación UV se infiltra en los ecosistemas de la Tierra con efectos potencialmente dañinos. La intensidad de la radiación UV-B que llega a la Tierra aumenta en un 2 por ciento por cada disminución del 1 por ciento en la capa de ozono (Green & Whiteman, 2017).

2.1.4 Monitoreo de la calidad del aire

En las últimas décadas se ha desarrollado una preocupación creciente por los efectos de la contaminación del aire y sus efectos a la salud humana y del ambiente. La fuerte presión social junto con la legislación más rigurosa, requiere la información confiable sobre la calidad del aire (Molina & Molina, 2004). De aquí la necesidad de contar con un sistema de monitoreo de contaminantes atmosféricos en las zonas urbanas, este sirve de herramienta para la identificación y evaluación de problemas de la calidad del aire.

El monitoreo atmosférico proporciona información acerca del estado que guarda el recurso aire en nuestras ciudades y, por lo tanto, constituye una herramienta indispensable en el desarrollo de los programas de gestión de la calidad del aire que aplican las autoridades ambientales y otros sectores involucrados (SSAOT, 2012).

Según el Instituto Nacional de Ecología (INE), denomina red de monitoreo al conjunto de dos o más estaciones de monitoreo, es común que las estaciones de monitoreo se encuentren agrupadas en redes que pueden cubrir grandes extensiones geográficas.

El monitoreo, junto con los modelos de predicción y los inventarios de emisiones, son parte integral de la gestión de la calidad del aire.

La importancia del propósito del monitoreo de la calidad del aire es generar y proporcionar información necesaria a científicos, legisladores y planificadores para que ellos tomen las decisiones adecuadas a favor de la gestión y mejora del medio ambiente (INE, 2010a).

El gobierno federal es el responsable de establecer los estándares para la protección de la salud pública y vigilar el cumplimiento. Estos estándares se encuentran en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) y son de observación obligatoria en todo el país. Las NOM (**Tabla 2**) describen los límites permisibles para los contaminantes criterio. Estas normas están condicionadas a una revisión periódica para reflejar la información reciente sobre los efectos en la salud y la gestión de la calidad del aire.

De acuerdo a la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (EPA), la localización del sitio de monitoreo depende inicialmente del objetivo de monitoreo. Una vez que se sabe la necesidad de monitorear algún contaminante, de acuerdo a un apropiado análisis, se puede reducir el número sitios de monitoreo para áreas específicas.

En el monitoreo de la calidad del aire se emplean dos tipos de normas: las NOM de salud ambiental que establecen los límites permisibles para los contaminantes criterio, y las NOM técnicas que definen los métodos de medición de los contaminantes criterio.

Las NOM técnicas (**Tabla 3**) definen los métodos de medición recomendados para el monitoreo de los contaminantes criterio. Estos métodos de medición pueden ser de referencia o equivalentes. Generalmente los métodos de medición propuestos por la NOM tienen una correspondencia con los designados por la EPA, por lo que cuando no existe una NOM para un contaminante criterio se utiliza la recomendación de la US EPA.

Tabla 2. NOM's: En materia de salud vigentes

| Contaminante | NOM | Publicación | Descripción |
|---|-------------------|-------------------------|---|
| Dióxido de azufre (SO ₂) | NOM-022-SSA1-2010 | 8 de septiembre de 2010 | 0.110 ppm, máximo promedio de 24 horas 0.200 ppm, segundo máximo anual como promedio móvil de 8 horas 0.025 ppm, promedio anual |
| Monóxido de carbono (CO) | NOM-021-SSA1-1993 | 23 de diciembre de 1994 | 11.0 ppm, máximo anual como promedio móvil de 8 horas |
| Dióxido de nitrógeno (NO ₂) | NOM-023-SSA1-1993 | 23 de diciembre de 1994 | 0.210 ppm, promedio horario |
| Ozono (O ₃) | NOM-020-SSA1-2014 | 19 de agosto de 2014 | 0.095 ppm, promedio horario 0.070 ppm, máximo anual del promedio móvil de 8 horas |
| Partículas suspendidas totales (PST) | | | Derogado |
| Partículas menores a 10 micrómetros (PM ₁₀) | NOM-025-SSA1-2014 | 20 de agosto de 2014 | 75 µg/m ³ , promedio 24 horas 40 µg/m ³ , promedio anual |
| Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM _{2.5}) | NOM-025-SSA1-2014 | 20 de agosto de 2014 | 45 µg/m ³ , promedio 24 horas 12 µg/m ³ , promedio anual |
| Plomo (Pb) | NOM-026-SSA1-1993 | 23 de diciembre de 1994 | 1.5 µg/m ³ , en un periodo de tres meses como promedio aritmético |

Fuente: (SEDEMA, 2018)

Tabla 3. NOM's: Técnicas vigentes

| Contaminante | NOM | Publicación | Descripción |
|---|--|-----------------------|---|
| Dióxido de azufre (SO ₂) | NOM-038-SEMARNAT-1993 | 18 de octubre de 1993 | Método equivalente: fluorescencia ultravioleta |
| Monóxido de carbono (CO) | NOM-034-SEMARNAT-1993 | 18 de octubre de 1993 | Método de referencia: absorción en el infrarrojo |
| Dióxido de nitrógeno (NO ₂) | NOM-037-SEMARNAT-1993 | 18 de octubre de 1993 | Método de referencia: quimioluminiscencia en fase gaseosa |
| Ozono (O ₃) | NOM-036-SEMARNAT-1993 | 18 de octubre de 1993 | Método equivalente: fotometría ultravioleta |
| Partículas suspendidas totales (PST) | NOM-035-SEMARNAT-1993 | 18 de octubre de 1993 | Muestreo: alto volumen Análisis: gravimetría |
| Partículas menores a 10 micrómetros (PM ₁₀) | No se cuenta con una NOM de métodos de medición, sin embargo, se considera el método equivalente que recomienda la US EPA. | | Gravimetría o atenuación de radiación beta |
| Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM _{2.5}) | No se cuenta con una NOM de métodos de medición, sin embargo, se considera el método equivalente que recomienda la US EPA. | | Gravimetría o atenuación de radiación beta |
| Plomo (Pb) | No se cuenta con una NOM de métodos de medición. | | |

Fuente: (SEDEMA, 2018)

2.2 Sistema de modelación

En la naturaleza, las variables físicas y biológicas muestran generalmente una importante heterogeneidad espacial. Ello no quiere decir que sea imposible encontrar un patrón de distribución. Al contrario, en la mayoría de los casos, existe una continuidad espacial entre las diferentes localizaciones. Un ejemplo es el caso de los trabajos relacionados con la ecología de los insectos. Aunque se pueden encontrar muchos estudios que tratan sobre las variaciones temporales de diversas poblaciones de insectos, hasta fechas muy recientes era menos común el análisis de las distribuciones espaciales de los mismos, debido a la dificultad que existía en el manejo y análisis de los datos (Cressie, 1992).

En algunos casos se intentó analizar la variación espacial de las poblaciones mediante el uso de índices de dispersión, comprobándose como era imposible la distinción de las distintas distribuciones espaciales con esos métodos, ya que ignoran la localización de las muestras.

El desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la aplicación de la geoestadística ha supuesto un nuevo impulso al análisis de la distribución espacial aplicada a la ecología y a las ciencias ambientales. Un SIG es un conjunto de programas informáticos que sirven para captar, almacenar, recuperar, transformar, mostrar y analizar diversos tipos de datos espaciales (Longley, Goodchild, Maguire, & Rhind, 1999). Los datos georreferenciados, es decir, con unas coordenadas conocidas con respecto a un origen predeterminado, pueden incorporarse a un SIG para generar mapas temáticos o coberturas. Por ejemplo, los tipos de suelo, las clases de cultivos o las densidades de insectos pueden mostrarse en unos mapas independientes. Además, los mapas temáticos pueden combinarse con el fin de analizar las posibles interacciones entre las diversas variables.

Aunque los SIG han permitido a los investigadores la manipulación de datos espaciales, la caracterización y la modelización de los patrones de distribución espacial es muy poco factible si no se cuenta con un programa estadístico adecuado.

2.2.1 Geoestadística

La geoestadística comprende a un conjunto de herramientas y técnicas que sirven para analizar y predecir los valores de una variable que se muestra distribuida en el espacio o en el tiempo de una forma continua. Debido a su aplicación orientada a los SIG, también se podría definir como la estadística relacionada con los datos geográficos, de ahí que se le conozca además como estadística espacial.

Todo trabajo geoestadístico tiene que llevarse a cabo en tres etapas:

1. Análisis exploratorio de los datos

Se estudian los datos muestrales sin tener en cuenta su distribución geográfica. Sería una etapa de aplicación de la estadística. Se comprueba la consistencia de los datos, eliminándose los erróneos e identificándose las distribuciones de las que provienen.

2. Análisis estructural

Estudio de la continuidad espacial de la variable. Se calcula el variograma, u otra función que explique la variabilidad espacial, y se ajusta al mismo un variograma teórico.

3. Predicciones

Estimaciones de la variable en los puntos no muestrales, considerando la estructura de correlación espacial seleccionada e integrando la información obtenida de forma directa en los puntos muestrales, así como la conseguida indirectamente en forma de tendencias conocidas.

La geoestadística se desarrolla por primera vez en la industria minera en la década de 1950 y actualmente se utiliza en las ciencias ambientales para el mapeo, monitoreo y otros tipos de gestiones ambientales (Oliver Margaret A. & Webster Richard, 2015).

Los científicos requieren conocer el comportamiento de las variables en lugares pequeños o con un número finito de datos (Díaz, Espinosa, & García, 2016). Para ello utilizan la geoestadística en puntos o bloques de una, dos o tres dimensiones. Dicha técnica es de gran valor en el campo de las ciencias del suelo tales como la concentración de nutrientes o productos químicos potencialmente tóxicos en el suelo. Los modelos matemáticos se basan en suposiciones de las relaciones determinísticas entre los sitios de muestreo de las variables de interés, ningún modelo puede describir por completo la variación en el mundo natural (Oliver Margaret A. & Webster Richard, 2015).

2.2.2 Kriging

En cualquier trabajo geoestadístico, el principal objetivo de este es la caracterización de la variable investigada en todas las localizaciones partiendo de la información suministrada por los puntos muestrales.

Los métodos de estimación geoestadística son conocidos como krigeado o krigeaje (Kriging en la literatura inglesa, en honor de Danie Krige, quien formuló por primera vez esta metodología en 1951)(Levy Mangin, Montero Lorenzo, & Larraz Iribas, 2011).

El Kriging engloba un conjunto de métodos de predicción espacial que fundamentan en la minimización del error cuadrático medio de predicción, sin embargo, estas metodologías tienen diferentes aplicaciones, dentro las cuales destacan el diseño de redes de monitoreo y la simulación de dispersión de contaminantes.

Las principales características que hacen del krigeado un método de estimación muy superior a los tradicionales, como el inverso ponderado de la distancia, la triangulación, etc., son las siguientes (Moral, 2004).

1) Mientras que los métodos tradicionales utilizan el concepto euclidiano de la distancia para el cálculo de los pesos que se aplicarán a cada dato muestral, el krigeado considera tanto la distancia como la geometría de la localización de las muestras.

2) Mediante el krigeado se minimiza la varianza del error esperado (diferencia entre el valor real y el estimado). Como el valor real en un punto no muestral es desconocido, el krigeado emplea un modelo conceptual con una función aleatoria asociada a los valores reales.

3) Los métodos geoestadísticos muestran una gran flexibilidad para la interpolación, pudiéndose estimar valores puntuales o en bloques, así como métodos para incorporar información secundaria que esté relacionada con la variable principal. Todos estos métodos dan lugar a unas superficies muy suaves, además de una estimación de la varianza en todos los puntos, lo cual no puede realizarse con otros métodos de interpolación.

La idea fundamental del krigeado es consecuencia de los conceptos relacionados con la dependencia espacial, tratados en el apartado anterior: los lugares que disten menos entre sí tendrán unos valores de los atributos más semejantes que los correspondientes a los puntos o bloques que estén más separados. En la naturaleza esto suele cumplirse y, además, las variables generalmente se distribuyen de una forma continua.

Existen varios tipos de Kriging actualmente (**Figura 4**) los cuales se fundamenta en la minimización del error cuadrático medio de predicción. Estos métodos se clasifican en dos grandes grupos en función de la estructura del estimador, lineales y no lineales (Chica Olmo, 2005).

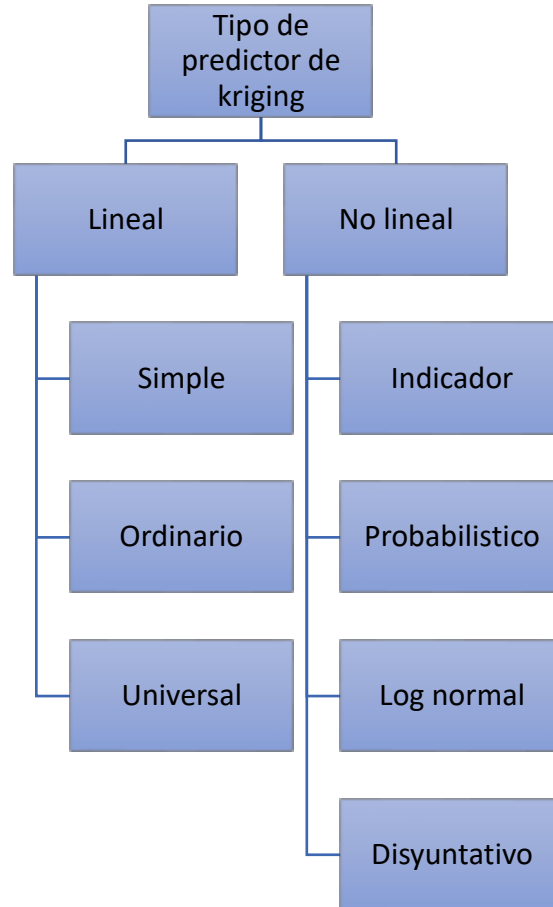


Figura 4. Tipos de Kriging
Fuente: (Elaboración propia, 2019)

2.2.2.1 Kriging ordinario

El Kriging ordinario (OK) es un método de interpolación ampliamente utilizado para la estimación y distribución espacial de los contaminantes (Gómez-Losada, Santos, Gibert, & Pires, 2019). El Kriging además de ser un método de interpolación también puede ser determinista y estocástico representativamente. El OK interpola los valores de un campo aleatorio en ubicaciones no observadas mediante el uso de datos si medidos en sitios cercanos. Este enfoque se basa en la primera ley de la geografía “todo está relacionado con lo demás” pero las cosas adyacentes están relacionadas entre sí (Tobler, 1970).

El Krigeado Ordinario consiste en la combinación lineal ponderada de los valores muestreados (Díaz et al., 2016). La estimación de Z_k se calcula mediante la **Ecuación 1**.

$$z_k = \lambda_1 z(x_1) + \lambda_2 z(x_2) + \lambda_3 z(x_3) + \dots + \lambda_n z(x_n) \quad (1)$$

donde Z_k es el valor estimado, Z_i son los valores de las muestras, i son los pesos de Krigeado y n es el número de observaciones disponibles.

El Krigeado atribuye un peso λ_i a la ley de cada muestra $Z(x_i)$, donde los pesos altos corresponden a las muestras cercanas y los pesos débiles a las alejadas. La ponderación λ_i depende del modelo ajustado a los puntos medidos, la distancia a la ubicación de la predicción, y las relaciones espaciales entre los valores medidos alrededor de la ubicación de la predicción. Estos pesos λ_i se calculan de manera que la varianza del error cometido sea mínima y considerando las características geométricas del problema (Alfaro, 2007). Para garantizar la condición de insesgamiento los pesos deben satisfacer la **Ecuación 2**, conocida como condición de universalidad:

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n = 1 \quad (2)$$

El Krigeado involucra operaciones de diferente índole, dígame: operaciones matriciales (inversión, multiplicación, sistemas de ecuaciones lineales), geométricas (distancia), estadísticas y de procesamiento de datos (Gutiérrez de Ravé, Jiménez-Hornero, Ariza-Villaverde, & Gómez-López, 2014).

Existen diferentes métodos para evaluar la bondad de ajuste del modelo de semivariograma elegido con respecto a los datos muestrales y por ende de las predicciones hechas con Kriging. El más empleado es el de validación cruzada, que consiste en excluir la observación de uno de los n puntos muestrales y con los $n-1$ valores restantes y el modelo de semivariograma escogido, predecir vía Kriging el valor de la variable en estudio en la ubicación del punto que se excluyó.

Se piensa que, si el modelo de semivarianza elegido describe bien la estructura de autocorrelación espacial, entonces la diferencia entre el valor observado y el valor predicho debe ser pequeña. Este procedimiento se realiza en forma secuencial con cada uno de los puntos muestrales y así se obtiene un conjunto de n "errores de predicción".

Lo usual es calcular medidas que involucren a estos errores de predicción para diferentes modelos de semivarianza y seleccionar aquel que optimice algún criterio como por ejemplo el del mínimo error cuadrático medio (MECM). Este procedimiento es similar a la conocida técnica de remuestreo Jackknife empleada en diversos contextos estadísticos para calcular varianzas de estimación, entre otros aspectos. Una forma descriptiva de hacer la validación cruzada es mediante un gráfico de dispersión de los valores observados contra los valores predichos. En la medida en que la nube de puntos se ajuste más a una línea recta que pase por el origen, mejor será el modelo de semivariograma utilizado para realizar el Kriging (Lebrenz & Bárdossy, 2019).

Una vez se ha hecho la predicción en un conjunto de puntos diferentes de los muestrales vía Kriging, se debe elaborar un mapa que dé una representación global del comportamiento de la variable de interés en la zona estudiada. Los más empleados son los mapas de contornos, los mapas de residuos y los gráficos tridimensionales.

En el caso de los mapas de contornos, en primer lugar, se divide el área de estudio en un enmallado y se hace la predicción en cada uno de los nodos de éste mismo. Posteriormente se unen los valores predichos con igual valor, generando así las líneas de contorno (isolíneas de distribución). Este gráfico permite identificar la magnitud de la variable en toda el área de estudio. Es conveniente acompañar el mapa de interpolaciones de la variable con los correspondientes mapas de isolíneas de los errores y de las varianzas de predicción (posiblemente estimados a través de métodos matemáticos), con el propósito de identificar zonas de mayor incertidumbre respecto a las predicciones (GISGeography, 2018).

2.2.2.2 Otros tipos de Kriging

A continuación, se mencionan algunos aspectos generales de los otros métodos de predicción espacial que describe (Cressie, 1992).

a. Kriging simple

El Kriging simple supone que hay una variable regionalizada estacionaria media (m) y covarianza conocida. De manera analógica a como se define en los modelos lineales (por ejemplo, en diseño de experimentos) el modelo establecido en este caso es igual a la media más un error aleatorio con media cero. La diferencia es que en este caso los errores no son independientes.

Sea $Z(x)$ la variable de interés medida en el sitio x se puede calcular en la siguiente forma (**Ecuación 3**).

$$\begin{aligned} E[Z(x)] &= m \\ Z(x) &= m + \varepsilon(x), \quad \text{con } E[\varepsilon(x)] = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

El predictor de la variable de interés en un sitio X_0 donde no se tiene información se define como (**Ecuación 4**):

$$Z^*(x_0) = m + \varepsilon^*(x_0), \quad (4)$$

Con $\varepsilon^*(x_0)$ que corresponde a la predicción del error aleatorio en el sitio X_0 despejando de la ecuación anterior $\varepsilon^*(x_0) = Z^*(x_0) - m$.

El predictor del error aleatorio se define de la siguiente forma (**Ecuación 5**)

$$\varepsilon^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \varepsilon(x_i) = \sum_{i=1}^n \lambda_i (Z(x_i) - m). \quad (5)$$

De donde el predictor de la variable de estudio es (**Ecuación 6**):

$$Z^*(x_0) = m + \left[\sum_{i=1}^n \lambda_i (Z(x_i) - m) \right] = m + \sum_{i=1}^n \lambda_i \varepsilon(x_i) \quad (6)$$

Por consiguiente, a diferencia del Kriging ordinario, en este caso no existen restricciones para las ponderaciones tendientes al cumplimiento de la condición de insesgamiento.

b. Kriging universal

En los supuestos hechos hasta ahora respecto a los métodos Kriging se ha asumido que la variable regionalizada es estacionaria (al menos se cumple con la hipótesis intrínseca). En muchos casos, la variable no satisface estas condiciones y se caracteriza por exhibir una tendencia. Por ejemplo, en hidrología los niveles piezométricos de un acuífero pueden mostrar una pendiente global en la dirección del flujo. Para tratar este tipo de variables es frecuente descomponer la variable $Z(x)$ como la suma de la tendencia, tratada como una función determinística, más una componente estocástica estacionaria de media cero. Asuma que (**Ecuación 7**):

$$Z(x) = m(x) + \varepsilon(x) \quad (7)$$

Con $E(\varepsilon(x)) = 0$, $V(\varepsilon(x)) = \sigma^2$ y, por consiguiente $E(Z(x)) = m(x)$. La tendencia puede expresarse mediante (**Ecuación 8**):

$$m(x) = \sum_{l=1}^p a_l f_l(x) \quad (8)$$

Donde las funciones $f_i(x)$ son conocidas y p es el número de términos empleados para ajustar $m(x)$. El predictor Kriging universal se define como (**Ecuación 9**):

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (9)$$

c. Kriging indicador

Suponga que se tiene una variable regionalizada $\{Z(x): x \in D \subset R^d\}$ estacionaria se define de la siguiente manera:

$$I(x_i, z_i) = \begin{cases} 1 & \text{Si } Z(x_i) \leq z_i \\ 0 & \text{Otro caso} \end{cases}$$

Algunas propiedades son las siguientes:

- i. $\Pr(I(x, z_i) = 1) = \Pr(Z(x) \leq z_i) = F(z_i)$
- ii. $E(I(x, z_i)) = 1 \Pr(I(x, z_i) = 1) + 0 \Pr(I(x, z_i) = 0)$
 $= 1 \Pr(I(x, z_i) = 1) = F(z_i)$

El predictor Kriging indicador es igual a (**Ecuación 10**):

$$I^*(x_0, z_i) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(z_i) I(x_i, z_i) \quad (10)$$

es decir que la predicción de la función indicadora en el sitio X_0 es igual a una combinación lineal de las n funciones indicadoras evaluadas en los sitios de medición. Cressie muestra que el Kriging indicador es un estimador de la probabilidad acumulada hasta el límite z definido en la función indicadora.

d. Kriging Log-Normal y Multi-Gaussiano

En estos dos procedimientos se hacen transformaciones de la variable regionalizada con el propósito de normalizar en cada sitio de la región de estudio. El primero de estos consiste en aplicar Kriging ordinario a la transformación logarítmica de los datos.

Sea $\{Z(x): x \in D\}$ una variable regionalizada log-normal. Es decir que $Y(x) = \text{Log}(Z(x))$ tiene distribución normal. Algunas veces se requiere adicionar una constante positiva de tal forma que $Y(x)$ esté definida.

El predictor Kriging log-normal es (**Ecuación 11**):

$$Y^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Y(x_i). \quad (11)$$

Los pesos se obtienen de manera análoga al Kriging ordinario. El semivariograma usado es el de los valores transformados. La complicación práctica puede darse al hacer la retransformación a la escala original, puesto que $Z^*(X_0) = \exp Y^*(X_0)$ es un predictor sesgado.

Respecto al Kriging multi-gaussiano, suponga que se tiene una variable regionalizada $\{Z(x): x \in D\}$: estacionaria. Este procedimiento consiste en hacer una transformación de $Z(x)$ tal que los valores transformados sigan una distribución normal estándar. En ese sentido es una generalización del Kriging log-normal.

3. METODOLOGÍA

La metodología que se sigue en este trabajo, se divide en tres etapas: la primera es la delimitación del área de estudio y aspectos generales en cuanto a contaminación atmosférica en Puebla, la segunda es la obtención, procesamiento y validación y evaluación de los datos de monitoreo de la calidad del aire y por último realizar un análisis estadístico de correlación, que nos permita encontrar la relación entre las variables meteorológicas y los contaminantes atmosféricos en la zona metropolitana.

3.1 Área de estudio y contaminación atmosférica en Puebla

Según el Consejo Nacional de Población (CONAPO), la zona metropolitana que pertenece Puebla es nombrada como la zona metropolitana Puebla-Tlaxcala (CONAPO, 2010). La ciudad de Puebla colinda al este con los municipios de Cuautlancingo, Ocoyucan, San Andrés y San Pedro Cholula; al norte con el Estado de Tlaxcala; al sur con los municipios de Teopantlán y Santiago Miahuatlán; y al oeste con Tepatlaxco de Hidalgo, Amozoc, Cuautinchán y Teteles de Ávila Camacho (**Figura 5**).

3.1.1 Localización y extensión

La ciudad de Puebla se encuentra localizada en el valle de Puebla-Tlaxcala. Sus coordenadas extremas son $18^\circ 50'$ - $19^\circ 14'$ de latitud norte y $98^\circ 01'$ - $98^\circ 18'$ de longitud oeste y su extensión territorial es de 524.31 Km^2 , lo que lo convierte en el quinto municipio más extenso del Estado de Puebla.

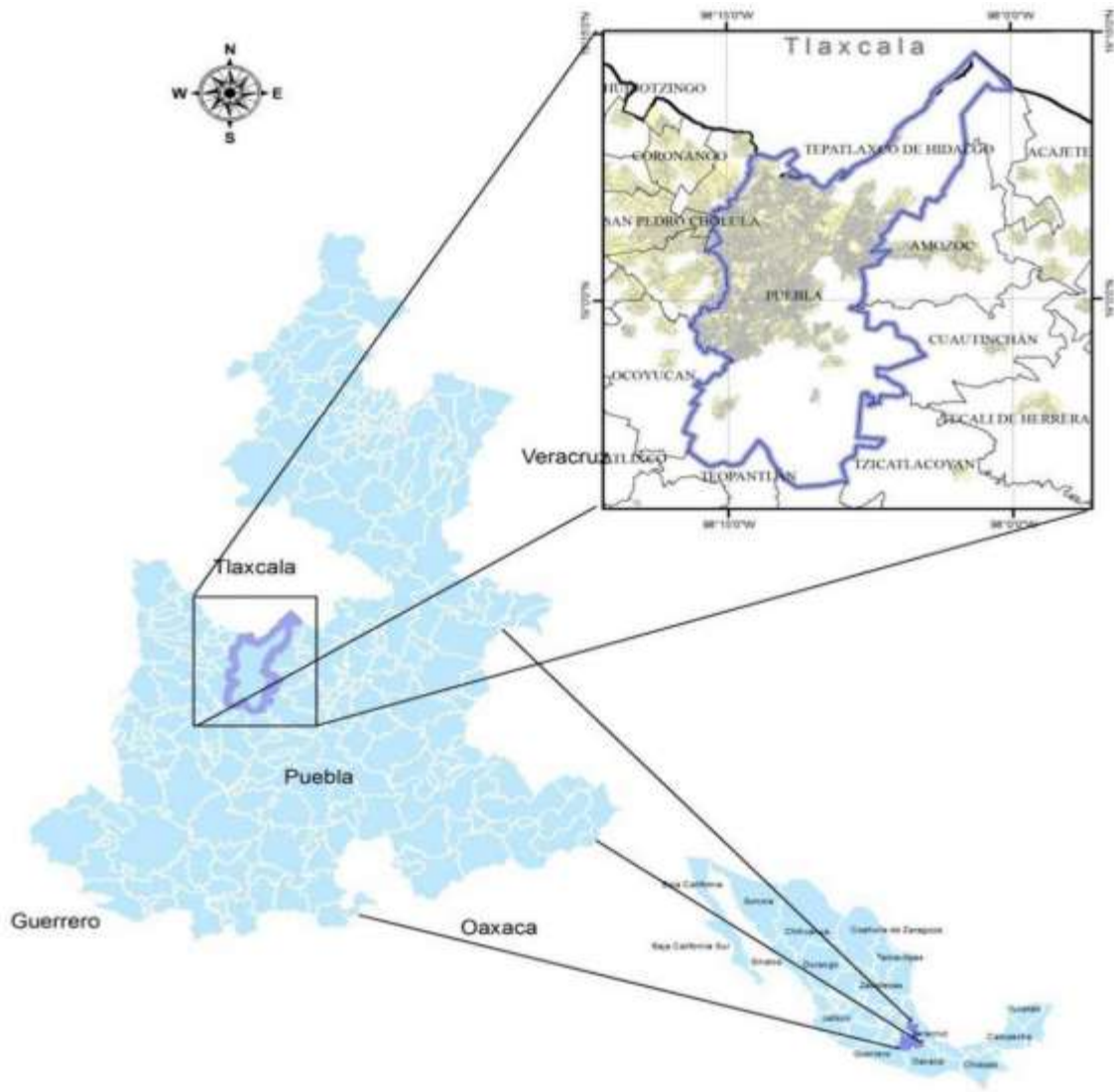


Figura 5. Localización y límite de la ciudad de Puebla
Fuente: (SDRSOT, 2015).

3.1.2 Clima

La ciudad de Puebla se presentan los siguientes climas por su ubicación en el eje neovolcánico: Templado – seco, en Marzo – Abril; templado subhúmedo con lluvias en verano y clima semifrío en invierno; así como clima frío la mayor parte del año en la cumbre de la Malinche.

La temperatura media anual registrada es de 16°C, descendiendo ésta a medida que el terreno asciende hacia La Malinche, y aumentando hacia sur. Por otra parte, los rangos más significativos del clima en el municipio de Puebla se pueden dividir en las siguientes isotermas según las distintas regiones del municipio: 16°C a 14°C, 14°C a 12°C, 12°C a 10°C, 10°C a 8°C y 8°C a 6°C (**Figura 6**).

En materia de precipitación, en el noreste de la ciudad se presenta pluviosidad superior a los 1,000 mm al año. Por lo que corresponde al sector intermedio del Valle de Puebla, ésta oscila entre 800 y 1,000 mm; mientras que en el sureste es inferior a los 800 mm.

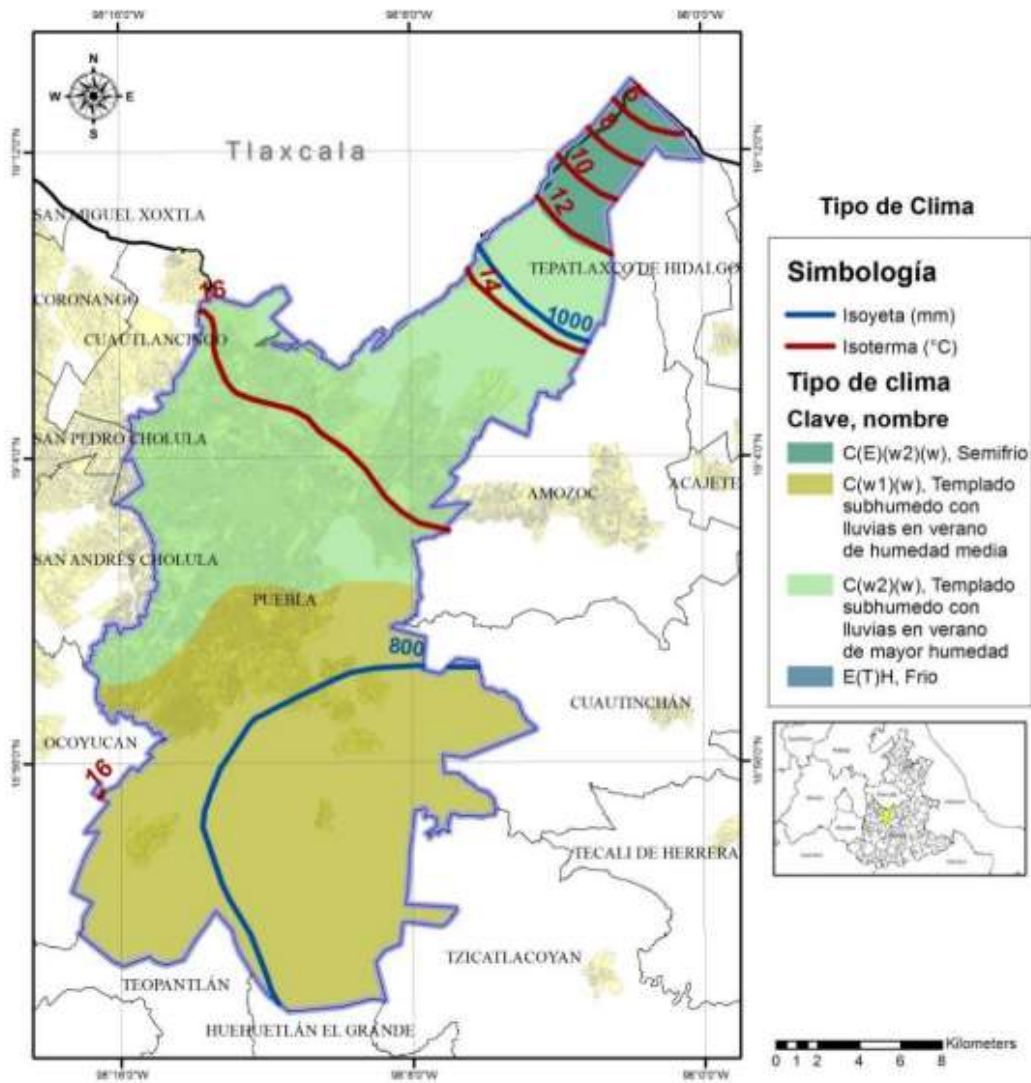


Figura 6. Clima de la ciudad de Puebla en el 2005
Fuente: (SDRSOT, 2015)

3.1.3 Contaminación atmosférica en la ciudad de Puebla

Resulta sustancial revisar los inventarios de emisión para conocer qué es lo que emite y cuanto emite dentro de la zona urbana, sin embargo, en México los inventarios de emisión no están actualizados, añadiéndole que la información que proporcionan las industrias a dichos inventarios son incongruentes, por lo tanto, los datos son pocos confiables. Cabe mencionar que los inventarios proporcionan una primera aproximación sobre las emisiones a la atmósfera que se generan en la zona metropolitana. Por otra parte, es importante ubicar las estaciones de monitoreo de la calidad de aire para el presente estudio.

La Red Estatal de Monitoreo Atmosférico del Estado de Puebla (REMA) esta administrada por la Secretaría de Desarrollo Rural, Sustentabilidad y Ordenamiento Territorial (SDRSOT). Las variables que mide esta red son las siguientes: Ozono (O₃). Monóxido de carbono (CO), Dióxido de azufre (SO₂), Dióxido de nitrógeno (NO₂) y Partículas (PM); datos meteorológicos, como velocidad y dirección del viento, humedad relativa, presión, precipitación y radiación solar.

La REMA actualmente cuenta con cinco estaciones de monitoreo atmosférico (Tecnológico, Ninfas, Serdán, Agua Santa y Velódromo) distribuidas a lo largo de la zona metropolitana del valle de Puebla. En los inicios de la red en el año 2000 solo contaban con cuatro estaciones de monitoreo (Tecnológico, Ninfas, Serdán y Agua Santa) que son con las que se hará este estudio. En la **Figura 7**, se observan las estaciones de monitoreo de calidad del aire en la ciudad de Puebla, mientras que en la **Tabla 4** se presentan los nombres y las coordenadas geográficas en sistema UTM de las estaciones y una descripción de lugar donde se encuentran.

Tabla 4. Ubicación de las estaciones de monitoreo de la REMA

| Nombre | Ubicación | Coordenadas UTM | | |
|---------------|---|-----------------|----------------|------|
| Tecnológico | Avenida Tecnológico No. 420, a una altitud de 2,216.5 msnmm1, en una zona con actividades industriales, habitacionales y escolares. | 589322.12 m E | 2107306.87 m N | 14 Q |
| Ninfas | Se localiza en el sector centro-poniente, a una altitud de 2,136 msnm, en una zona habitacional. | 582677.09 m E | 2105584.71 m N | 14 Q |
| Serdán (BINE) | Está a un costado del Monumento a los Hermanos Serdán, a una altitud de 2,180 msnm. | 581580.47 m E | 2108461.94 m N | 14 Q |
| Agua Santa | Se encuentra al suroeste de la ciudad a una altitud de 2,182 msnm, dentro de una zona habitacional y escolar. | 578980.52 m E | 2099600.34 m N | 14 Q |

Fuente: (Mendoza, 2016).

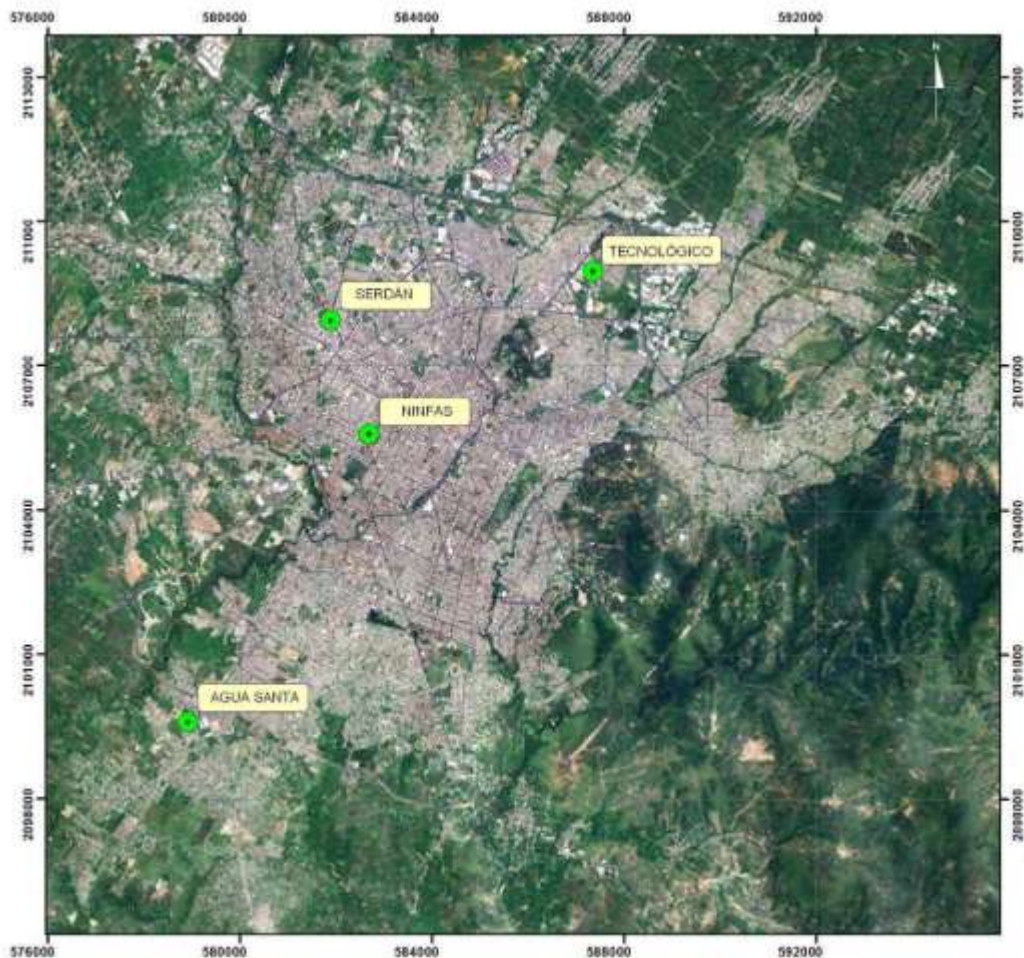


Figura 7. Ubicación de las estaciones del REMA
Fuente: (SSAOT, 2012)

3.1.3.1 Inventario de emisiones

Los contaminantes presentes en el aire son el resultado de una gran cantidad y diversidad de fuentes emisoras. En zonas urbanas como es el municipio de Puebla, tienen un origen antropogénico, no obstante, también existen fuentes de origen natural, pero en menor escala. Los contaminantes se presentan en forma de gases, aerosoles y material particulado. Entre los gaseosos encontramos a los óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), bióxido de azufre (SO₂), compuestos orgánicos volátiles (COV's), entre otros. En referencia al material particulado, éste considera a los sólidos presentes en el aire que se clasifican en partículas suspendidas totales, partículas de diámetro aerodinámico menor a 10 micras, y partículas suspendidas de diámetro aerodinámico inferior a 2.5 micras.

Las fuentes de emisión que se consideran para los inventarios de emisión son:

- Fuentes fijas
 - Fuentes de área
 - Fuentes móviles
 - Fuentes naturales
- a) Fuentes fijas: Comprende las emisiones provenientes de las industrias de jurisdicción federal y estatal. Se estiman las emisiones de tres tipos de procesos:
- Procesos de combustión en equipos de calentamiento directo e indirecto, incluye combustibles fósiles, biomasa y biocombustibles.
 - Procesos que generan partículas como polvos, humos, aerosoles o neblinas.
 - Procesos que generan gases, vapores o neblinas tóxicas.
- b) Fuentes de área: Son aquellas fuentes numerosas y dispersas como para incluirse de manera eficiente en un inventario de fuentes fijas. Se consideran las siguientes categorías:
- Combustión en fuentes estacionarias. Incluye el uso de combustibles derivados de petróleo y biomasa en establecimientos comerciales y de uso doméstico.
 - Uso de solventes. Incluye actividades que utilizan solventes en sus procesos, como son el recubrimiento de superficies, pintado de carrocerías, señalización vial y actividades de limpieza, entre otras.
 - Almacenamiento y transporte de derivados de petróleo. Incluye emisiones evaporativas asociadas a actividades de manejo, almacenamiento y distribución en gasolineras y gaseras.
 - Fuentes industriales ligeras y comerciales. Incluye procesos de la industria de la construcción, panificadoras, tortillerías, servicios comerciales, venta y preparación de alimentos.
 - Agropecuarias. Aplicación de fertilizantes, plaguicidas, labores de labranza, movimiento del ganado en corrales de engorda, entre otras.
 - Fuentes de área misceláneas. Incendios forestales, construcciones, emisiones domésticas de amoníaco, operaciones en terminales de autobuses, esterilización de material hospitalario y quemas agrícolas.
- c) Fuentes móviles: Se dividen en fuentes carreteras y no carreteras. Las no carreteras incluyen maquinaria de construcción y agrícola, embarcaciones, ferrocarriles y aviones; las fuentes móviles carreteras son todos los vehículos automotores.

- d) Fuentes naturales: Las fuentes naturales son aquellas que emiten contaminantes a la atmósfera sin la intervención del humano, se clasifican en emisiones biogénicas y geogénicas:
- Emisiones biogénicas. Se originan por procesos bióticos producidos por los diferentes tipos de vegetación y cultivos. Se consideran principalmente los COV y los NO_x producidos por los microorganismos del suelo.
 - Emisiones geogénicas. Proviene de procesos abióticos como las erupciones volcánicas y fumarolas. Se contabiliza principalmente el SO₂.

3.2 Obtención, procesamiento y validación de los datos de monitoreo del REMA

El gobierno de México cuenta con el Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA), sin embargo, en el sistema los datos que emite la REMA de Puebla no están validados por lo que se deben de validar, para ello se utiliza la metodología que marca el SINAICA mediante el manual 5 “protocolo de manejo de datos de la calidad del aire” (INE, 2010b). Este método se describe en tres partes generales: consideraciones respecto a la disponibilidad, disposición y verificación de los datos.

3.2.1 Disponibilidad, disposición, limpieza y verificación de los datos

Como primer paso, se debe iniciar considerando algunos aspectos y características de los datos que son de fundamental importancia, tales como: tipo de datos, disponibilidad, disposición, forma de acceso y cantidad; lo anterior debe ser homogéneo en toda la base de datos, tanto a través del tiempo como de las estaciones de monitoreo. En este caso se solicitó la base de datos al REMA.

En caso de no contar con los datos validados, se debe realizar una limpieza y validación de la base de datos crudos. Como primer término la limpieza de los datos consiste, entre otras cosas, en la asignación automática de códigos/avisos para la identificación de valores nulos y fuera de intervalo según la experiencia o el análisis de los datos.

En esta se aplicarán una serie de criterios, de forma manual, semiautomática o automática en algunos casos, para diferenciar los datos correctos de los falsos o incorrectos. Es decir que aquellos valores que no correspondan a mediciones de la calidad del aire del REMA. Un dato o debidamente medido da información incorrecta sobre la concentración y el comportamiento de un contaminante atmosférico.

En la mayor parte de los casos el uso de criterios depende del sistema de monitoreo, ya que este determina: la cantidad y tipo de bandejas para la limpieza de datos, los límites máximos y mínimos de la medición de concentración de los contaminantes atmosféricos, entre otros criterios. Resulta fundamental resaltar la importancia de la etapa de validación, ya que esta se concibe como un proceso para determinar la calidad de un conjunto de datos de acuerdo con las necesidades particulares (Mendoza, 2016).

La verificación del criterio de suficiencia de datos de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-156-SEMARNAT-2012, se debe tener al menos del 75% de completión de datos disponibles tal como se muestra en la **Tabla 5**.

Para la determinación de las características fundamentales de los datos, como su comportamiento general a través del tiempo, se recomienda utilizar gráficas de series de tiempo, de dispersión e histogramas, a continuación, se describe cada una de estas herramientas.

1. Series de tiempo

Algunas representaciones geográficas específicas para los datos temporales son las series de tiempo, más simples de generar y proporcionar una gran cantidad de información. Este gráfico hace más fácil identificar las tendencias a gran y a pequeña escala sobre el tiempo. También al utilizar esta herramienta nos permite identificar fácilmente los posibles datos dudosos usando el gráfico del tiempo (**Figura 8**). El tiempo se traza en el eje horizontal y la observación en el eje vertical.

2. Dispersión de los datos

Un diagrama de caja y bigote o bloxplot en inglés, es un gráfico basado en cuartiles, mediante el cual se visualiza un conjunto de datos. Este compuesto por un rectángulo, “la caja”, y dos brazos, “los bigotes”. Esta herramienta es muy útil para conocer estadísticamente los datos atípicos para un estudio de transporte de contaminantes atmosféricos, este comportamiento lo podemos relacionar como una posible atribución de algunos fenómenos naturales o antropogénicos (**Figura 9**).

3. Histogramas

El uso de histogramas es una excelente herramienta estadística para observar la posible distribución que tiene los datos analizados. Las distribuciones estadísticas de muchas variables atmosféricas son claramente asimétricas y sesgadas a la derecha (**Figura 10**), existe un límite físico a la izquierda, las cuales no pueden tomar valores negativos (Wilks, 2012).

Tabla 5. Disponibilidad de datos del 2001-2005 obtenidos del REMA

| Estación | | Tecnológico | | | | | | Ninfas | | | | | |
|-----------------------|------------|-------------|--------|-------|-------------------|---------|---------|------------|--------|---------|------|-----------|---------|
| Año | Mes | T (°C) | HR (%) | UV-A | UV-B | O3(PPB) | CO(PPM) | T (°C) | HR (%) | UV-A | UV-B | O3(PPB) | CO(PPM) |
| 2001 | ENERO | 13.3 | 56.2 | 150.7 | 17.0 | 22.4 | 1.9 | 14.1 | 54.2 | 44.2 | 47.6 | 18.2 | 1.9 |
| | FEBRERO | 14.3 | 55.6 | 169.3 | 22.5 | 23.6 | 1.5 | 15.5 | 53.2 | 48.5 | 62.5 | 17.1 | 1.8 |
| | MARZO | 16.0 | 40.4 | 209.8 | 30.3 | 29.2 | 1.7 | 16.9 | 41.6 | 59.8 | 84.8 | 18.7 | 1.8 |
| | ABRIL | 17.3 | 49.4 | 196.7 | 28.5 | 38.4 | 2.1 | 18.3 | 41.7 | 51.7 | 51.5 | 27.8 | 2.5 |
| | MAYO | 17.4 | 54.9 | 183.8 | 27.8 | 36.7 | 1.4 | 18.7 | 53.6 | 54.6 | 77.3 | 27.9 | 1.5 |
| | JUNIO | 16.3 | 70.3 | 189.3 | 28.2 | 29.8 | 1.2 | 17.5 | 69.6 | 55.5 | 81.0 | 23.1 | 1.3 |
| | JULIO | 16.4 | 68.3 | 188.2 | 25.9 | 25.2 | 1.1 | 17.7 | 68.3 | 54.9 | 78.7 | 22.7 | 1.4 |
| | AGOSTO | 16.6 | 69.3 | 173.9 | 26.4 | 22.5 | 1.1 | 17.9 | 67.8 | 52.0 | 75.0 | 21.4 | 1.3 |
| | SEPTIEMBRE | 16.0 | 74.5 | 203.9 | 38.9 | 20.3 | 1.3 | 17.2 | 73.8 | 109.8 | 43.8 | 20.0 | 1.5 |
| | OCTUBRE | 15.3 | 65.6 | 165.1 | 23.4 | 23.1 | 1.4 | 16.6 | 63.6 | 149.8 | 23.1 | 23.1 | 1.3 |
| | NOVIEMBRE | 13.8 | 58.9 | 148.1 | 19.1 | 23.0 | 1.3 | 14.9 | 57.7 | 130.8 | 18.0 | 21.8 | 1.6 |
| | DICIEMBRE | 13.6 | 60.8 | 132.1 | 16.8 | 18.9 | 1.5 | 14.7 | 60.1 | 114.9 | 15.8 | 18.3 | 1.8 |
| P. ANUAL | | 15.5 | 60.3 | 175.9 | 25.4 | 26.1 | 1.4 | 16.7 | 58.7 | 77.2 | 54.9 | 21.7 | 1.6 |
| Estación | | Serdán | | | | | | Agua santa | | | | | |
| Año | Mes | T (°C) | HR (%) | UV-A | UV-B | O3(PPB) | CO(PPM) | T (°C) | HR (%) | UV-A | UV-B | O3(PPB) | CO(PPM) |
| 2001 | ENERO | 13.2 | 53.9 | 27.9 | 49.3 | 14.1 | 3.3 | 14.5 | 57.2 | 27.0 | 44.2 | 23.5 | 1.2 |
| | FEBRERO | 14.4 | 53.6 | 39.5 | 56.9 | 16.3 | 2.2 | 16.0 | 55.0 | 35.1 | 48.1 | 24.4 | 1.0 |
| | MARZO | 15.8 | 42.2 | 52.2 | 69.2 | 18.4 | 1.7 | 17.2 | 44.3 | 48.6 | 60.6 | 30.5 | 0.9 |
| | ABRIL | 17.4 | 47.3 | 50.6 | 65.9 | 25.4 | 1.7 | 18.6 | 48.3 | 42.7 | 53.4 | 40.5 | 1.0 |
| | MAYO | 17.5 | 53.4 | 48.3 | 61.4 | 25.9 | 2.0 | 18.9 | 56.1 | 45.0 | 54.7 | 38.8 | 1.1 |
| | JUNIO | 16.5 | 68.5 | 47.9 | 60.8 | 21.7 | 2.4 | 18.0 | 71.5 | 49.8 | 58.8 | 29.2 | 0.8 |
| | JULIO | 16.6 | 67.5 | 46.7 | 60.5 | 18.4 | 2.0 | 18.0 | 71.0 | 47.3 | 57.9 | 26.8 | 0.8 |
| | AGOSTO | 16.9 | 67.9 | 50.5 | 66.6 | 22.4 | 1.9 | 18.1 | 69.1 | 43.3 | 52.1 | 24.4 | 0.8 |
| | SEPTIEMBRE | 16.1 | 72.3 | 138.8 | 28.1 | 16.1 | 2.1 | 17.6 | 76.6 | 117.3 | 26.5 | 21.0 | 0.9 |
| | OCTUBRE | 15.5 | 62.4 | 190.3 | 12.8 | 18.9 | 2.1 | 16.8 | 66.8 | 164.6 | 11.9 | 24.2 | 0.9 |
| | NOVIEMBRE | 13.8 | 57.4 | 163.4 | 10.0 | 16.9 | 2.3 | 15.1 | 61.0 | 146.4 | 9.5 | 23.7 | 1.0 |
| | DICIEMBRE | 13.6 | 59.5 | 145.8 | 8.8 | 13.1 | 2.4 | 14.9 | 63.6 | 127.0 | 8.1 | 24.9 | 1.6 |
| P. ANUAL | | 15.6 | 58.8 | 83.5 | 45.8 | 19.0 | 2.2 | 17.0 | 61.7 | 74.5 | 40.5 | 27.7 | 1.0 |
| NOM-156-SEMARNAT-2012 | | | | | Datos disponibles | | | | | 75% MIN | | 100% REAL | |

Fuente: (Elaboración propia mediante datos del REMA, 2019)

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
LICENCIATURA EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

| Estación | | Tecnológico | | | | | | Ninfas | | | | | |
|-----------------------|------------|-------------|--------|-------------------|------|---------|---------|------------|--------|---------|------|--------------|---------|
| Año | Mes | T (°C) | HR (%) | UV-A | UV-B | O3(PPB) | CO(PPM) | T (°C) | HR (%) | UV-A | UV-B | O3(PPB) | CO(PPM) |
| 2002 | ENERO | 13.7 | 50.4 | 153.4 | 20.2 | 24.5 | 1.4 | 14.4 | 51.7 | 129.0 | 18.3 | 21.2 | 1.7 |
| | FEBRERO | 14.3 | 53.3 | 160.5 | 25.4 | 25.0 | 1.1 | 15.3 | 52.2 | 139.6 | 24.0 | 22.2 | 1.4 |
| | MARZO | 17.2 | 44.4 | 190.5 | 33.3 | 29.9 | 1.0 | 18.4 | 43.8 | 165.9 | 32.9 | 25.4 | 1.2 |
| | ABRIL | 17.9 | 47.4 | 199.6 | 34.6 | 34.7 | 1.1 | 19.2 | 45.8 | 175.6 | 31.1 | 34.6 | 1.2 |
| | MAYO | 18.4 | 50.1 | 187.8 | 31.2 | 35.9 | 1.0 | 19.7 | 49.4 | 165.1 | 29.9 | 37.4 | 1.2 |
| | JUNIO | 17.0 | 70.2 | 173.5 | 28.3 | 25.3 | 1.0 | 18.1 | 69.5 | 153.9 | 25.8 | 26.7 | 1.1 |
| | JULIO | 16.8 | 66.3 | 172.3 | 27.5 | 24.2 | 0.8 | 18.1 | 64.9 | 153.3 | 26.4 | 17.2 | 1.1 |
| | AGOSTO | 16.9 | 62.2 | 182.4 | 29.3 | 25.4 | 0.9 | 18.3 | 60.7 | 159.5 | 27.8 | 19.0 | 1.1 |
| | SEPTIEMBRE | 16.4 | 76.5 | 141.1 | 23.1 | 22.9 | 1.0 | 17.5 | 75.0 | 125.0 | 22.6 | 15.0 | 1.2 |
| | OCTUBRE | 16.3 | 71.6 | 157.3 | 23.8 | 22.4 | 1.2 | 17.4 | 71.9 | 155.4 | 16.9 | 15.7 | 1.3 |
| | NOVIEMBRE | 13.8 | 60.5 | 133.8 | 17.5 | 21.6 | 1.3 | 14.7 | 59.9 | 137.5 | 12.3 | 14.5 | 1.2 |
| | DICIEMBRE | 13.3 | 59.1 | 129.2 | 16.5 | 21.8 | 1.3 | 14.0 | 58.9 | 131.3 | 11.5 | 14.1 | 1.5 |
| | P. ANUAL | 16.0 | 59.3 | 165.1 | 25.9 | 26.1 | 1.1 | 17.1 | 58.6 | 149.2 | 23.3 | 21.9 | 1.3 |
| Estación | | Serdán | | | | | | agua santa | | | | | |
| Año | Mes | T (°C) | HR (%) | UV-A | UV-B | O3(PPB) | CO(PPM) | T (°C) | HR (%) | UV-A | UV-B | O3(PPB) | CO(PPM) |
| 2002 | ENERO | 13.4 | 51.3 | 161.0 | 10.0 | 15.9 | 2.0 | 14.6 | 55.5 | 141.8 | 9.4 | 24.5 | 1.1 |
| | FEBRERO | 14.2 | 51.3 | 172.6 | 12.8 | 17.4 | 1.8 | 15.6 | 54.7 | 152.6 | 12.0 | 22.6 | 0.8 |
| | MARZO | 17.2 | 43.2 | 209.1 | 17.3 | 22.7 | 1.7 | 17.4 | 46.0 | 185.6 | 16.5 | 27.8 | 1.3 |
| | ABRIL | 17.9 | 45.7 | 216.5 | 17.8 | 30.1 | 1.6 | 19.5 | 47.8 | 194.5 | 17.3 | 35.7 | 0.8 |
| | MAYO | 18.5 | 48.5 | 202.8 | 15.9 | 28.9 | 1.7 | 19.9 | 51.5 | 179.6 | 15.2 | 39.0 | 0.8 |
| | JUNIO | 17.0 | 68.4 | 187.0 | 14.1 | 24.1 | 1.7 | 18.6 | 71.7 | 164.6 | 13.8 | 28.1 | 0.7 |
| | JULIO | 16.9 | 64.4 | 179.6 | 13.4 | 19.5 | 1.6 | 18.3 | 68.6 | 171.8 | 13.9 | 23.0 | 0.6 |
| | AGOSTO | 17.1 | 60.4 | 186.4 | 14.0 | 20.0 | 1.7 | 18.5 | 63.4 | 169.3 | 13.9 | 24.7 | 0.7 |
| | SEPTIEMBRE | 16.6 | 75.6 | 154.7 | 11.7 | 17.5 | 2.1 | 17.9 | 80.2 | 139.8 | 11.6 | 21.5 | 0.9 |
| | OCTUBRE | | | | | 18.0 | 2.3 | 17.5 | 76.7 | 147.5 | 11.3 | 20.4 | 0.9 |
| | NOVIEMBRE | | | | | 17.3 | 2.2 | 15.1 | 64.4 | 128.4 | 8.6 | 20.5 | 0.9 |
| | DICIEMBRE | | | | | 17.0 | 2.5 | 14.4 | 63.3 | 121.5 | 8.0 | 17.4 | 1.1 |
| | P. ANUAL | 16.5 | 56.5 | 185.5 | 14.1 | 20.7 | 1.9 | 17.3 | 62.0 | 158.1 | 12.6 | 25.4 | 0.9 |
| NOM-156-SEMARNAT-2012 | | | | Datos disponibles | | | | | | 75% MIN | | 95.83 % REAL | |

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
LICENCIATURA EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

| Estación | | Tecnológico | | | | | | Ninfas | | | | | |
|-----------------------|------------|-------------|--------|-------------------|------|---------|---------|------------|---------|-------|--------------|---------|---------|
| Año | Mes | T (°C) | HR (%) | UV-A | UV-B | O3(PPB) | CO(PPM) | T (°C) | HR (%) | UV-A | UV-B | O3(PPB) | CO(PPM) |
| 2003 | ENERO | 13.2 | 53.8 | 131.4 | 17.4 | 26.8 | 1.3 | 14.1 | 52.9 | 129.1 | 11.8 | 25.6 | 1.4 |
| | FEBRERO | 15.4 | 44.7 | 171.0 | 27.3 | 27.5 | 1.3 | 16.4 | 44.2 | 166.4 | 17.8 | 23.5 | 1.3 |
| | MARZO | 16.9 | 37.2 | 186.1 | 30.4 | 32.1 | 1.0 | 17.9 | 36.7 | 184.4 | 20.2 | 27.6 | 1.3 |
| | ABRIL | 19.1 | 43.1 | 184.0 | 30.0 | 37.6 | 1.1 | 20.8 | 38.3 | 181.6 | 20.2 | 35.1 | 1.5 |
| | MAYO | 19.3 | 50.7 | 179.7 | 28.8 | 43.4 | 0.9 | 20.5 | 50.0 | 176.0 | 19.1 | 40.1 | 0.9 |
| | JUNIO | 15.9 | 76.6 | 152.0 | 25.5 | 22.3 | 0.7 | 17.9 | 77.1 | 149.0 | 17.3 | 20.0 | 1.0 |
| | JULIO | 16.7 | 65.2 | 182.0 | 29.4 | 24.1 | 0.6 | 18.0 | 64.1 | 180.7 | 20.1 | 21.8 | 0.7 |
| | AGOSTO | 16.6 | 67.4 | 166.4 | 26.7 | 27.6 | 0.8 | 17.7 | 67.4 | 163.1 | 18.0 | 22.1 | 1.0 |
| | SEPTIEMBRE | 16.5 | 75.1 | 159.2 | 26.0 | 25.0 | 0.9 | 17.6 | 76.0 | 161.9 | 18.2 | 20.3 | 1.0 |
| | OCTUBRE | 16.0 | 71.5 | 150.2 | 23.9 | 21.6 | 1.2 | 17.1 | 72.5 | 145.3 | 16.2 | 17.7 | 1.0 |
| | NOVIEMBRE | 14.9 | 60.0 | 142.7 | 20.4 | 22.3 | 1.6 | 15.9 | 60.1 | 138.7 | 14.0 | 21.3 | 1.0 |
| | DICIEMBRE | 11.8 | 52.8 | 120.9 | 15.0 | 23.2 | 1.3 | 12.7 | 52.6 | 117.3 | 10.2 | 21.5 | 1.2 |
| P. ANUAL | | 16.0 | 58.2 | 160.5 | 25.1 | 27.8 | 1.1 | 17.2 | 57.7 | 157.8 | 16.9 | 24.7 | 1.1 |
| Estación | | Serdán | | | | | | agua santa | | | | | |
| Año | Mes | T (°C) | HR (%) | UV-A | UV-B | O3(PPB) | CO(PPM) | T (°C) | HR (%) | UV-A | UV-B | O3(PPB) | CO(PPM) |
| 2003 | ENERO | 13.2 | 53.8 | 130.5 | 17.4 | 21.9 | 2.0 | 14.6 | 55.8 | 123.9 | 8.3 | 24.4 | 0.9 |
| | FEBRERO | | | | | 18.0 | 2.3 | 16.5 | 47.4 | 158.1 | 12.6 | 21.9 | 1.0 |
| | MARZO | 15.6 | 41.5 | 166.1 | 20.0 | 21.3 | 2.3 | 18.1 | 38.8 | 172.2 | 14.1 | 27.3 | 1.0 |
| | ABRIL | 19.4 | 41.1 | 170.6 | 20.2 | 27.8 | 1.9 | 21.0 | 40.1 | 174.9 | 14.7 | 34.9 | 0.6 |
| | MAYO | 19.6 | 48.7 | 172.4 | 20.2 | 32.7 | 1.7 | 20.9 | 51.3 | 163.7 | 13.2 | 37.3 | 0.9 |
| | JUNIO | 17.3 | 75.9 | 137.4 | 17.1 | 15.6 | 1.7 | 18.6 | 80.1 | 146.6 | 12.6 | 18.5 | 0.8 |
| | JULIO | 17.3 | 62.6 | 170.0 | 20.2 | 17.9 | 1.4 | 18.4 | 67.6 | 176.3 | 14.3 | 21.7 | 0.6 |
| | AGOSTO | 16.9 | 67.0 | 157.2 | 18.5 | 19.5 | 1.7 | 18.3 | 70.8 | 161.2 | 13.4 | 22.5 | 0.9 |
| | SEPTIEMBRE | 16.9 | 74.7 | 151.0 | 18.1 | 18.1 | 1.9 | 18.1 | 80.5 | 154.7 | 12.8 | 22.3 | 0.8 |
| | OCTUBRE | 16.4 | 71.8 | 140.2 | 16.6 | 13.4 | 1.9 | 17.5 | 77.5 | 142.2 | 11.6 | 19.4 | 0.8 |
| | NOVIEMBRE | 15.2 | 59.7 | 130.5 | 14.1 | 13.7 | 2.1 | 16.2 | 65.3 | 130.3 | 9.6 | 19.6 | 0.9 |
| | DICIEMBRE | 12.0 | 51.8 | 112.4 | 10.7 | 20.3 | 2.1 | 13.2 | 57.4 | 109.7 | 6.8 | 21.7 | 1.3 |
| P. ANUAL | | 16.4 | 59.0 | 150.8 | 17.5 | 20.0 | 1.9 | 17.6 | 61.0 | 151.2 | 12.0 | 24.3 | 0.9 |
| NOM-156-SEMARNAT-2012 | | | | Datos disponibles | | | | | 75% MIN | | 98.61 % REAL | | |

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
LICENCIATURA EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

| Estación | | Tecnológico | | | | | | Ninfas | | | | | |
|-----------------------|------------|-------------|--------|-------------------|------|---------|---------|------------|--------|------------|------|---------|---------|
| Año | Mes | T (°C) | HR (%) | UV-A | UV-B | O3(PPB) | CO(PPM) | T (°C) | HR (%) | UV-A | UV-B | O3(PPB) | CO(PPM) |
| 2004 | ENERO | 12.6 | 60.5 | 127.8 | 18.7 | 19.4 | 1.1 | 13.3 | 61.0 | 122.0 | 12.5 | 16.9 | 1.0 |
| | FEBRERO | 14.2 | 46.8 | 169.1 | 27.9 | 21.8 | 0.9 | 15.1 | 46.5 | 161.2 | 18.6 | 22.9 | 1.1 |
| | MARZO | 15.9 | 52.6 | 170.9 | 30.7 | 23.8 | 0.8 | 16.9 | 52.7 | 161.1 | 20.6 | 21.1 | 0.9 |
| | ABRIL | 17.2 | 48.7 | 186.1 | 35.5 | 27.1 | 0.7 | 18.2 | 49.0 | 177.2 | 23.3 | 25.1 | 0.9 |
| | MAYO | 17.2 | 61.2 | 174.6 | 30.2 | 29.3 | 0.8 | 18.3 | 60.6 | 175.1 | 20.9 | 27.6 | 0.8 |
| | JUNIO | 16.6 | 71.2 | 162.3 | 28.5 | 19.6 | 0.7 | 17.8 | 70.5 | 166.4 | 20.1 | 17.1 | 0.8 |
| | JULIO | 16.3 | 67.6 | 172.3 | 27.4 | 21.5 | 0.7 | 17.5 | 67.3 | 172.8 | 18.8 | 19.9 | 0.8 |
| | AGOSTO | 16.8 | 67.8 | 172.4 | 28.3 | 19.8 | 0.7 | 18.2 | 66.4 | 179.2 | 20.3 | 20.8 | 0.7 |
| | SEPTIEMBRE | 16.3 | 74.1 | 146.5 | 23.5 | 18.9 | 0.8 | 17.3 | 75.0 | 150.5 | 16.7 | 15.7 | 0.9 |
| | OCTUBRE | 16.2 | 71.9 | 147.8 | 22.8 | 15.0 | 0.9 | 17.4 | 72.7 | 139.4 | 15.1 | 11.3 | 1.0 |
| | NOVIEMBRE | 14.6 | 55.7 | 147.2 | 19.5 | 12.6 | 1.0 | 15.5 | 55.4 | 139.1 | 12.9 | 13.9 | 1.0 |
| | DICIEMBRE | 12.9 | 54.2 | 122.9 | 14.3 | 12.8 | 1.1 | 13.7 | 54.5 | 126.5 | 10.3 | 19.2 | 1.1 |
| | P. ANUAL | 15.5 | 61.0 | 158.3 | 25.6 | 20.1 | 0.8 | 16.6 | 61.0 | 155.9 | 17.5 | 19.3 | 0.9 |
| Estación | | Serdán | | | | | | agua santa | | | | | |
| Año | Mes | T (°C) | HR (%) | UV-A | UV-B | O3(PPB) | CO(PPM) | T (°C) | HR (%) | UV-A | UV-B | O3(PPB) | CO(PPM) |
| 2004 | ENERO | 12.7 | 59.6 | 117.5 | 12.8 | 15.7 | 1.9 | 13.9 | 64.7 | 115.8 | 8.7 | 18.9 | 0.8 |
| | FEBRERO | 14.5 | 44.9 | 159.0 | 19.1 | 17.1 | 2.2 | 15.5 | 48.9 | 155.2 | 13.0 | 23.4 | 1.0 |
| | MARZO | 17.3 | 43.8 | 163.1 | 22.3 | 15.0 | 2.7 | 17.4 | 54.0 | 156.9 | 14.7 | 21.2 | 1.3 |
| | ABRIL | 17.7 | 47.5 | 191.3 | 26.0 | 27.4 | 2.0 | 18.7 | 51.0 | 171.3 | 16.7 | 19.5 | 1.3 |
| | MAYO | 17.6 | 59.3 | 176.1 | 22.6 | 26.1 | 1.8 | 18.7 | 63.6 | 162.7 | 14.3 | 32.9 | 0.6 |
| | JUNIO | 16.5 | 77.9 | 133.2 | 18.5 | 13.4 | 2.0 | 18.2 | 75.3 | 165.5 | 14.5 | 21.2 | 0.7 |
| | JULIO | 16.7 | 67.9 | 171.6 | 20.0 | 28.5 | 1.6 | 17.9 | 73.0 | 172.8 | 13.6 | 24.7 | 0.6 |
| | AGOSTO | 17.5 | 65.5 | 174.0 | 21.1 | 15.1 | 1.6 | 18.6 | 70.9 | 177.1 | 14.9 | 24.5 | 0.8 |
| | SEPTIEMBRE | 16.7 | 74.2 | 142.6 | 16.7 | 18.6 | 1.7 | 17.9 | 79.8 | 150.8 | 12.4 | 17.7 | 0.8 |
| | OCTUBRE | 16.8 | 72.8 | 140.7 | 15.7 | 17.9 | 1.9 | 17.8 | 80.0 | 138.4 | 10.9 | 12.1 | 0.8 |
| | NOVIEMBRE | 14.9 | 54.9 | 136.3 | 13.2 | 17.2 | 2.1 | 15.8 | 60.3 | 134.5 | 9.1 | 10.9 | 0.9 |
| | DICIEMBRE | 13.1 | 53.7 | 112.2 | 9.6 | 18.3 | 2.0 | 14.4 | 59.5 | 116.1 | 6.8 | 16.4 | 0.9 |
| | P. ANUAL | 16.0 | 60.2 | 151.5 | 18.1 | 19.2 | 2.0 | 17.1 | 65.1 | 151.4 | 12.5 | 20.3 | 0.9 |
| NOM-156-SEMARNAT-2012 | | | | Datos disponibles | | | | 75% MIN | | 100 % REAL | | | |

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
LICENCIATURA EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

| Estación | | Tecnológico | | | | | | Ninfas | | | | | |
|-----------------------|------------|-------------|--------|-------------------|------|---------|---------|------------|--------|--------------|------|---------|---------|
| Año | Mes | T (°C) | HR (%) | UV-A | UV-B | O3(PPB) | CO(PPM) | T (°C) | HR (%) | UV-A | UV-B | O3(PPB) | CO(PPM) |
| 2005 | ENERO | 13.2 | 52.5 | 126.2 | 15.5 | 13.6 | 1.1 | 14.1 | 52.9 | 130.1 | 11.3 | 20.1 | 1.1 |
| | FEBRERO | 15.2 | 47.0 | 144.4 | 20.3 | 13.7 | 1.1 | 16.1 | 47.7 | 145.6 | 14.4 | 20.3 | 0.9 |
| | MARZO | 17.0 | 42.1 | 180.0 | 30.7 | 12.9 | 0.8 | 17.7 | 50.2 | 171.4 | 19.8 | 22.4 | 0.7 |
| | ABRIL | 18.9 | 46.2 | 176.4 | 30.1 | 17.9 | 1.4 | 20.1 | 46.8 | 175.1 | 20.6 | 41.6 | 1.1 |
| | MAYO | 18.0 | 52.1 | 169.7 | 26.3 | 29.9 | 1.0 | 19.1 | 52.1 | 169.9 | 18.0 | 35.5 | 0.9 |
| | JUNIO | 18.5 | 49.2 | 157.9 | 27.4 | 28.0 | 0.8 | 19.8 | 59.0 | 157.6 | 18.8 | 22.4 | 0.7 |
| | JULIO | 17.1 | 65.7 | 168.9 | 28.6 | 25.1 | 0.6 | 18.2 | 67.9 | 166.2 | 19.3 | 23.5 | 0.7 |
| | AGOSTO | 16.5 | 71.3 | 147.7 | 25.1 | 18.3 | 0.8 | 17.6 | 71.7 | 148.1 | 17.2 | 19.6 | 0.8 |
| | SEPTIEMBRE | 15.8 | 79.3 | 116.2 | 18.2 | 23.8 | 1.8 | 17.7 | 67.2 | 155.0 | 17.1 | 22.9 | 0.8 |
| | OCTUBRE | 15.7 | 65.5 | 137.6 | 21.2 | 22.0 | 2.0 | 16.9 | 66.0 | 134.3 | 14.5 | 21.3 | 0.7 |
| | NOVIEMBRE | 14.5 | 55.4 | 137.1 | 19.5 | 19.5 | 0.9 | 15.6 | 55.2 | 135.6 | 12.9 | 24.4 | 0.6 |
| | DICIEMBRE | 14.1 | 51.7 | 116.1 | 14.3 | 20.7 | 1.5 | 14.9 | 52.2 | 118.1 | 9.8 | 27.7 | |
| P. ANUAL | | 16.2 | 56.5 | 148.2 | 23.1 | 20.5 | 1.1 | 17.3 | 57.4 | 150.6 | 16.1 | 25.1 | 0.8 |
| Estación | | Serdán | | | | | | agua santa | | | | | |
| Año | Mes | T (°C) | HR (%) | UV-A | UV-B | O3(PPB) | CO(PPM) | T (°C) | HR (%) | UV-A | UV-B | O3(PPB) | CO(PPM) |
| 2005 | ENERO | 13.5 | 52.1 | 114.6 | 10.3 | 16.2 | 2.2 | 14.7 | 57.1 | 121.0 | 7.3 | 16.9 | 1.0 |
| | FEBRERO | 15.3 | 46.6 | 132.9 | 13.8 | 14.7 | 2.6 | 16.4 | 51.4 | 139.9 | 9.5 | 14.1 | 0.8 |
| | MARZO | 17.4 | 41.0 | 175.6 | 21.6 | 14.3 | 2.0 | | | | | | |
| | ABRIL | 19.3 | 45.9 | 171.3 | 21.2 | 20.9 | 1.9 | | | | | | |
| | MAYO | 18.4 | 51.0 | 166.6 | 19.0 | 28.6 | 1.6 | | | | | | |
| | JUNIO | 19.1 | 57.9 | 152.4 | 19.5 | 18.8 | 1.6 | 19.6 | 69.4 | 133.4 | 11.8 | 9.0 | 0.5 |
| | JULIO | 17.6 | 68.0 | 159.2 | 19.8 | 11.1 | 1.6 | 18.9 | 72.4 | 159.4 | 13.1 | 9.6 | 0.7 |
| | AGOSTO | 16.9 | 73.0 | 143.5 | 17.8 | 9.6 | 1.8 | 18.4 | 76.8 | 145.3 | 12.3 | 19.3 | 0.6 |
| | SEPTIEMBRE | 17.0 | 67.8 | 149.4 | 17.4 | 15.8 | 1.6 | 18.4 | 71.8 | 152.3 | 12.1 | 28.9 | 0.6 |
| | OCTUBRE | 16.2 | 67.1 | 132.1 | 15.0 | 9.8 | 1.6 | 17.6 | 70.3 | 131.5 | 10.0 | 26.7 | 0.6 |
| | NOVIEMBRE | 15.4 | 56.0 | 133.6 | 7.7 | 9.5 | 1.6 | 16.3 | 58.9 | 128.9 | 8.8 | 24.4 | 0.9 |
| | DICIEMBRE | | | | | 10.4 | | 15.5 | 56.0 | 108.5 | 6.6 | 26.1 | 0.6 |
| P. ANUAL | | 16.9 | 56.9 | 148.3 | 16.6 | 15.0 | 1.8 | 17.3 | 64.9 | 135.6 | 10.2 | 19.4 | 0.7 |
| NOM-156-SEMARNAT-2012 | | | | Datos disponibles | | | | 75% MIN | | 92.36 % REAL | | | |

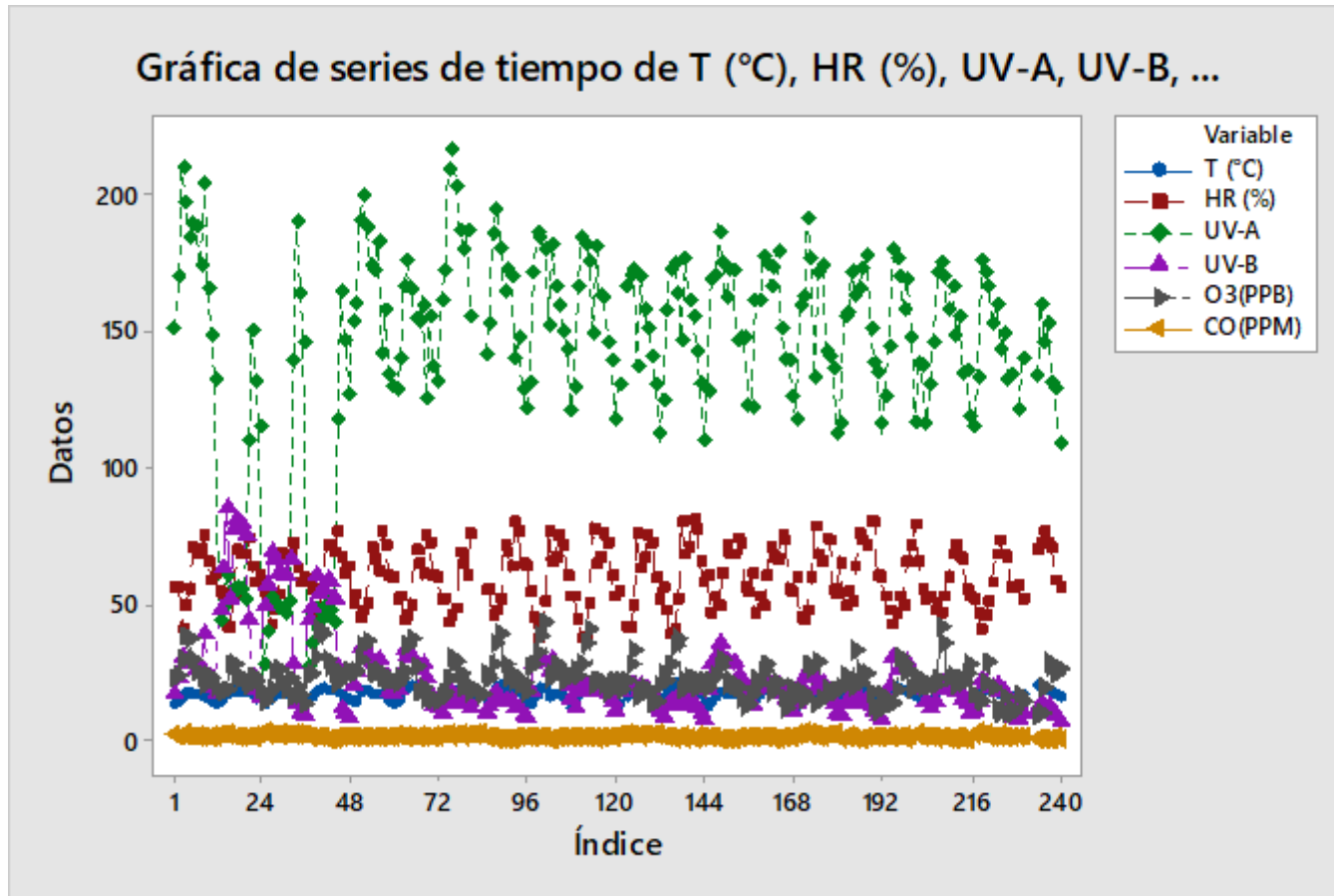


Figura 8. Series de tiempo de las variables
Fuente: Elaboración propia

Nota: Después del procesamiento y validación de los datos de monitoreo se realiza una serie de tiempo para ver la tendencia de las variables a través del tiempo, pudiendo identificar datos dudosos lo cuales posteriormente se les hará un análisis más profundo.

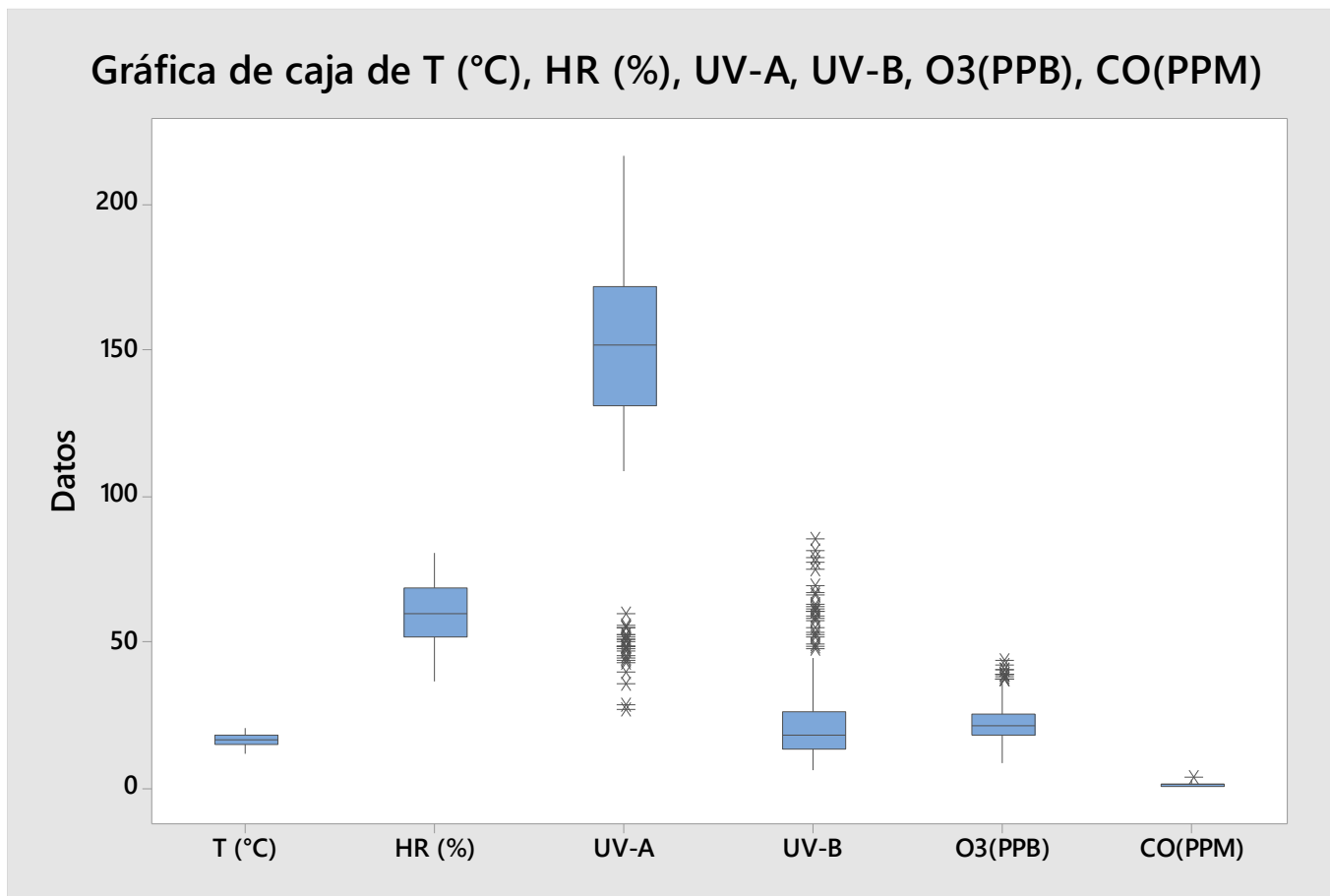


Figura 9. Bloxplot / caja y bigote de las variables

Fuente: Elaboración propia

Nota: En la gráfica de caja y bigote podemos observar datos atípicos muy notables en la UV-A y UV-B por lo que se puede atribuir a una mala medición de las estaciones de monitoreo, fenómenos antropogénicos o naturales.

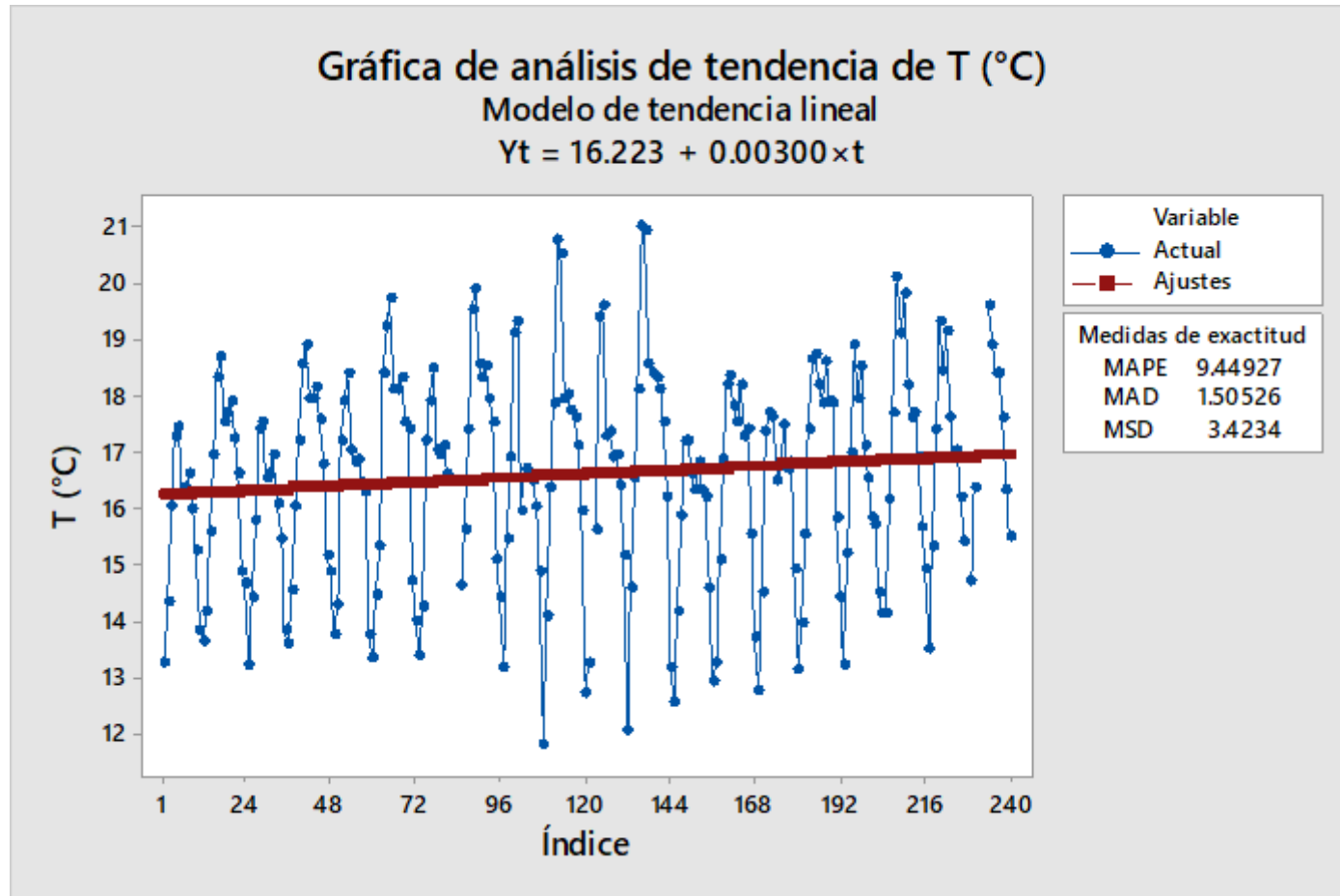


Figura 10. Serie de tiempo de temperatura con tendencia (2001-2005)

Fuente: Elaboración propia

Nota: En la gráfica se puede apreciar claramente una tendencia positiva (de incremento) de la temperatura en la ciudad de Puebla del 2001-2005

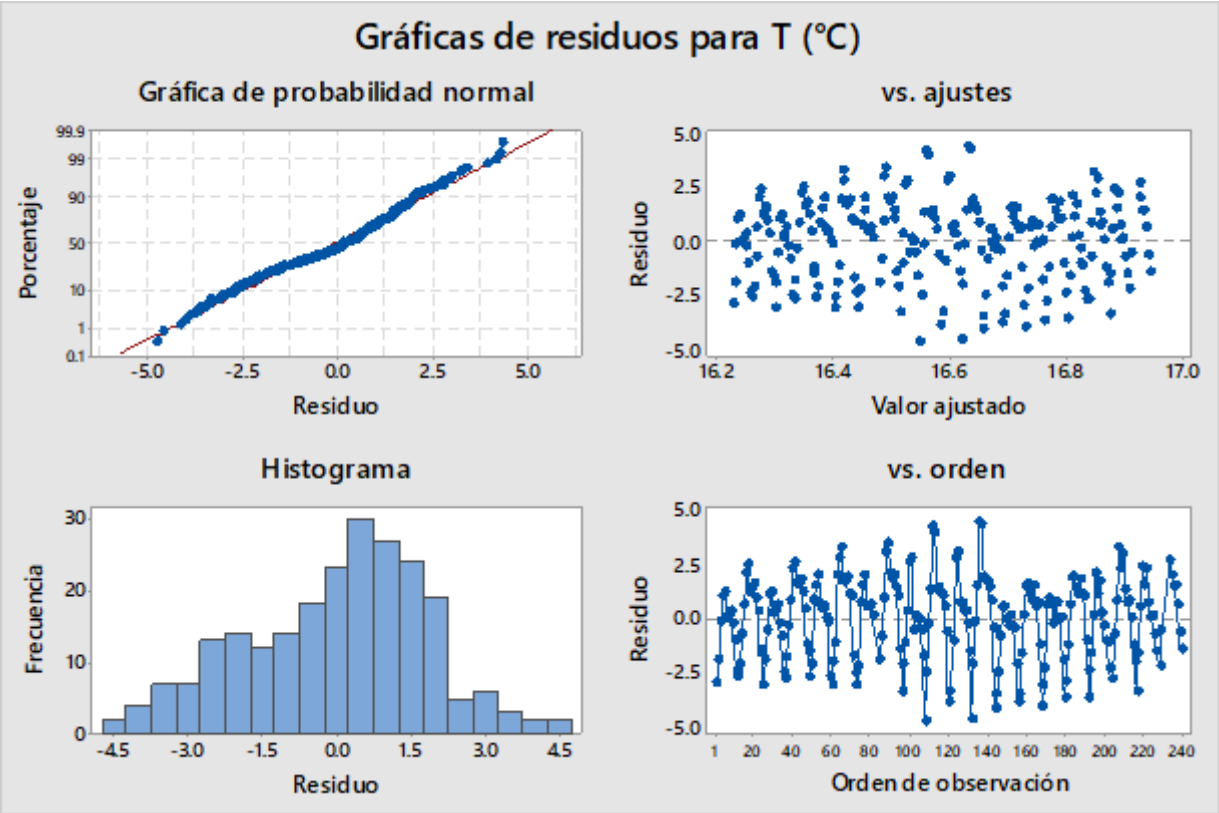


Figura 11. Gráfica de residuos 4 en 1 para la temperatura del (2001-2005)

Fuente: Elaboración propia

Nota: La gráfica de probabilidad normal tiene un estupendo ajuste ya que los puntos están muy cerca de la línea de tendencia, esto lo podemos corroborar con la gráfica de v.s ajuste y v.s orden donde vemos que la distribución de los datos es tanto positivos y negativos lo que nos marca que tienen un comportamiento normal. En cuanto el histograma de frecuencia tiene un sesgo a la derecha común en las variables ambientales, tales como contaminantes o variables meteorológicas tal como lo marca (Wilks, 2012).

3.3 Análisis estadístico de correlación de datos

Un coeficiente de correlación mide el grado de relación o asociación existente generalmente entre dos variables aleatorias. No es conveniente identificar correlación con dependencia causal, ya que, si hay una semejanza formal entre ambos conceptos, no puede deducirse de esto que sean análogos (Restrepo & González, 2007); en efecto es posible que haya una alta correlación entre dos acontecimientos y que, sin embargo, no exista entre ellos relación de causa o efecto; por ejemplo, cuando dos acontecimientos tienen alguna causa común, pueden resultar altamente asociados y no son el uno causa del otro. Cabe recordar que el coeficiente fluctúa entre $-1 \leq \rho \leq 1$.

3.3.1 Coeficiente de correlación de Pearson

Coeficiente de correlación de Pearson tiene como objetivo medir la fuerza o grado de asociación entre dos variables aleatorias cuantitativas que poseen una distribución normal bivariada conjunta. El coeficiente se define por la **Ecuación 12**:

$$\rho = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad -1 \leq \rho \leq 1 \quad (12)$$

Supuestos que fundamentan el coeficiente de correlación según (Restrepo & González, 2007)

1. La distribución conjunta de las variables (X, Y) debe ser normal bivariada.
2. En términos prácticos para validar dicho supuesto se debe observar que cada variable se distribuya en forma normal, si una sola de las variables se desvía de la normalidad, tampoco es normal la distribución conjunta.
3. Debe existir una relación de tipo lineal entre las variables (X, Y).
4. Para cada valor de X, hay una subpoblación de valores de Y normalmente distribuidas.
5. Las subpoblaciones de valores Y tienen varianza constante.
6. Los promedios de las subpoblaciones de Y tienen ubicación en la misma línea recta.
7. Las subpoblaciones de X tienen varianza constante.
8. Las medias de las subpoblaciones de X se encuentran en la misma línea recta.
9. Para cada valor de Y hay una subpoblación de valores X que están normalmente distribuidas.

Interpretación de los resultados de correlación de Pearson

- a. Fuerza: El valor del coeficiente de correlación puede variar de -1 a $+1$. Mientras mayor sea el valor absoluto del coeficiente, más fuerte será la relación entre las variables. Para la correlación de Pearson, un valor absoluto de 1 indica una relación lineal perfecta. Una correlación cercana a 0 indica que no existe relación lineal entre las variables.
- b. Dirección: El signo del coeficiente indica la dirección de la relación. Si ambas variables tienden a aumentar o disminuir a la vez.

H_0 = No existe relación entre las variables $H_0: p=0$

H_i = Existe la relación entre las variables $H_i: p \neq 0$

Determinación si el coeficiente de correlación es significativo

Para determinar si la correlación entre las variables es significativa, compare el valor p con su nivel de significancia. Por lo general, un nivel de significancia (denotado como α o alfa) de 0.05 funciona adecuadamente. Un α de 0.05 indica que el riesgo de concluir que existe una correlación, cuando en realidad no es así, es 5% . El valor p indica si el coeficiente de correlación es significativamente diferente de 0 . (Un coeficiente de 0 indica que no existe una relación lineal).

Valor $p \leq \alpha$: La correlación es estadísticamente significativa

Si el valor p es menor que o igual al nivel de significancia, entonces usted puede concluir que la correlación es diferente de 0 .

Valor $p > \alpha$: La correlación no es estadísticamente significativa

Si el valor p es mayor que el nivel de significancia, entonces usted no puede concluir que la correlación es diferente de 0 .

Para hacer el análisis del coeficiente de correlación se utiliza el software Minitab 18 obteniendo lo siguiente resultados en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Coeficientes de correlación de Pearson

Correlaciones

| | T (°C) | HR (%) | UV-A | UV-B | O ₃ (PPB) |
|----------------------|--------|--------|--------|-------|----------------------|
| HR (%) | 0.072 | | | | |
| | 0.274 | | | | |
| UV-A | 0.273 | -0.074 | | | |
| | 0.000 | 0.263 | | | |
| UV-B | 0.186 | -0.105 | -0.588 | | |
| | 0.004 | 0.110 | 0.000 | | |
| O ₃ (PPB) | 0.446 | -0.349 | 0.185 | 0.206 | |
| | 0.000 | 0.000 | 0.005 | 0.002 | |
| CO(PPM) | -0.325 | -0.246 | -0.232 | 0.173 | -0.249 |
| | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.008 | 0.000 |

Contenido de la celda
Correlación de Pearson
Valor p

Fuente: (Elaboración propia,2019)

Con los resultados de la Tabla 6 se puede ver que existe una correlación entre las siguientes variables (T °(C) vs UV-A, UV-B, O₃ de forma positiva y una relación negativa con el CO; en cuanto a la HR (%) hay una correlación con el O₃ y el CO de forma negativa; la UV-A tiene relación significativa con el UV-B y CO negativamente y positivamente con el O₃; el UV-B de forma positiva con el O₃ y el CO; por último tenemos que el O₃ tiene una correlación negativa con el CO).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este capítulo se divide en tres subcapítulos, basados en los tres objetivos específicos propuestos en este trabajo.

4.1 Evaluación de los datos de monitoreo de calidad del aire

Con base a las mediciones de la concentración de los contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas, se obtienen e identifican los valores para cada celda en archivos de Excel:

- Coordinadas
- Valor de las variables
- Estaciones de monitoreo atmosférico.

En la etapa de limpieza de datos, se encontraron valores incongruentes de mediciones, por ejemplo: -999.9999 o 0.0000, significa que no tuvo medición o que en el momento de esta muy probablemente no hubo un adecuado mantenimiento o calibración de los equipos de monitoreo.

En la **Tabla 7** se representa la suficiencia de la base de datos proporcionados por el REMA del (2001-2005).

Tabla 7. Suficiencia de la base de datos

| Año | % Suficiencia de datos | NOM-156-SEMARNAT-2012 |
|------|------------------------|--|
| 2001 | 100 | Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de calidad del aire (75% como mínimo para validar datos de monitoreo) |
| 2002 | 95.83 | |
| 2003 | 98.61 | |
| 2004 | 100 | |
| 2005 | 92.36 | |

Fuente: (Elaboración propia, 2019)

Las herramientas utilizadas en la metodología para el análisis de los datos del sistema de monitoreo (series de tiempo, dispersión de datos e histogramas) son de gran ayuda para la discusión de resultados, pero no antes de hacer un análisis más profundo a los datos atípicos que se muestran en la gráfica de series de tiempo o de caja y bigote, para esto se hace la prueba de valores atípicos de Grubbs.

4.1.1 Valores atípicos de Grubbs

Este método fue planteado por Frank E. Grubbs en el año 1969 y también es conocido como el método ESD (Extreme Studentized Deviate). La prueba de Grubbs se utiliza para detectar valores atípicos en un conjunto de datos univariantes y se basa en el supuesto de normalidad (AMÓN, 2010), es decir, primero debe verificarse que los datos pueden aproximarse razonablemente a una distribución normal antes de aplicar esta prueba.

El nivel de significancia se compara con el valor p para decidir si puede rechazar o no la hipótesis nula (H0). Si el valor p es menor que el nivel de significancia, la interpretación habitual es que los resultados son estadísticamente significativos y usted rechaza H0.

- H0: Todos los valores de la muestra provienen de la misma población distribuida normalmente.
- H1: Uno de los valores de la muestra no proviene de la misma población distribuida normalmente.

Por lo general, un nivel de significancia (denotado como α o alfa) de 0.05 funciona adecuadamente. Un nivel de significancia de 0.05 indica un riesgo de 5% de concluir que existe una diferencia cuando no hay una diferencia real.

Tabla 8. Prueba de valores atípicos de Grubbs

Prueba de Grubbs

| Variable | N | Media | Desv.Est. | Mín. | Máx. | G | P |
|----------------------|-----|--------|-----------|--------|--------|------|-------|
| T (°C) | 232 | 16.581 | 1.866 | 11.800 | 20.990 | 2.56 | 1.000 |
| HR (%) | 232 | 59.737 | 10.829 | 36.730 | 80.500 | 2.12 | 1.000 |
| UV-A | 232 | 143.90 | 39.62 | 26.98 | 216.50 | 2.95 | 0.678 |
| UV-B | 232 | 23.011 | 15.142 | 6.600 | 84.804 | 4.08 | 0.008 |
| O ₃ (PPB) | 237 | 22.249 | 6.538 | 9.000 | 43.360 | 3.23 | 0.262 |
| CO(PPM) | 235 | 1.2773 | 0.5204 | 0.5000 | 3.2920 | 3.87 | 0.020 |

Valor atípico

| Variable | Fila | Valor atípico |
|----------|------|---------------|
| UV-B | 15 | 84.8037 |
| CO(PPM) | 25 | 3.2920 |

Fuente: (Elaboración propia, 2019)

Nota: Como se muestra en la **Tabla 8**, existen 2 valores atípicos en la base de datos que se utiliza para este estudio, siendo estos los máximos de cada variable y no los mínimos. Se analiza la base de datos para descartar un error al pasar los datos crudos del REMA a la base propia y se descarta esta alternativa, así que se atribuye directamente al registro en la base de datos del REMA.

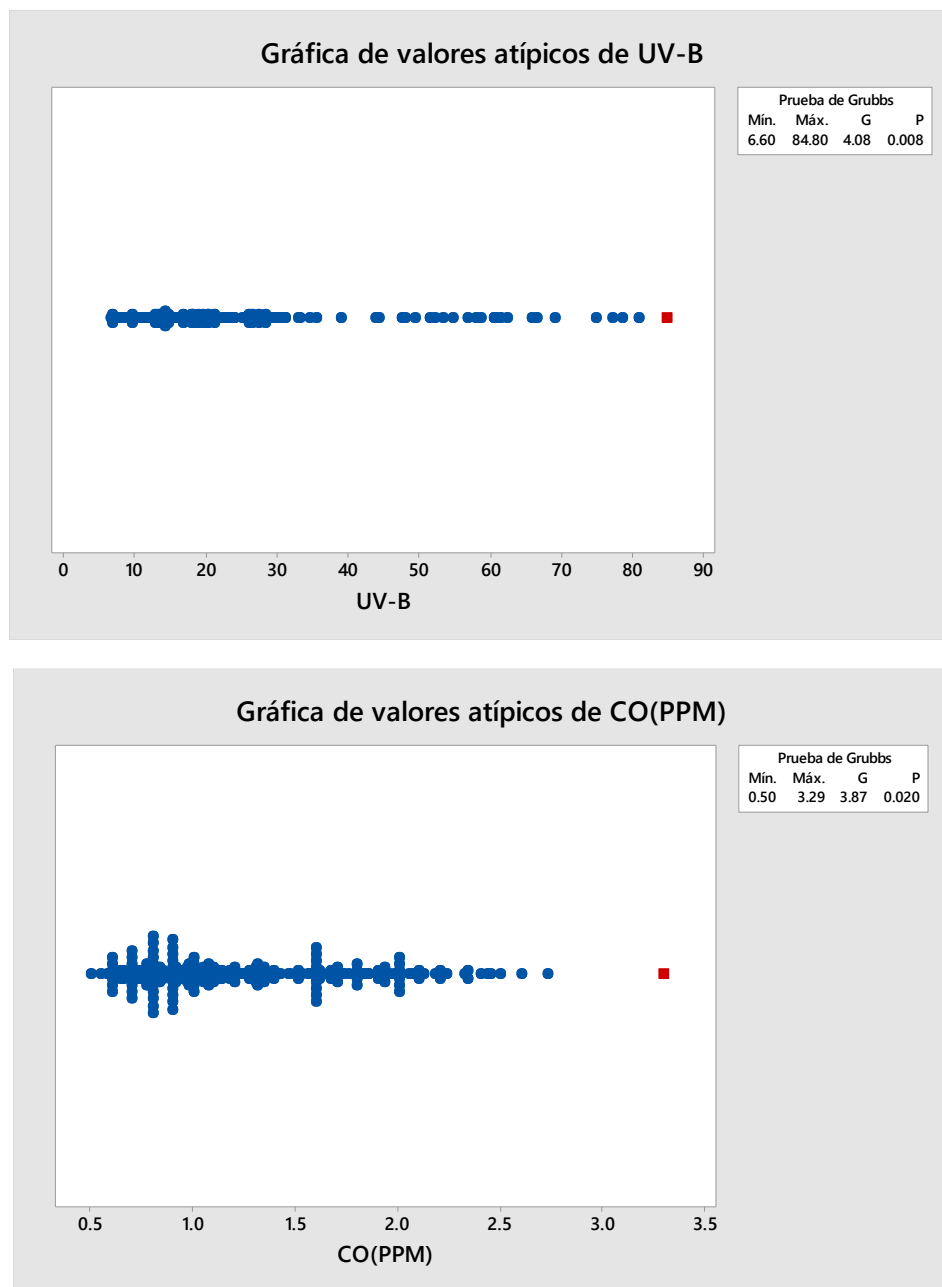


Figura 12. Valores atípicos de Grubbs

Fuente: Elaboración propia

4.2 Mapas de dispersión de contaminantes y variables meteorológicas en la Zona Metropolitana del Valle de Puebla (ZMVP)

Para la dispersión de contaminantes se utilizó la metodología de (Hernández, Madrigal, & Morales, 2004) y se combinó con algunos puntos propios para poder alcanzar el objetivo específico marcado al inicio de este estudio (**Figura 13**).

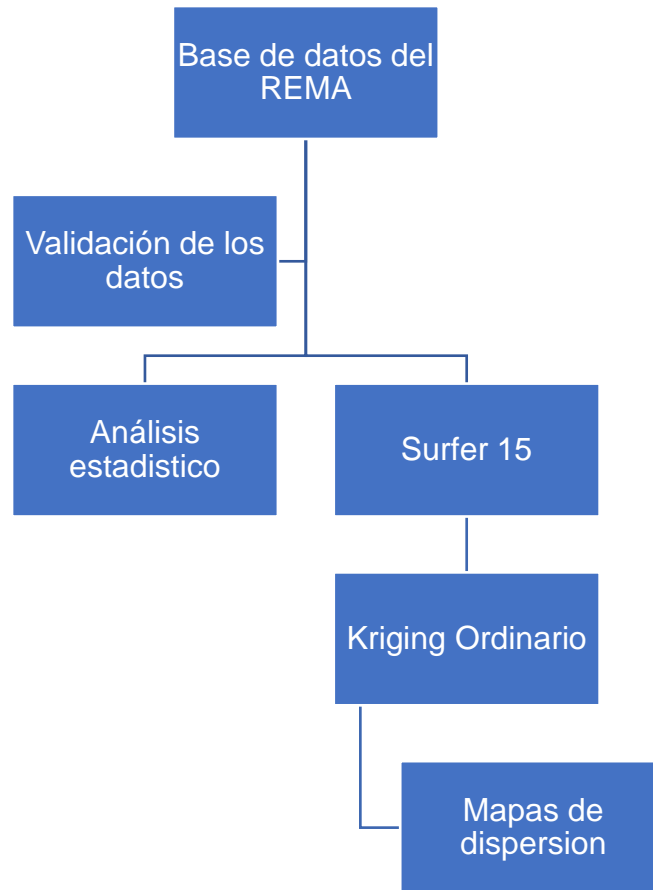


Figura 13. Obtención de los mapas de dispersión
Fuente: (Elaboración propia, 2019)

4.2.1 Surfer 15

Surfer es un software utilizado por varios científicos, ingenieros y educadores para el modelado de datos (GoldenSoftware, 2017). Surfer ofrece trece métodos de cuadrícula diferentes, incluyendo el Kriging con variograma, para convertir datos de X, Y y Z espaciados de forma regular o irregular en cuadrículas ráster uniformes.

A continuación, se describe como se fueron haciendo los mapas de dispersión de contaminantes y de las variables meteorológicas mediante el Surfer 15.



Figura 14. Ejecución del Software Surfer 15
Fuente: (Elaboración propia, 2019)

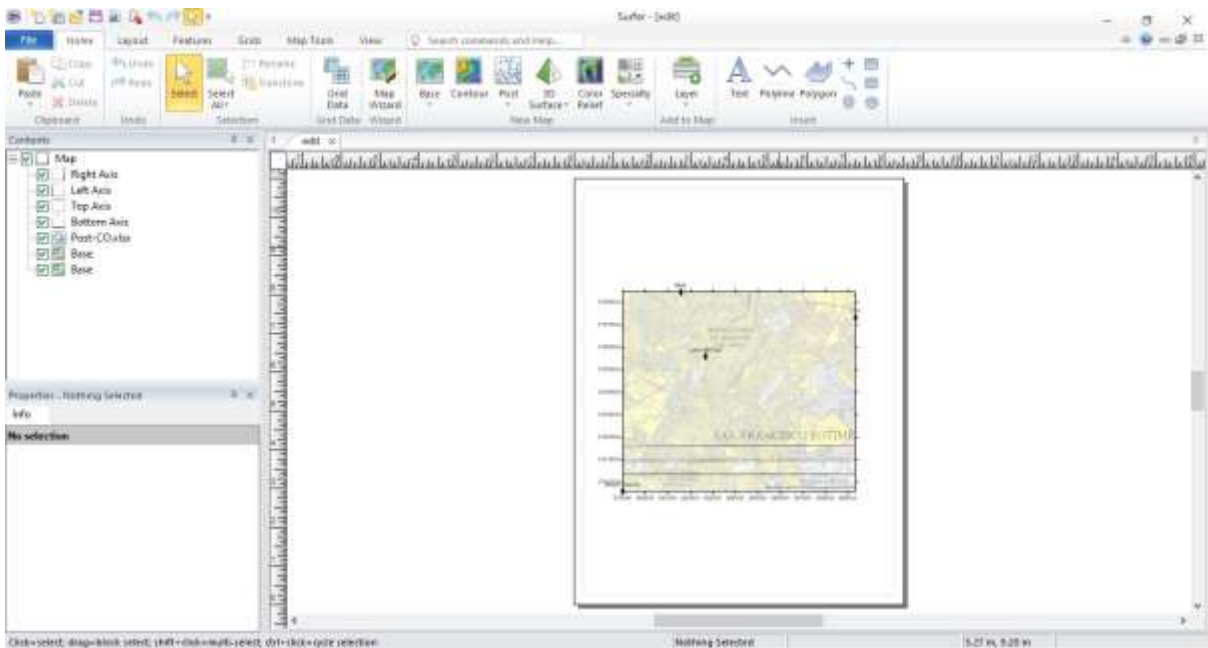


Figura 15. Carga de carta topográfica E14B43 (Puebla, Puebla) y E14B53 (San Francisco Totímehuacan, Puebla)
Fuente: (Elaboración propia, 2019)

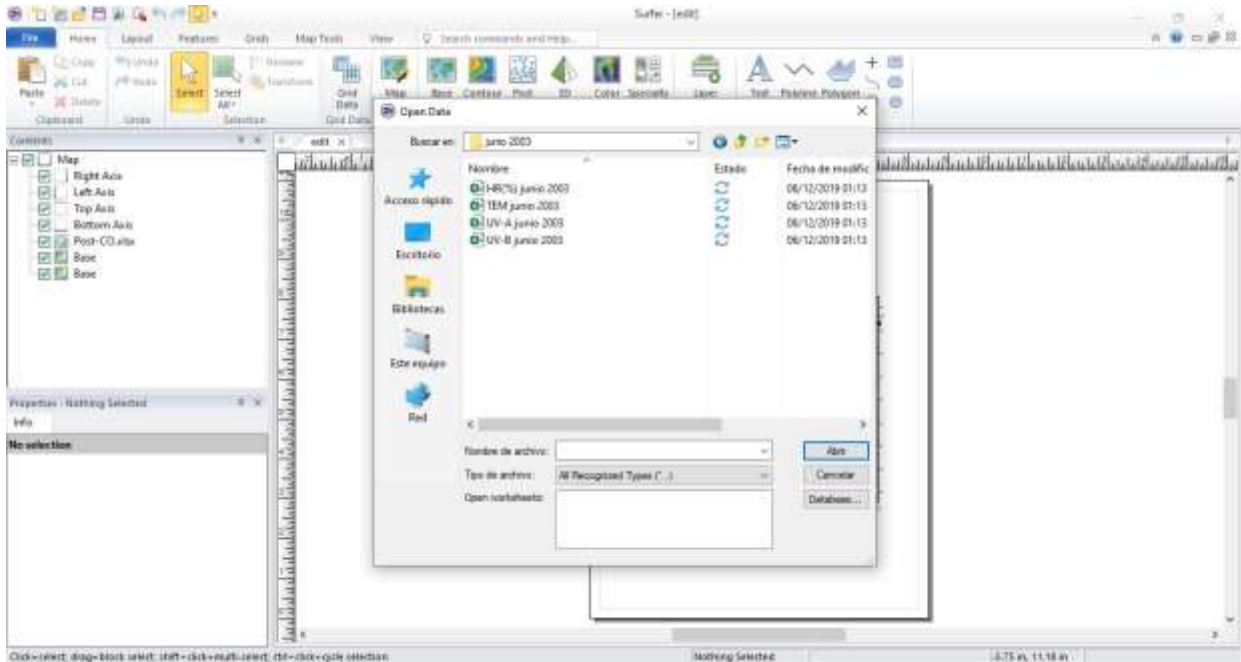


Figura 16. Selección de libro de Excel que contiene los datos medidos de cada estación de monitoreo

Fuente: (Elaboración propia, 2019)

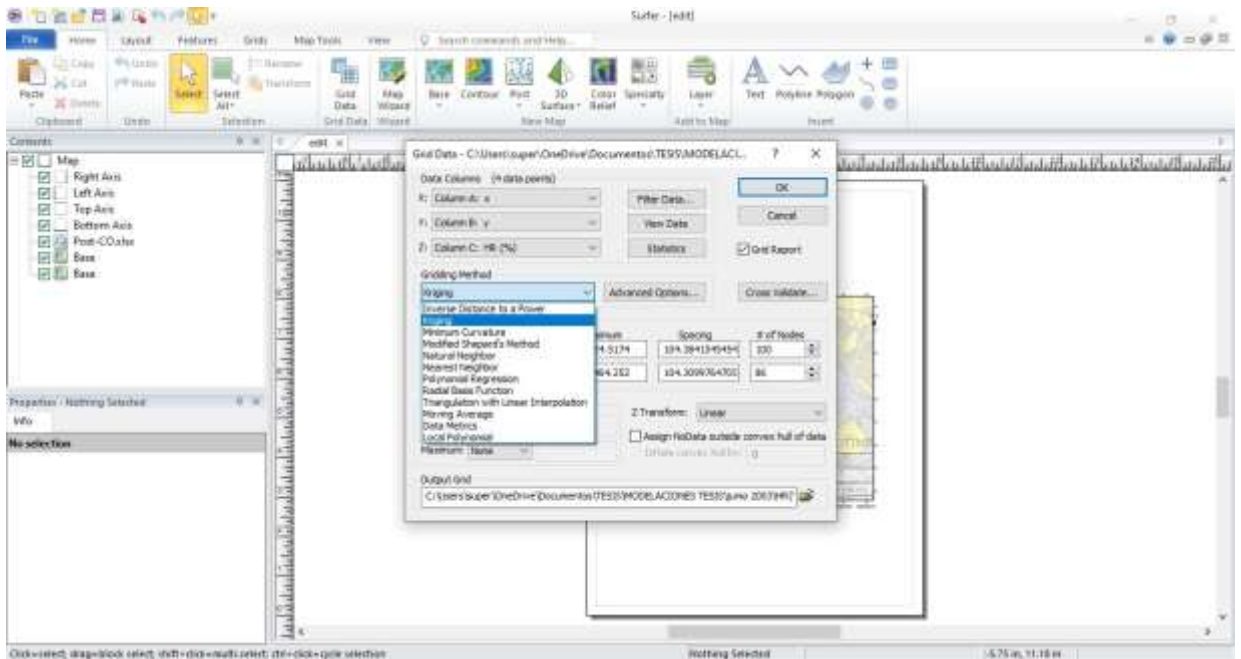


Figura 17. Selección del método geostatístico (Kriging Ordinario)

Fuente: (Elaboración propia, 2019)

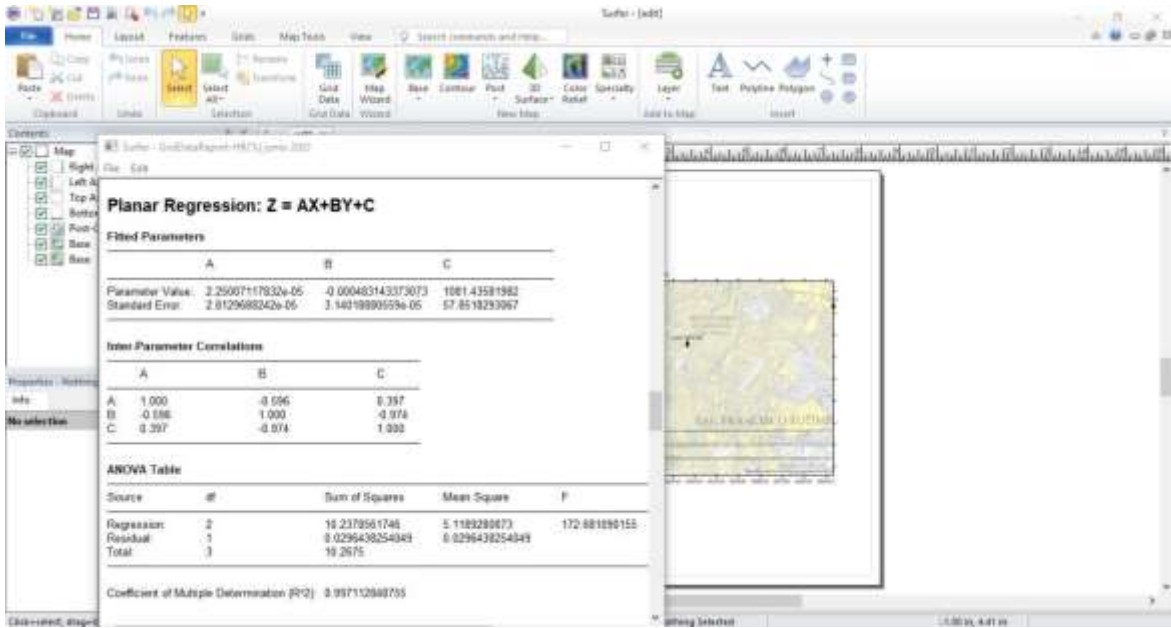


Figura 18. Análisis estadístico del modelo geoestadístico Kriging
Nota: Se puede apreciar un ajuste de R² de 0.9971, un ajuste casi perfecto por el modelo geoestadístico Kriging.
Fuente: (Elaboración propia, 2019)



Figura 19. Selección del Grip para aplicar contorno a las variables
Fuente: (Elaboración propia, 2019)

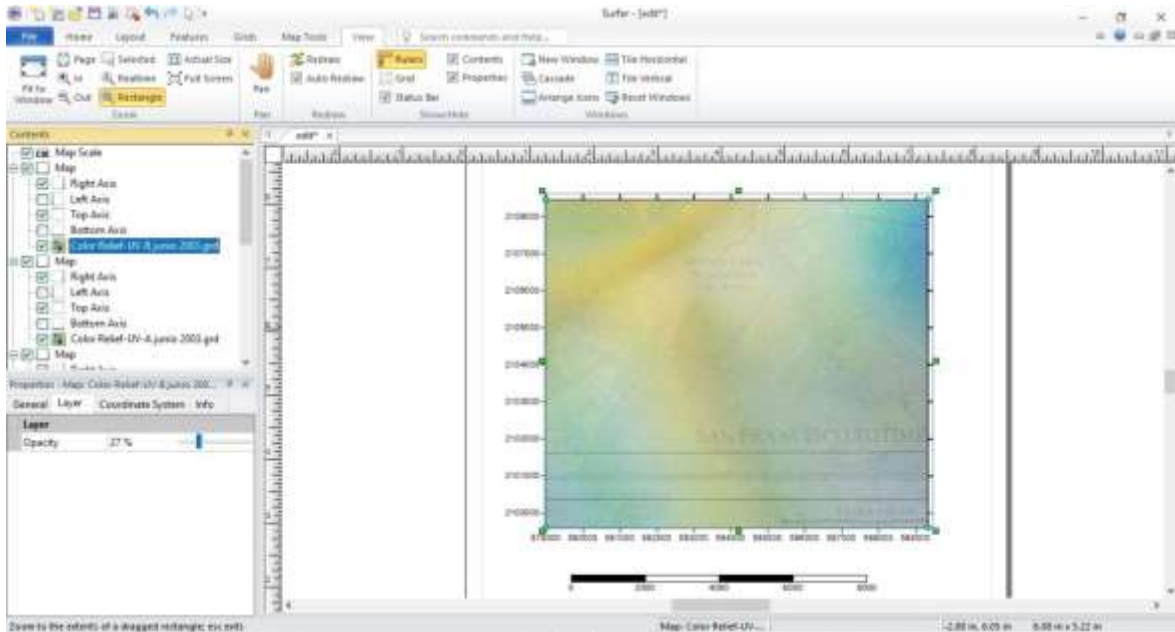


Figura 20. Modificación de la opacidad del contorno a un 27%, criterio personal para poder distinguir tanto la carta topográfica como los colores de los contornos de las variables

Fuente: (Elaboración propia, 2019)

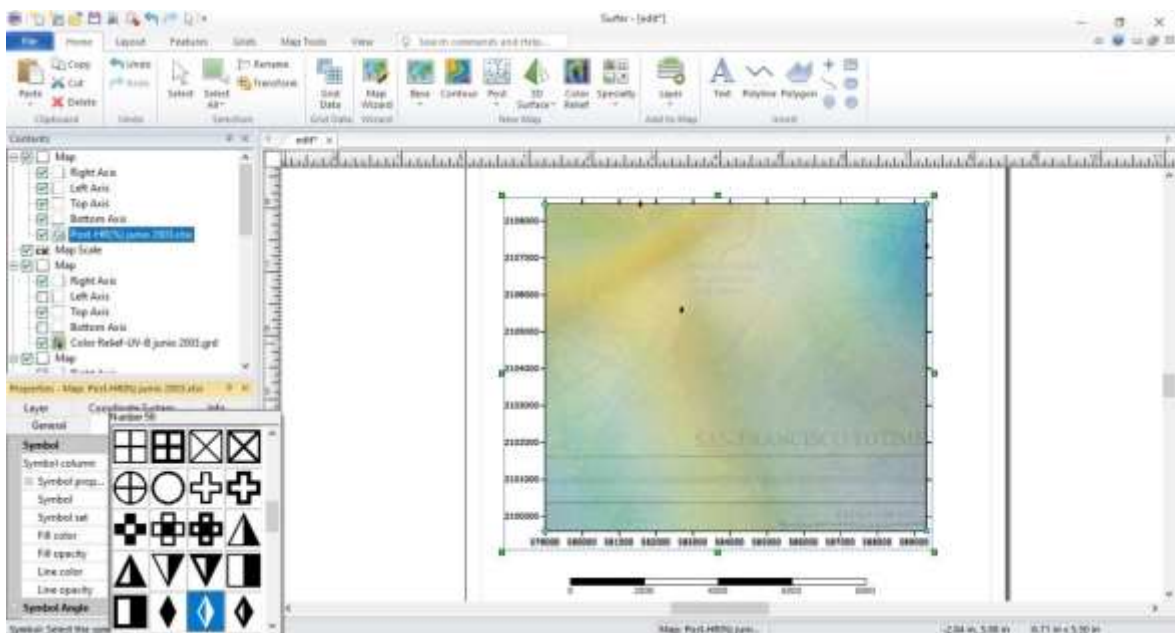


Figura 21. Ubicación de las estaciones de monitoreo atmosférico del REMA

Nota: La selección del símbolo es meramente personal y de gusto propio

Fuente: (Elaboración propia, 2019)

4.2.2 Combinación de mapas de dispersión obtenidos mediante Kriging ordinario

El Kriging es un interpolador exacto, es decir, la estimación en un sitio dado vuelve a dar el valor a este dato, mientras que la varianza de Kriging en este sitio es nula (Emery, 2013).

Los mapas con valores estimado por Kriging son más suaves que los mapas de valores aleatorios, es decir, que presentan menos fluctuaciones por lo cual permiten una mejor interpretación al comparar como las variables interfieren en las otras al combinar los mapas.

Los mapas de dispersión estimada (**Figura 22-26**) ponen en evidencia las áreas más contaminadas en la zona, que parecen en tonos más oscuros dependiendo el color asignado a cada variable. Las variaciones de los valores estimados son muy suaves, ilustrando la propiedad de aislamiento del Kriging. Esto se puede corroborar al comparar los datos originales con la estadística básica realizada anteriormente.

La varianza del Kriging no depende de los valores de los datos de las estaciones de monitoreo, sino que solamente su posición en el espacio. Por lo tanto, no mide todas las fuentes de incertidumbre: intuitivamente, la incertidumbre es mayor cuando los datos tienen valores más dispersos (atípicos) que cuando tienen valores parecidos (dentro de la normalidad).

Casi todos los fenómenos naturales que se estudian son variables medidas tanto en el tiempo como en el espacio. Considerando una superficie muy grande como la de una ciudad, en ocasiones se puede observar una variabilidad en grandes distancias. Esta variabilidad es el resultado de los procesos naturales como por ejemplo las interacciones físicas y químicas entes los contaminantes y las variables meteorológicas que se toman en cuenta en este estudio. Si se tienen datos de las variables en n sitios de una región con continuidad espacial, implícitamente en cada uno de ellos hay una observación funcional.

A continuación, se muestran todos los mapas realizados en este estudio de validación de los contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas, obteniendo los siguientes resultados, donde se puede observar como las variables meteorológicas afectan el comportamiento de los contaminantes, teniendo que a), b), c), d), e) y f) representan a los meses de Enero, Febrero, Junio, Julio, Agosto y Diciembre

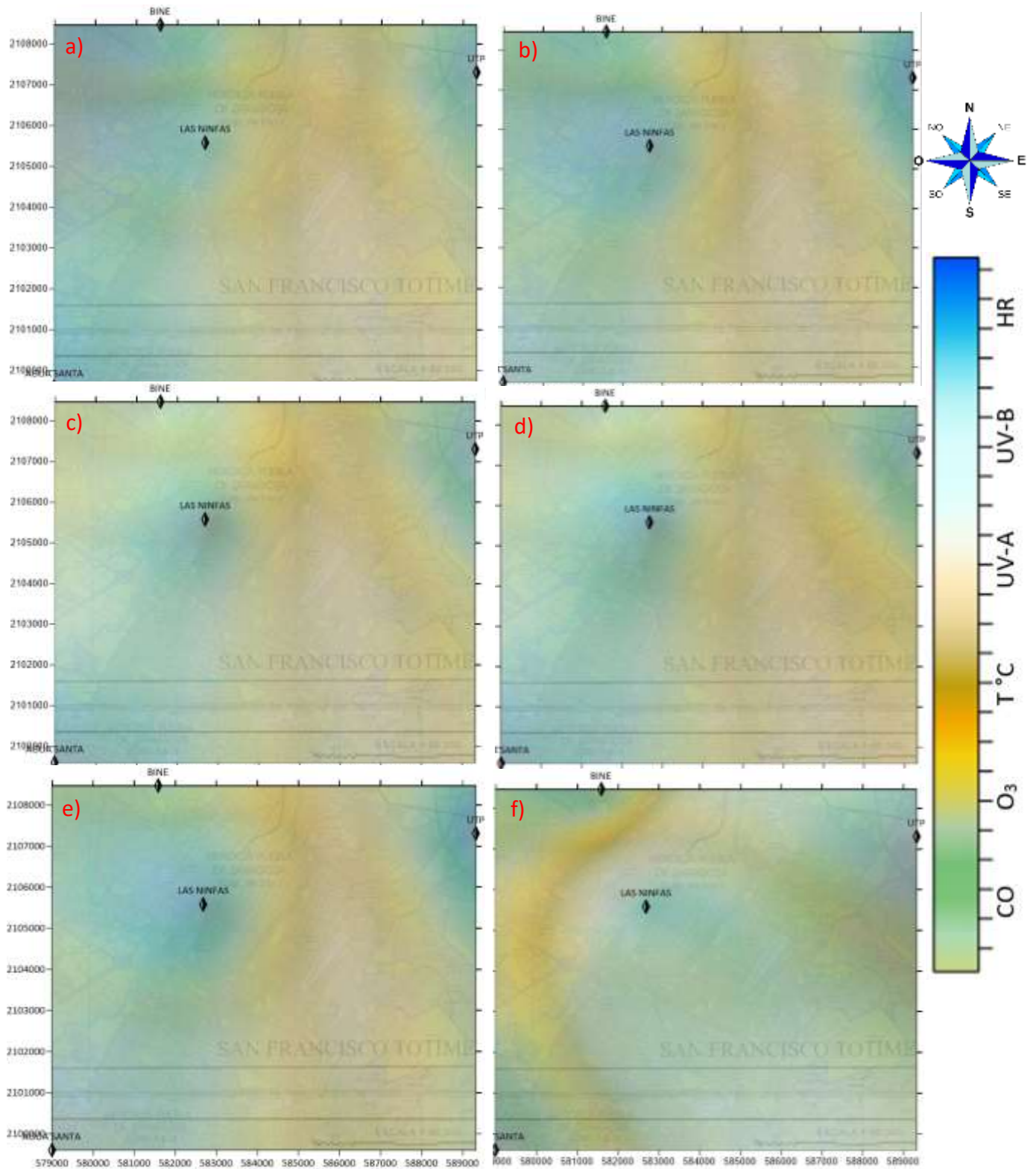


Figura 22. Dispersión de las variables en la ZMVP durante el 2001
Fuente: (Elaboración propia, 2019)

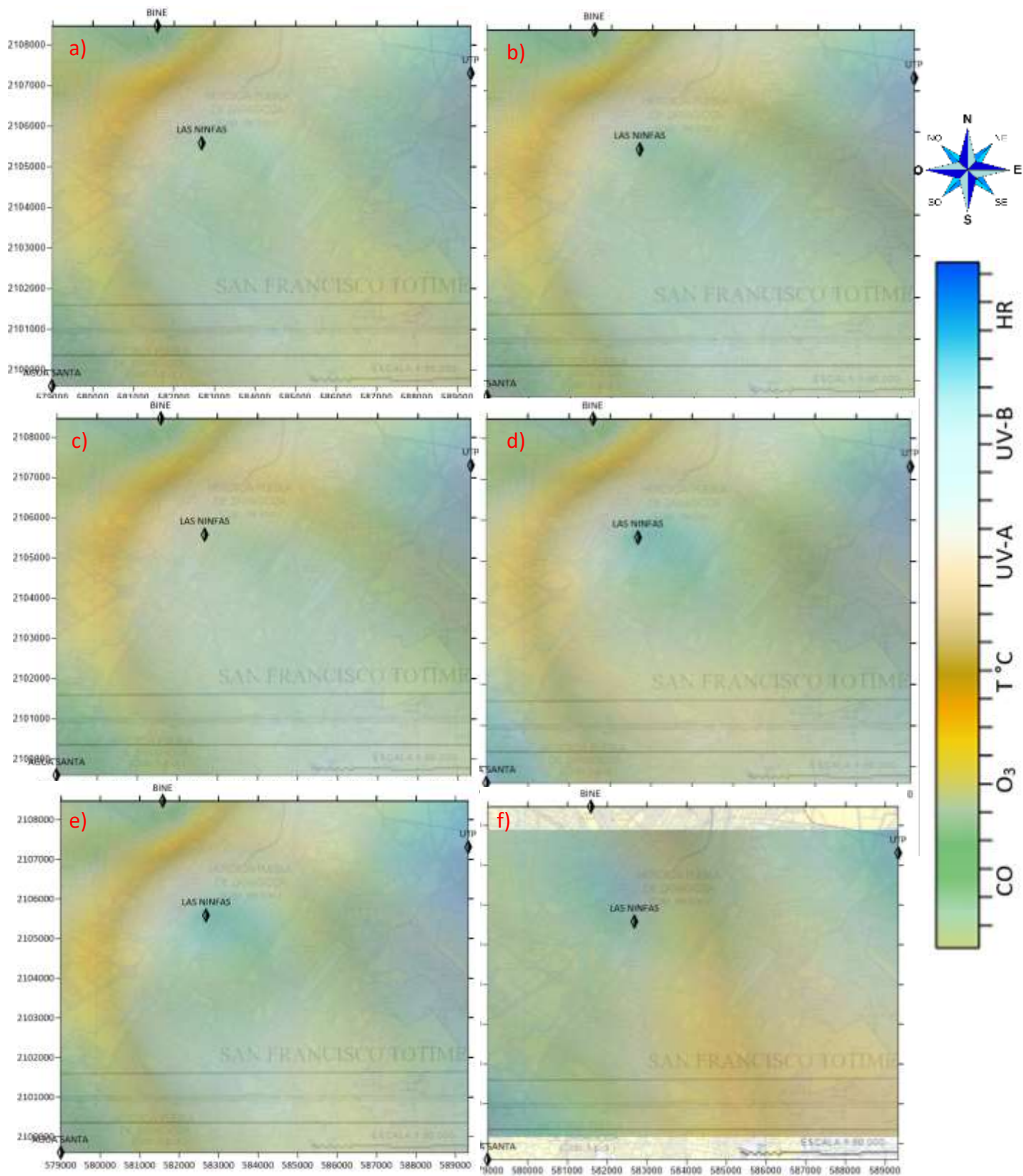


Figura 23. Dispersión de las variables en la ZMVP durante el 2002

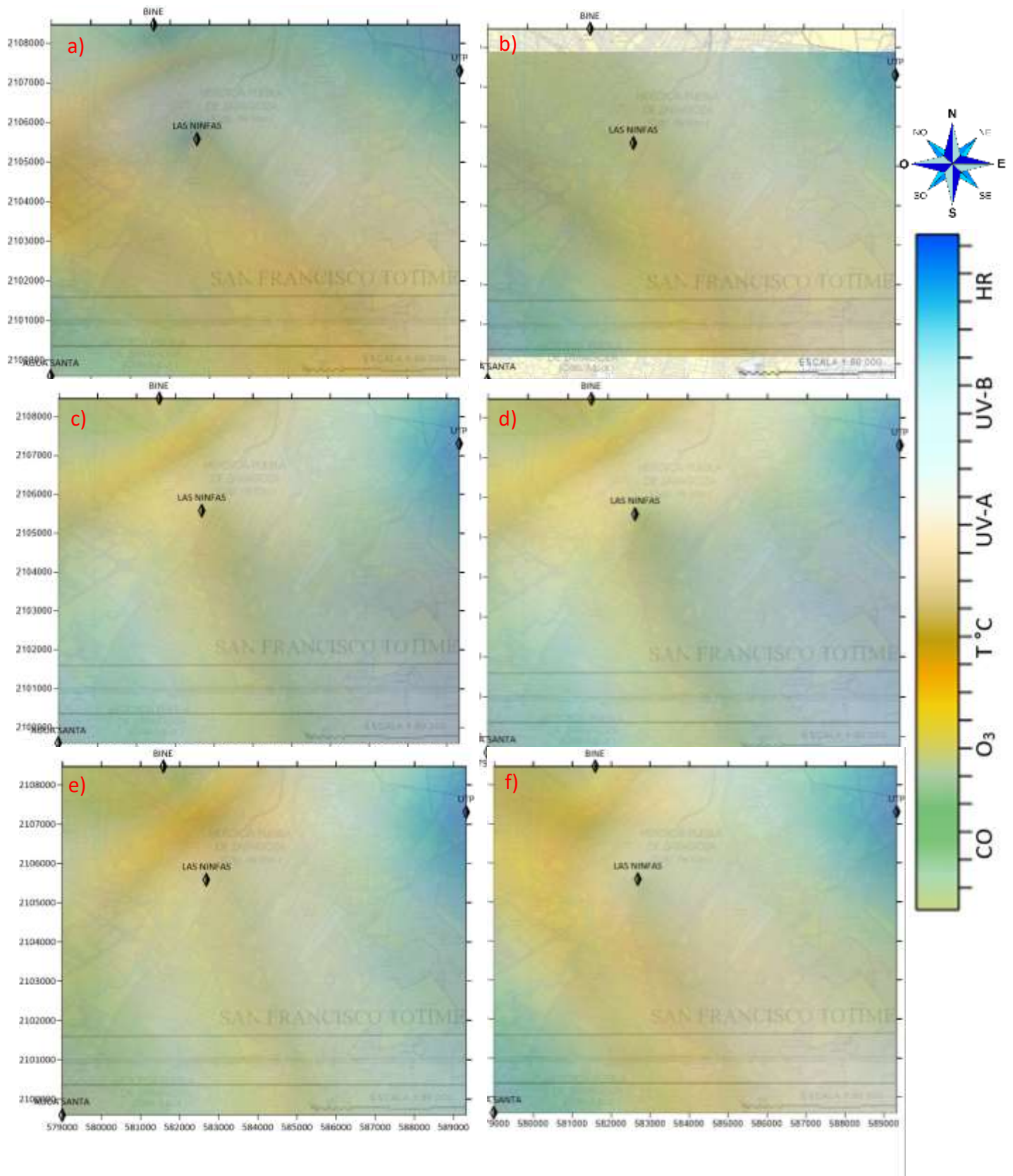


Figura 24. Dispersión de las variables en la ZMVP durante el 2003

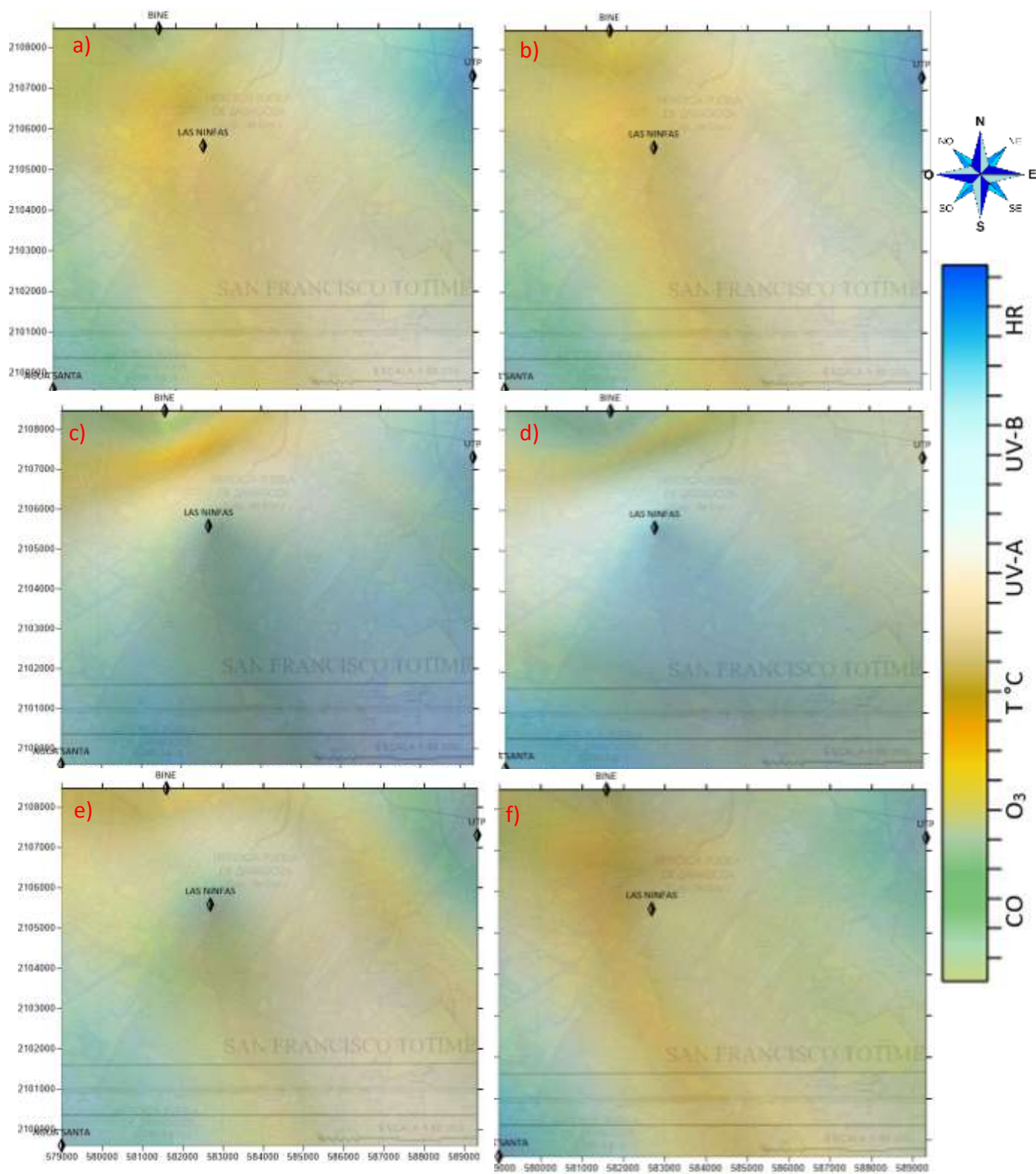


Figura 25. Dispersión de las variables en la ZMVP durante el 2004

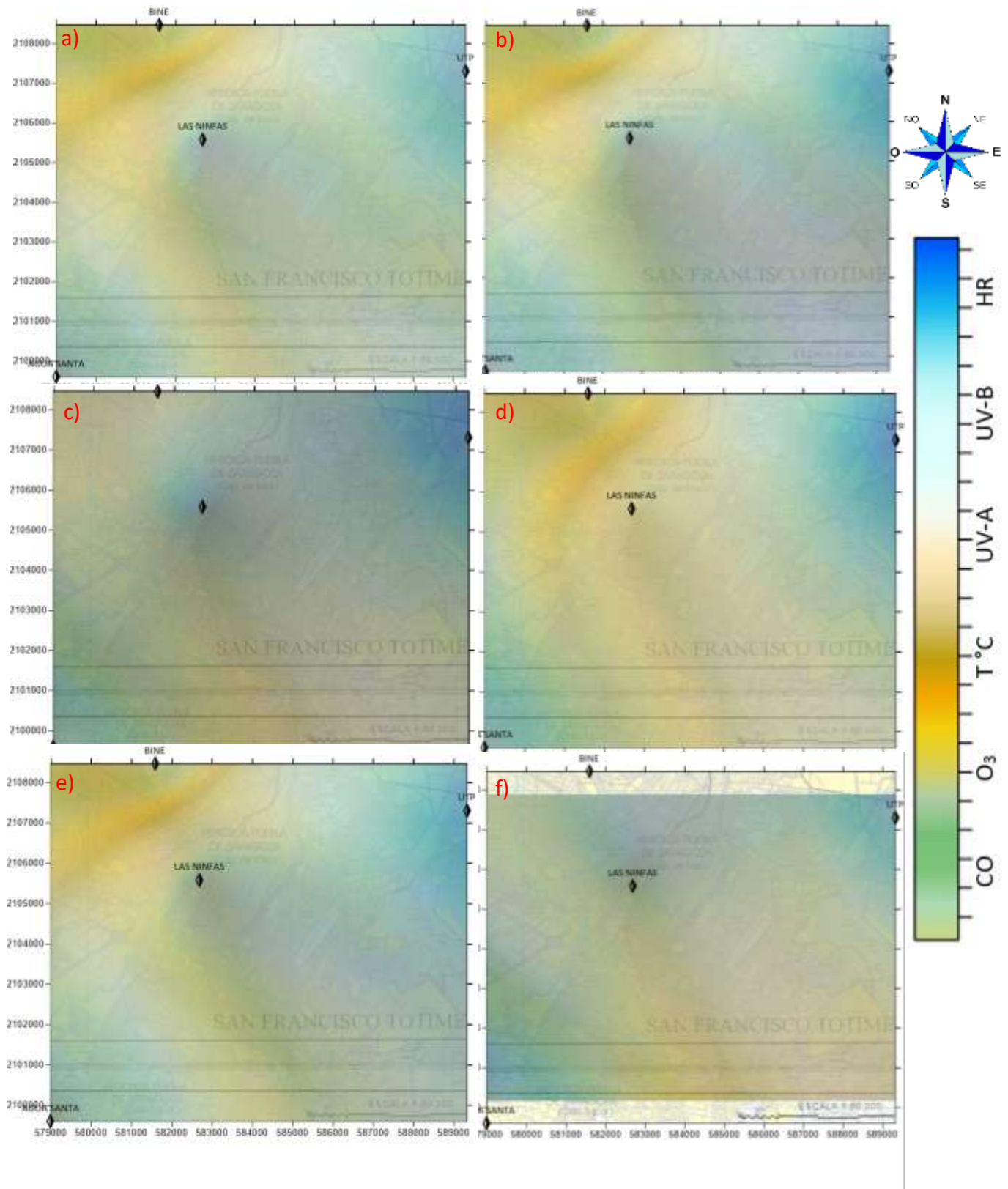


Figura 26. Dispersión de las variables en la ZMVP durante el 2005
Fuente: (Elaboración propia, 2019)

4.3 Comportamiento general de los datos a través del tiempo

En esta sección se analizó y comparan las concentraciones de los contaminantes atmosféricos con las variables meteorológicas, con el fin de identificar los factores que afectan a su comportamiento. Para analizar este comportamiento se toman las concentraciones mensuales del ozono, donde hay mayor concentración de ozono se da por la menor cantidad de humedad relativa (**Figura 27**) y mayor actividad de radiación solar (**Figura 28**), este es un comportamiento que presenta el ozono de acuerdo a sus características, ya que es un contaminante atmosférico fotoquímico, por lo que se reduce en presencia de la radiación solar y en combinación de la reacción con otros compuestos presentes en la atmosfera.

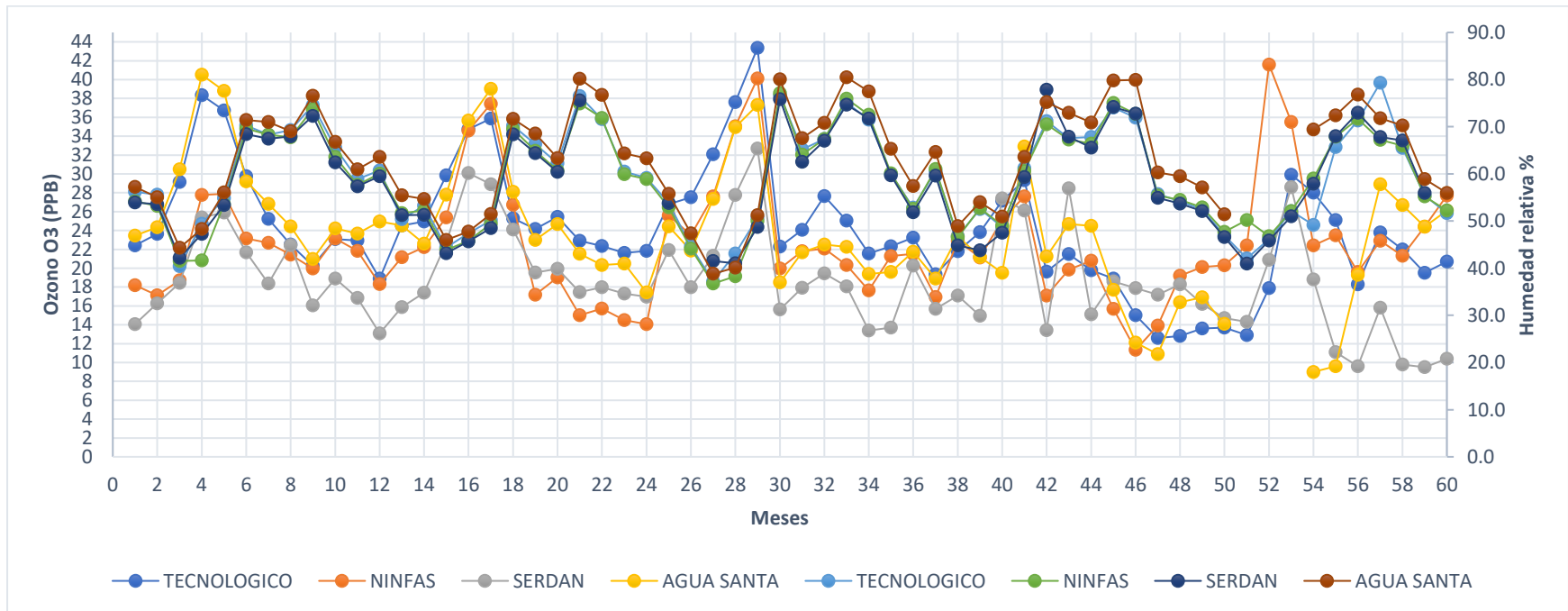


Figura 27. Comportamiento del Ozono v.s Humedad relativa (2001-2005)

Fuente: (Elaboración propia, 2019)

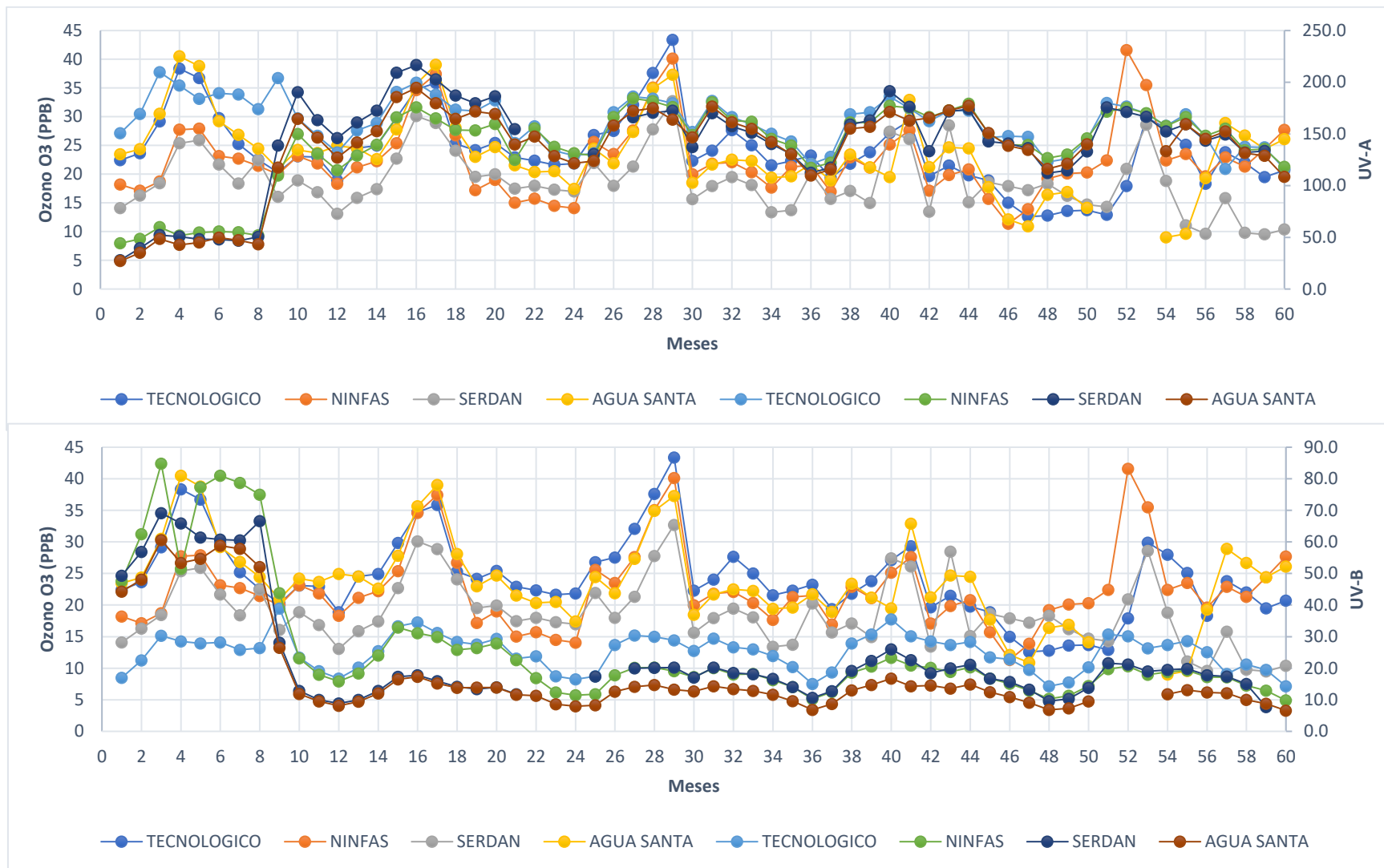


Figura 28. Comportamiento de Ozono v.s Radiación ultravioleta del tipo A y B

El CO afecta indirectamente los niveles de O₃ al reaccionar con los radicales hidroxilos (**Figura 29**). Por otro lado, la temperatura reduce el tiempo de vida del monóxido de carbono cuando este es mayor (**Figura 30**).

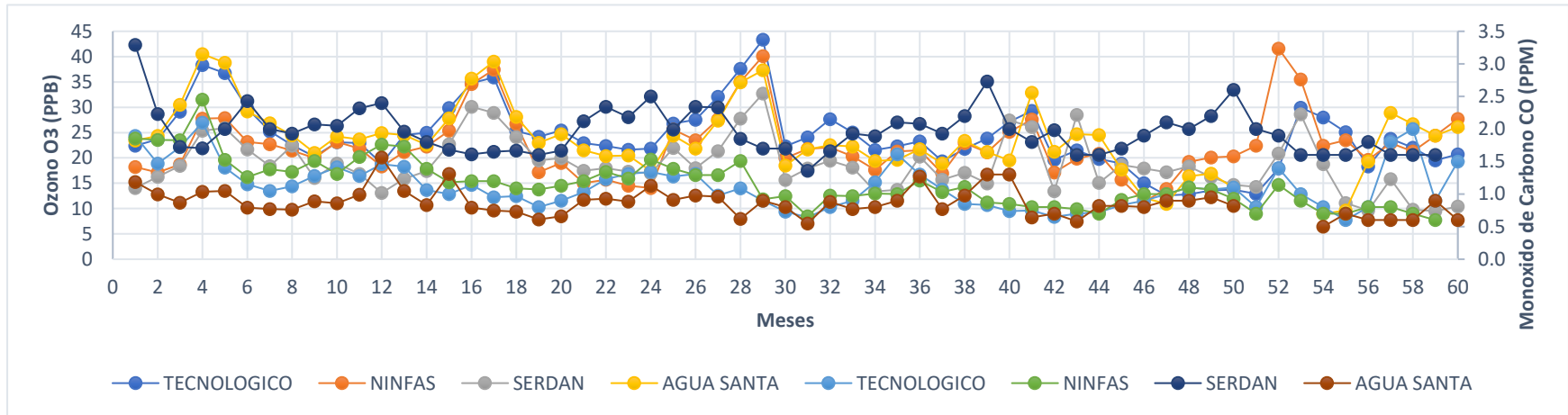


Figura 29. Comportamiento del Ozono vs Monóxido de Carbono

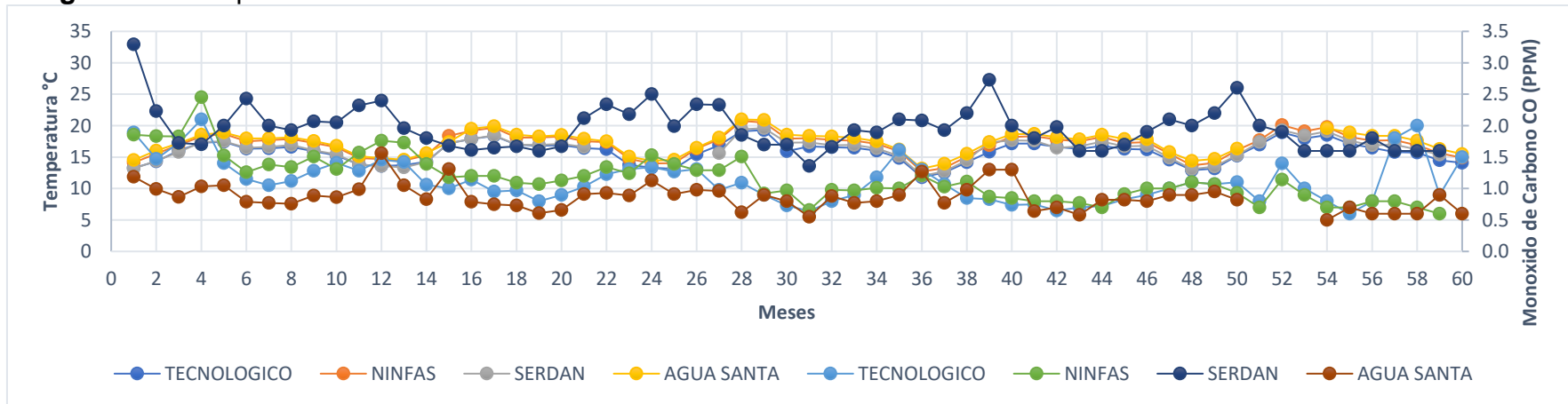


Figura 30. Comportamiento del Monóxido de carbono vs Temperatura

4.4 Discusión de resultados

Se observa que la dispersión de los últimos años es mucho menor que aquella de los primeros, aunque los valores promedios son muy similares (propiedad de insesgo). En cuanto a las desviaciones estándar de Kriging, éstas son bajas cerca de los sitios con datos y aumentan al acercarse de los bordes de la zona, donde se trabaja, por lo regular, mediante extrapolación (**Figura 23/f**), **Figura 24/b**) e **Figura 26/f**). Además, no dependen de los valores, sino que solamente de la configuración geométrica de los datos, es decir, la ubicación de las estaciones en forma triangular.

El comportamiento del monóxido de carbono generado en ZMVP es controlado en gran medida por la ocurrencia de los fenómenos climáticos y la geografía de la región. La concentración de monóxido de carbono depende básicamente de las emisiones de los automóviles y de las industrias (**Figura 23**). El tránsito vehicular de la ZMVP es muy elevado, ya que se concentran tantos vehículos que proceden de los municipios adyacentes y de los estados vecinos.

La actividad del monóxido de carbono sufre cambios en forma significativa durante el invierno, lo que hace estacionaria la contaminación atmosférica en relación directa con las bajas temperaturas; ello causa inversiones térmicas. Mientras que en el verano el monóxido de carbono a su vez ante la magnitud de las lluvias, actúa como núcleo de condensación y sublimación permitiendo el desarrollo de funciones fisiológicas, como la fotosíntesis en la vegetación. La oxigenación se eleva a su máximo en verano, no solo para la limpieza de la atmosfera, sino también por la propagación de oxígeno que transportan los huracanes.

La humedad atmosférica que constituyen las precipitaciones es aportada por el Frente Tropical Mexicano proveniente durante el verano de las fajas ecuatoriales y responsable de la mayor parte de la humedad como se observa en la **Gráfica 27**. Todos estos eventos actúan en forma continental en todo el país como elementos regionales que regulan el clima y sus anomalías, como las inundaciones y las sequías. En las **Imágenes 24/c), d) y 25/c), e)** se pueden apreciar claramente el alto nivel de % de humedad en la ZMVP.

El descenso de temperatura en Diciembre, Enero y Febrero mantiene al monóxido de carbono en los niveles más bajos de la troposfera (primera capa de la atmósfera), asimismo propicia un mayor número de horas de exposición, ya que en invierno las noches son más largas (**Imágenes 22-26/f), a), b)**.

Esto refuerza la presencia de los fenómenos de inversión térmica relacionados con las bajas temperaturas que adquieren las construcciones, y que, al conjuntarse con la estacionalidad de los vientos, permiten que muchas de las emisiones permanezcan más concentradas alrededor de las fuentes contaminantes, en este caso los vehículos automotores.

El mes de mayor precipitación es Julio y el de menor es Agosto (**Imágenes 22-26/d, e**). Esto explica en parte el hecho de que en este último mes se presente la mayor concentración de monóxido de carbono del verano. El calentamiento de Julio propicia fenómenos conectivos que elevan suficiente humedad para formar grandes nubes denominadas cúmulonimbos, que dan como consecuencia precipitaciones torrenciales. En Agosto, el valor de CO se incrementa debido a que entonces disminuyen las lluvias y los vientos, que coinciden en muchas ocasiones con la ocurrencia de la sequía intraestival y la canícula.

Hay que recordar que el CO sigue generándose en verano, con los procesos industriales, el tránsito vehicular, las actividades domésticas y la dinámica físico natural, sin embargo, las precipitaciones y los vientos limpian la atmósfera durante esta época del año.

Por otro lado, el ozono tiene una mayor concentración por la menor cantidad de humedad relativa (**Gráfica 27**) y mayor en cuanto la actividad de radiación solar (**Gráfica 28**), este es un comportamiento que presenta el ozono de acuerdo a sus características, ya que es un contaminante atmosférico fotoquímico, por lo que se reduce en presencia de la radiación solar y en combinación de la reacción con otros compuestos presentes en la atmosfera.

5. Conclusión

Al analizar la base de datos de la REMA del 2001-2005 y después procesar, limpiar, y validar los datos de monitoreo de acuerdo a los manuales del Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA) y la NOM-156-SEMARNAT-2012 del Diario Oficial de la Nación (DOF), se concluye que es posible analizar y validar cómo se comportan los contaminantes atmosféricos en la Zona Metropolitana del Valle de Puebla, mediante el modelo geoestadístico Kriging Ordinario. El cual ayuda a interpolar y extrapolar los contaminantes por toda el área de estudio aun sin tener datos donde no hay estaciones y poder saber las concentraciones o bien su comportamiento en dicha zona.

La ayuda de las herramientas (series de tiempo, dispersión de los datos/ gráfica de caja y bigote, histogramas, gráfica de residuos, correlación de Pearson, valores atípicos de Grubbs) fueron de gran ayuda para poder determinar cuáles fueron las variables meteorológicas que impactan en mayor o menor manera al comportamiento de los contaminantes atmosféricos en la ZMVP. Obteniendo que el ozono tiene una correlación de Pearson positiva de **0.446** con la temperatura, **0.273** con la radiación ultravioleta tipo A y **0.186** con la radiación ultravioleta tipo B, mientras que presenta una correlación negativa con el monóxido de carbono de **-0.325**, y de **-0.349** con la humedad relativa. Esto se debe a que el ozono cuenta con características fotoquímicas lo cual permite que sus concentraciones aumenten al interactuar durante el día con la temperatura, monóxido de carbono y radiación ultravioleta, mientras disminuye cuando hay un alto % de humedad relativa en el ambiente.

Los mapas de dispersión ponen en evidencia como es el comportamiento de los contaminantes, así como las zonas más contaminadas, esto se colabora con las gráficas de comportamiento a través del tiempo donde podemos ver interactúan en todo el año y como estas se vuelven estacionales (un comportamiento casi idéntico durante el año). La varianza el Kriging no depende de los datos de las estaciones de monitoreo, si no de la posición de las estaciones del REMA, si hay una gran distancia entre las estaciones la variabilidad (error) será más grande. Una de las ventajas del Kriging es que la estimación que hace en los sitios de medición (estaciones de monitoreo) les vuelve a dar el mismo valor del dato de concentración dado en ese punto, dando una varianza del sitio es casi nula, lo que quiere decir que el modelo estadístico es muy confiable. Y esto se puede apreciar en el análisis estadístico del Kriging que nos da por defecto el software Surfer 15, al tener en la mayoría de los registros de todas las estimaciones un valor de **R²** por arriba del **0.99**, un ajuste casi perfecto, otro motivo por el cual se eligió este tipo de Kriging.

Resultaría interesante comparar los mapas de Kriging con aquellos que se obtendrían por un método de interpolación tradicional, como el del inverso de la distancia, que pondera cada dato por una potencia del inverso de la distancia entre su posición y la posición del sitio a estimar, o cualquier otro método de predicción, pero todo esto es una recomendación ya que el objetivo de este estudio es validar los datos de las estaciones de monitoreo y así fomentar el Kriging como una herramienta indispensable en mi opinión en el desarrollo de programas de gestión para la calidad del aire de la ciudad de Puebla y otros sectores que pueden ser beneficiarios.

Agradecimiento especial

Todo mi más profundo agradecimiento y admiración al Dr. Miguel Ángel Valera Pérez, quien siempre me apoyo en mi formación como profesional y como un pequeño, pero no insignificante, investigador. Por siempre brindarme opciones para poder superarme, como lo fueron los programas de haciendo ciencia o jóvenes investigadores, programas que en lo personal fueron fundamentales como una introducción a realizar este estudio y reflejarlo en una tesis, por apoyarme en congresos e intercambios, por presentarme con doctores incluíbles como lo fue el Dr. Edgardo o la Dra. Gladys, quienes fueron muy importantes para este estudio. por todo esto y mucho más, gracias!

6. Referencias

- Ahammad, R. (2018). Nitrogen Oxides. In *Salem Press Encyclopedia of Science* (p. 4). Retrieved from <http://eds.a.ebscohost.com/eds/detail/detail?vid=8&sid=dfb8b201-d3a1-4723-978d-23f0c4abeae5%40sessionmgr4007&bdata=Jmxhbm9ZXMmc2l0ZT1lZHMtbGl2ZQ%3D%3D#AN=89475293&db=ers>
- Alfaro, M. A. S. (2007). *Estimación de Recursos Mineros*. Retrieved from http://www.cg.ensmp.fr/bibliotheque/public/ALFARO_Cours_00606.pdf
- AMÓN, I. U. (2010). *GUÍA METODOLÓGICA PARA LA SELECCIÓN DE TÉCNICAS DE DEPURACIÓN DE DATOS*. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/2033/1/71644758.20101.pdf>
- Arcinegas, C. A. S. (2012). Diagnóstico Y Control De Material Particulado: Partículas Suspendidas Totales Y Fracción Respirable Pm10. *Luna Azul*, (34), 195–213. <https://doi.org/10.17151/luaz.2012.34.12>
- Burchard, E. M. (2019). Ozone. In *Salem Press Encyclopedia of Science*. Retrieved from <http://eds.a.ebscohost.com.pbid.unam.mx:8080/eds/detail/detail?vid=3&sid=0cffbef0-ea69-4f49-843c-f12420a974fc%40sessionmgr4008&bdata=Jmxhbm9ZXMmc2l0ZT1lZHMtbGl2ZQ%3D%3D#db=ers&AN=89475794>
- Camilloni, I., & Vera, C. (2003). Ciencias Naturales “La Atmósfera.” *EXPLORA: LAS CIENCIAS EN EL MUNDO CONTEMPORÁNEO*, 1, 16. Retrieved from <http://www.bnm.me.gov.ar/giga1/documentos/EL002316.pdf>
- Cancino, B. (2019, May 10). Mala calidad del aire es por falta de cultura del medio ambiente : especialistas. Retrieved from El Sol de Puebla website: <https://www.elsoldepuebla.com.mx/local/mala-calidad-del-aire-es-por-falta-de-cultura-del-medio-ambiente-especialistas-puebla-contaminacion-salud-3600702.html>
- Chica Olmo, M. (2005). La geoestadística como herramienta de análisis espacial de datos de inventario forestal. *Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 19, 47–55. Retrieved from <http://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2981942.pdf>
- CONAPO, (CONSEJO NACIONAL DE POBLACIÓN). (2010). Delimitación De Las Zonas Metropolitanas De México 2010 - Capítulos I a Iv. In 2012. <https://doi.org/71109>
- Consejería de salud. (2005). Monóxido de carbono. Retrieved from Región de Murcia website: <https://www.murciasalud.es/pagina.php?id=180398&idsec=1573#>
- Corza, I. E., & Velásquez, M. H. (2014). El plomo y sus efectos en la salud. *Acta Médica Del Centro*, 8(3), 141–148.
- Cressie, N. (1992). Statistics for Spatial Data. In *Terra Nova* (Vol. 4). <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.1992.tb00605.x>
- Díaz, M. F., Espinosa, G. J. R., & García, R. C. J. (2016). Algoritmo paralelo para la interpolación espacial de Krigeado Ordinario Parallel algorithm for spatial interpolation of Ordinary Kriging. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 10(3), 57–71. Retrieved from <http://rcci.uci.xn--cupg-7na.57-70>
- Emery, X. (2013). *Geoestadística* (U. de Chile, Ed.). Retrieved from <https://www.u->

- cursos.cl/usuario/f697544fb48474f4153ef2aafbe4c963/mi_blog/r/Geoestadistica.pdf
- GISGeography. (2018). Geoestadística, interpolación con Kriging. Retrieved from ArcGeek website: <https://acolita.com/geoestadistica-interpolacion-con-kriging/>
- Gobierno de Aragon. (2019). El ozono y la Salud. Retrieved from Construyendo europa desde Aragon website: http://www.aragonaire.es/ozone.php?n_action=health
- GoldenSoftware. (2017). Surfer 15. Retrieved August 10, 2019, from <https://www.goldensoftware.com/press-release/golden-software-releases-surfer-v15>
- Gómez-Losada, Á., Santos, F. M., Gibert, K., & Pires, J. C. M. (2019). A data science approach for spatiotemporal modelling of low and resident air pollution in Madrid (Spain): Implications for epidemiological studies. *Computers, Environment and Urban Systems*, 75, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2018.12.005>
- Green, A. C., & Whitman, D. C. (2017). Ultraviolet Radiation. In *Schottenfeld and Fraumeni Cancer Epidemiology and Prevention, Fourth Edition* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1093/oso/9780190238667.003.0014>
- Gutiérrez de Ravé, E., Jiménez-Hornero, F. J., Ariza-Villaverde, A. B., & Gómez-López, J. M. (2014). Using general-purpose computing on graphics processing units (GPGPU) to accelerate the ordinary kriging algorithm. *Computers and Geosciences*, 64, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.11.004>
- Harmon, A. (2019). Sulfur Dioxide. In *Salem Press Encyclopedia of Science* (p. 2). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.00933-7>
- Hernández, J. C. R., Madrigal, D. U., & Morales, C. M. (2004). Comportamiento del monóxido de carbono y el clima en la ciudad de Toluca, de 1995 a 2001. *Ciencia Ergo Sum*, 11(3), 263–274.
- INE, I. nacional de ecología. (2010a). Manual 1: principios de medicion de la calidad del aire. *Instituto Nacional de Ecología*.
- INE, I. nacional de ecología. (2010b). *Protocolo de Manejo de datos de la calidad del aire*. Retrieved from <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/5> - Protocolo de Manejo de Datos de la Calidad del Aire.pdf
- Lebrenz, H., & Bárdossy, A. (2019). Geostatistical interpolation by quantile kriging. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(3), 1633–1648. <https://doi.org/10.5194/hess-23-1633-2019>
- Levy Mangin, J.-P., Montero Lorenzo, J. M., & Larraz Iribas, B. (2011). Introduccion a la Geoestadistica lineal. *Universidad Nacional de Colombia*, 1–94. <https://doi.org/10.4272/978-84-9745-347-9.ch1>
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (1999). Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Applications and Management. In *John Wiley and Sons* (Vol. 2, pp. 188–195). [https://doi.org/10.1016/S0306-9192\(98\)00008-6](https://doi.org/10.1016/S0306-9192(98)00008-6)
- Lv, D., Chen, Y., Zhu, T., Li, T., Shen, F., Li, X., & Mehmood, T. (2019). The pollution characteristics of PM10 and PM2.5 during summer and winter in Beijing, Suning and Islamabad. *Atmospheric Pollution Research*, 10(4), 1159–1164. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.01.021>

- Martines, E. (2007). Definiciones de humedad y su equivalencia. *Centro Nacional de Metrología, División de Termometría*, 1–5. Retrieved from <http://www.cenam.mx/dme/pdf/TM02.pdf>
- Mena, M. (2019). Es Puebla tercera zona metropolitana más contaminada del país. Retrieved August 19, 2019, from El Sol de Puebla website: <https://www.elsoldepuebla.com.mx/local/es-puebla-tercera-zona-metropolitana-mas-contaminada-del-pais-2881606.html>
- Mendoza, O. O. L. (2016). *Influencia y transporte de la contaminación atmosférica generada en la Zona Metropolitana del Valle de México en la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de Puebla* (Universidad Nacional Autónoma de México). Retrieved from <http://132.248.9.195/ptd2016/noviembre/0752874/Index.html>
- Molina, M. J., & Molina, L. T. (2004). Megacities and atmospheric pollution. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 54(6), 644–680. <https://doi.org/10.1080/10473289.2004.10470936>
- Moral, F. J. G. (2004). Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales. *Ecosistemas*, 13(1), 78–86.
- Oliver Margaret A., & Webster Richard. (2015). *Springer Briefs in Agriculture: Basic steps in Geostatistics: The variogram and kriging*. Retrieved from <http://www.springer.com/series/10183>
- OMS, O. mundial de la salud. (2005). Contaminacion atmosferica. Retrieved from Departamento de Salud Pública, Medio Ambiente y Determinantes Sociales de la Salud website: https://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/es/
- Restrepo, L. F. B., & González, J. L. (2007). De Pearson a Spearman. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 20(2), 183–192. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=295023034010>
- Rodríguez, R. M. J., Águeda, B. C., & Portela, A. L. (2004). *Meteorología y Climatología Semana de la Ciencia y la Tecnología 2004*. Retrieved from <https://cab.inta-csic.es/uploads/culturacientifica/adjuntos/20130121115236.pdf>
- Romero, M. P., Diego, F. O., & Álvarez, M. T. (2005). La Contaminación Del Aire: Su Repercucion Como Problema De Salud. *Revista Española de Salud Publica*, 79(22), 159–175.
- Schwartz, J. J. (2019). Carbon monoxide. In *Salem Press Encyclopedia of Science*. Retrieved from <http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=ers&AN=89404315&lang=es&site=eds-live>
- SDRSOT, S. de D. R. S. y O. T. (2015). Inventario de emisiones, determinación de factores de emisión y datos de actividad para fuentes en el municipio de Puebla “Plan estratégico de reducción de emisiones a la atmósfera.” *Gobierno Municipal de Puebla*, 252.
- SEDEMA, S. del M. A. (2018). Normatividad. Retrieved from Gobierno de la ciudad de Mexico website: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnml=&dc=%27Yw==>
- SEMARNAT, S. de medio ambiente y recursos naturales, & INE, I. nacional de ecología.

(2005). Guía de Elaboración y Usos de Inventarios de Emisiones. Retrieved from Western Governor's Association website:
http://aplicaciones.semarnat.gob.mx/estadisticas/compendio2010/10.100.13.5_8080/ibi_apps/WFServlete5c8.html

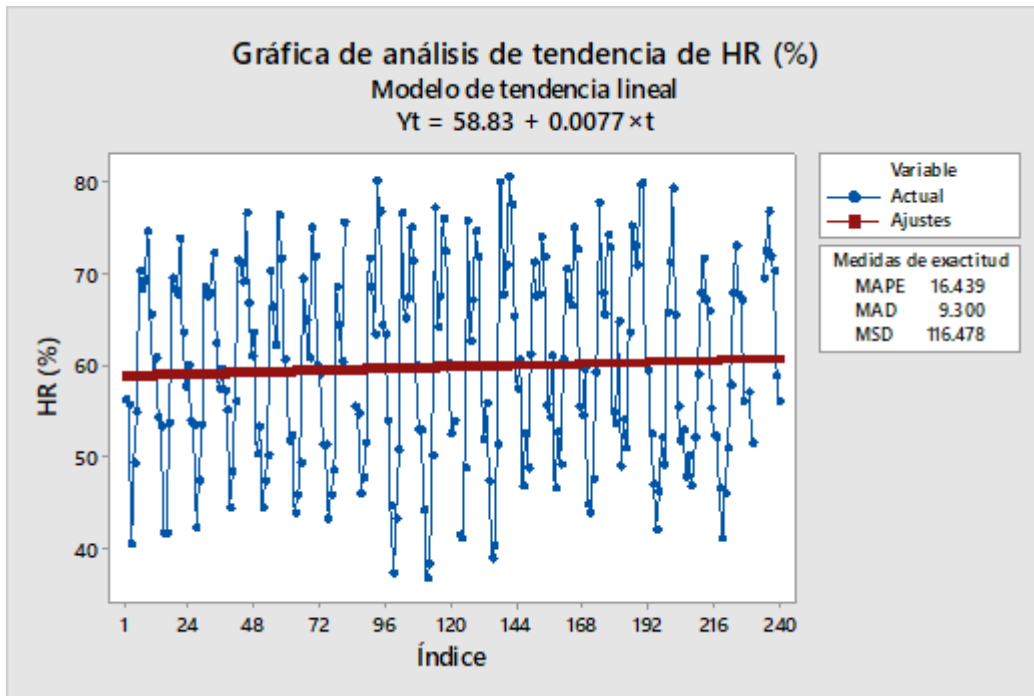
SSAOT, S. de sustentabilidad y ordenamiento territorial. (2012). Programa para mejorar la calidad del aire en el estado de Puebla 2012-2020. *Gobierno Municipal de Puebla*, 231. Retrieved from www.ssaot.puebla.gob.mx

Tobler, W. R. (1970). A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. *Economic Geography*, 46, 234. <https://doi.org/10.2307/143141>

Wexler, A., & Wildhack, W. A. (1962). Humidity and moisture. *Physics Today*, 15(9), 106. <https://doi.org/10.1063/1.3058379>

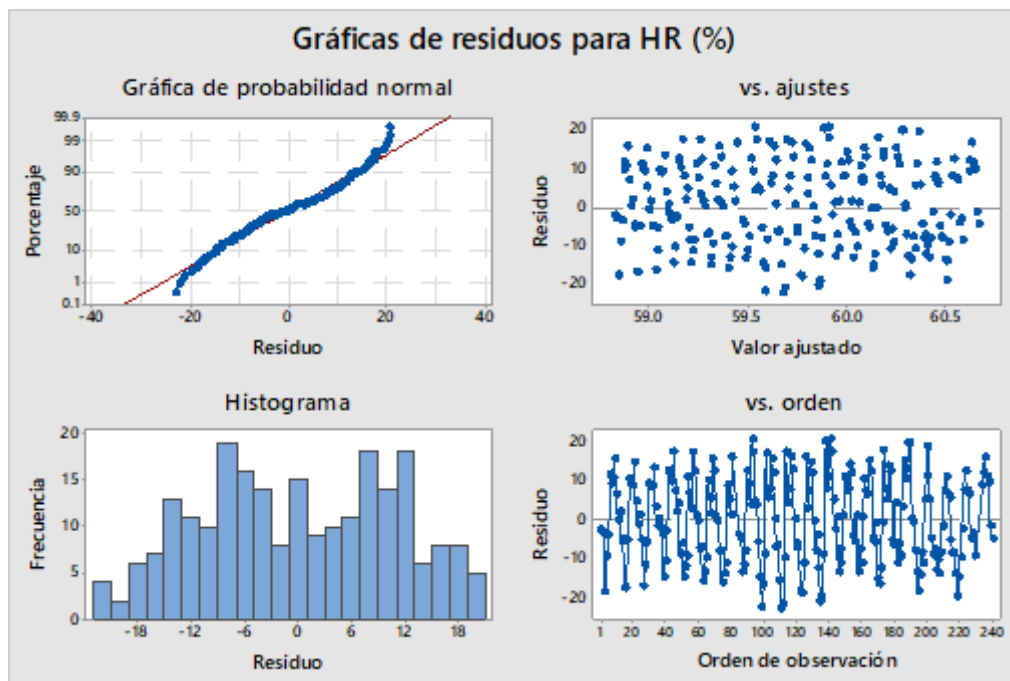
Wilks, D. S. (2012). *Statistical methods in the atmospheric sciences*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-385022-5.00016-6>

Anexo 1. Gráficas de serie de tiempo y de residuos para las variables



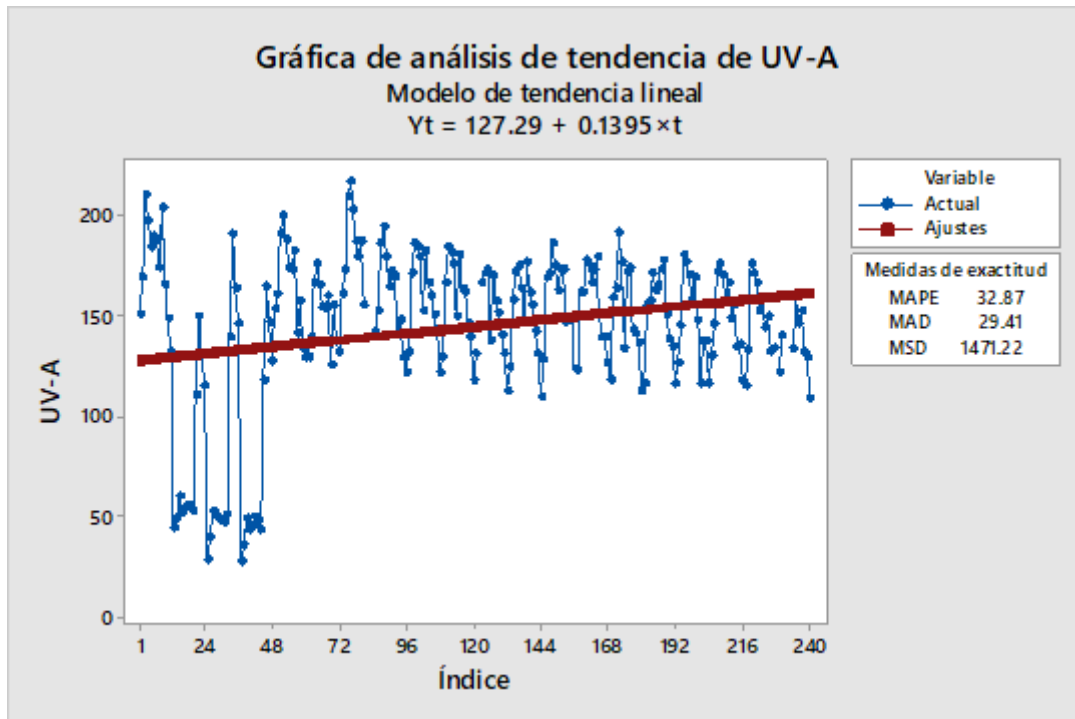
Gráfica. Serie de tiempo de humedad relativa con tendencia (2001-2005)

Fuente: Elaboración propia

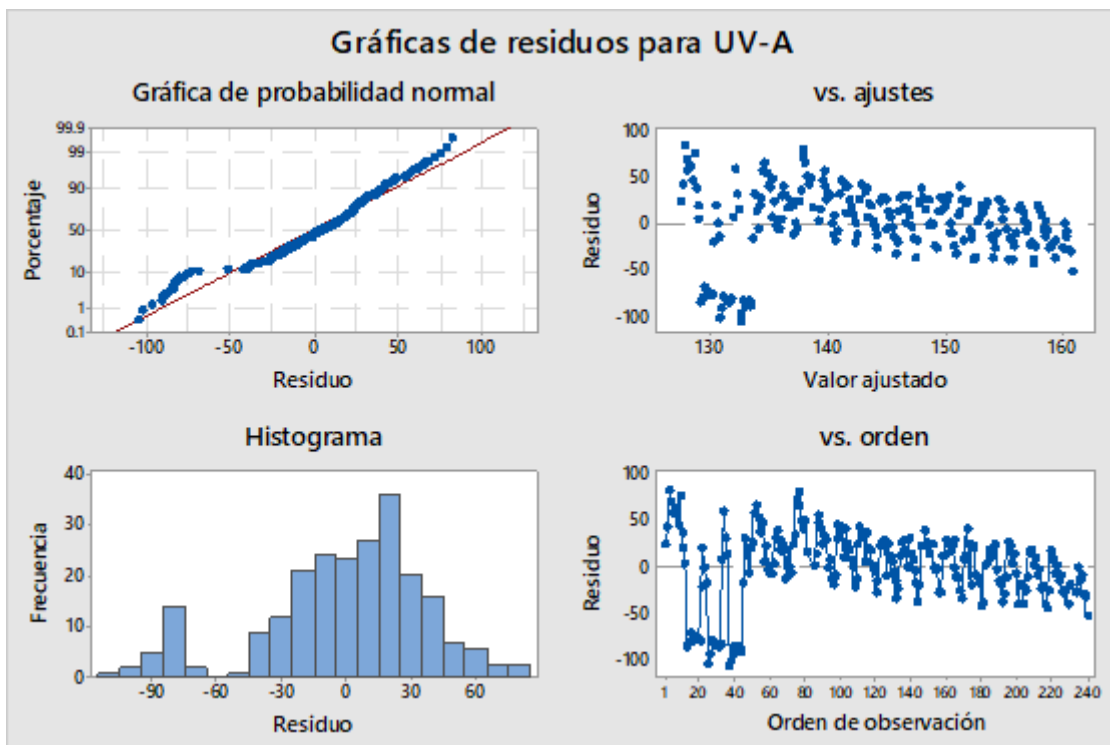


Gráfica. Gráfica de residuos 4 en 1 para la humedad relativa del (2001-2005)

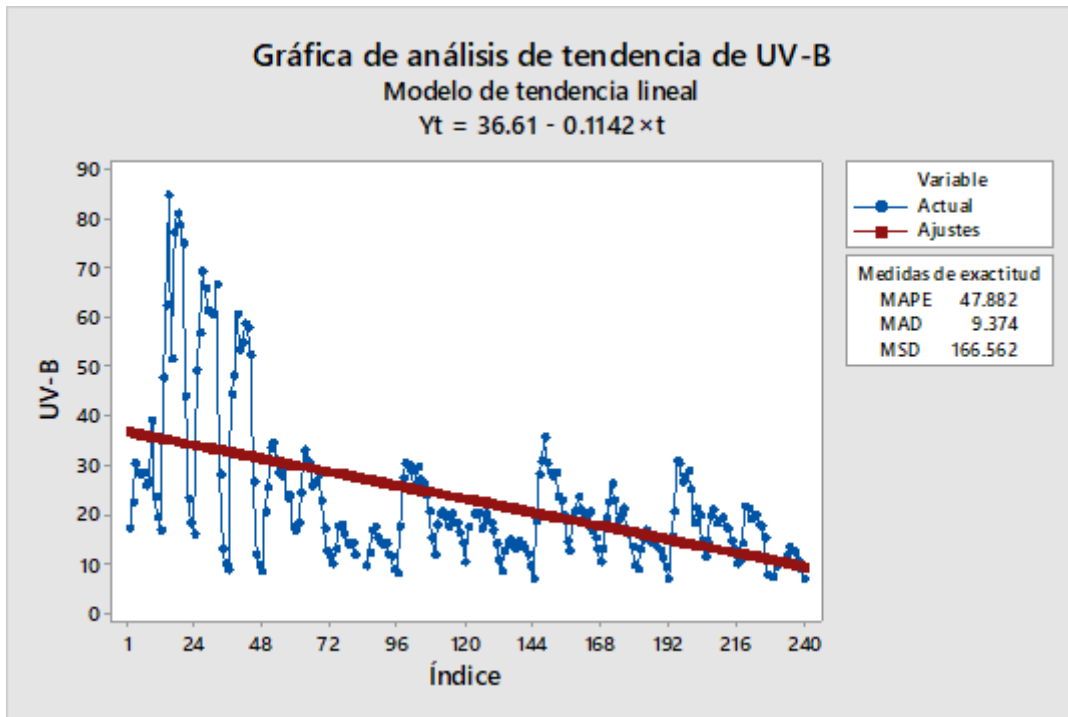
Fuente: Elaboración propia



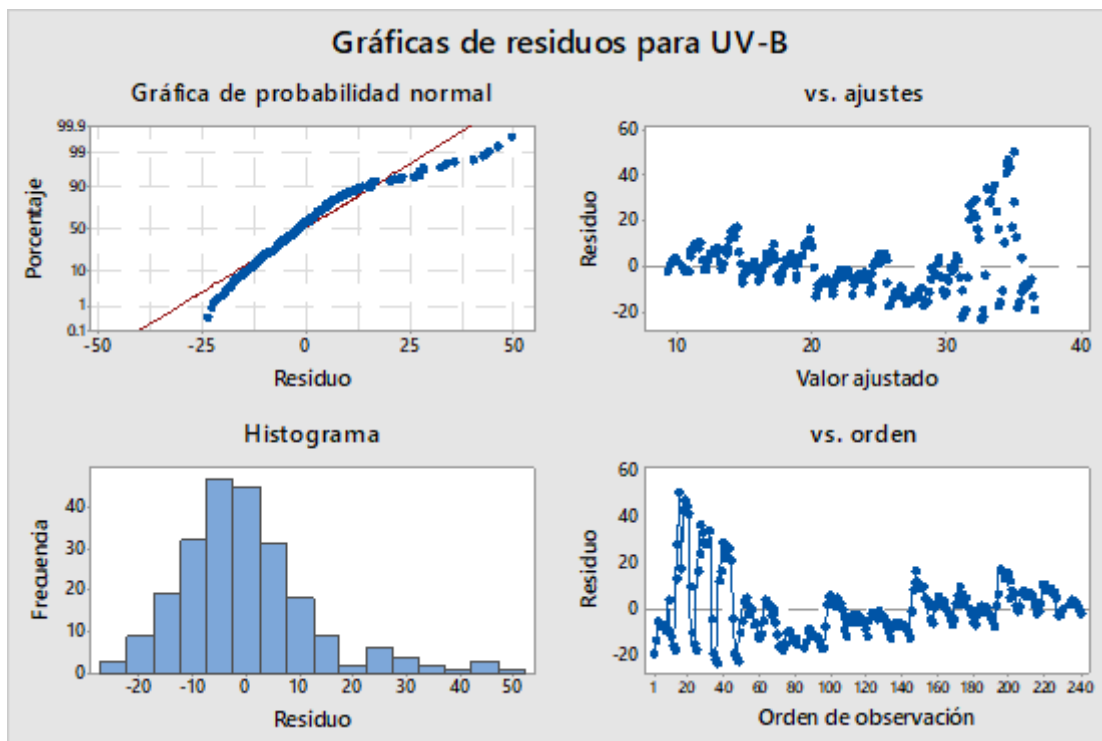
Gráfica. Serie de tiempo de la radiación ultravioleta tipo A con tendencia (2001-2005)
Fuente: Elaboración propia



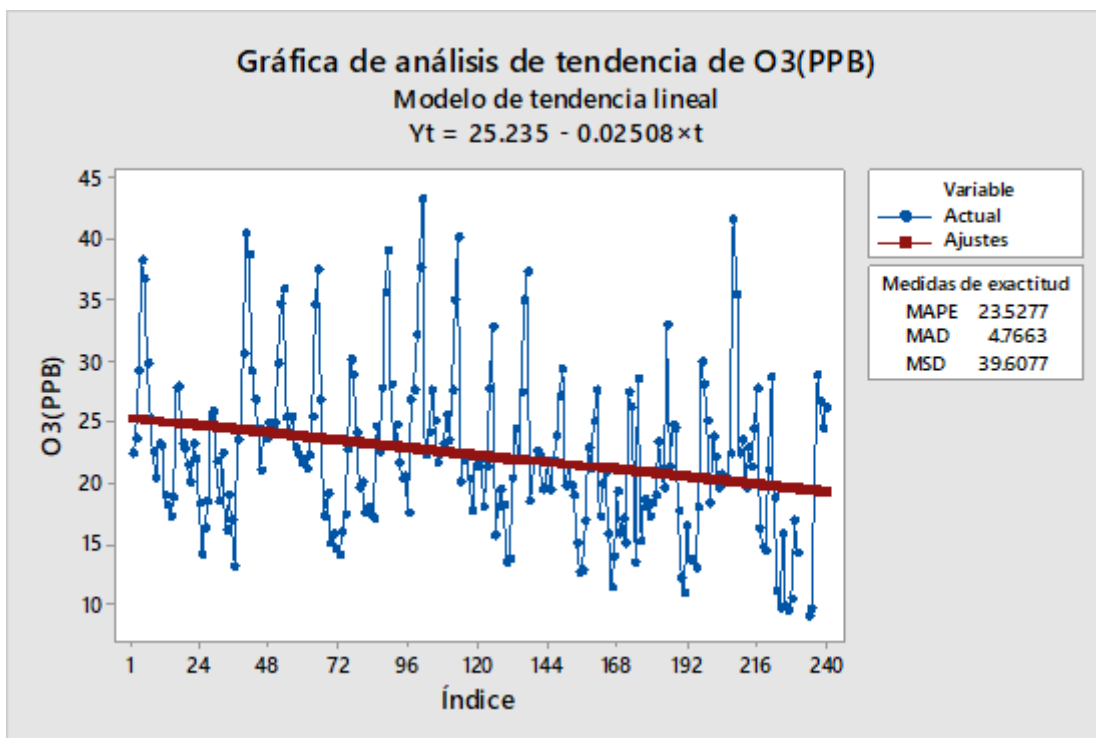
Gráfica. Gráfica de residuos 4 en 1 para la radiación ultravioleta tipo A del (2001-2005)
Fuente: Elaboración propia



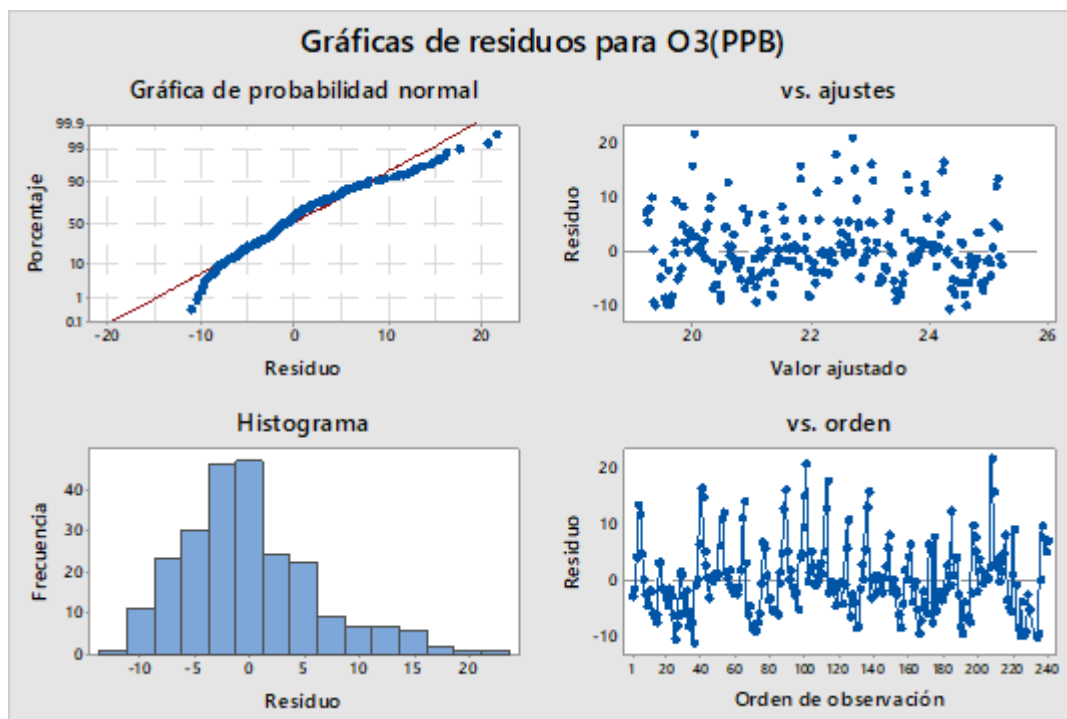
Gráfica. Serie de tiempo de la radiación ultravioleta tipo B con tendencia (2001-2005)
 Fuente: Elaboración propia



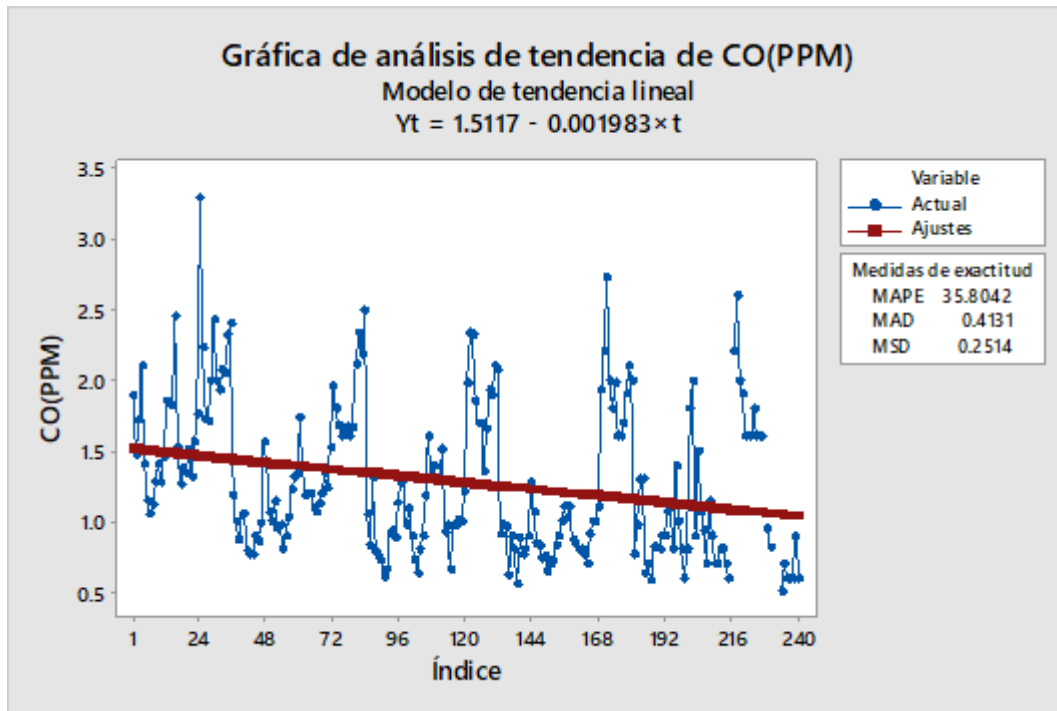
Gráfica. Gráfica de residuos 4 en 1 para la radiación ultravioleta tipo B del (2001-2005)
 Fuente: Elaboración propia



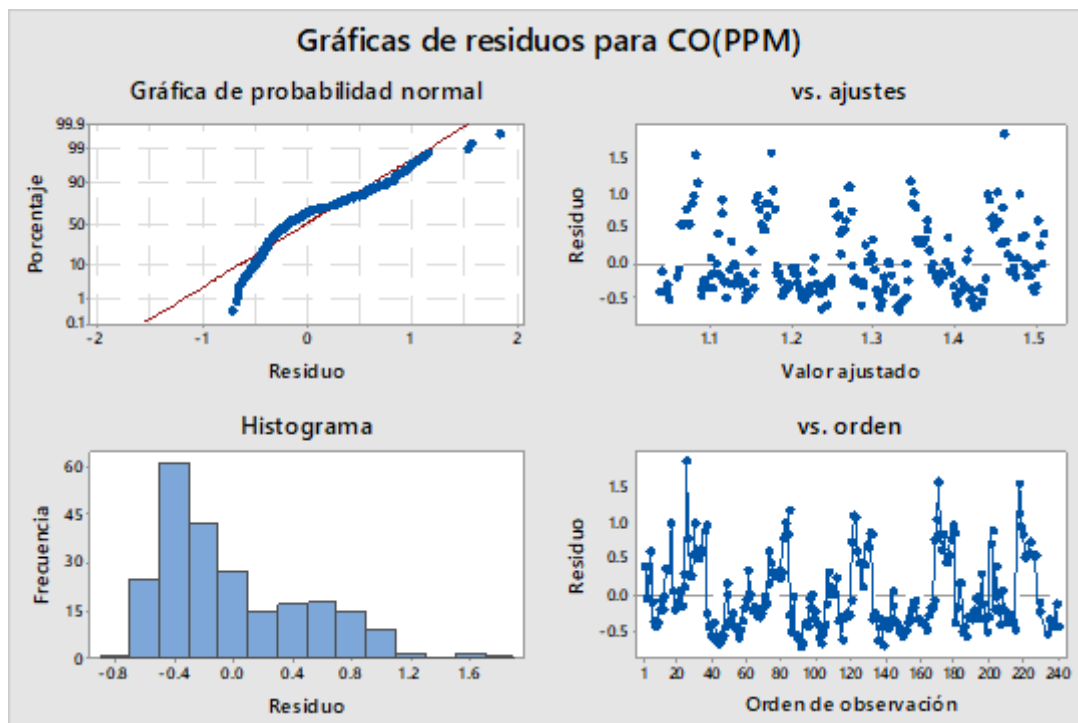
Gráfica. Serie de tiempo del ozono con tendencia (2001-2005)
 Fuente: Elaboración propia



Gráfica. Gráfica de residuos 4 en 1 para el ozono del (2001-2005)
 Fuente: Elaboración propia

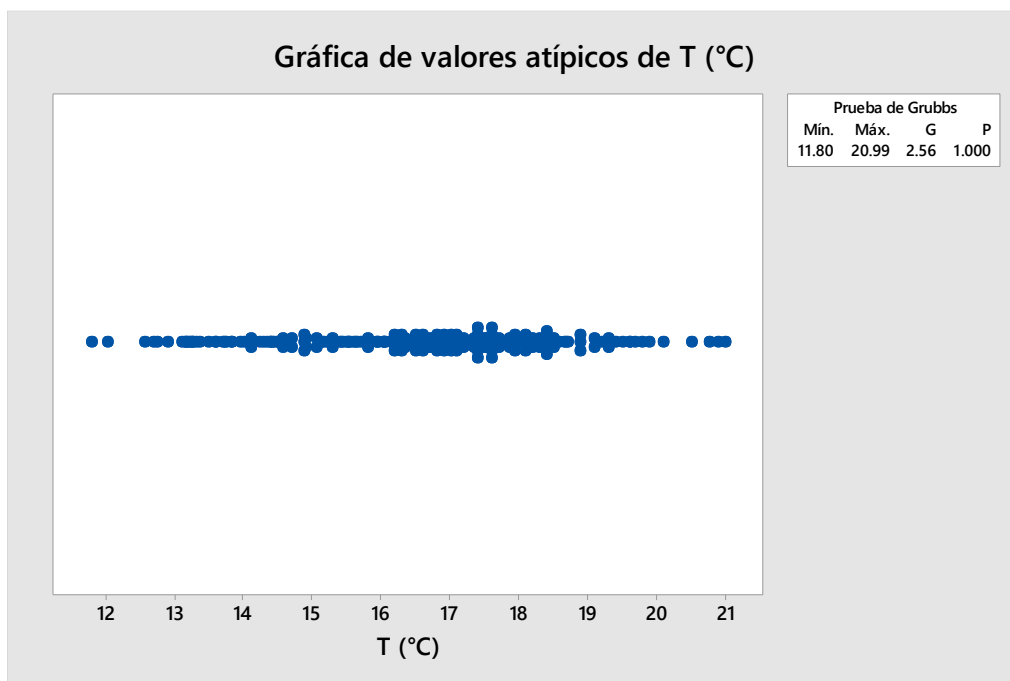


Gráfica. Serie de tiempo del monóxido de carbono con tendencia (2001-2005)
 Fuente: Elaboración propia

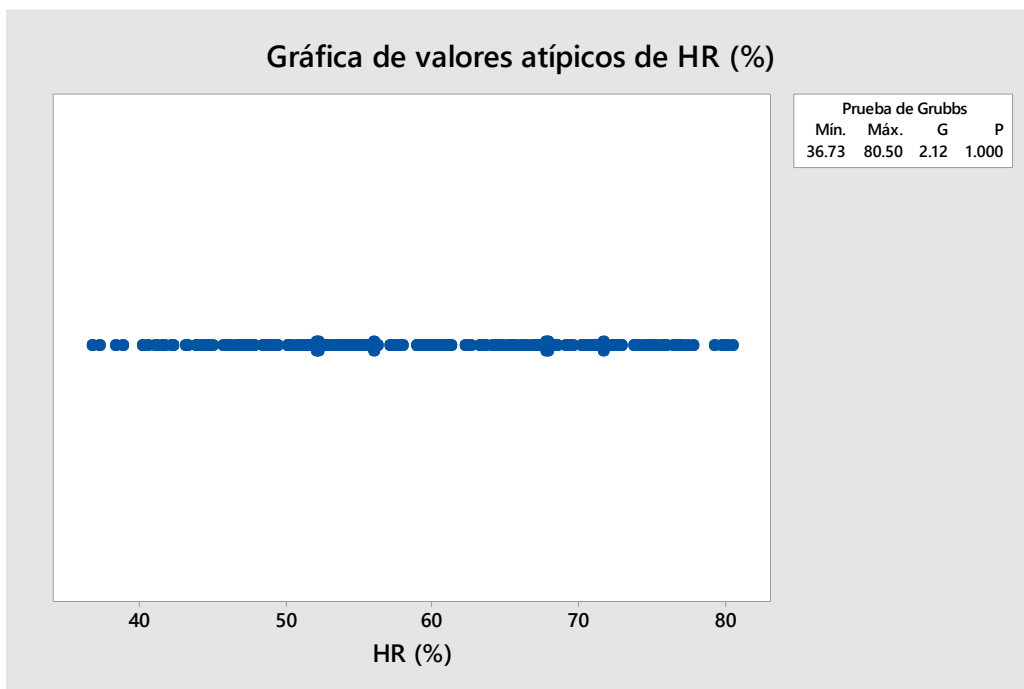


Gráfica. Gráfica de residuos 4 en 1 para el ozono del (2001-2005)
 Fuente: Elaboración propia

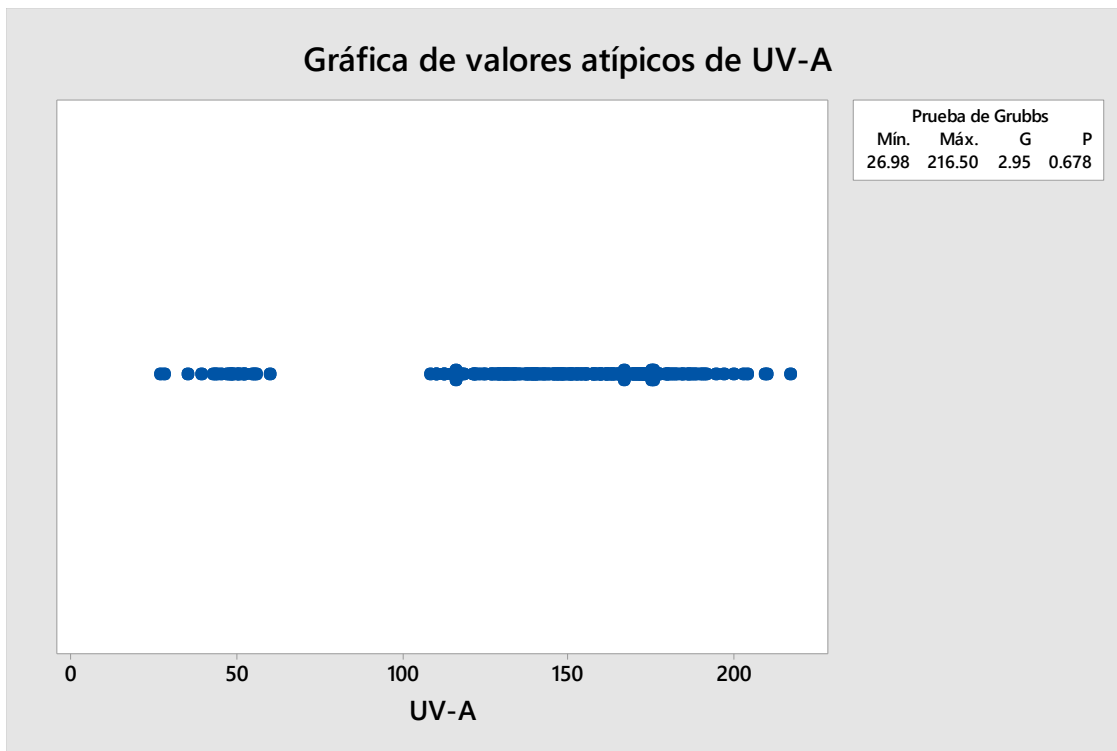
Anexo 2. Graficas de valores atípicos de las variables



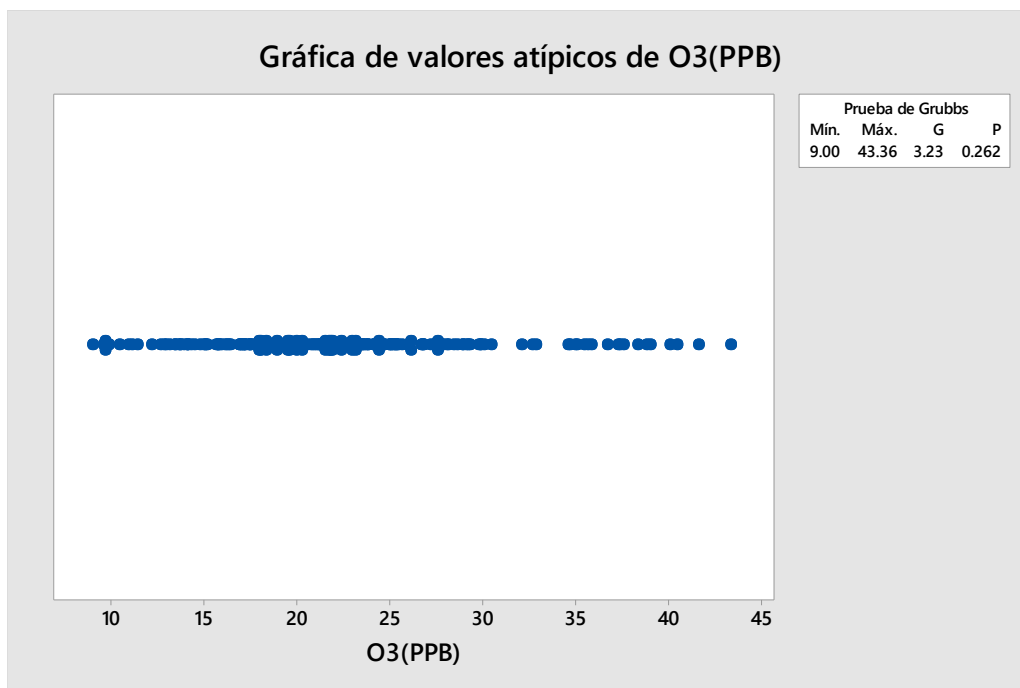
Gráfica. Gráfica de valores atípicos
Fuente: Elaboración propia



Gráfica. Gráfica de valores atípicos
Fuente: Elaboración propia



Gráfica. Gráfica de valores atípicos
Fuente: Elaboración propia



Gráfica. Gráfica de valores atípicos
Fuente: Elaboración propia

Anexo 3. Gridding Report

Gridding Report

Fri Dec 6 14:33:54 2019
Elapsed time for gridding: 0.01 seconds

Data Source

Source Data File Name: C:\Users\super\OneDrive\Documentos\TESIS\MODELACIONES
TESIS\agosto 2002\HR(%) agosto 2002.xlsx (sheet 'TEM')
X Column: A
Y Column: B
Z Column: C

Filtered Data Counts

Active Data: 4
Original Data: 4
Excluded Data: 0
Deleted Duplicates: 0
Retained Duplicates: 0
Artificial Data: 0
Superseded Data: 0

Exclusion Filtering

Exclusion Filter String: Not In Use

Duplicate Filtering

Duplicate Points to Keep: First
X Duplicate Tolerance: 0.0012
Y Duplicate Tolerance: 0.001

No duplicate data were found.

Breakline Filtering

Breakline Filtering: Not In Use

Z Data Transform

Transformation method: Linear (use Z values directly)

No untransformable data were found.

Data Counts

Active Data: 4

Univariate Statistics

| | X | Y | Z |
|-------------------------|------------------|------------------|-----------------|
| Count: | 4 | 4 | 4 |
| 1%-tile: | 578990.486143 | 2099597.90452 | 60.4 |
| 5%-tile: | 578990.486143 | 2099597.90452 | 60.4 |
| 10%-tile: | 578990.486143 | 2099597.90452 | 60.4 |
| 25%-tile: | 578990.486143 | 2099597.90452 | 60.4 |
| 50%-tile: | 581581.582744 | 2105584.36089 | 60.7 |
| 75%-tile: | 582688.153351 | 2107307.43391 | 62.2 |
| 90%-tile: | 582688.153351 | 2107307.43391 | 62.2 |
| 95%-tile: | 582688.153351 | 2107307.43391 | 62.2 |
| 99%-tile: | 582688.153351 | 2107307.43391 | 62.2 |
| Minimum: | 578990.486143 | 2099597.90452 | 60.4 |
| Maximum: | 589324.517308 | 2108464.25135 | 63.4 |
| Mean: | 583146.184887 | 2105238.48767 | 61.675 |
| Median: | 582134.868048 | 2106445.8974 | 61.45 |
| Geometric Mean: | 583133.769845 | 2105235.71688 | 61.6632368398 |
| Harmonic Mean: | 583121.393736 | 2105232.94351 | 61.6515237452 |
| Root Mean Square: | 583158.63862 | 2105241.25587 | 61.6868097732 |
| Trim Mean (10%): | N/A | N/A | N/A |
| Interquartile Mean: | 581086.740746 | 2104163.2331 | 61.1 |
| Midrange: | 584157.501725 | 2104031.07793 | 61.9 |
| Winsorized Mean: | 581487.093897 | 2104949.28331 | 61.375 |
| TriMean: | 581210.451246 | 2104518.51505 | 61 |
| Variance: | 19366465.4375 | 15540632.1571 | 1.9425 |
| Standard Deviation: | 4400.73464747 | 3942.16084871 | 1.39373598648 |
| Interquartile Range: | 3697.66720862 | 7709.52939701 | 1.8 |
| Range: | 10334.0311655 | 8866.34683357 | 3 |
| Mean Difference: | 5351.44401724 | 4720.3522547 | 1.75 |
| Median Abs. Deviation: | 1848.83360431 | 1439.94523201 | 0.9 |
| Average Abs. Deviation: | 2860.15044312 | 2647.35496526 | 1.125 |
| Quartile Dispersion: | 0.00318303796154 | 0.00183258922576 | 0.0146818923328 |
| Relative Mean Diff.: | 0.00917684820021 | 0.00224219359581 | 0.0283745439805 |
| Standard Error: | 2200.36732374 | 1971.08042436 | 0.696867993238 |
| Coef. of Variation: | 0.00754653766333 | 0.00187254834633 | 0.0225980703117 |

| | | | |
|---------------|-------------------|-------------------|----------------|
| Skewness: | 0.469757826935 | -0.559052229901 | 0.210366226846 |
| Kurtosis: | 1.17405845863 | 1.17891198668 | 0.826639622248 |
| Sum: | 2332584.73955 | 8420953.95066 | 246.7 |
| Sum Absolute: | 2332584.73955 | 8420953.95066 | 246.7 |
| Sum Squares: | 1.36029599119e+12 | 1.77281629817e+13 | 15221.05 |
| Mean Square: | 340073997797 | 4.43204074542e+12 | 3805.2625 |

Inter-Variable Covariance

| | X | Y | Z |
|----|------------|------------|------------|
| X: | 19366465 | 10339248 | -494.50244 |
| Y: | 10339248 | 15540632 | -4364.6281 |
| Z: | -494.50244 | -4364.6281 | 1.9425 |

Inter-Variable Correlation

| | X | Y | Z |
|----|--------|--------|--------|
| X: | 1.000 | 0.596 | -0.081 |
| Y: | 0.596 | 1.000 | -0.794 |
| Z: | -0.081 | -0.794 | 1.000 |

Inter-Variable Rank Correlation

| | X | Y | Z |
|----|--------|--------|--------|
| X: | 1.000 | 0.400 | -0.200 |
| Y: | 0.400 | 1.000 | -0.800 |
| Z: | -0.200 | -0.800 | 1.000 |

Principal Component Analysis

| | PC1 | PC2 | PC3 |
|---------|--------------------|--------------------|-------------------|
| X: | -0.639559399977 | -0.639559399977 | -0.00019293376922 |
| Y: | 0.768741557405 | 0.768741557405 | 0.000409212301258 |
| Z: | -0.000437971152278 | -0.000437971152278 | 0.000409212301258 |
| Lambda: | 27968267.5018 | 6938831.78349 | 0.251846546783 |

Planar Regression: $Z = AX+BY+C$

Fitted Parameters

| | A | B | C |
|------------------|-------------------|--------------------|---------------|
| Parameter Value: | 0.000192933779583 | -0.000409212330263 | 810.655949798 |
| Standard Error: | 0.000142012465581 | 0.000158532135456 | 292.064414207 |

Inter-Parameter Correlations

| | A | B | C |
|----|--------|--------|--------|
| A: | 1.000 | -0.596 | 0.397 |
| B: | -0.596 | 1.000 | -0.974 |
| C: | 0.397 | -0.974 | 1.000 |

ANOVA Table

| Source | df | Sum of Squares | Mean Square | F |
|-------------|---------------|----------------|----------------|---|
| Regression: | 2 | 5.07196020501 | 2.5359801025 | |
| | 3.35651426876 | | | |
| Residual: | 1 | 0.755539794992 | 0.755539794992 | |
| Total: | 3 | 5.8275 | | |

Coefficient of Multiple Determination (R^2): 0.870349241529

Nearest Neighbor Statistics

| | Separation | Delta Z |
|-----------|---------------|---------|
| 1%-tile: | 3085.16897318 | 0.3 |
| 5%-tile: | 3085.16897318 | 0.3 |
| 10%-tile: | 3085.16897318 | 0.3 |
| 25%-tile: | 3085.16897318 | 0.3 |
| 50%-tile: | 3085.16897318 | 0.3 |
| 75%-tile: | 6856.4062909 | 1.5 |
| 90%-tile: | 6856.4062909 | 1.5 |
| 95%-tile: | 6856.4062909 | 1.5 |
| 99%-tile: | 6856.4062909 | 1.5 |
| Minimum: | 3085.16897318 | 0.3 |
| Maximum: | 7036.36288506 | 2.7 |

| | | |
|-------------------------|------------------|----------------|
| Mean: | 5015.77678058 | 1.2 |
| Median: | 4970.78763204 | 0.9 |
| Geometric Mean: | 4629.14379022 | 0.777006019233 |
| Harmonic Mean: | 4272.45173371 | 0.519230769231 |
| Root Mean Square: | 5374.87779075 | 1.55884572681 |
| Trim Mean (10%): | N/A | N/A |
| Interquartile Mean: | 4342.24807908 | 0.7 |
| Midrange: | 5060.76592912 | 1.5 |
| Winsorized Mean: | 4970.78763204 | 0.9 |
| TriMean: | 4027.97830261 | 0.6 |
| | | |
| Variance: | 4975059.40395 | 1.32 |
| Standard Deviation: | 2230.48411874 | 1.14891252931 |
| Interquartile Range: | 3771.23731772 | 1.2 |
| Range: | 3951.19391188 | 2.4 |
| Mean Difference: | 2604.13650889 | 1.4 |
| Median Abs. Deviation: | 1885.61865886 | 0.6 |
| Average Abs. Deviation: | 1930.6078074 | 0.9 |
| Quartile Dispersion: | 0.379340015797 | 0.666666666667 |
| Relative Mean Diff.: | 0.519189075355 | 1.166666666667 |
| | | |
| Standard Error: | 1115.24205937 | 0.574456264654 |
| Coef. of Variation: | 0.444693656898 | 0.957427107756 |
| Skewness: | 0.00211282462574 | 0.320461139373 |
| Kurtosis: | 0.564939018036 | 0.915805785124 |
| | | |
| Sum: | 20063.1071223 | 4.8 |
| Sum Absolute: | 20063.1071223 | 4.8 |
| Sum Squares: | 115557245.062 | 9.72 |
| Mean Square: | 28889311.2655 | 2.43 |

Complete Spatial Randomness

| | |
|------------------|-------------------|
| Lambda: | 4.36561575753e-08 |
| Clark and Evans: | 2.09599841783 |
| Skellam: | 31.6973208711 |

Gridding Rules

| | |
|------------------------------|---------|
| Gridding Method: | Kriging |
| Kriging Type: | Point |
| | |
| Polynomial Drift Order: | 0 |
| Kriging std. deviation grid: | no |

Semi-Variogram Model

| | |
|-------------------|--------|
| Component Type: | Linear |
| Anisotropy Angle: | 0 |
| Anisotropy Ratio: | 1 |
| Variogram Slope: | 1 |

Search Parameters

| | |
|---------------------------|------|
| No Search (use all data): | true |
|---------------------------|------|

Output Grid

Grid File Name: C:\Users\super\OneDrive\Documentos\TESIS\MODELACIONES
TESIS\agosto 2002\HR(%) agosto 2002.grd
Grid Size: 86 rows x 100 columns
Total Nodes: 8600
Filled Nodes: 8600
NoData Nodes: 0
NoData Value: 1.70141E+38

Grid Geometry

X Minimum: 578990.4861
X Maximum: 589324.5174
X Spacing: 104.38415454545

Y Minimum: 2099597.904
Y Maximum: 2108464.252
Y Spacing: 104.30997647059

Univariate Grid Statistics

| | Z |
|----------------------|----------------|
| Count: | 8600 |
| 1%-tile: | 60.4988730506 |
| 5%-tile: | 60.6355899089 |
| 10%-tile: | 60.7597734551 |
| 25%-tile: | 61.2192567591 |
| 50%-tile: | 61.8643747285 |
| 75%-tile: | 62.2950829749 |
| 90%-tile: | 62.5703405651 |
| 95%-tile: | 62.6954572165 |
| 99%-tile: | 63.0718568051 |
| Minimum: | 60.4019509425 |
| Maximum: | 63.4000000079 |
| Mean: | 61.764401754 |
| Median: | 61.8645684229 |
| Geometric Mean: | 61.7607869005 |
| Harmonic Mean: | 61.7571662124 |
| Root Mean Square: | 61.768010574 |
| Trim Mean (10%): | 61.7674294394 |
| Interquartile Mean: | 61.8250219286 |
| Midrange: | 61.9009754752 |
| Winsorized Mean: | 61.7580853633 |
| TriMean: | 61.8107722977 |
| Variance: | 0.445858086162 |
| Standard Deviation: | 0.667726056225 |
| Interquartile Range: | 1.07582621588 |

| | |
|-------------------------|------------------|
| Range: | 2.9980490654 |
| Mean Difference: | 0.764779130513 |
| Median Abs. Deviation: | 0.51165756328 |
| Average Abs. Deviation: | 0.562370374051 |
| Quartile Dispersion: | 0.00871013210444 |
| Relative Mean Diff.: | 0.0123821992733 |
| Standard Error: | 0.00720027523829 |
| Coef. of Variation: | 0.0108108560475 |
| Skewness: | -0.215202812712 |
| Kurtosis: | 2.05943140133 |
| Sum: | 531173.855085 |
| Sum Absolute: | 531173.855085 |
| Sum Squares: | 32811469.3203 |
| Mean Square: | 3815.28713027 |

Gridding Report

Sat Dec 7 13:42:06 2019
Elapsed time for gridding: 0.05 seconds

Data Source

Source Data File Name: C:\Users\super\OneDrive\Documentos\TESIS\MODELACIONES
TESIS\junio 2003\UV-B junio 2003.xlsx (sheet 'TEM')
X Column: A
Y Column: B
Z Column: C

Filtered Data Counts

| | |
|----------------------|---|
| Active Data: | 4 |
| Original Data: | 4 |
| Excluded Data: | 0 |
| Deleted Duplicates: | 0 |
| Retained Duplicates: | 0 |
| Artificial Data: | 0 |
| Superseded Data: | 0 |

Exclusion Filtering

Exclusion Filter String: Not In Use

Duplicate Filtering

Duplicate Points to Keep: First
X Duplicate Tolerance: 0.0012
Y Duplicate Tolerance: 0.001

No duplicate data were found.

Breakline Filtering

Breakline Filtering: Not In Use

Z Data Transform

Transformation method: Linear (use Z values directly)

No untransformable data were found.

Data Counts

Active Data: 4

Univariate Statistics

| | X | Y | Z |
|-------------------|---------------|---------------|---------------|
| Count: | 4 | 4 | 4 |
| 1%-tile: | 578990.486143 | 2099597.90452 | 12.6 |
| 5%-tile: | 578990.486143 | 2099597.90452 | 12.6 |
| 10%-tile: | 578990.486143 | 2099597.90452 | 12.6 |
| 25%-tile: | 578990.486143 | 2099597.90452 | 12.6 |
| 50%-tile: | 581581.582744 | 2105584.36089 | 17.1 |
| 75%-tile: | 582688.153351 | 2107307.43391 | 17.3 |
| 90%-tile: | 582688.153351 | 2107307.43391 | 17.3 |
| 95%-tile: | 582688.153351 | 2107307.43391 | 17.3 |
| 99%-tile: | 582688.153351 | 2107307.43391 | 17.3 |
| Minimum: | 578990.486143 | 2099597.90452 | 12.6 |
| Maximum: | 589324.517308 | 2108464.25135 | 25.5 |
| Mean: | 583146.184887 | 2105238.48767 | 18.125 |
| Median: | 582134.868048 | 2106445.8974 | 17.2 |
| Geometric Mean: | 583133.769845 | 2105235.71688 | 17.558533267 |
| Harmonic Mean: | 583121.393736 | 2105232.94351 | 17.0311498786 |
| Root Mean Square: | 583158.63862 | 2105241.25587 | 18.7130302196 |

| | | | |
|-------------------------|-------------------|-------------------|----------------|
| Trim Mean (10%): | N/A | N/A | N/A |
| Interquartile Mean: | 581086.740746 | 2104163.2331 | 15.6666666667 |
| Midrange: | 584157.501725 | 2104031.07793 | 19.05 |
| Winsorized Mean: | 581487.093897 | 2104949.28331 | 16.075 |
| TriMean: | 581210.451246 | 2104518.51505 | 16.025 |
| Variance: | 19366465.4375 | 15540632.1571 | 28.8825 |
| Standard Deviation: | 4400.73464747 | 3942.16084871 | 5.3742441329 |
| Interquartile Range: | 3697.66720862 | 7709.52939701 | 4.7 |
| Range: | 10334.0311655 | 8866.34683357 | 12.9 |
| Mean Difference: | 5351.44401724 | 4720.3522547 | 6.48333333333 |
| Median Abs. Deviation: | 1848.83360431 | 1439.94523201 | 2.35 |
| Average Abs. Deviation: | 2860.15044312 | 2647.35496526 | 3.275 |
| Quartile Dispersion: | 0.00318303796154 | 0.00183258922576 | 0.157190635452 |
| Relative Mean Diff.: | 0.00917684820021 | 0.00224219359581 | 0.357701149425 |
| Standard Error: | 2200.36732374 | 1971.08042436 | 2.68712206645 |
| Coef. of Variation: | 0.00754653766333 | 0.00187254834633 | 0.296510021125 |
| Skewness: | 0.469757826935 | -0.559052229901 | 0.371788407391 |
| Kurtosis: | 1.17405845863 | 1.17891198668 | 1.16630499338 |
| Sum: | 2332584.73955 | 8420953.95066 | 72.5 |
| Sum Absolute: | 2332584.73955 | 8420953.95066 | 72.5 |
| Sum Squares: | 1.36029599119e+12 | 1.77281629817e+13 | 1400.71 |
| Mean Square: | 340073997797 | 4.43204074542e+12 | 350.1775 |

Inter-Variable Covariance

| | X | Y | Z |
|----|-----------|-----------|-----------|
| X: | 19366465 | 10339248 | 23502.343 |
| Y: | 10339248 | 15540632 | 14276.982 |
| Z: | 23502.343 | 14276.982 | 28.8825 |

Inter-Variable Correlation

| | X | Y | Z |
|----|-------|-------|-------|
| X: | 1.000 | 0.596 | 0.994 |
| Y: | 0.596 | 1.000 | 0.674 |
| Z: | 0.994 | 0.674 | 1.000 |

Inter-Variable Rank Correlation

| | X | Y | Z |
|--|---|---|---|
|--|---|---|---|

X: 1.000 0.400 1.000
Y: 0.400 1.000 0.400
Z: 1.000 0.400 1.000

Principal Component Analysis

| | PC1 | PC2 | PC3 |
|---------|--------------------|--------------------|--------------------|
| X: | -0.639558720138 | -0.639558720138 | -0.00112140549459 |
| Y: | 0.768742025547 | 0.768742025547 | -0.000172610970223 |
| Z: | -0.000584511732231 | -0.000584511732231 | -0.000172610970223 |
| Lambda: | 27968293.5915 | 6938832.82318 | 0.062460567541 |

Planar Regression: $Z = AX + BY + C$

Fitted Parameters

| | A | B | C |
|------------------|-------------------|-------------------|----------------|
| Parameter Value: | 0.00112140621138 | 0.000172611083984 | -999.206251273 |
| Standard Error: | 7.07231613488e-05 | 7.89500678615e-05 | 145.450039232 |

Inter-Parameter Correlations

| | A | B | C |
|----|--------|--------|--------|
| A: | 1.000 | -0.596 | 0.397 |
| B: | -0.596 | 1.000 | -0.974 |
| C: | 0.397 | -0.974 | 1.000 |

ANOVA Table

| Source | df | Sum of Squares | Mean Square | F |
|-------------|----|----------------|----------------|---|
| Regression: | 2 | 86.4601180562 | 43.2300590281 | |
| Residual: | 1 | 0.187381943848 | 0.187381943848 | |
| Total: | 3 | 86.6475 | | |

Coefficient of Multiple Determination (R^2): 0.997837422386

Nearest Neighbor Statistics

| | Separation | Delta Z |
|-------------------------|------------------|----------------|
| 1%-tile: | 3085.16897318 | 0.2 |
| 5%-tile: | 3085.16897318 | 0.2 |
| 10%-tile: | 3085.16897318 | 0.2 |
| 25%-tile: | 3085.16897318 | 0.2 |
| 50%-tile: | 3085.16897318 | 0.2 |
| 75%-tile: | 6856.4062909 | 4.7 |
| 90%-tile: | 6856.4062909 | 4.7 |
| 95%-tile: | 6856.4062909 | 4.7 |
| 99%-tile: | 6856.4062909 | 4.7 |
| Minimum: | 3085.16897318 | 0.2 |
| Maximum: | 7036.36288506 | 8.2 |
| Mean: | 5015.77678058 | 3.325 |
| Median: | 4970.78763204 | 2.45 |
| Geometric Mean: | 4629.14379022 | 1.11427638206 |
| Harmonic Mean: | 4272.45173371 | 0.387044940999 |
| Root Mean Square: | 5374.87779075 | 4.72784306 |
| Trim Mean (10%): | N/A | N/A |
| Interquartile Mean: | 4342.24807908 | 1.7 |
| Midrange: | 5060.76592912 | 4.2 |
| Winsorized Mean: | 4970.78763204 | 2.45 |
| TriMean: | 4027.97830261 | 1.325 |
| Variance: | 4975059.40395 | 15.0625 |
| Standard Deviation: | 2230.48411874 | 3.88104367407 |
| Interquartile Range: | 3771.23731772 | 4.5 |
| Range: | 3951.19391188 | 8 |
| Mean Difference: | 2604.13650889 | 4.75 |
| Median Abs. Deviation: | 1885.61865886 | 2.25 |
| Average Abs. Deviation: | 1930.6078074 | 3.125 |
| Quartile Dispersion: | 0.379340015797 | 0.918367346939 |
| Relative Mean Diff.: | 0.519189075355 | 1.42857142857 |
| Standard Error: | 1115.24205937 | 1.94052183703 |
| Coef. of Variation: | 0.444693656898 | 1.16723118017 |
| Skewness: | 0.00211282462574 | 0.245568008509 |
| Kurtosis: | 0.564939018036 | 0.836475138169 |
| Sum: | 20063.1071223 | 13.3 |
| Sum Absolute: | 20063.1071223 | 13.3 |
| Sum Squares: | 115557245.062 | 89.41 |
| Mean Square: | 28889311.2655 | 22.3525 |

Complete Spatial Randomness

| | |
|------------------|-------------------|
| Lambda: | 4.36561575753e-08 |
| Clark and Evans: | 2.09599841783 |
| Skellam: | 31.6973208711 |

Gridding Rules

Gridding Method: Kriging
Kriging Type: Point

Polynomial Drift Order: 0
Kriging std. deviation grid: no

Semi-Variogram Model

Component Type: Linear
Anisotropy Angle: 0
Anisotropy Ratio: 1
Variogram Slope: 1

Search Parameters

No Search (use all data): true

Output Grid

Grid File Name: C:\Users\super\OneDrive\Documentos\TESIS\MODELACIONES
TESIS\junio 2003\UV-B junio 2003.grd
Grid Size: 86 rows x 100 columns
Total Nodes: 8600
Filled Nodes: 8600
NoData Nodes: 0
NoData Value: 1.70141E+38

Grid Geometry

X Minimum: 578990.4861
X Maximum: 589324.5174
X Spacing: 104.38415454545

Y Minimum: 2099597.904
Y Maximum: 2108464.252
Y Spacing: 104.30997647059

Univariate Grid Statistics

| | Z |
|-----------|---------------|
| Count: | 8600 |
| 1%-tile: | 13.2921840277 |
| 5%-tile: | 14.1959616275 |
| 10%-tile: | 14.8464292438 |
| 25%-tile: | 16.0541329915 |
| 50%-tile: | 18.1887541458 |
| 75%-tile: | 20.620111728 |
| 90%-tile: | 22.5152298912 |
| 95%-tile: | 23.5376746223 |
| 99%-tile: | 24.8348102027 |

| | |
|-------------------------|-----------------|
| Minimum: | 12.6000001079 |
| Maximum: | 25.4958115694 |
| Mean: | 18.4395569039 |
| Median: | 18.189253519 |
| Geometric Mean: | 18.2145683615 |
| Harmonic Mean: | 17.9928102833 |
| Root Mean Square: | 18.6653392998 |
| Trim Mean (10%): | 18.3780065777 |
| Interquartile Mean: | 18.234385584 |
| Midrange: | 19.0479058387 |
| Winsorized Mean: | 18.3999161311 |
| TriMean: | 18.2629382528 |
| Variance: | 8.37860662194 |
| Standard Deviation: | 2.89458228799 |
| Interquartile Range: | 4.56597873645 |
| Range: | 12.8958114615 |
| Mean Difference: | 3.31522692784 |
| Median Abs. Deviation: | 2.25669348439 |
| Average Abs. Deviation: | 2.44358592252 |
| Quartile Dispersion: | 0.12450096168 |
| Relative Mean Diff.: | 0.179788860715 |
| Standard Error: | 0.0312130835379 |
| Coef. of Variation: | 0.156976781117 |
| Skewness: | 0.28064755803 |
| Kurtosis: | 2.1945712605 |
| Sum: | 158580.189373 |
| Sum Absolute: | 158580.189373 |
| Sum Squares: | 2996196.06412 |
| Mean Square: | 348.394891177 |
