



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MÉXICO.**

**FACULTAD DE ECONOMÍA.**



**“ANÁLISIS DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE EN LOS  
MUNICIPIOS DE TOLUCA, METEPEC, SAN MATEO ATENCO  
Y ZINACANTEPEC A TRAVÉS DE LA METODOLOGÍA DE  
SIMULACIÓN BAJO EL MÉTODO DE MONTECARLO, 2000 -  
2020”**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
LICENCIADO EN ACTUARÍA.**

**PRESENTAN:**

**MARIO ARTURO BALLESTEROS VILLEGAS.**

**CARLOS ALBERTO ROTTER ZIMBRÓN.**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**DR. en A. OSWALDO GARCÍA SALGADO.**

**REVISORES:**

**M.A. VERÓNICA ÁNGELES MORALES**

**M. en E. FÉLIX HECTOR ALCÁNTARA CRUZ**

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	4
CAPÍTULO I. ....	10
1.1 Marco Teórico .....	10
1.2 Un acercamiento histórico algunos enfoques de la contaminación del aire. ....	12
1.3 Breve reseña sobre los estudios de la contaminación del aire y riesgos de salud. ....	16
1.4 Marco teórico referencial. ....	17
CAPÍTULO II. OBJETO DE ESTUDIO: Los municipios analizados bajo un enfoque poblacional y de morbilidad debido a contaminación aeróbica. ....	30
2.1 INTRODUCCIÓN.....	30
2.2 DINÁMICA POBLACIONAL .....	34
2.3 ENFERMEDADES.....	46
2.4 MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN ALGUNOS MUNICIPIOS DE ZMVT.....	52
CAPÍTULO III. ....	59
3.1 INTRODUCCIÓN.....	59
3.2 ANTECEDENTES.....	65
3.3 APLICACIONES.....	66
3.4 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO.....	74
CAPÍTULO IV. ....	81
4.1 INTRODUCCIÓN.....	81
4.2 VARIABLES.....	81
4.2.1 CRECIMIENTO POBLACIONAL.....	82
4.2.2 MANCHA URBANA.....	86
4.2.3 DENSIDAD POBLACIONAL.....	94
4.2.4 CONTAMINANTES.....	97
4.2.5 ENFERMEDADES QUE SE GENERAN CON LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL.....	104
4.3.1 MODELO LÓGICO.....	108
4.3.2 FUNCIONES DE DENSIDAD DE LAS VARIABLES.....	110
4.3.3 RELACIONES DE DEPENDENCIA ENTRE LAS VARIABLES.....	113
4.3.4 DESARROLLO DEL MODELO.....	123
4.3.4.1 APLICACIÓN SOBRE VARIABLES.....	123
4.3.4.2 APLICACIÓN DEL MODELO.....	129
RESULTADOS.....	131
CONCLUSIONES.....	142
Anexo I.....	148
Anexo II.....	157
Anexo III.....	159
Anexo IV.....	172
BIBLIOGRAFÍA.....	196

## INTRODUCCIÓN

Ubicada en la porción central del Estado de México, la zona metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) se extiende sobre una superficie de 1,208.55 km<sup>2</sup> en la que habitan 1'361,500 personas, que la sitúan como la segunda concentración poblacional en importancia de la entidad y la quinta a nivel nacional.

La evolución de la ZMVT es similar a la de otras ciudades del país, al pasar de una economía rural a una industrial y de servicios, aunada a un continuo proceso de urbanización con una demanda de servicios y satisfactores a costa de los recursos naturales, provocando como consecuencia diversos problemas ambientales, tales como: cambios de los usos del suelo que han reducido la frontera agrícola y forestal, invasión de áreas naturales protegidas, deforestación, procesos de erosión, incendios forestales, quemas de residuos a cielo abierto, así como las emisiones de contaminantes provenientes de industrias que carecen de sistemas de control y de vehículos automotores con condiciones mecánicas en mal estado, entre otros.

Para darse una idea de la complejidad de la metrópoli: una tercera parte de su territorio tiene uso urbano; en ella se asientan 4,291 unidades manufactureras; 26,525 comercios; 14,665 establecimientos de servicio y posee un parque vehicular mayor a 260 mil vehículos. Tanto las fuentes fijas como móviles satisfacen su demanda energética, además de la energía eléctrica, mediante el consumo de combustibles fósiles, lo cual implica la emisión de contaminantes y un impacto adverso en la calidad del aire.

Todo lo anterior se refleja en la intensidad con que los distintos sectores productivos contribuyen en las emisiones contaminantes, es así que en la ZMVT se estima la generación de 608,140 toneladas de contaminantes al año, de las cuales el 93% proviene del sector transporte, el 6% de los sectores industrial y comercial y el 1% de los suelos y su vegetación.

Por contaminante, los suelos con procesos de erosión y campos agrícolas aportan el 60% de partículas menores a 10 micras, o PM10, el sector industrial aporta 85% de las emisiones de dióxido de azufre, los vehículos automotores aportan 99% del monóxido de carbono, 81% de los óxidos de nitrógeno y 69% de los hidrocarburos.

Respecto a la problemática de la calidad del aire, las partículas PM10 se sitúan como el principal contaminante en importancia debido a sus frecuentes rebases a los límites establecidos en la norma de calidad de aire ambiente y su tendencia creciente de los valores de concentración registrados durante los últimos años. Es así que los valores máximos de concentración han llegado a ser más del doble de lo establecido en la norma para 24 horas.

Referente al ozono, un contaminante característico de zonas urbanas, el número de días al año que se ha rebasado la norma de calidad de aire ambiente llega a ser del 6%, registrando en el 2003 un valor máximo de 133 puntos IMECA. En ambos casos, la norma anual para PM10 y ozono se ha rebasado lo cual señala que la población de la ZMVT está expuesta a altos niveles de contaminantes durante largos periodos, lo que significa daños de tipo crónico en su salud.

- La contaminación atmosférica constituye un riesgo medioambiental para la salud y se estima que causa alrededor de dos millones de muertes prematuras al año en todo el mundo.
- Cuanto menor sea la contaminación atmosférica de una ciudad, mejor será la salud respiratoria (a corto y largo plazo) y cardiovascular de su población.
- Se calcula que la contaminación del aire de interiores causa aproximadamente 2 millones de muertes prematuras, la mayoría en los

países en desarrollo. Casi la mitad de esas muertes se deben a neumonías en menores de 5 años.

- Se calcula que la contaminación atmosférica urbana causa en todo el mundo 1.3 millones de muertes al año, que afectan de forma desproporcionada a quienes viven en países de ingresos medios.
- La exposición a los contaminantes atmosféricos está en gran medida fuera del control personal y requiere medidas de las autoridades públicas a nivel nacional, regional e internacional.
- Hallazgos fundamentales de las directrices sobre calidad del aire de 2005, elaboradas por la OMS en ese año proponen:
- Existen graves riesgos para la salud derivados de la exposición a las PM y al O<sub>3</sub> en numerosas ciudades de los países desarrollados y en desarrollo. Es posible establecer una relación cuantitativa entre los niveles de contaminación y resultados concretos relativos a la salud como el aumento de la mortalidad o la morbilidad. Este dato resulta útil para comprender las mejoras que cabría esperar en materia de salud si se reduce la contaminación del aire.
- Los contaminantes atmosféricos, incluso en concentraciones relativamente bajas, se han relacionado con una serie de efectos adversos para la salud.
- Puede lograrse una considerable reducción de la exposición a la contaminación atmosférica si disminuyen las concentraciones de varios de los contaminantes atmosféricos más comunes que se emiten durante la combustión de fósiles. Tales medidas reducirán también los gases de efecto invernadero y contribuirán a mitigar el calentamiento global.

Además de los valores recomendados, las directrices proponen, en cuanto a la contaminación atmosférica al aire libre, unas metas provisionales para cada contaminante con el fin de fomentar la reducción gradual de las concentraciones. Si se alcanzaran estas metas, cabría esperar una considerable reducción del riesgo de efectos agudos y crónicos sobre la salud. En todo caso, el último objetivo debe consistir en avanzar hacia los valores fijados en las directrices.

Es por ello que el objetivo principal de esta investigación es de conocer el comportamiento y evolución en el tiempo de los contaminantes del aire en la zona metropolitana del Valle de Toluca, y así pronosticar los siguientes años.

Dentro de los objetivos específicos está el de conocer los componentes de la contaminación del aire y sus efectos en la salud, además de la situación actual de ésta a nivel mundial, nacional, estatal junto a la normativa que la controla.

Y por último se pretendió describir a los componentes de la contaminación del aire de forma individual al principio y así construir un modelo para simular su comportamiento hasta el año 2020.

Por lo tanto en esta investigación se planteó las siguientes hipótesis:

- Existe una relación directa entre la calidad del aire y el crecimiento poblacional en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.
- El número de enfermedades cardiovasculares, de las vías respiratorias y afecciones al sistema nervioso va a aumentar debido a la mala calidad del aire en los municipios de Toluca, Metepec, San Mateo Atenco y Zinacantepec.

Para ello se realizó la siguiente metodología:

Se obtuvo la información proveniente de las estaciones de monitoreo atmosférico supervisadas por la Química Alejandra López Tinoco, Jefa del Departamento de Monitoreo Atmosférico, dependiente de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México.

Así mismo se extrajo información histórica de las variables población, enfermedades, mancha urbana, ya que son parte fundamental de la presente información.

A esta información obtenida se le aplican estadísticas descriptivas como lo son media, varianza y desviación estándar, todo con la finalidad de poder definir el tratamiento posterior que se debía dar a la información para poder aplicar la metodología de simulación Montecarlo.

Por último se aplica el modelo antes mencionado, relacionando las variables propuestas, con la finalidad de cumplir con los objetivos planteados y tener la información estadística para poder probar las hipótesis planteadas.

Por lo tanto, la presente investigación se compone de cuatro capítulos, siendo el primero de éstos el marco teórico y referencial, donde nos centramos en describir las investigaciones realizadas con anterioridad acerca de la contaminación aérea, dentro de México y en el contexto internacional.

El segundo capítulo se enfoca principalmente en el objeto de estudio, que en este caso en particular son los municipios de Toluca, Metepec, Zinacantepec, y San Mateo Atenco, que son municipios pertenecientes a la Zona Metropolitana del Valle de Toluca y en los cuales se encuentran presentes las centrales del monitoreo atmosférico.

El siguiente capítulo, en el cual se describe el método de simulación montecarlo, es el tercer capítulo de la investigación y se desarrolla y explica el funcionamiento, las limitaciones, ventajas y desventajas de haber elegido esta metodología para desarrollar el tema.

Por último, el cuarto capítulo es la aplicación del modelo propuesto, aplicar las herramientas obtener la información necesaria, obtención de resultados y explicación de los mismos, así como identificar el modelo final obtenido y contextualizar los datos obtenidos.



## **CAPÍTULO I.**

### **MARCO TEÓRICO Y REFERENCIAL.**

El objetivo de este capítulo es el de mencionar los conceptos básicos de la contaminación ambiental relacionados con el riesgo económico y financiero de las regiones. Para ello, se comienza con un marco teórico sobre conceptos de la contaminación ambiental; seguido de estudios previos que abordan la problemática surgida de la contaminación aérea en un contexto internacional.

Investigaciones realizadas en Estados Unidos, Emiratos Árabes por mencionar algunas, nos presentan diferentes contextos, culturas y herramientas con las que se puede realizar una investigación muy completa partiendo de modelos sencillos que relacionan diferentes variables para tratar de explicar el mismo fenómeno.

#### **1.1 Marco Teórico**

En cuanto a contaminación se refiere, lo que se ignora puede hacer daño. Esta conciencia ha motivado el interés por conocer más acerca de la contaminación y sus consecuencias, especialmente sobre los efectos adversos en la salud.

En general, a medida que el hombre ha avanzado en cuanto a tecnología, la contaminación atmosférica ha aumentado. Desde la primera vez que uso el fuego para generar calor y luz hasta los procesos industriales altamente avanzados de la actualidad, el hombre ha continuado participando en actividades que producen efectos indeseables en el ambiente y en la salud.

Lamentablemente, muchos de esos efectos nunca se sospecharon, e incluso cuando se presentaron observaciones al respecto, estas advertencias muchas veces fueron menospreciadas. Solo recientemente el hombre ha comenzado a comprender el grado y magnitud de los problemas provocados por la

contaminación. Y solo recientemente se ha usado la tecnología para resolver los problemas de contaminación que ésta ayudó a crear.

Para entender mejor a lo que se refiere cuando se habla de contaminación del aire, primero es necesario conocer ¿Qué es aire limpio? Para esto, Cantú (1992) define a la atmosfera como una mezcla de gases y partículas diminutas que rodea el planeta, compuesta por los elementos que se muestran en la Tabla 1.1.

**Tabla 1.1**

**Elementos que se consideran como aire limpio.**

Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	78.1%
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	21%
Argón (Ar)	0.9%
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	330 ppm
Neón (Ne)	18 ppm
Helio (He)	5 ppm
Metano (CH <sub>4</sub> )	1.5 ppm
Otros	Concentraciones < 1 ppm

**Fuente:** Cantú (1992).

Si se juntan todos esos componentes en las cantidades indicadas, se obtendrá una atmosfera no adulterada, idónea para respirar. Sin embargo, eso no es del todo cierto, ya que hay pocos lugares en el planeta tienen ese aire puro, saludable. Por lo general el aire contiene aditivos o contaminante, como se analizara este trabajo, y los riesgos que traen consigo a la salud.

## **1.2 Un acercamiento histórico algunos enfoques de la contaminación del aire.**

Aunque no existen pruebas contundentes, no es equivocado pensar que la primera vez que el hombre contaminó el aire fue cuando descubrió el fuego. Sin embargo, en esa época, la contribución del hombre a la contaminación del aire probablemente era menor que la provocada por fuentes naturales.

Como ejemplos de fuentes de contaminación natural están los rayos, que pueden causar incendios que contaminan al aire con partículas y gases diversos. Asimismo, los volcanes pueden enviar toneladas de contaminantes gaseosos y particulados a la atmósfera. Incluso un viento aparentemente inofensivo puede levantar partículas de las superficies de la tierra y el mar y transformarlas en contaminantes.

El siguiente avance que tuvo serias consecuencias para la contaminación del aire fue el establecimiento de numerosas comunidades permanentes. En el estudio de la contaminación del aire se observan dos consecuencias notables de la sedentarización del hombre: un impacto ambiental mayor y más notables, y el agotamiento del combustible para generar fuego.

En Europa, durante el siglo XII y XIII, la obtención de madera para el combustible se tornó tan difícil que fue necesario un combustible alternativo, y el carbón fue la solución. El oscuro humo denso que producía se consideró simplemente como una desventaja menor (Rico, 2001).

Más tarde, Europa de mediados del siglo XVIII, comenzó la Revolución Industrial y el movimiento científico se expandió rápidamente por todo el mundo. Las distintas industrias emergentes requerían energía, y energía en esa época significaba combustión de carbón. Además de la contaminación producida por esta causa, muchas industrias incluyeron procesos químicos que generaron sus propios contaminantes tóxicos. Ramos (2010).

Durante el siglo XIX y a principios del XX, el carbón fue la principal fuente de calor, energía y contaminación en el mundo. Sin embargo, empezó a tener competencia cuando en 1859 se inició, en Pensilvania, la perforación del primer pozo petrolero, de rápidos beneficios comerciales. La refinación de petróleo y la industria automovilística experimentaron un extraordinario crecimiento en el siglo XX, junto con sus diversas industrias derivadas, como el acero y la fabricación de caucho (Rico, 2001).

La Segunda Guerra Mundial y sus consecuencias aumentaron y aceleraron el impacto de la actividad humana en la atmosfera, prácticamente inadvertida. La proliferación de la industria petroquímica y el desarrollo de la industria nuclear abrieron el camino. Sin embargo, la industria del transporte, con sus quemados de combustibles fósiles, permanece hasta hoy como la causa principal de contaminación. Se estima que esta industria es responsable del 60% de toda la contaminación atmosférica (OMS).

Rico (2001) establece que la diferencia entre un episodio y un accidente de contaminación del aire es fundamental para entender el problema. Un episodio ocurre cuando los contaminantes propios del aire se combinan con otros factores como las anomalías meteorológicas y la topografía, para crear una atmosfera amenazante para la salud. A pesar de que el hombre es responsable del factor contaminación, la ocurrencia de los otros factores es incontrolable. En contraste, un accidente de contaminación del aire es una descarga evitable de sustancias químicas tóxicas, a menudo atribuible a fallas mecánicas o al error humano.

Durante el siglo XX, los cuatro episodios de contaminación del aire más famosos sucedieron en Meuse Valley, Bélgica; Donora, Pensilvania; Londres, Inglaterra; y Nueva York, Estados Unidos. Las cuatro tragedias coincidieron con una condición meteorológica conocida como inversión térmica. Normalmente, el aire caliente de la superficie terrestre asciende y el aire, más frío, de la parte superior de la atmosfera cae, con lo cual se crea una circulación natural que dispersa los contaminantes superficiales del aire. Una inversión ocurre cuando las capas de aire de la atmosfera inferior son más frías que las superiores. La

circulación natural sufre una interrupción y tanto el aire superficial acumulado como los contaminantes del aire se concentran alrededor de sus fuentes (Rico, 2001).

En la Tabla 1.2 se muestra cuatro eventos catastróficos de contaminantes casuales que llamaron la atención mundial en el siglo XX.

**Tabla 1.2 Eventos Catastróficos**

EPISODIO	AÑO	EXCESO DE MORTALIDAD	CONTAMINANTES CAUSALES
Meuse Valley	1930	Más de 60	SO <sub>2</sub> , fluoruros, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Donora	1948	20	SO <sub>2</sub> , material particulado
Londres	1952	Más de 4,000	SO <sub>2</sub> , material particulado, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Nueva York	1966	168	SO <sub>2</sub> , material particulado

**Fuente:** Rico (2001)

Una característica importante a resaltar, común a estos cuatro episodios, es que los presuntos agentes causales eran productos de desecho típicos de la vida en el siglo XX y supuestamente seguros. La quema generalizada de combustibles fósiles y la proliferación de procesos industriales producen dióxido de azufre, ácido sulfúrico, material particulado, fluoruros y otros contaminantes del aire.

Actualmente, la mayoría de las ciudades principales han implementado programas para predecir y detectar los niveles de contaminación y condiciones meteorológicas que podrían combinarse para ocasionar consecuencias trágicas. En esas ciudades se advierte habitualmente a los ciudadanos mediante alertas sobre la calidad del aire y acerca del peligro de condiciones adversas, y se les alienta a permanecer dentro de sus casas el mayor tiempo posible durante los periodos críticos (Cantú, 1992).

Uno de los primeros accidentes de contaminación del aire con causa definida y adecuadamente documentados sucedió en 1950 en Poza Rica, México.

El problema comenzó cuando una refinería de gas natural descargó inadvertidamente sulfuro de hidrógeno en el aire; simultáneamente una inversión térmica agravó el problema. Los resultados de este accidente fueron 22 muertes y más de 300 casos de enfermedades relacionadas, sobre todo irritación de las vías respiratorias y trastornos del sistema nervioso (Moreno, 2012).

El accidente registrado en Bhopal, India, en 1984, sea quizás el ejemplo más ilustrativo de cómo la descarga de una sustancia química tóxica puede perjudicar a gran parte de la población. Cuarenta toneladas de isocianato de metilo escaparon a través de una válvula rota y cubrieron una comunidad adyacente a una planta químico-industrial. Más de 8,000 muertes se atribuyeron a este caso y 150,000 personas quedaron permanentemente discapacitadas. (<http://www.rebellion.org/hemeroteca/ddhh/040120bhopal.htm>).

En 1986, la ciudad soviética de Chernóbil fue sinónimo de desastre industrial. A pesar de que no era el primer accidente que involucraba a una central nuclear, este fue, y aún sigue siendo, el peor de todos. La explosión fue la culminación de una serie de acontecimientos, atribuibles al mal funcionamiento mecánico y al error humano. Las consecuencias fueron muy graves. Murieron 30 trabajadores por exposición radiactiva en los primeros meses y otros 200 trabajadores y bomberos fueron hospitalizados con serios daños provocados por radiación ([http://www.tudiscovery.com/desastre\\_chernobyl/](http://www.tudiscovery.com/desastre_chernobyl/))

### **1.3 Breve reseña sobre los estudios de la contaminación del aire y riesgos de salud.**

Entre los primeros esfuerzos por relacionar los trastornos de salud con causas específicas están los estudios sobre enfermedades ocupacionales (Moreno, 2012). Los antiguos griegos y romanos notaron que los mineros y metalúrgicos contraían frecuentemente ciertas enfermedades, y esto se atribuyó a las emanaciones ácidas que respiraban y a los metales tóxicos que respiraban. En Europa, durante la edad media, proliferan estudios e informes concernientes a la salud ocupacional.

A mediados del siglo XVIII, la revolución industrial trajo nuevas industrias, nuevas ocupaciones y, por tanto, nuevas amenazas a la salud. Es en este periodo que se dieron las primeras descripciones de cáncer ocupacional, el cáncer al escroto que padecían los encargados de limpieza de chimeneas a finales del siglo. Aunque estas deducciones eran obvias y requerían poca o ninguna investigación, produjeron lo que se podría llamar “epidemiología temprana” (Moreno, 2012).

Otros adelantos de mediados y fines del siglo XIX ayudaron a definir y refinar los campos de la epidemiología y de la toxicología. La guerra civil estadounidense impulsó la búsqueda de anestésicos y desinfectantes seguros y eficaces. A fines del siglo, diversos estudios epidemiológicos condujeron al desarrollo y aceptación general de la teoría de los gérmenes como causantes de enfermedades.

La segunda guerra mundial provocó una variedad de estudios científicos y tecnológicos que estimularon aún más los campos de la toxicología y la epidemiología. Los estudios sobre radiactividad, un derivado de las detonaciones de armas nucleares, se diseñaron para identificar los efectos de la radiación en el sistema humano. Estos estuvieron entre los primeros intentos por comprender los efectos en la salud de la exposición a este nuevo y potente contaminante del aire (Moreno, 2012).

A fines de los años cuarenta, la espectrometría de masas se aplicó por primera vez al análisis de contaminantes gaseosos. A fines de los años cincuenta y principios de los sesenta, el analizador infrarrojo no dispersivo se popularizó para estudiar las emisiones de los automóviles. Por la misma época, se desarrolló la cromatografía de gases (CG) que, en su forma compleja actualmente vigente, se une a la espectrometría de masas (EM) a fin de proporcionar análisis químicos de algunas sustancias químicas en el rango de partes por millón (ppm).

Hoy en día, el análisis CG/EM constituye el criterio habitual para detectar la mayoría de contaminantes del aire; especialmente, los compuestos orgánicos y los metales traza o metales pesados (Moreno, 2012).

#### **1.4 Marco teórico referencial.**

Diversas investigaciones se han realizado en los últimos trece años enfocándose en la contaminación ambiental, considerando la contaminación del aire, del suelo y de los cuerpos de agua. Este tema de investigación no se limita a una zona geográfica específica, al contrario, es abordado desde diferentes lugares del mundo, tales como los Emiratos Árabes Unidos, la ciudad de Nueva York en Estados Unidos, etc. Todos con el objetivo de prevenir las consecuencias de la contaminación del aire, de estudiar la situación actual y tratar de predecir un escenario futuro y sus costos sociales y económicos.

Para el caso de la Ciudad de Nueva York, en el año 2008 se dio a conocer una investigación realizada desde el 24 de octubre del año 2001, año donde tuvo lugar el ataque terrorista en contra del World Trade Center (WTC) (Lederman et al. 2008). Aproximadamente 19 monitores fijos de aire fueron usados para muestrear el aire de la zona circundante al WTC, con diferentes monitores midiendo las emisiones de metales pesados, compuestos orgánicos, asbestos y partículas en el aire.



Estos investigadores, junto con otros más, han usado la percepción de las personas acerca de la contaminación del aire como una forma de caracterizar la distribución de la contaminación o exposición a los contaminantes.

La relación entre factores psicológicos y la percepción de la calidad del medio ambiente también ha sido estudiada, con el reconocimiento de que esta percepción puede ser influenciada por factores sociales y culturales como la raza, etnicidad, nivel de ingresos y la presencia de síntomas respiratorios (Lederman et al. 2008).

Lederman et al. (2008) usaron un sistema de siete pasos para la realización de esta investigación: enrolamiento, entrevistas, uso de datos geográficos, percepción de la contaminación del aire (PAP por sus siglas en Ingles), contaminación del aire modelada (MAP por sus siglas en ingles), implementación de métodos estadísticos y la presentación de resultados.

Siendo el análisis por regresión lineal el método estadístico usado tanto para PAP como para MAP, cuyas variables regresivas fueron las mujeres, divididas según tres grupos: residencial, laboral y un grupo de referencia; otra variable fue la distancia que tenían los objetos de estudio a la fuente emisora de contaminantes; y por último la calidad del aire, medida en una escala de cuatro grupos.

Este estudio fue un comparativo entre PAP y MAP, la primera es una simulación de las percepciones de las personas respecto de la calidad del aire, mientras que la segunda es un modelo matemático y estadístico en base al monitoreo de los contaminantes del aire en la zona.

Arrojando como resultados que en regresiones para el PAP se muestra que el paso del tiempo no está asociado con la percepción reportada y la correlación entre PAP y la distancia a la fuente de contaminantes resulto ser negativa débil. Mientras para MAP el paso del tiempo resulto una variable que durante la primera semana después del 11 de septiembre presento gran impacto en el área de

estudio y la correlación entre el MAP y la distancia a la fuente de contaminantes resulto ser negativa fuerte (Lederman et al. 2008).

Como conclusiones Lederman et al. (2008) demuestran que el PAP determinado a partir de una escala de cuatro puntos en la percepción se relaciona directamente con la distancia que existe a la fuente de contaminantes y más aún, esta relación es mayor mediante el uso del MAP. En contraste a pesar de esta relación existen también limitantes al hacer uso de una escala de sólo cuatro puntos, tales como que la percepción del polvo y olor pueden no capturar diferencias en concentración de contaminantes, también la percepción individual en la misma locación puede variar.

Además la variación en la calidad del aire puede no ser ponderada en la misma medida por diferentes personas. También se encontró contaminación del aire en áreas muy locales así que el modelo no considera estos casos relevantes por no estar directamente relacionados con el evento en el WTC (Lederman et al. 2008).

Por su parte Hassan (2009) intenta adaptar el método Monte Carlo para cuantificar la administración del riesgo en la contaminación ambiental. Con el objetivo de desarrollar un esquema Monte Carlo para la evaluación de la contaminación.

Los principios para modelar el riesgo son muy simples, el tomador de decisiones desarrolla un modelo o modelos que representan las relaciones cuantitativas entre diferentes acciones y sus consecuencias. Esta evaluación cuantitativa del riesgo puede en general basarse en un modelo determinístico o uno estocástico (Law y Kelton, 1991).

La diferencia entre estos dos se basa en dos factores: riesgos a conocer e incertidumbre. En un modelo determinístico la incertidumbre se ignora, mientras que en el estocástico se toma en cuenta (Pfeiffer, 1997).

La simulación bajo el método de Monte Carlo en particular es una útil herramienta para la simulación de los modelos de evaluación del riesgo y se aplica con frecuencia. Otras posibilidades son los métodos fuzzy (Ferson, 1996) y las redes bayesianas (Barker et al. 2000).

Hassan (2009) plantea una serie de pasos para poder realizar su investigación: desarrollo de un modelo conceptual, desarrollo de un modelo determinístico, desarrollo de un modelo estocástico, verificación del modelo, validación del modelo y por último la credibilidad.

El análisis de los datos se realizó usando la hoja de cálculo Microsoft Excel y el software estadístico Risk, donde se usaron como variables el flujo de agua, porcentaje de agua fresca en el lago y los contaminantes remanentes en el lago, además de proponerse las distribuciones de probabilidad normal y binomial (Hassan, 2009).

Como resultado de esta investigación, Hassan (2009) pudo determinar que en el mes de mayo del primer año simulado se encontraría la mayor concentración de contaminantes, mientras que el resto del tiempo los niveles de contaminación permanecerían por debajo de la norma.

Hassan (2009) concluye, que aplicar el método Monte Carlo para evaluar la contaminación del medio ambiente es muy factible y sirve al propósito de controlar la contaminación en el corto y largo plazo. Además sugiere que el paso importante en todo proceso de análisis de riesgo es la evaluación del riesgo, donde uno identifica peligros, desarrolla perfiles de riesgo, establece prioridades y destina recursos; comisiona evaluaciones del riesgo y evalúa sus resultados.

En su artículo titulado: "*Power estimation using simulations for air pollution time-series studies*", Winquist et al. (2012) examinaron el impacto de distintos factores afectando la energía usando simulaciones, en comparación con estimaciones de energía obtenidas de simulaciones usando software estadístico.

Estimación de la energía para evaluar las asociaciones de interés puede ser un reto para los estudios de series de tiempo de los efectos agudos de la contaminación del aire, debido a que hay dos dimensiones o tamaño de la muestra (largo de la serie de tiempo y cuenta de resultados al día), y debido a que estos estudios suelen utilizar modelos lineales generalizados para controlar los complejos patrones de covariación entre los contaminantes y el tiempo de evolución, la meteorología y posiblemente otros contaminantes (Winqvist et al. 2012).

Winqvist et al. (2012) proponen que en un estudio dado, el poder de un análisis en particular es la probabilidad de identificar una asociación estadísticamente significativa cuando una asociación no aleatoria realmente existe. Dada una probabilidad de error, el poder de este análisis depende de varios factores incluido el diseño del estudio, distribución de resultados, tipo de modelo analítico, tamaño de muestra, distribución de la exposición y covarianza entre exposición y sus covariables.

A menudo se encuentra un alto grado de covariación entre contaminantes, y entre contaminantes y otras variables del modelo, que típicamente disminuye el efecto de la precisión en el cálculo y disminuye también el poder de identificar los efectos del aire contaminado (Winqvist et al. 2012).

El método usado por estos autores es un algoritmo Poisson multivariado, usando como variables las visitas a centros médicos en zona de urgencias, la propia serie de tiempo al aumentar o disminuir la cantidad de datos, relación de riesgo y los contaminantes; los cálculos fueron realizados usando el software G\*Power y PASS.

Como parte de sus resultados Winqvist et al. (2012) describen que aumentando la longitud de la serie de tiempo y el promedio de cuenta de los resultados diarios se logra incrementar el poder del análisis en un nivel similar. Caso contrario el poder del análisis disminuye. Resulta además que se observa

una reducción del poder del análisis al hacer uso de modelos con múltiples contaminantes.

Este análisis demuestra el impacto similar que tiene aumentar tanto la longitud de la serie de tiempo y el número de resultados diario, algo que no se había reportado en estudios previos (Winquist et al. 2012).

En el año 2011, Chang et al. redactan su trabajo titulado: “*Time series analysis of personal exposure to ambient air pollution and mortality using an exposure simulator*”, este artículo describe un marco de modelización para estimar los efectos agudos de la exposición personal a la contaminación ambiental en un diseño de series de tiempo. En primer lugar, un modelo jerárquico espacial se utiliza para relacionar concentraciones ambientales diarias y exposiciones simuladas para un subconjunto del período de estudio, la serie de exposiciones completa es capturada después para la estimación del riesgo.

Se aplica el enfoque propuesto para el análisis de las partículas finas de  $<2,5 \mu\text{m}$  de diámetro aerodinámico ( $\text{PM}_{2.5}$ ) y la mortalidad diaria en la zona metropolitana de la ciudad de Nueva York durante el período de exposición 2001-2005. Las exposiciones personales a  $\text{PM}_{2.5}$  fueron simuladas usando el modelo estocástico de exposición humana (Chang et al. 2011)

Hallazgos empíricos provenientes de estudios de panel han aportado considerable conocimiento sobre cómo las diferentes fuentes de contaminación contribuyen dependiendo de las exposiciones personales. Estos resultados junto con información de patrones de actividad humana diaria han llevado a desarrollar diferentes simuladores de exposición personal (Chang et al. 2011).

Los modelos usados para el tratamiento de la información fueron el modelo de exposición probabilístico NAAQS, modelo de exposición a contaminantes del aire y la simulación estocástica para exposición humana; cuyas variables fueron siempre la concentración de partículas y la mortalidad diaria reportada. Además de estos modelos usados, las corridas o simulaciones fueron realizadas en el software libre R en su versión 2.8.0 con subrutinas escritas en lenguaje C.

Chang et al. (2011) encuentran como resultados que tanto las concentraciones como las exposiciones son mayores durante los meses de verano. Aunque intuitivamente las personas pasan más tiempo dentro de sus hogares en el invierno, este periodo no es el que corresponde ni a la menor concentración de contaminantes, ni a la menor exposición personal.

Bajo el enfoque de simulación de exposición personal, se estima que un incremento de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en la exposición a  $\text{PM}_{2.5}$  se asocia con un incremento del 2.32% en la tasa de mortalidad diaria. Para corresponder con este resultado se establece una probabilidad de que este incremento se dé de un 1.13% (Chang et al. 2011).

El simulador estadístico propuesto para el nivel promedio de exposición de la población representa un enfoque híbrido que combina ideas tanto de un modelo completamente estadístico como de uno estocástico. Específicamente los simuladores de exposición estocásticos pueden incorporar efectivamente conocimientos avanzados en varios aspectos de la percepción sobre la exposición personal. Después los simuladores estadísticos proveen una forma computacional eficiente para estimar la exposición de una gran población basado en el algoritmo estocástico (Chang et al. 2011).

Chang et al. (2011) determinan que el tiempo en este estudio para realizar simulaciones para 50,000 individuos en un periodo de 30 días es aproximadamente entre 5 y 6 horas, usando una computadora personal con sistema operativo Windows.

Por otra parte del mundo, Gibson et al. (2012) en su artículo llamado *“Deaths and Medical Visits Attributable to Environmental Pollution in the United Arab Emirates”* contribuyen también al desarrollo de investigaciones sobre los efectos en la salud por la contaminación del aire.

Este estudio trata de estimar los beneficios potenciales de salud alcanzables en los Emiratos Árabes Unidos (EAU) con un mejor control sobre la contaminación del medio ambiente. El gobierno de los EAU encargó este trabajo

como parte de un proyecto de planificación estratégica de la salud ambiental destinada a hacer frente a este cambio en la naturaleza de la carga de enfermedades del país.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) en el año 2007, publicó las estimaciones para la carga de morbilidad ambiental para las naciones de todo el mundo. Estas estimaciones incluían riesgos en cuatro categorías de contaminación ambiental: particulares en el aire exterior, quemaduras de combustibles sólidos a puertas cerradas, partículas en ambientes laborales y patógenos en cuerpos de agua (Gibson et al. 2012).

Para implementar la simulación bajo el método Monte Carlo, Gibson et al. (2012) emplearon el software llamado "Analytica", considerando como sus variables principales las partículas en aire externo, partículas en aire a puertas cerradas, agua para beber, agua de las costas, partículas en ambientes de trabajo y los cambios reportados en el clima.

Para cada ruta de exposición se integró información aportada por los monitores ambientales de los EAU e información aportada por el sistema de salud pública en un modelo de simulación Monte Carlo para poder estimar la carga de morbilidad anual atribuible a cada uno de los contaminantes.

Además de los resultados de la investigación, una de las aportaciones más importantes hechas por estos autores a los EAU, es la construcción de un modelo de simulación por computadora llamado "modelo de carga de morbilidad para los Emiratos Árabes Unidos" (Gibson et al. 2012). Este modelo está diseñado para soportar en su simulación un análisis comparativo entre diferentes políticas públicas para reducir los riesgos por contaminación en el aire.

Ahora bien dentro de los resultados de la investigación citada se encontró que la contaminación por partículas en aire al exterior es la principal aportación a la mortalidad de la zona con 651 muertes atribuibles de todas las muertes registradas. La contaminación por partículas a puertas cerradas y en el ambiente

de trabajo fueron la segunda y tercera respectivamente con 153 y 46 muertes atribuibles (Gibson et al. 2012)

Concluyen en su investigación que en base a comparaciones mundiales, la carga de morbilidad ambiental para los EAU es bajo para todos los factores investigados, excepto para la contaminación por partículas al aire libre. Desde un punto de vista de salud pública, reducir las emisiones de contaminantes al aire debe de ser la principal prioridad para las agencias ambientales de los EAU.

Los procesos atmosféricos pueden ser descritos usando ecuaciones para reacciones de advención y difusión, es lo que nos dicen Schlegel (2012) en su artículo titulado “Implementation of multirate time integration methods for air pollution modelling”.

El termino advención describe el fenómeno de transporte a través del aire, mientras la difusión describe una mezcla turbulenta a una escala menor a la celular. Ambos términos pueden ser resueltos usando los métodos explícitos conocidos como Runge-Kutta (RK).

En la mayoría de los modelos atmosféricos actuales los operadores de división simples son los más comunes, mientras que el uso de los métodos de multi frecuencia es muy raro. En Schlegel et al. (2012) se presenta una aproximación general de un divisor que puede ser usado para la construcción de un esquema de multi frecuencia llamado “Divisor Multi frecuencia de Flujo Recursivo” y esta expresado por la siguiente ecuación:

$$w' = F(w) + G(w) \quad (1.1)$$

En el contexto de esta investigación se define a G como el término que describe la advención, mientras F será el término que defina la difusión. Para el desarrollo de los cálculos basados en este modelo se emplea un código escrito en lenguaje Fortran 90/95 que usa librerías adicionales de la programación en lenguaje C.



El anterior modelo se aplicó en dos escenarios diferentes, uno académico con características controladas, y el otro con datos reales. En ambos escenarios se obtuvieron muy buenos resultados, por ejemplo, una característica importante de programas paralelos es el aumento de velocidad a la hora de resolver el problema en varios procesadores. Para el escenario discutido en este caso el académico, observamos que no es un aumento de velocidad ideal (lineal), pero el tamaño es lo suficientemente pequeño como para justificar la ejecución en paralelo (Schlegel et al. 2012).

Schlegel et al. (2012) explica que los resultados para el escenario con datos reales son muy alentadores, ya que se presentó una disminución en el costo computacional para llevar a cabo las simulaciones. Aproximadamente en promedio la reducción del tiempo computacional requerido es de un 29%.

Sin embargo, para el caso con datos reales surge un defecto en la aceleración de la paralelización: mientras que el problema escala bien hasta un máximo de ocho procesadores, empleando dieciséis procesadores arroja muy poca mejoría.

Por ultimo concluyen los autores que han podido presentar a detalle una eficiente implementación desde una perspectiva general de división. Esta perspectiva es empleada al obtener una división multi frecuencia, i.e., advención para diferentes dominios físicos se resuelve mediante diferentes pasos de tiempo explícitos dependiendo del tamaño de la rejilla, mientras que las ecuaciones de difusión se resuelven implícitamente (Schlegel et al. 2012).

Como se ha podido ver una herramienta usualmente adoptada para el estudio de la exposición a partículas contaminantes y a la concentración de estas partículas son las series de tiempo. Brauer et al. (2002) expone la aplicación de esta herramienta en su obra "Exposure misclassification and threshold concentrations in time series analyses of air pollution health effects".

Numerosos estudios por series de tiempo indican que los niveles actuales de contaminación en el aire se pueden asociar con resultados adversos en la

salud de las personas, entre ellos y unos de los más preocupantes, la mortandad. En casi todos los casos, los estudios indican una relación lineal entre la contaminación del aire y el incremento en el riesgo de muerte, sin un aparente límite (Brauer et al. 2002).

Estimar la exposición individual a los contaminantes del aire a través de monitores ubicados en el exterior puede ser un grave error. La precisión de estos monitores como indicadores de la exposición personal es uno de los componentes considerados en la medición del error en estudios epidemiológicos.

La habilidad de identificar un límite en esta relación lineal entre contaminación y riesgo es crítico en evaluaciones económicas y al momento de imponer medidas de salud. En caso de no poder establecer un límite se puede atribuir, en parte, al hecho de que existe una distribución de las exposiciones individuales dentro de una población (Brauer et al. 2002).

La metodología empleada por estos autores en su artículo consiste primero en la estimación de la relación existente entre la exposición personal y las concentraciones en el ambiente de dos partículas en especial:  $PM_{2.5}$  y Sulfato  $SO_4^{2-}$ , seguida por la simulación de la relación entre la exposición personal y el riesgo, considerado en esta investigación como la probabilidad de muerte.

Más precisamente de los 7 días en que se hace un seguimiento monitoreado de la exposición personal del sujeto  $i$  para cada uno de los 16 sujetos se ajusta una relación lineal entre la concentración de los contaminantes en el ambiente ( $A$ ) y la exposición personal ( $E$ ) para todos los días  $j$ , basados en un modelo regresivo simple:

$$E_{ij} = \alpha_i + \beta_i A_j + \varepsilon_{ij} \quad (1.2)$$

donde  $\varepsilon_{ij}$  es el error asociado (Brauer et al. 2002).

Brauer et al. (2002) modelan además, la relación entre la probabilidad de muerte del  $i$ -ésimo individuo ( $P_i$ ) y la exposición personal ( $E_i$ ) como una relación

determinística de la forma  $P_i = t * (E_i)$  donde  $t^*(.)$  es una función lineal del límite buscado. También se estima la probabilidad de muerte de la población en general para cada ambiente de concentración (A), como un promedio de las probabilidades individuales simuladas en ese ambiente de concentración para un total de 10,000 habitantes:

$$\hat{P}(A) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{P}_i(A) \quad (1.3)$$

Los autores entonces concluyen que, la identificación de los niveles del límite es importante para las normas reglamentarias, evaluaciones de riesgo y valoraciones económicas, que a menudo se incorporan en los análisis de costo-beneficio. Específicamente, para exposiciones ambientales tales como la contaminación del aire, que tienden a ser episódicas, las concentraciones tienden a ser bajas para la mayoría de las veces. Al realizar valoraciones económicas o evaluaciones de riesgo, hay que tomar una decisión en cuanto a si la relación exposición-respuesta dada se aplica a niveles bajos, o si se establece algún límite en el que se supone que no se producen efectos (Brauer et al. 2002).

Como un dato importante, se estima que el 60% de la población mundial vivirá en zonas urbanas para el año 2030. Una de las consecuencias indeseadas del incremento en la actividad económica que acompaña al proceso de urbanización, en particular del incremento en el uso de vehículos, consumo de combustibles, generación de energía y la producción industrial es, el deterioro en la calidad del aire (Goswami y Baruah, 2013).

Partículas respirables suspendidas en el aire son un problemas de salud mayor, ya que penetran en lo profundo del sistema respiratorio de las personas y causa muchos desordenes. Es sabido que un incremento en la concentración de estas partículas se asocia con problemas cardiacos.

Uno de los dos componentes críticos dentro del modelaje dinámico de la contaminación del aire, es el modelaje de las fuentes emisoras de los

contaminantes; el segundo de los componentes es la prescripción de los campos meteorológicos dinámicos.

El modelamiento en la contaminación del aire ha visto significantes mejoras en los años recientes; sin embargo el uso de los modelos dinámicos, y en particular de los modelos a menor escala para modelar la contaminación está aun en sus etapas iniciales.

Goswami y Baruah (2013) en su trabajo solo no consideraron dentro del estudio los efectos químicos que aquejan a las especies. Además se explora la posibilidad de combinar la información meteorológica diaria en conjunto con los modelos naturales de fuentes emisoras, al simular las concentraciones de los contaminantes usando los campos de pronóstico del modelo general de circulación atmosférica. Las variables a considerar dentro de este modelo son: partículas suspendidas (PS), partículas suspendidas respirables (PSR), dióxido de sulfuro ( $\text{SO}_2$ ) y dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) en sus valores diarios, pero al momento de ser evaluado se promedian estos datos para obtener cifras mensuales.

Uno de sus principales resultados consiste en establecer que mientras un incremento en los contaminantes del aire es generalmente favorecedor a la formación de nubes y a la posterior precipitación, cambios en los patrones del viento (advención) y las tasas de precipitación pueden afectar significativamente la concentración de contaminantes, lo que promueve la creación de un ciclo de retroalimentación (Goswami y Baruah, 2013).

Es aquí que se termina este capítulo, donde se ha pretendido describir algunos de los principales estudios sobre la contaminación ambiental, en específico los contaminantes del aire; estudios que han realizado hasta la fecha y que se han escrito en diversas revistas de investigación científica.

A partir de este momento se hará mención de terminología específica en materia de contaminación ambiental anteriormente descrita.

## **CAPÍTULO II. OBJETO DE ESTUDIO:**

### **Los municipios analizados bajo un enfoque poblacional y de morbilidad debido a contaminación aeróbica.**

El objetivo de este estudio es analizar los principales municipios del Valle de Toluca, en específico los Municipios de Metepec, San Mateo Atenco, Toluca y Zinacantepec; municipios que han tenido desde casi por dos décadas monitoreo de la calidad del aire, y que servirán como objeto de estudio en esta investigación; analizándolos desde perspectivas económicas y su desarrollo en la evolución de contaminación.

#### **2.1 INTRODUCCIÓN.**

Actualmente, derivado de las ventajas comparativas, los mercados, la concentración de actividades económicas especializadas, sobre todo industriales y de servicios, el modelo de concentración urbana se hace cada vez más evidente a nivel mundial ayudando a consolidar la economía de las grandes ciudades y dando paso, también, a la conformación de nuevas y complejas figuras de coordinación entre administraciones, concediendo las zonas metropolitanas y, otras de mayor orden, las zonas megalopolitanas (GEM, 2005).

Esta concentración de población en espacios relativamente pequeños, si bien es cierto que atraen inversiones, avances tecnológicos, acumulación de riqueza, etc., genera de igual forma una inequidad, contaminación ambiental, inseguridad, fallas en la economía y dificultad para su administración.

Las Zonas Metropolitanas (ZM) son hoy una realidad del hombre moderno y, sin embargo, por su gran complejidad, poco se ha avanzado en la comprensión de su funcionamiento y, menos aún, en la forma de contrarrestar sus externalidades (GEM, 2005). Los esfuerzos por definir y delimitarlas han sido

variados y abordados desde diferentes perspectivas incorporando tanto aspectos cuantitativos como cualitativos.

El concepto de zona metropolitana fue desarrollado en Estados Unidos a partir de 1920. En México este proceso inicio en la década de los cuarenta, y hasta ahora se ha mostrado como el elemento de mayor jerarquía en el sistema urbano, siendo el espacio físico donde se genera la mayor parte del producto interno bruto (PIB) del país (SEDESOL et al., 2005).

Los criterios para delimitar las zonas metropolitanas han sido cambiantes y dependientes de las regiones, temporalidad y la información oficial disponible, entre otros; por ejemplo, en el modelo estadounidense de los años cincuenta prevaleció el criterio del número de habitantes en la delimitación de zonas metropolitanas, definiéndola como uno o más municipios contiguos con por lo menos una ciudad de 50 mil habitantes, considerando también a los municipios con integración económica y social con la ciudad central (Rodríguez, 2004).

Para el caso específico de México (SEDESOL et al., 2005), se define como zona metropolitana al conjunto de dos o más municipios donde se localiza una ciudad de 50 mil o más habitantes, cuya área urbana, funciones y actividades rebasan el límite del municipio que originalmente la contenía, incorporando como parte de sí misma o de su área de influencia directa a municipios vecinos, predominantemente urbanos, con los que mantienen un alto grado de integración socioeconómica; en esta definición se incluyen además a aquellos municipios que por sus características particulares son relevantes para la planeación y política urbanas.

Para 2003-2004, en México se crea un grupo interinstitucional conformado por SEDESOL, CONAPO e INEGI, identificando 55 zonas metropolitanas a nivel nacional, entre las que, por el volumen de población, destacan las del Valle de México, Guadalajara, Monterrey, Puebla-Tlaxcala y Toluca dentro de las primeras cinco más pobladas del año 2000. Un año más tarde, empleando los mismos criterios y los datos del II Censo de Población y Vivienda 2005, identificaron 56

zonas metropolitanas dentro del territorio nacional sumándose Tijuana, León, Juárez y la Laguna para alcanzar nueve metrópolis con más de un millón de habitantes (GEM, 2005).

En SEDESOL et al., (2005) se establece que la utilidad de delimitar estas zonas metropolitanas responde básicamente a tres objetivos:

1. Establecer un marco referencial común que contribuya a fortalecer y mejorar las acciones de los tres órdenes de gobierno en la planeación y gestión del desarrollo metropolitano.
2. Contar con una base conceptual y metodológica, que dé cuenta de forma exhaustiva y sistemática de la configuración territorial de las zonas metropolitanas y proporcione criterios claros para su actualización.
3. Disponer de una definición común que permita la generación de información estadística y geográfica, así como de estudios y proyectos de investigación relevantes para la toma de decisiones en diferentes ámbitos del desarrollo.

De acuerdo con la gaceta del gobierno No. 99 del 19 de noviembre de 2009, decreto 13 por el que la H. LVII Legislatura del Estado de México aprobó la declaratoria de Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), la ZMVT se encuentra delimitada por 22 municipios: Almoloya de Juárez, Almoloya del Río, Atizapán, Calimaya, Capulhuac, Chapultepec, Lerma, Metepec, Mexicalzingo, Ocoyoacac, Otzolotepec, San Antonio La Isla, San Mateo Atenco, Rayón, Temoaya, Tenango del Valle, Texcalyacac, Tianguistenco, Toluca, Xalatlaco, Xonacatlán y Zinacantepec (GEM, 2009).

En el contexto internacional, en 1985 se crea la Asociación Mundial de las Grandes Metrópolis (Metrópolis), cuya misión es favorecer la cooperación internacional y los intercambios de conocimientos y experiencias entre sus miembros: gobiernos locales y metropolitanos.

**Tabla 2.1.**

**Aglomeraciones urbanas seleccionadas, de acuerdo a su población, ranking en la posición mundial y su tasa de crecimiento, incluyendo el Valle de Toluca.**

AGLOMERACION URBANA	PAIS	Población (millones)		POSICION MUNDIAL (RANKING)		TASA DE CRECIMIENTO ANUAL PROMEDIO 2005-2010
		1975	2009	1975	2009	
Tokio	Japón	26.6	36.5	1	1	0.6
Delhi	India	4.4	21.7	22	2	2.6
Sao Paulo	Brasil	9.6	20	5	3	1.7
Mumbai	India	7.1	19.7	14	4	1.9
Ciudad de México	México	10.7	19.3	3	5	0.8
Nueva York-Newark	Estados Unidos	15.9	19.3	2	6	0.7
Shanghái	China	5.6	16.3	17	7	1.8
Calcuta	India	7.9	15.3	9	8	1.7
Dhaka	Bangladesh	2.2	14.3	63	9	3.1
Buenos Aires	Argentina	8.7	13	7	10	0.8
Karachi	Pakistán	4	12.8	25	11	2.4
Los Ángeles-Long Beach-Santa Ana	Estados Unidos	8.9	12.7	6	12	0.7
Beijing	China	4.8	12.2	19	13	1.6
Rio de Janeiro	Brasil	7.6	11.8	11	14	1
Manila	Filipinas	5	11.4	18	15	1.6
Toluca	México	0.3	1.6	378	253	1.1

**FUENTE:** Elaboración propia con datos de *Urban Agglomerations*, 2009.

Algunas de las metrópolis han presentado un rápido crecimiento demográfico en los últimos 35 años, sobre todo aquellas en economías que están o han motivado un crecimiento urbano; sin embargo, Tokio, Nueva York-Newark y Ciudad de México se han mantenido dentro de los primeros seis lugares debido a su volumen de población y de acuerdo con la clasificación y delimitación de estas zonas por parte de la organización “Metrópolis”.

Por su parte el conglomerado de la Ciudad de Toluca, ha escalado 125 posiciones en el mismo periodo para ubicarse en el lugar 253 del ranking mundial, demostrando la importancia de la alta dinámica demográfica de la zona, no solo a nivel mundial, sino en la configuración del sistema de ciudades en México, pues



de los 103 millones de habitantes en el país, 57 millones fueron metropolitanos; es decir, 56 de cada 100 mexicanos habitaron alguna zona metropolitana en 2005.

De las 56 zonas metropolitanas conformadas en el territorio nacional en 2005, dos de ellas se componen por municipios del Estado de México, las metrópolis de los valles de México y Toluca concentraron juntas 37.28% y 36.06% del total de habitantes metropolitanos a nivel nacional en el año 2000 y 2005, respectivamente (GEM, 2005).

En los años ochenta, la ZMVT encabezada por el corredor Toluca-Lerma, inicio su consolidación como metrópoli económicamente semi diversificada, desarrollando un amplio sector secundario; para la siguiente década paso a una segunda etapa, consolidando su sector terciario y alcanzando tasas de crecimiento semejantes en los dos sectores, distinguiéndose de las otras regiones del valle y del país donde no existió ese balance. Este efecto se extendió a los municipios de la periferia aumentando la influencia de la ZMVT (GEM, 2005).

## **2.2 DINÁMICA POBLACIONAL**

En 60 años, el volumen de población de los municipios que actualmente componen la ZMVT se sextuplico al pasar de 356 mil habitantes en 1950 a un estimado de 2 millones de habitantes en 2010. A pesar de que la zona metropolitana del valle Cuautitlán-Texcoco (ZMVC-T) es la que concentra la mayor proporción de población, y que en los últimos 10 años ha aumentado en un millón de habitantes su población, la ZMVT ha representado el mayor dinamismo demográfico en las últimas décadas y ha aumentado 440 mil habitantes en los últimos 10 años. Esto es, casi lo doble de la proporción del aumento de la población en el Distrito Federal en el periodo de referencia (GEM, 2005).

Al interior de las ZM, el comportamiento de la dinámica demográfica es diferido, tanto en distribución poblacional como en su dinámica demográfica. Por ejemplo, la ZMVT tiene como lugar central al municipio de Toluca, mismo que adquiere importancia no solo como centro económico y político, sino por el número

de habitantes, concentrando el 37.7% de la población total de la ZMVT. A manera de comparación, esta población es similar a la suma de los siguientes seis municipios más poblados de la zona: Metepec, Zinacantepec, Almoloya de Juárez, Lerma, Temoaya y Oztolotepec, juntos suman 38.3% de la población total de la zona (GEM, 2005).

Mientras la dinámica demográfica se ocupa de aspectos diacrónicos (que se desarrollan a lo largo del tiempo) de las poblaciones, la estructura de la población lo hace de aspectos sincrónicos (simultáneos). Siendo entonces, la estructura de la población, la que se estudia a través de su clasificación en una serie de categorías interconectadas entre sí, desagregadas en un conjunto de características, a los activos de una población, es decir, cómo se encuentra constituida una población.

Así, resaltan dos características básicas de las poblaciones humanas: la composición por sexo y composición o distribución por edad; ambas representadas a través de la pirámide de población. Estas dos características arrojan datos relevantes de los activos de una población y son de gran utilidad en la toma racional de decisiones, sobre todo, dentro del proceso de las políticas de población y de las políticas públicas, ya que son un indicador indirecto de las necesidades y retos a enfrentar a mediano y largo plazo. Pero también son muestra de las decisiones de décadas pasadas, ya que el cambio en la estructura de una población es paulatino y sólo se aprecia a través de varias décadas de haber iniciado un proceso de cambio (COESPO, 2012).

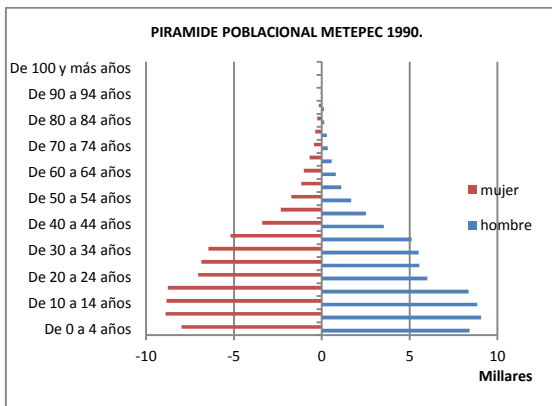
En este sentido, la estructura de la población de la ZMVT ha tenido un cambio marcado a partir de años sesentas, donde la mayoría de los activos se encontraba en la base de la pirámide, es decir, una población muy joven, principalmente por dos aspectos: la alta fecundidad-natalidad y la alta mortalidad, tanto global como infantil-materna característica de esos años. Por su parte, la población en edad adulta se encontraba casi a la par en cantidad y porcentaje que la población infantil, existiendo una carga económica superior ante la población económicamente activa ocupada de la época. Así también la población adulta

mayor no era extensa en número, pues la esperanza de vida de la población era menor.

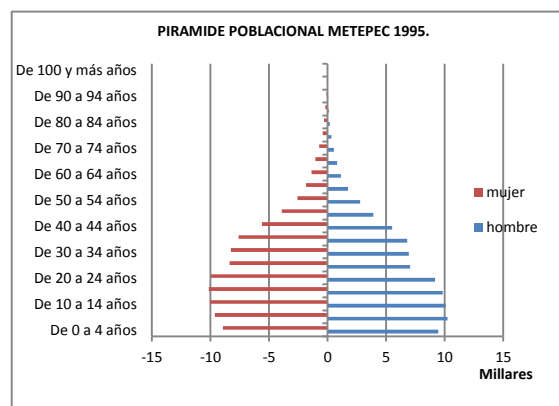
Esta pirámide es conocida como pirámide progresiva: caracterizada por tener un gran contingente de población joven en su base, misma que va desapareciendo a medida que avanza a otros grupos, quedando muy pocos efectivos en la cumbre. Se explica principalmente por mantener altas tasas de natalidad, una corta esperanza de vida debido a la alta mortalidad de su población, por lo que representan mayor dinamismo poblacional (COESPO, 2012).

**Figura 2.1**

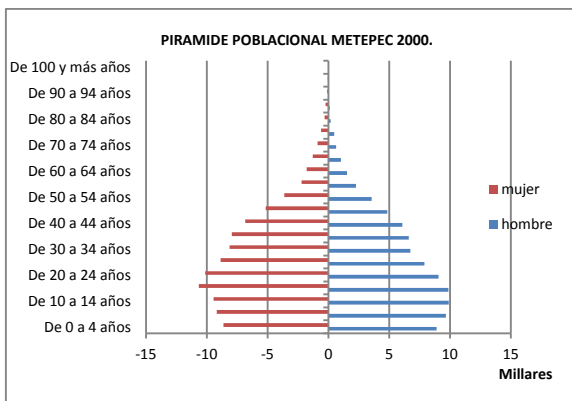
**EVOLUCION DE LA PIRAMIDE POBLACIONAL MUNICIPIO METEPEC**



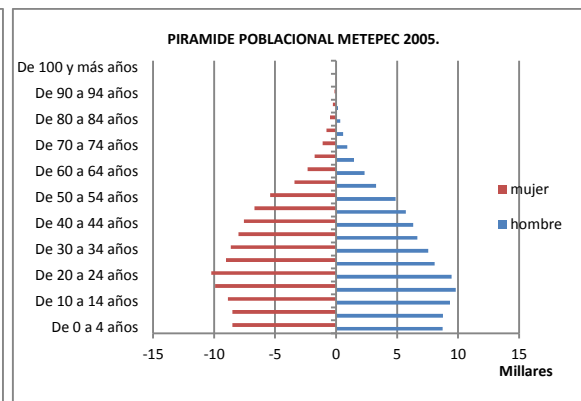
(a)



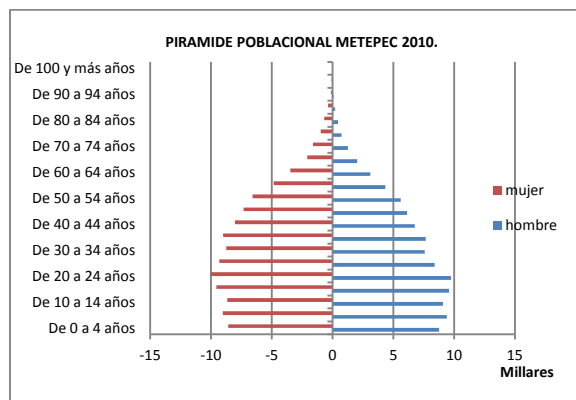
(b)



(c)



(d)



(e)

Fuente: (a) Elaboración propia con datos de INEGI. XI Censo general de población y vivienda 1990. (b) Elaboración propia con datos de INEGI. I Conteo de población y vivienda 1995. (c) Elaboración propia con datos de INEGI. XII Censo general de población y vivienda 2000. (d) Elaboración propia con datos de INEGI. II Conteo de población y vivienda 2005. (e) Elaboración propia con datos de INEGI. Censo de población y vivienda 2010.

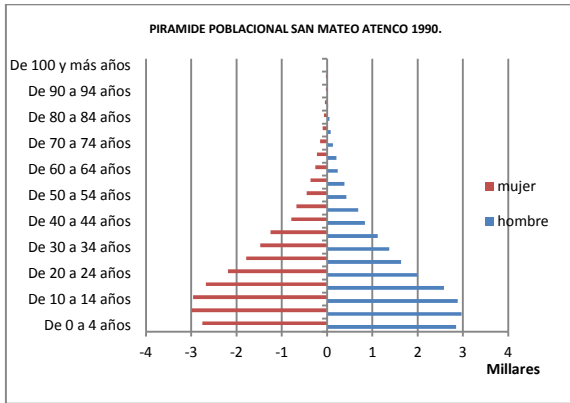
El estudio de la evolución de la población del municipio de Metepec inicia en el año 1990 (a), donde se puede observar una pirámide poblacional progresiva caracterizada por una base poblacional joven, que va disminuyendo conforme se aumenta la edad. Cinco años más tarde (b) se puede observar que la base de la pirámide se prolonga un grupo de edad más llegando hasta la población de 20 a 24 años de edad.

Para el año 2000 (c) y 2005 (d) se observa un cambio notorio pues se pasa de una pirámide progresiva a una pirámide en periodo de transición, se le conoce así ya que la base de la pirámide sufre una disminución en volumen poblacional, fenómeno explicado por una disminución en la tasa de natalidad.

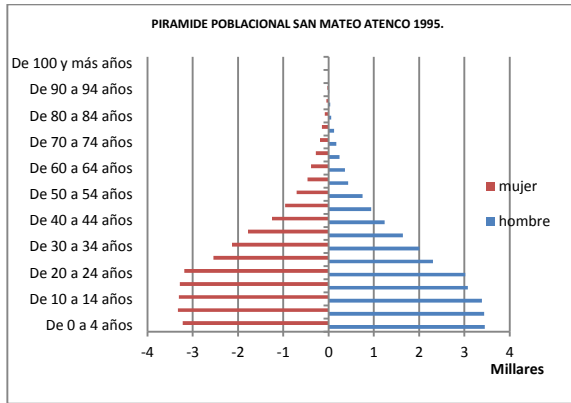
Por ultimo al año 2010 (e) se observa más notorio el fenómeno de transición ya que no existe diferencia considerable desde la base de la pirámide hasta el grupo de edad de 40 a 44 años de edad llegando a lo que también se conoce como pirámide estacionaria.

Figura 2.2

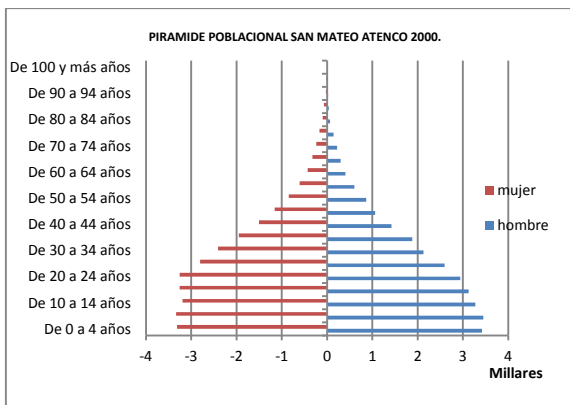
EVOLUCION DE LA PIRAMIDE POBLACIONAL MUNICIPIO SAN MATEO ATENCO



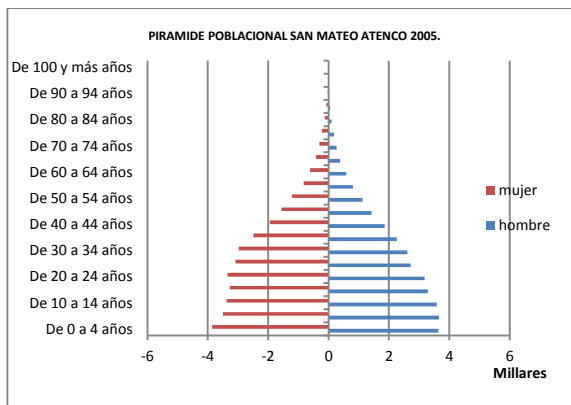
(a)



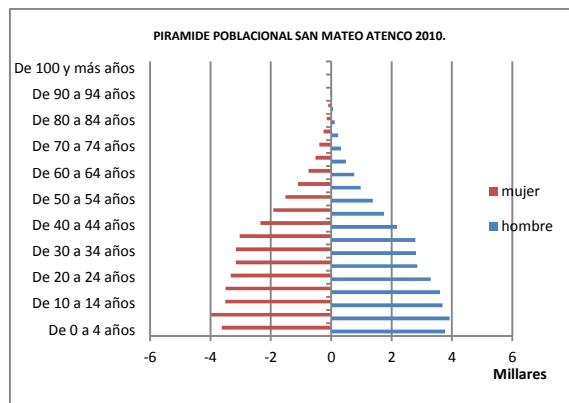
(b)



(c)



(d)



(e)

Fuente: (a) Elaboración propia con datos de INEGI. XI Censo general de población y vivienda 1990. (b) Elaboración propia con datos de INEGI. I Conteo de población y vivienda 1995. (c) Elaboración propia con datos de INEGI. XII Censo general de población y vivienda 2000. (d) Elaboración propia con datos de INEGI. II Conteo de población y vivienda 2005. (e) Elaboración propia con datos de INEGI. Censo de población y vivienda 2010.

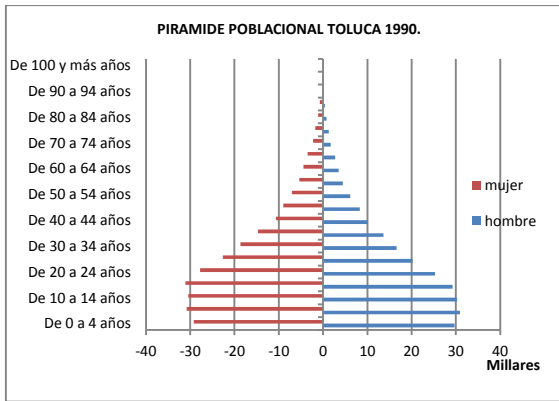
El caso del municipio de San Mateo Atenco presenta cambios en la composición de la población con mayor aceleración ya que en al año 1990 (a) se ve una pirámide progresiva, pero en tan solo 5 años (b) se pasa a una en fase de transición, tendencia que se mantiene hasta el 2000 (c).

Los siguientes 10 años no hay más cambios en la tendencia, tan solo se avanza hasta llegar a una pirámide estacionaria con su ultimo escalón en el grupo de edad de 40 a 44 años, caso similar al municipio de Metepec.

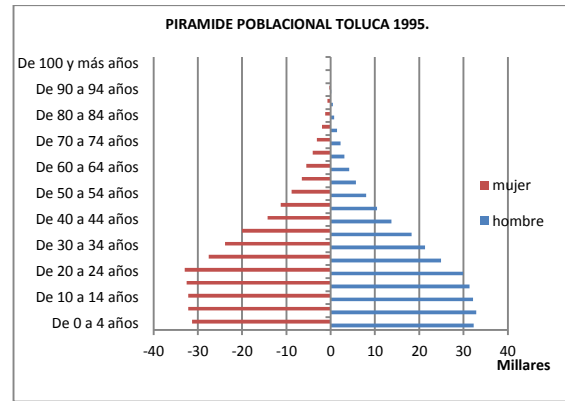
El año 2010 (e) presenta una alteración en el cuerpo de la pirámide, este eso, a partir del grupo de 20 años y hasta los 39 años se note una disminución de la población tanto para hombres como para mujeres; este evento pudiera ser explicado por un fenómeno migratorio de familias completas, ya sea dentro o fuera del país.

**Figura 2.3.**

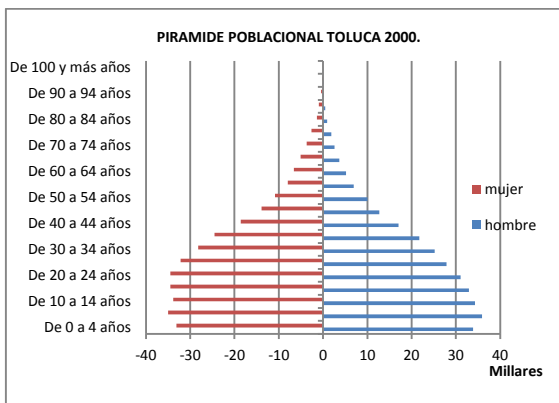
**Evolución de la pirámide poblacional municipio Toluca**



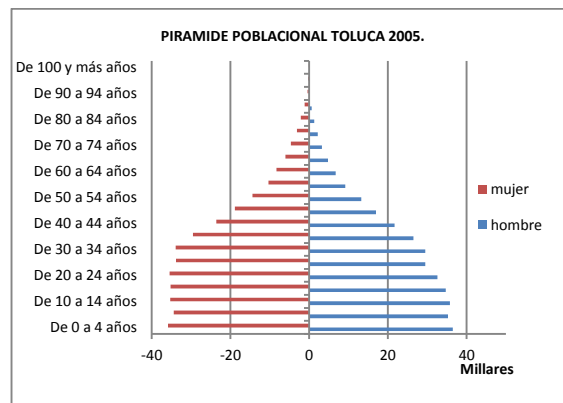
(a)



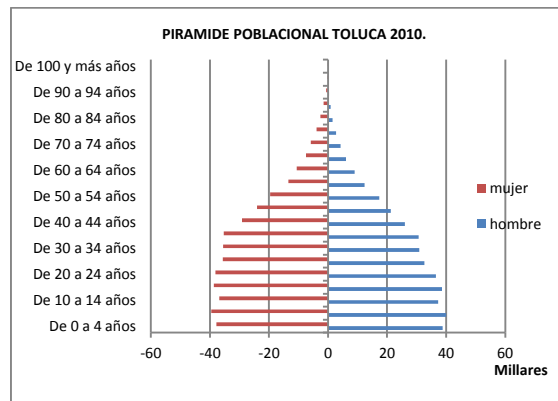
(b)



(c)



(d)



(e)

Fuente: (a) Elaboración propia con datos de INEGI. XI Censo general de población y vivienda 1990. (b) Elaboración propia con datos de INEGI. I Conteo de población y vivienda 1995. (c) Elaboración propia con datos de INEGI. XII Censo general de población y vivienda 2000. (d) Elaboración propia con datos de INEGI. II Conteo de población y vivienda 2005. (e) Elaboración propia con datos de INEGI. Censo de población y vivienda 2010.

Al ser la capital del Estado de México, el municipio de Toluca se ha desarrollado con mayor velocidad que el resto de los municipios, este desarrollo se ve reflejado tanto en la evolución de la mancha urbana como en su población misma.

Es así que se puede apreciar que al año 1990 (a) la pirámide ya presenta indicios de estar en fase de transición, a diferencia de los otros dos municipios estudiados que en ese mismo año su población trazaba una pirámide progresiva.

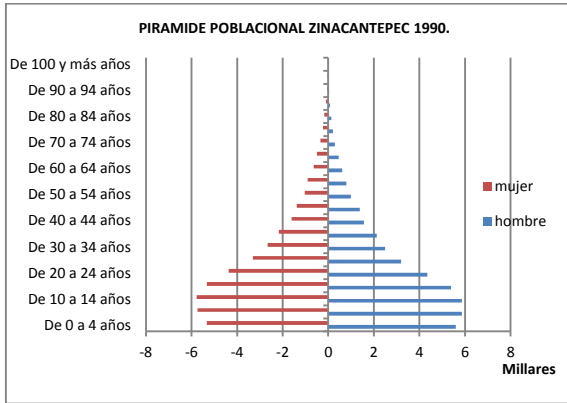
Para el año 1995 (b) se llega al grupo de edad entre 20 y 24 años con un similar volumen poblacional desde la base de la pirámide. Los años 2000 (c) y 2005 (d) no son diferentes e incluso se agregan varios grupos quinquenales al grueso de la población.

Por último al año 2010 (e) se llega al grupo de edad entre 40 y 44 años para ambos sexos, algunos autores llaman a este tipo de pirámide estacionaria moderna.

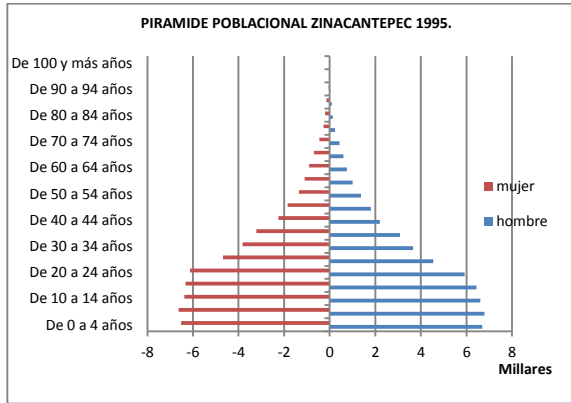


**Figura 2.4**

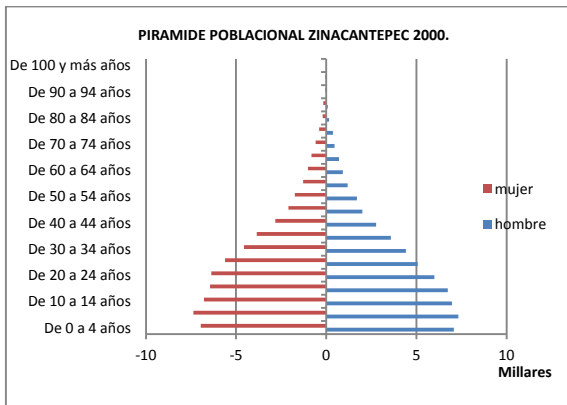
**Evolución de la pirámide poblacional municipio Zinacantepec**



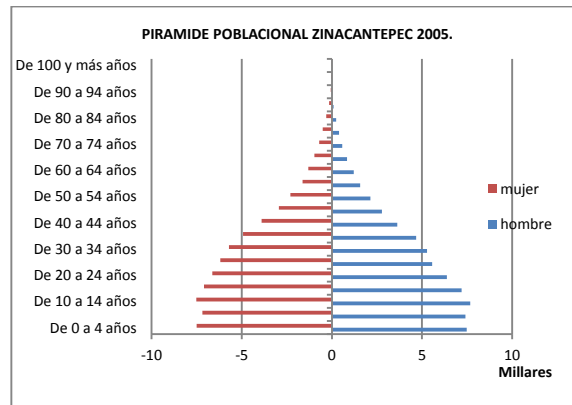
(a)



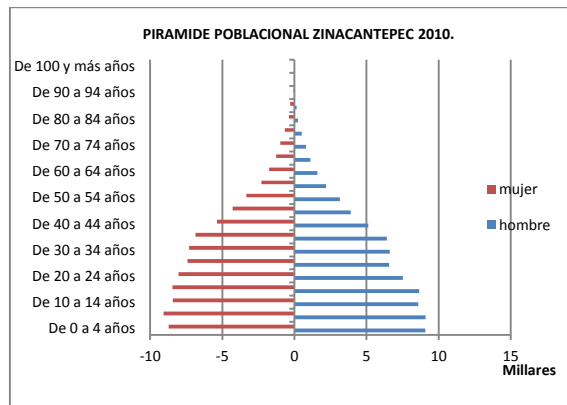
(b)



(c)



(d)



(e)

Fuente: (a) Elaboración propia con datos de INEGI. XI Censo general de población y vivienda 1990. (b) Elaboración propia con datos de INEGI. I Conteo de población y vivienda 1995. (c) Elaboración propia con datos de INEGI. XII Censo general de población y vivienda 2000. (d) Elaboración propia con datos de INEGI. II Conteo de población y vivienda 2005. (e) Elaboración propia con datos de INEGI. Censo de población y vivienda 2010.

Similar al caso anterior de Toluca, Zinacantepec ya se encontraba en fase de transición para el año 1990 (a), año en el que el grupo que concentraba el mayor volumen poblacional era el de 10 a 14 años para ambos sexos.

Un cambio evidente sucede hasta el año 2000 (b), 10 años después sucede algo que vale la pena mencionar, el grupo que concentra la mayor concentración de población es nuevamente de 10 a 14 años.

Para el año 2010 (e) sucede el mismo fenómeno comentado anteriormente, el mismo grupo quinquenal concentra el mayor volumen de la población. Por último me es necesario destacar, a mi punto de vista, se observa en esta última gráfica poblacional lo que a mi opinión definiría como un ciclo, esto es, se observa que de 0 a 24 años las barras que representan el número de habitantes en el grupo quinquenal se alternan, la primera barra o base de la pirámide es de menor cuantía que la siguiente mientras que la tercera es menor a la anterior y a la siguiente.

Para el 2010, la estructura de la población se ha modificado a tal grado que la mayoría de la población se encuentra en edades entre 15 y 59 años, dicho grupo ha constituido la mayor fuerza laboral jamás vista, denominada también "Bono Demográfico". Este volumen decrecerá a medida que la estructura de la población expulsa a estos activos hacia edades mayores, lo que sin duda tendrá un efecto en la economía y servicios públicos en años venideros, toda vez que de haber tenido una dependencia mayoritariamente infantil en 1960, se revertirá a una dependencia mayoritariamente senil en el largo plazo.

Simplemente, el volumen del grupo de edad de 60 años y más se componía por 28 mil personas, y representaba 6.74% de la población de la zona; para el 2010 esta cifra ha aumentado 5.2 veces, alcanzando los 148 mil adultos mayores;

es decir, 6.92% de la población total de la zona. La reducción de los activos en quinquenio de edad corta, la desaceleración y reducción de la fecundidad, el aumento de la esperanza de vida, entre otros aspectos, hacen inminente la concentración de la mayoría de la población en edades adultas, mismas que a la postre redundara en el aumento de los adultos mayores en la ZMVT.

Según CONAPO (1998), la transición demográfica se divide, por lo general, en cuatro etapas:

1. Primera etapa: se caracteriza por niveles de fecundidad y mortalidad elevados. El crecimiento natural es muy bajo.
2. Segunda etapa: presenta un descenso de la mortalidad debido a las mejoras y avances de la medicina. La esperanza de vida comienza a aumentar. La fecundidad continua siendo elevada. La diferencia entre ambas tasas (fecundidad y mortalidad) determina un alto crecimiento natural.
3. Tercera etapa: se observa una disminución de la fecundidad y de la mortalidad. El crecimiento natural es moderado y la esperanza de vida al nacer sigue aumentando.
4. Cuarta etapa: considerada el fin de la transición demográfica. Las tasas de mortalidad y fecundidad son bajas. La esperanza de vida al nacer es de más de 65 años. El crecimiento natural es moderado y estacionario.

A continuación se presentan en la Tabla 2.2 los datos correspondientes a la población total y la tasa de crecimiento poblacional intercensal para cada uno de los municipios del estudio: Metepec, San Mateo Atenco, Toluca y Zinacantepec. Además del análisis de regresión con el fin de poder proyectar la población de los años 2015 y 2020, para cada municipio.

**Tabla 2.2**

**Población total y la tasa de crecimiento poblacional intercensal para cada uno de los municipios del estudio: Metepec, San Mateo Atenco, Toluca y Zinacantepec.**

METEPEC					
AÑO	1990	1995	2000	2005	2010
POBLACION TOTAL METEPEC	139,577	177,737	185,551	196,050	209,976
TASA DE CRECIMIENTO INTERCENSAL		1.273	1.044	1.057	1.071

FUENTE: Elaboración propia con base en datos de INEGI

SAN MATEO ATENCO					
AÑO	1990	1995	2000	2005	2010
POBLACIÓN TOTAL SAN MATEO ATENCO	41,724	54,043	56,986	65,042	71,465
TASA DE CRECIMIENTO INTERCENSAL		1.295	1.054	1.141	1.099

FUENTE: Elaboración propia con base en datos de INEGI

TOLUCA					
AÑO	1990	1995	2000	2005	2010
POBLACION TOTAL TOLUCA	486,980	563,927	632,925	707,122	804,317
TASA DE CRECIMIENTO INTERCENSAL		1.158	1.122	1.117	1.137

FUENTE: Elaboración propia con base en datos de INEGI

ZINACANTEPEC					
AÑO	1990	1995	2000	2005	2010
POBLACION TOTAL ZINACANTEPEC	83,139	105,416	116,817	132,726	166,348
TASA DE CRECIMIENTO INTERCENSAL		1.268	1.108	1.136	1.253

FUENTE: Elaboración propia con base en datos de INEGI

En México, como en todo el mundo, la distribución de habitantes es desigual: existen regiones donde se concentra mucha gente y otras en las que la población es poca; las ciudades están más densamente pobladas que las comunidades rurales.

La relación entre un espacio determinado y el número de personas que lo habitan se llama densidad de población, la cual se obtiene dividiendo el número de personas que viven en un lugar específico entre el número de kilómetros cuadrados que mide ese territorio. En este estudio en específico se tomó la densidad de población en la mancha urbana de los municipios de interés, esto es, el número de personas que viven los municipios entre el área de la mancha urbana.

### **2.3 ENFERMEDADES**

La contaminación, tanto en espacios interiores como al aire libre, constituye un grave problema de salud medioambiental que afecta a los países desarrollados y en desarrollo por igual. Las directrices sobre calidad del aire elaboradas por la OMS en 2005 están concebidas para ofrecer una orientación mundial a la hora de reducir las repercusiones sanitarias de la contaminación del aire. Las primeras directrices, publicadas en 1987 (WHO, 1987) y actualizadas en 1997 (WHO, 2000), se enfocaban al ámbito europeo. Las nuevas (2005), sin embargo, son aplicables a todo el mundo y se basan en una evaluación de pruebas científicas actuales llevada a cabo por expertos. En ellas se recomiendan nuevos límites de concentración de algunos contaminantes en el aire — partículas en suspensión (PM), ozono (O<sub>3</sub>), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) — de aplicación en todas las regiones de la Organización Mundial de la Salud.

Además de los valores recomendados, las Directrices proponen, en cuanto a la contaminación atmosférica al aire libre, unas metas provisionales para cada contaminante con el fin de fomentar la reducción gradual de las concentraciones. Si se alcanzaran estas metas, cabría esperar una considerable reducción del

riesgo de efectos agudos y crónicos sobre la salud. En todo caso, el objetivo último debe consistir en avanzar hacia los valores fijados en las Directrices.

## **1. Partículas en suspensión**

Valores fijados en las directrices

### **PM2.5**

10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  promedio anual

25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  promedio en 24h

### **PM10**

20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  promedio anual

50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  promedio en 24h

Los efectos de las PM sobre la salud se producen a los niveles de exposición a los que está sometida actualmente la mayoría de la población urbana y rural de los países desarrollados y en desarrollo. La exposición crónica a las partículas aumenta el riesgo de enfermedades cardiovasculares y respiratorias, así como de cáncer de pulmón. En los países en desarrollo, la exposición a los contaminantes derivados de la combustión de combustibles sólidos en fuegos abiertos y cocinas tradicionales en espacios cerrados aumenta el riesgo de infección aguda en las vías respiratorias inferiores y la mortalidad por esta causa en los niños pequeños; la polución atmosférica en espacios interiores procedente de combustibles sólidos constituye también un importante factor de riesgo de enfermedad pulmonar obstructiva crónica y cáncer de pulmón entre los adultos.

## **2. Ozono (O<sub>3</sub>)**

Valores fijados en las directrices

**O<sub>3</sub>**

100 µg/m<sup>3</sup> promedio en 8h

El exceso de ozono en el aire puede producir efectos adversos de consideración en la salud humana. Puede causar problemas respiratorios, provocar asma, reducir la función pulmonar y originar enfermedades pulmonares.

## **3. Dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>)**

Valores fijados en las directrices

**NO<sub>2</sub>**

40 µg/m<sup>3</sup> promedio anual

200 µg/m<sup>3</sup> promedio en 1h

Estudios epidemiológicos han revelado que los síntomas de bronquitis en niños asmáticos aumentan en relación con la exposición prolongada. La disminución del desarrollo de la función pulmonar también se asocia con las concentraciones de NO<sub>2</sub> registradas (u observadas) actualmente en ciudades europeas y norteamericanas.

#### **4. Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)**

Valores fijados en las Directrices

##### **SO<sub>2</sub>**

20 µg/m<sup>3</sup> promedio en 24h

500 µg/m<sup>3</sup> promedio en 10 min

El dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) puede afectar al sistema respiratorio y las funciones pulmonares, y causa irritación ocular. La inflamación del sistema respiratorio provoca tos, secreción mucosa y agravamiento del asma y la bronquitis crónica; así mismo, aumenta la propensión de las personas a contraer infecciones del sistema respiratorio. Los ingresos hospitalarios por cardiopatías y la mortalidad aumentan en los días en que los niveles de SO<sub>2</sub> son más elevados. En combinación con el agua, el SO<sub>2</sub> se convierte en ácido sulfúrico, que es el principal componente de la lluvia ácida que causa la deforestación.

A lo largo de este apartado, se ha podido confirmar que la presencia de agentes contaminantes en el aire tiene repercusiones en la salud de las personas expuestas a estos. Enfermedades tales como asma, bronquitis, cáncer de pulmón, cardiopatías e infecciones en el sistema nervioso son solo algunos ejemplos de las consecuencias de la contaminación del aire.

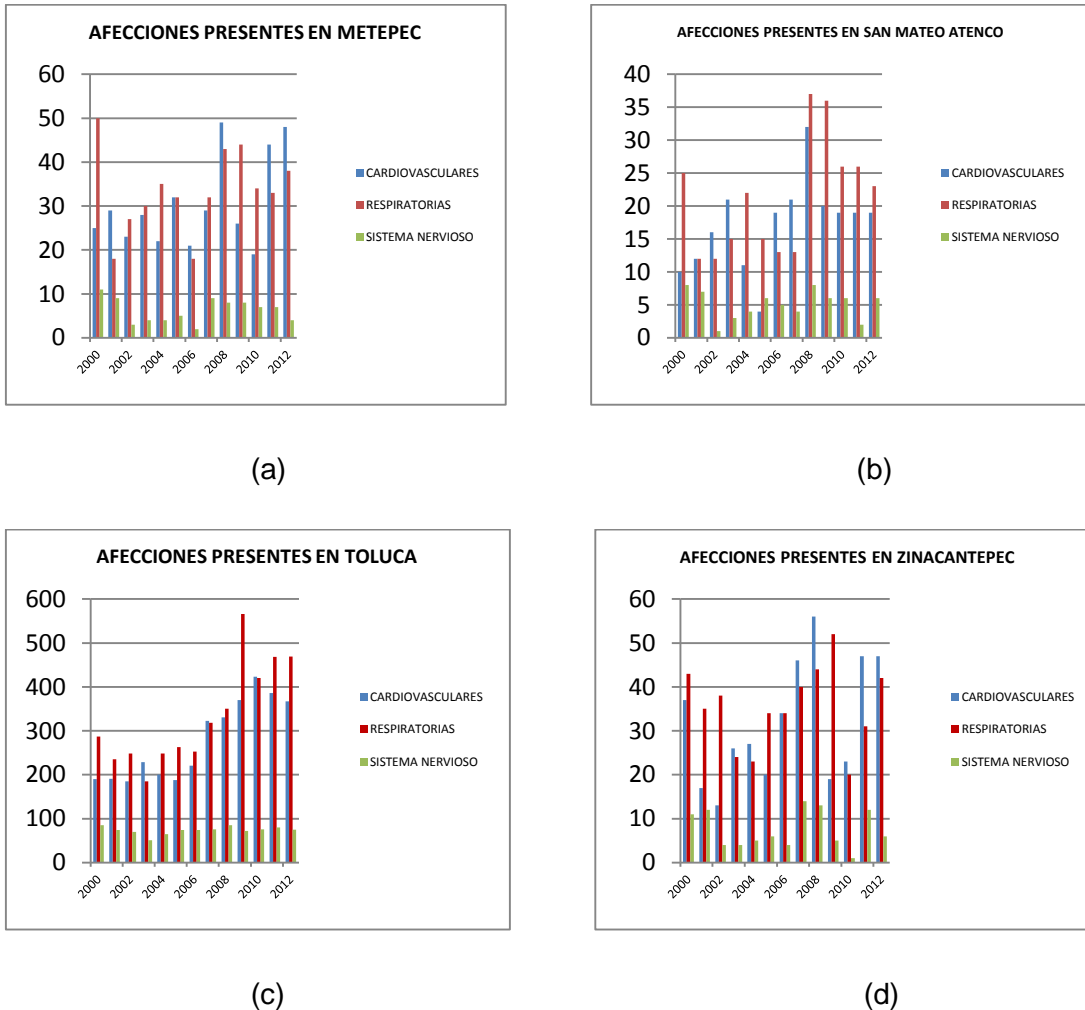
En este sentido podemos clasificar las enfermedades provocadas por la contaminación atmosférica en tres grandes grupos:

1. Afecciones respiratorias
2. Afecciones cardiovasculares
3. Afecciones al sistema nervioso



Figura 2.5

Evolución de la morbilidad en los municipios de Metepec, San Mateo Atenco, Toluca y Zinacantepec.



FUENTE: Elaboración propia con base en datos de SINAIS.

Es importante en esta investigación conocer la evolución de las enfermedades (morbilidad) que aquejan a la población de los municipios de interés. A través de la página web del SINAIS se tuvo acceso a 12 bases de datos diferentes, una para cada año desde el 2000 hasta 2012 cuya información se pudo resumir en la figura 2.5, llegando a las siguientes conclusiones:

- Para el municipio de Metepec (a), las afecciones al sistema nervioso a lo largo de los 12 años no superan los 10 casos, aunque presentan un

aumento a partir del año 2006; las enfermedades cardiovasculares presentan una tendencia creciente al pasar de casi 30 en el año 2007 a casi 50 para 2012; por último las afecciones del sistema respiratorio tienen mayor presencia a lo largo del periodo y también se podría decir que tendencia creciente.

- Para el municipio de San Mateo Atenco (b), a partir del año 2003 las afecciones al sistema nervioso presentan un comportamiento estable, oscilando entre 5 y 10 casos al año; fuera del máximo valor observado (33) correspondiente al año 2008, las enfermedades cardiovasculares presentan un comportamiento estable; por último las afecciones del sistema respiratorio presentan un cambio notorio en el año 2008 ya que antes de este se presenta un comportamiento estable y después decrece hasta el 2012.
- El municipio de Toluca (c) es un caso especial, ya que presenta 10 veces más casos que los demás municipios, esto es simplemente explicado por el número de pobladores; en este sentido las afecciones al sistema nervioso tienen el comportamiento más estable en este municipio y no superan los 100 casos al año; las enfermedades cardiovasculares se comportan de forma creciente hasta el año 2010 y decaen para los dos últimos años del periodo; por último las afecciones respiratorias crecen a lo largo del periodo, sobresale el año 2009 con alrededor de 550 casos.
- Por último el municipio de Zinacantepec (d) en el que las afecciones del sistema nervioso tienen importante presencia ya que en 5 años diferentes se presentaron más de 10 casos; las enfermedades cardiovasculares por su parte son muy volátiles al igual que las afecciones al sistema respiratorio.

## **2.4 MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN ALGUNOS MUNICIPIOS DE ZMVT.**

Las actividades de monitoreo atmosférico en la ciudad de Toluca inician en el año de 1975, mediante una red manual para partículas suspendidas totales (PST). En 1987 con ayuda de la Facultad de Química de la UAEM, se incorporan las mediciones de óxidos de nitrógeno y bióxido de azufre por vía húmeda en 3 de las 5 estaciones que se tenían establecidas.

En 1992, el Gobierno del Estado de México adquiere los componentes para la instalación de la red automática de monitoreo atmosférico de la zona metropolitana de Toluca (RAMA), misma que inició operaciones en 1993 y desde entonces es administrada por la Secretaría del Medio Ambiente del gobierno del estado.

A principios del año 2010, la RAMA de la ZMVT fue renovada en su totalidad. Además, 1 estación de monitoreo fue reubicada (Toluca-Centro) y se instaló una nueva estación: Ceboruco.

La red de monitoreo atmosférico surge como un programa de vigilancia atmosférica vinculado con los siguientes objetivos:

- Evaluar la calidad del aire en una zona establecida, mediante la generación de indicadores de la calidad del aire.
- Crear las medidas necesarias para controlar la contaminación.
- Observar la tendencia de los contaminantes a lo largo del tiempo.
- Evaluar el cumplimiento de los estándares de calidad del aire y brindar información en caso de situaciones de alerta, alarma y emergencia.
- Obtener una base de datos para planear la distribución del suelo y del transporte.
- Conocer el impacto que ejercen ciertos contaminantes sobre la población.
- Proporcionar datos para el desarrollo y la validación de modelos.
- Desarrollar estrategias de control para prevenir problemas por contaminación, o bien, eliminarlos.

Para que una red de monitoreo proporcione datos confiables y representativos se consideran los siguientes aspectos:

Zona de estudio.

Lugar geográfico donde se desarrollará el estudio. Debe estar de acuerdo a los objetivos del programa y debe tomar en consideración la topografía del sitio junto con las variables del clima.

Clima.

El clima es un factor que va a determinar la selección del sitio de muestreo. Los factores del clima más significativos son: presión, temperatura, precipitación pluvial, velocidad y dirección del viento.

Selección del sitio de muestreo.

De acuerdo a lo especificado por la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos (EPA), los sitios de muestreo deben:

- Ser representativos del área donde se ubican.
- Proporcionar datos comparables con el resto de los equipos de monitoreo.
- Tener un tiempo de vida útil largo.
- Ser accesibles permanentemente.
- Contar con suministros de energía eléctrica seguros.
- Ser capaces de resistir condiciones extremas.
- Estar protegidos contra actos de vandalismo.

Inventario de emisiones.

El inventario de emisiones enumera todas las fuentes de emisión que existen en la zona de estudio y define el tipo de contaminante, número y tamaño de cada una de ellas.

Manejo y reporte de datos.

Los datos deberán ser validados y se debe contar con un número mínimo de ellos por periodo de tiempo para que la información se considere veraz.

Métodos de análisis para los contaminantes.

Se cuenta con metodologías oficiales establecidas como estándares para la medición y análisis de los contaminantes considerados como criterio a nivel internacional. Estos contaminantes son: Bióxido de azufre, bióxido de nitrógeno, monóxido de carbono, ozono, hidrocarburos no metano y material particulado (PM10 y PM2.5). Las metodologías para el caso de México se encuentran como Normas Oficiales Mexicanas.

Aspectos contables.

Debe considerar el costo de los equipos de monitoreo, la construcción física de los sitios, el equipo de oficina, el personal y los medios de transporte.

Número mínimo de estaciones.

El número promedio de estaciones de monitoreo que deben considerarse para los programas de vigilancia de la calidad del aire en zonas urbanas e industriales de acuerdo a la Organización Panamericana de la Salud va de 2 a 10, dependiendo del tamaño de la población. Para el Valle de Toluca, que cuenta con una población de 1,846,116 habitantes, el número mínimo de estaciones es 5. La Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) del valle de Toluca cuenta con 7 estaciones.

Estas estaciones se aprecian en el mapa que siguiente de la en la figura 2.6, mostrando en este su localización y los municipios que conforman este estudio.

Figura 2.6

**Red Automática de Monitoreo Atmosférico y localización de las estaciones de monitoreo de la de vigilancia de la calidad del aire en los municipios de Metepec, San Mateo Atenco, Toluca y Zinacantepec dentro de la ZMVT**



Fuente: <http://portal2.edomex.gob.mx/rama/index.htm>

La Red Automática de Monitoreo Atmosférico se compone de siete estaciones fijas, una unidad móvil y un centro de control.

En la Tabla 2.3 las estaciones se encuentran identificadas en base a las siguientes claves:

**Tabla 2.3**

**Claves de las estaciones de monitoreo**

<b>Clave</b>	<b>Identificación</b>
AP	Aeropuerto
MT	Meteppec
CE	Toluca Centro
SC	San Cristóbal Huichochitlán
OX	Oxtotitlán
CB	Ceboruco
SM	San Mateo Atenco
UM	Unidad Móvil
CC	Centro de Control

De forma general, la medición de la contaminación del aire, se inicia con la obtención de la muestra de aire ambiente en la caseta, la cual pasa a los analizadores y se procesa, para generar datos los cuales posteriormente se envían al Centro de Control, vía Internet (TCP/IP), donde se almacenan y se validan, para integrar los diferentes reportes de calidad del aire.

La Red opera las 24 horas del día, los 365 días del año, por lo que la generación de datos es constante y en tiempo real.

La Red Automática mide 6 contaminantes:

- Bióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>)
- Bióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>)
- Monóxido de Carbono (CO)
- Ozono (O<sub>3</sub>)
- Partículas Suspendidas Menores a 10 micras (PM<sub>10</sub>)
- Partículas Suspendidas Menores a 2.5 micras (PM<sub>2.5</sub>)

Dada la relación entre la contaminación atmosférica y las condiciones del clima, se miden parámetros meteorológicos, como: temperatura ambiente, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, presión atmosférica, radiación solar total y precipitación pluvial.

Las estaciones de monitoreo atmosférico son recintos metálicos climatizados, que albergan en su interior los equipos analizadores automáticos, además de contar con una torre meteorológica, donde están instalados los sensores, cuenta con energía eléctrica regulada, su sistema de adquisición de datos está basado en plataforma PC y una topología de red LAN interna y comunicación con el centro de control TCP/IP.

El Valle de Toluca se encuentra dividido para su estudio en 3 regiones. En cada una de ellas se encuentran distribuidas las estaciones de monitoreo.

Las zonas y estaciones correspondientes se detallan a continuación.

**Tabla 2.4**  
**Pertenencia de estaciones por regiones**

Zona		
Centro	Norte	Sur
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Toluca Centro</li> <li>• Oxtotitlán</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aeropuerto</li> <li>• San Cristóbal Huichochitlán</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metepec (Centro)</li> <li>• Ceboruco</li> <li>• San Mateo Atenco</li> </ul>

Debido a que el Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca se basa en siete estaciones fijas y el alcance de éstas sólo llega a cuatro municipios, el presente estudio solo se enfocara a éstos, que son: Metepec, San Mateo Atenco, Toluca y Zinacantepec.



Este capítulo termina aquí, y se ha podido dar a conocer los municipios objeto de estudio, se conoce ahora la dinámica poblacional y la importancia de cada uno de los municipios dentro de la dinámica económica de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

## **CAPÍTULO III.**

### **METODO PROPUESTO DENTRO LA INVESTIGACIÓN:**

#### **MÉTODO SIMULACION MONTECARLO.**

El objetivo de este apartado es describir en forma breve la técnica que permitirá relacionar las variables propuestas dentro de un modelo final, el cual se someterá a diferentes pruebas con la única finalidad de asegurar que la información obtenida tiene sentido en el contexto de la presente investigación.

Es aquí donde se describe la técnica usada y se justifica la elección de la misma.

#### **3.1 INTRODUCCIÓN.**

En el mundo actual, tanto en el área de los negocios, como en la industria y el gobierno, los proyectos en gran escala y de gran complejidad son la regla y no la excepción.

Estos proyectos complejos requieren estudios previos a su construcción o modificación, denominados estudios pilotos. Tales estudios pilotos se realizan utilizando la técnica llamada modelización, es decir, construcción de modelos donde se realiza el estudio con el fin de obtener conclusiones aplicables al sistema real (Tapia, 2000).

Construido el modelo, el proceso de ensayar en él una alternativa se llama simular. El conjunto de alternativas que se definen para su ensayo constituye la estrategia de la simulación. Los objetivos del proyecto definen cuál es el sistema y cuál el medio ambiente que lo rodea (Tapia, 2000).

El sistema procura satisfacer las necesidades cambiantes de ese medio ambiente en el que está insertado. Cada nuevo sistema lo modifica y crea en él nuevas necesidades. El sistema para poder subsistir debe adaptarse a los cambios.

Uno de los objetivos de la simulación es realizar ensayos de cambios en el sistema probándolos en el modelo, con el fin de elegir la mejor alternativa, y así enfrentar mejor a una realidad que varía día a día. En este punto es conveniente puntualizar algunos conceptos fundamentales para el desarrollo del presente capítulo:

**Sistema:** Conjunto de objetos o ideas que están interrelacionados entre sí como una unidad para la consecución de un fin. También se puede definir como la porción del Universo que será objeto de la simulación (Tapia, 2000).

El comportamiento del sistema total depende de:

El comportamiento de cada subsistema.

Las relaciones entre los subsistemas.

Las relaciones con el mundo exterior, es decir, con el medio ambiente que lo circunda.

El sistema en estudio, puede subdividirse en subsistemas interconectados, cada uno de los cuales está compuesto por elementos interconectados entre sí.

El comportamiento del sistema dependerá del comportamiento de cada subsistema, de sus relaciones y del medio ambiente donde se lo inserta. Los elementos y las relaciones que los ligan entre sí definen los subsistemas. Los subsistemas y las relaciones entre sí definen al sistema en estudio (Tarifa, 2000).

Las relaciones entre los elementos del sistema constituyen la estructura del sistema. Estas ideas son fundamentales para la resolución de problemas que implican la construcción de modelos.

**Modelo:** Un objeto X es un modelo del objeto Y para el observador Z, si Z puede emplear X para responder cuestiones que le interesan acerca de Y (Tapia, 2000).

La simulación de sistemas implica la construcción de modelos. El objetivo es averiguar qué pasaría en el sistema si acontecieran determinadas hipótesis.

Desde muy antiguo la humanidad ha intentado adivinar el futuro. Ha querido conocer qué va a pasar cuando suceda un determinado hecho histórico. La simulación ofrece, sobre bases ciertas, esa predicción del futuro, condicionada a supuestos previos (Tarifa, 2000).

Para ello se construyen los modelos, normalmente una simplificación de la realidad. Surgen de un análisis de todas las variables intervinientes en el sistema y de las relaciones que se descubren existen entre ellas (Tarifa, 2000).

A medida que avanza el estudio del sistema se incrementa el entendimiento que el analista tiene del modelo y ayuda a crear modelos más cercanos a la realidad.

En el modelo se estudian los hechos salientes del sistema o proyecto. Se hace una abstracción de la realidad, representándose el sistema/proyecto, en un modelo. El modelo que se construye debe tener en cuenta todos los detalles que interesan en el estudio para que realmente represente al sistema real. Por razones de simplicidad deben eliminarse aquellos detalles que no interesan y que lo complicarían innecesariamente (Tarifa, 2000).

Se requiere pues, que el modelo sea una fiel representación del sistema real. No obstante, el modelo no tiene porqué ser una réplica de aquél. Consiste en una descripción del sistema, junto con un conjunto de reglas que lo gobiernan.

La descripción del sistema puede ser abstracta, física o simplemente verbal. Las reglas definen el aspecto dinámico del modelo. Se utilizan para estudiar el comportamiento del sistema real (Tarifa, 2000).

Como ejemplo de modelo físico se pueden citar los túneles de viento donde se ensayan los aviones, los simuladores de vuelo, los canales de experiencia donde se ensayan los barcos, etc. (Tarifa, 2000).

Como ejemplo de modelo abstracto, se pueden citar los modelos econométricos donde, entre otras cosas, se pueden ensayar las consecuencias de medidas económicas antes de aplicarlas. (Tarifa, 2000).

Dado un sistema, son muchas las representaciones que se pueden hacer de él. Depende de las facetas del sistema que interesan en el estudio, de la herramienta que se utiliza en el mismo e incluso de la modalidad personal del que lo construye.

En los modelos deben estar identificadas perfectamente las entidades intervinientes y sus atributos. Las mismas pueden ser permanentes (Ej.: empleados atendiendo) o transitorias (Ej.: clientes)

Las acciones provocan cambios de estado, es decir, se modifican los atributos de las entidades; se producen los eventos. Basándonos en la obra de Tarifa (2000), existen múltiples tipos de modelos para representar la realidad. Algunos de ellos son:

**Dinámicos:** Utilizados para representar sistemas cuyo estado varía con el tiempo.

**Estáticos:** Utilizados para representar sistemas cuyo estado es invariable a través del tiempo.

**Matemáticos:** Representan la realidad en forma abstracta de muy diversas maneras.

**Físicos:** Son aquellos en que la realidad es representada por algo tangible, construido en escala o que por lo menos se comporta en forma análoga a esa realidad (maquetas, prototipos, modelos analógicos, etc.).

**Analíticos:** La realidad se representa por fórmulas matemáticas. Estudiar el sistema consiste en operar con esas fórmulas matemáticas (resolución de ecuaciones).

**Numéricos:** Se tiene el comportamiento numérico de las variables intervinientes. No se obtiene ninguna solución analítica.

**Continuos:** Representan sistemas cuyos cambios de estado son graduales. Las variables intervinientes son continuas.

**Discretos:** Representan sistemas cuyos cambios de estado son de a saltos. Las variables varían en forma discontinua.

**Determinísticos:** Son modelos cuya solución para determinadas condiciones es única y siempre la misma.

**Estocásticos:** Representan sistemas donde los hechos suceden al azar, lo cual no es repetitivo. No se puede asegurar cuáles acciones ocurren en un determinado instante. Se conoce la probabilidad de ocurrencia y su distribución probabilística. (Por ejemplo, llega una persona cada  $20 \pm 10$  segundos, con una distribución equiprobable dentro del intervalo).

**Simulación:** Simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a cabo experiencias con él, con la finalidad de aprender el comportamiento del sistema o de evaluar diversas estrategias para el funcionamiento del sistema (Tapia, 2000).

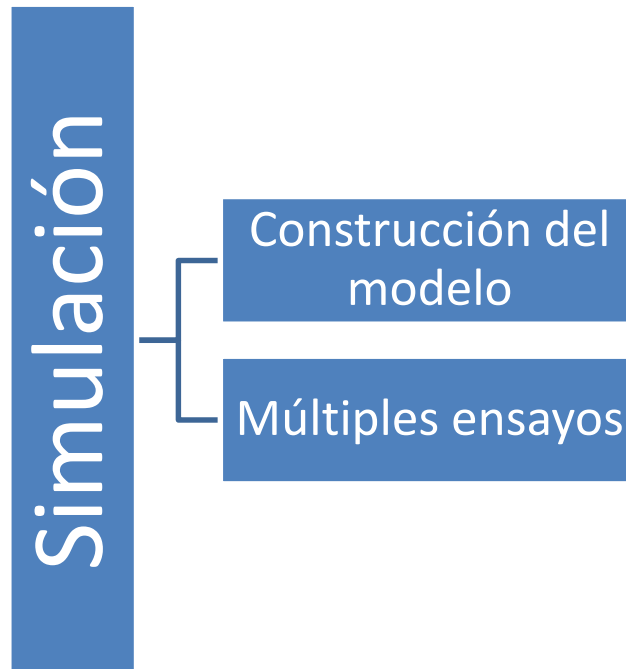
Construido el modelo, se ensaya una alternativa en él con el fin de aplicar las conclusiones al sistema. Los resultados obtenidos no tienen valor si no son aplicables al sistema.

La simulación tiene como principal objetivo la predicción, es decir, puede mostrar lo que sucederá en un sistema real cuando se realicen determinados cambios bajo determinadas condiciones.

La simulación se emplea sólo cuando no existe otra técnica que permita encarar la resolución de un problema. Siempre es preferible emplear una alternativa analítica antes que simular. Lo anterior no implica que una opción sea

superior a otra, sino que los campos de acción no son los mismos. Mediante la simulación se han podido estudiar problemas y alcanzar soluciones que de otra manera hubieran resultado inaccesibles (Tarifa, 2000).

La simulación involucra dos facetas (Tarifa, 2000):



El análisis de riesgos es parte de cada decisión que tomamos. Nos enfrentamos constantemente con la incertidumbre, la ambigüedad y variabilidad. Y a pesar de que tenemos un acceso sin precedentes a la información, no podemos predecir con exactitud el futuro. El Método de Monte Carlo permite ver todos los resultados posibles de sus decisiones y evaluar el impacto del riesgo, lo que permite una mejor toma de decisiones en condiciones de incertidumbre.

### 3.2 ANTECEDENTES.

El método de Montecarlo es un método no determinístico estadístico numérico, usado para aproximar expresiones matemáticas complejas y costosas de evaluar con exactitud. El método se llamó así en referencia al CASINO de Montecarlo (Principado de Mónaco) por ser “la capital del juego de azar”, al ser la ruleta un generador simple de números aleatorios. El nombre y el desarrollo sistemático de los métodos de Montecarlo datan aproximadamente de 1944 y se mejoraron enormemente con el desarrollo de la computadora. (Corporación Universitaria del Meta-Simulación, 2012).

El uso de los métodos de Montecarlo como herramienta de investigación, proviene del trabajo realizado en el desarrollo de la bomba atómica durante la Segunda Guerra Mundial en el laboratorio nacional de Los Álamos en EE. UU. Este trabajo conllevaba la simulación de problemas probabilísticos de hidrodinámica concernientes a la difusión de neutrones en el material de fisión. Esta difusión posee un comportamiento eminentemente aleatorio. (Corporación Universitaria del Meta-Simulación, 2012).

En la actualidad es parte fundamental de los algoritmos de Raytracing para la generación de imágenes 3D. El método de Montecarlo proporciona soluciones aproximadas a una gran variedad de problemas matemáticos posibilitando la realización de experimentos con muestreos de números pseudoaleatorios en una computadora. El método es aplicable a cualquier tipo de problema, ya sea estocástico o determinista. A diferencia de los métodos numéricos que se basan en evaluaciones en N puntos en un espacio M-dimensional para producir una solución aproximada, el método de Montecarlo tiene un error absoluto de la estimación que decrece como  $\frac{1}{\sqrt{N}}$  en virtud del teorema del límite central. En la primera etapa de estas investigaciones, John von Neumann y Stanislaw Ulam refinaron esta ruleta rusa y los métodos "de división" de tareas. Sin embargo, el desarrollo sistemático de estas ideas tuvo que esperar al trabajo de Harris y



Herman Kahn en 1948. Aproximadamente en el mismo año, Enrico Fermi, Nicholas Metropolis y Ulam obtuvieron estimadores para los valores característicos de la ecuación de Schrödinger para la captura de neutrones a nivel nuclear usando este método. (Corporación Universitaria del Meta-Simulación, 2012).

### **3.3 APLICACIONES.**

Como se plantea en ([http://centrodeartigos.com/articulos-utiles/article\\_100105.html](http://centrodeartigos.com/articulos-utiles/article_100105.html)) los métodos de Monte Carlo son especialmente útiles para la simulación de fenómenos con incertidumbre en los insumos y sistemas con un gran número de grados de libertad acoplados. Las áreas de aplicación incluyen:

#### **Ciencias físicas**

Métodos de Monte Carlo son muy importantes en física computacional, química física y campos aplicados relacionados, y tienen diversas aplicaciones de la cromodinámica cuántica complicados cálculos para diseñar pantallas térmicas y formas aerodinámicas. En la física estadística Monte Carlo modelado molecular es una alternativa a la dinámica molecular computacional, y métodos de Monte Carlo se usan para calcular las teorías estadísticas de campo de sistemas de polímeros sencilla de partículas y. Quantum métodos de Monte Carlo a resolver el problema de muchos cuerpos para sistemas cuánticos. En la física experimental de partículas, métodos de Monte Carlo se utilizan para el diseño de detectores, la comprensión de su comportamiento y la comparación de los datos experimentales con la teoría. En astrofísica, que se utilizan en este tipo de diversas maneras para modelar tanto la evolución de las galaxias y la transmisión de la radiación de microondas a través de una superficie planetaria áspera. Métodos de Monte Carlo también se utilizan en los modelos de conjunto que forman la base de la actual predicción del tiempo.

## Ingeniería

Métodos de Monte Carlo son ampliamente utilizados en ingeniería para el análisis de sensibilidad y análisis probabilístico cuantitativa en el diseño del proceso. La necesidad surge de la conducta interactiva, co-lineal y no lineal de simulaciones de procesos típicos. Por ejemplo:

- En la microelectrónica de ingeniería, métodos de Monte Carlo se aplican a analizar las variaciones correlacionadas y no correlacionadas en los circuitos integrados analógicos y digitales.
- En geoestadística y Geometalurgia, métodos de Monte Carlo sustentan el diseño de diagramas de flujo de procesamiento de minerales y contribuyen al análisis de riesgo cuantitativo.
- En el análisis de rendimiento de la energía eólica, la producción de energía previsto de un parque eólico durante su vida útil se calcula dar diferentes niveles de incertidumbre
- Impactos de la contaminación son simuladas y diesel en comparación con la gasolina.
- En robótica autónoma, Monte Carlo localización puede determinar la posición de un robot. Se aplica a menudo a filtros estocásticos tales como el filtro de Kalman o un filtro de partículas que forma el corazón del algoritmo de SLAM.
- En la ingeniería aeroespacial, se utilizan los métodos de Monte Carlo para asegurar que múltiples partes de un ensamblaje encajan en un componente del motor.

## **Biología Computacional**

Métodos de Monte Carlo se utilizan en biología computacional, tales como para la inferencia bayesiana en la filogenia.

Los sistemas biológicos tales como membranas de proteínas, imágenes de cáncer, están siendo estudiados por medio de simulaciones por ordenador.

Los sistemas pueden ser estudiados en los marcos inicio de grano grueso o ab dependiendo de la precisión deseada. Las simulaciones por ordenador nos permiten monitorear el entorno local de una molécula en particular para ver si alguna reacción química ocurre por ejemplo. También se pueden llevar a cabo experimentos de pensamiento cuando los experimentos físicos no son factibles, por ejemplo, bonos de rotura, la introducción de impurezas en sitios específicos, el cambio de la estructura local/global, o la introducción de campos externos.

## **Infografía**

Camino trazado, a veces denominada Monte Carlo Ray Tracing, hace una escena 3D trazando al azar muestras de posibles trayectorias de la luz. Muestreo repetido de cualquier píxel con el tiempo hará la media de las muestras para converger en la solución correcta de la ecuación de la representación, por lo que es uno de los gráficos en 3D más precisos físicamente métodos existentes de representación.

## **Estadística aplicada**

En estadística aplicada, métodos de Monte Carlo se utilizan generalmente para dos propósitos:

- a) Para comparar las estadísticas de la competencia para muestras pequeñas de datos en condiciones realistas. Aunque las propiedades de error de tipo I y el poder de la estadística se puede calcular de los datos

extraídos de las distribuciones teóricas clásicas para condiciones asintóticas, los datos reales a menudo no tienen tales distribuciones.

- b) Para proporcionar implementaciones de pruebas de hipótesis que son más eficientes que las pruebas exactas tales como pruebas de permutación y ser más precisos que los valores críticos de las distribuciones asintóticas.

Métodos de Monte Carlo son también un compromiso entre la aleatorización aproximadas y pruebas de permutación. Una prueba de aleatorización aproximada se basa en un subconjunto especificado de todas las permutaciones. El método de Monte Carlo se basa en un número especificado de permutaciones extraídos aleatoriamente.

### **Diseño y visuales**

Métodos de Monte Carlo también son eficientes en la solución de ecuaciones diferenciales acopladas integrales de los campos de radiación y el transporte de energía, y por lo tanto estos métodos han sido utilizados en los cálculos de iluminación global que producen imágenes foto-realistas de modelos virtuales en 3D, con aplicaciones en los videojuegos, la arquitectura, el diseño , películas y efectos especiales cinematográficos generados por ordenador.

### **Finanzas y negocio**

Métodos de Monte Carlo en finanzas a menudo se utilizan para calcular el valor de las empresas, para evaluar las inversiones en proyectos en una unidad de negocio o nivel corporativo, o para evaluar los derivados financieros. Pueden ser utilizados para los programas del proyecto de modelo, donde las simulaciones se

agregan las estimaciones para el peor de los casos, el mejor de los casos, y lo más probable duración de cada tarea para determinar los resultados para el conjunto del proyecto.

## **Telecomunicaciones**

Cuando se planifica una red inalámbrica, el diseño debe ser probado para trabajar para una amplia variedad de escenarios que dependen principalmente del número de usuarios, su ubicación y los servicios que desea utilizar. Métodos de Monte Carlo se utilizan típicamente para generar estos usuarios y sus estados. El rendimiento de la red se evaluó a continuación y, si los resultados no son satisfactorios, el diseño de la red pasa a través de un proceso de optimización.

## **Utilizar en matemáticas**

En general, los métodos de Monte Carlo se utilizan en las matemáticas para resolver diversos problemas mediante la generación de números aleatorios adecuados y la observación de que la fracción de los números que obedece a alguna propiedad o propiedades. El método es útil para la obtención de soluciones numéricas a problemas demasiado complicados para resolver analíticamente. La aplicación más común del método de Monte Carlo es la integración Monte Carlo.

## **Integración**

Algoritmos de integración numérica deterministas funcionan bien en un pequeño número de dimensiones, pero encontrarse con dos problemas cuando las funciones tienen muchas variables. En primer lugar, el número de evaluaciones de la función necesarios aumenta rápidamente con el número de dimensiones. Por ejemplo, si 10 evaluaciones proporcionan una precisión adecuada en una

dimensión, a continuación, se necesitan 10.100 puntos por 100 dimensiones- demasiados para ser calculado. Esto se conoce como la maldición de la dimensionalidad. En segundo lugar, el límite de una región multidimensional puede ser muy complicado, por lo que no puede ser factible para reducir el problema a una serie de integrales unidimensionales anidados. 100 dimensiones no es en absoluto inusual, ya que en muchos problemas físicos, una "dimensión" es equivalente a un grado de libertad.

Métodos de Monte Carlo proporcionan una manera de salir de este aumento exponencial de tiempo de cálculo.

Mientras la función en cuestión está razonablemente bien comportado, se puede estimar mediante la selección aleatoria 100 puntos en el espacio tridimensional, y teniendo algún tipo de promedio de los valores de la función en estos puntos. Por el teorema del límite central, este método muestra la convergencia, es decir, cuadruplicar el número de puntos de muestra reduce a la mitad el error, sin importar el número de dimensiones.

Un refinamiento de este método, conocido como muestreo de importancia en las estadísticas, implica el muestreo de los puntos al azar, pero con más frecuencia donde el integrando es grande. Para ello, precisamente, uno tendría que saber ya la integral, pero se puede aproximar la integral por una integral de una función similar o usar rutinas de adaptación, tales como el muestreo estratificado, muestreo estratificado recursivo, el muestreo adaptativo paraguas o el algoritmo vegas.

Un enfoque similar, el método cuasi-Monte Carlo, utiliza secuencias de baja discrepancia. Estas secuencias de "llenar" la zona mejor y degustar los puntos más importantes con más frecuencia, por lo que los métodos cuasi Monte Carlo a menudo pueden converger en el integrando más rápidamente.

Otra clase de métodos para el muestreo de puntos en un volumen es simular paseos aleatorios sobre ella. Tales métodos incluyen el algoritmo de Metropolis-Hastings, el muestreo Gibbs y el algoritmo de Wang y Landau.

### **Simulación - Optimización**

Otra aplicación de gran alcance y muy popular para los números aleatorios en la simulación numérica es en la optimización numérica. El problema es reducir al mínimo las funciones de algunos vectores que a menudo tiene un gran número de dimensiones. Muchos problemas pueden formularse de esta manera: por ejemplo, un programa de ajedrez de computadora podría ser visto como un intento de encontrar el conjunto de, digamos, 10 movimientos que produce la mejor función de evaluación al final. En el problema del viajante de comercio que el objetivo es minimizar la distancia recorrida. También hay aplicaciones de diseño de ingeniería, tales como la optimización del diseño multidisciplinar.

El problema del viajante de comercio es lo que se llama un problema de optimización convencional. Es decir, todos los datos necesarios para determinar la mejor ruta a seguir se conocen con certeza y el objetivo es ejecutar a través de las posibles opciones de viaje para llegar a la una con la distancia total más bajo. Sin embargo, supongamos que en vez de querer minimizar la distancia total recorrida para visitar cada destino deseado, hemos querido minimizar el tiempo total que se necesita para llegar a cada destino. Esto va más allá de la optimización convencional, ya que el tiempo de viaje es inherentemente incierto. En consecuencia, para determinar nuestro camino óptimo que nos gustaría utilizar la simulación - optimización entender primero el rango de horas posibles que puede tomar para ir de un punto a otro y luego optimizar nuestras decisiones de viaje para identificar el mejor camino a seguir teniendo que en cuenta la incertidumbre.

Simulación de problemas de la industria utilizando el software de hoja de cálculo es una potente aplicación de la simulación de Monte Carlo. Con una herramienta de hoja de cálculo básico y algunas fórmulas incorporadas en la hoja,

industria, a menudo puede alcanzar buenas soluciones sin tener que recurrir a software de simulación caro.

## **Problemas inversos**

Formulación probabilística de problemas inversos conduce a la definición de una distribución de probabilidad en el espacio modelo. Esta distribución de probabilidad combina la información anterior con la nueva información obtenida por la medición de algunos parámetros observables. Dado que, en el caso general, la teoría de la vinculación de datos con los parámetros del modelo es no lineal, la probabilidad posterior en el espacio modelo puede no ser fácil de describir.

Al analizar un problema inverso, la obtención de un modelo de probabilidad máxima por lo general no es suficiente, ya que normalmente también deseen tener información sobre el poder de resolución de los datos. En el caso general, es posible que tengamos un gran número de parámetros del modelo, y una inspección de las densidades de probabilidad marginales de interés puede ser poco práctico, o incluso inútil. Sin embargo, es posible generar pseudoaleatoria una gran colección de modelos de acuerdo con la distribución de probabilidad posterior y para analizar y visualizar los modelos de tal manera que la información sobre las probabilidades relativas de Características del modelo se transporta al espectador. Esto se puede lograr por medio de un método de Monte Carlo eficiente, incluso en los casos en que no se dispone de fórmula explícita para la distribución a priori.

El método de muestreo de importancia más conocido, el algoritmo de Metropolis, puede ser generalizada, y esto da un método que permite el análisis de problemas inversos con complejo de información y de datos con una distribución arbitraria ruido a priori.



## Matemática Computacional

Métodos de Monte Carlo son útiles en muchas áreas de la matemática computacional, donde una "opción afortunada" se puede encontrar el resultado correcto. Un ejemplo clásico es el algoritmo de Rabin para las pruebas de primalidad: para cualquier  $n$  no es primo, una aleatoria  $x$  tiene al menos un 75% de posibilidades de probar que  $n$  no es primo. Por lo tanto, si  $n$  no es primo, pero  $x$  dice que puede ser que sea, hemos observado a lo sumo un 1 en 4 eventos. Si 10  $x$  diferentes al azar dicen que " $n$  es probablemente primo" cuando no lo es, se ha observado un uno en un millón evento. En general, un algoritmo de Monte Carlo de este tipo produce una respuesta correcta con una garantía de  $n$  es compuesto, y  $x$  demuestra que sí, pero otra sin, pero con una garantía de no obtener esta respuesta cuando se está mal con demasiada frecuencia, en este caso como máximo el 25% del tiempo. ([http://centrodeartigos.com/articulos-utiles/article\\_100105.html](http://centrodeartigos.com/articulos-utiles/article_100105.html))

### 3.4 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO.

Simulación de Monte Carlo es una técnica matemática computarizada que permite a las personas tener en cuenta el riesgo en el análisis cuantitativo y la toma de decisiones. La técnica es usada por profesionales de campos tan diferentes como finanzas, gestión de proyectos, energía, manufactura, ingeniería, investigación y desarrollo, seguros, petróleo y gas, el transporte y principalmente por la naturaleza de este estudio, el medio ambiente (Rodríguez, 2011).

Este método proporciona al tomador de decisiones un rango de posibles resultados y las probabilidades de que cada uno de estos ocurra. Muestra las probabilidades extremas (los resultados de ir por todo y para la decisión más conservadora), junto con todas las posibles consecuencias para las decisiones intermedias.

La técnica fue utilizada por primera vez por los científicos que trabajaban en la bomba atómica, pero fue nombrado "Monte Carlo", por la ciudad turística de

Mónaco famosa por sus casinos. Desde su presentación en la Segunda Guerra Mundial, la simulación Monte Carlo se ha utilizado para modelar una variedad de sistemas físicos y conceptuales (Rodríguez, 2011).

### **¿Cómo funciona la simulación Monte Carlo?**

La simulación de Monte Carlo realiza el análisis de riesgo mediante la construcción de modelos de los posibles resultados mediante la sustitución de un rango de valores (una distribución de probabilidad) de cualquier factor que tiene incertidumbre inherente. A continuación, calcula los resultados una y otra vez, cada vez utiliza un conjunto diferente de valores aleatorios de las funciones de probabilidad. Dependiendo del número de incertidumbres y de los intervalos especificados para ellos, una simulación de Monte Carlo podría involucrar a miles o decenas de miles de nuevos cálculos antes de que se haya completado. Simulación de Monte Carlo produce distribuciones de posibles valores de los resultados (Rodríguez, 2011).

Mediante el uso de distribuciones de probabilidad, las variables pueden tener diferentes probabilidades de los diferentes resultados que se producen. Las distribuciones de probabilidad son una manera mucho más realista de describir la incertidumbre en las variables de un análisis de riesgo (Rodríguez, 2011).

Para Rodríguez (2011), las distribuciones de probabilidad más comunes incluyen:

- Normal – también conocida como "Curva de campana". El usuario simplemente define la media o valor esperado y una desviación estándar para describir la variación alrededor de la media. Los valores de la media cerca de la media son más probables que ocurran. Es simétrica y describe muchos fenómenos naturales, tales como la altura de las personas. Ejemplos de variables descritas por las distribuciones normales incluyen las tasas de inflación y los precios de la energía.

- Lognormal – los valores están sesgados positivamente, no simétricos como una distribución normal. Se utiliza para representar valores que no van por debajo de cero, pero que tienen un potencial positivo ilimitado. Ejemplos de variables descritas por las distribuciones logarítmicas normales incluyen valores de las propiedades de bienes raíces, precios de las acciones, y las reservas de petróleo.
- Uniforme - Todos los valores tienen la misma probabilidad de ocurrir, y el usuario simplemente define el mínimo y el máximo. Entre los ejemplos de variables que pueden ser distribuidos uniformemente incluyen los costos de fabricación o los ingresos por ventas futuras de un producto nuevo.
- Triangular - El usuario define el mínimo, más probable y máximo. Los valores cercanos al más probable tienen mayor probabilidad de ocurrencia. Dentro de las variables que pueden ser descritas por una distribución triangular son el historial de ventas pasadas por unidad de tiempo e inventarios.
- PERT - El usuario define el mínimo, más probable y máximo, al igual que la distribución triangular. Sin embargo los valores entre el más probable y los extremos son más probables que ocurran que en la triangular, es decir, los extremos no son tan enfatizados. Un ejemplo de la utilización de una distribución PERT es para describir la duración de una tarea en un modelo de gestión de proyectos.
- Discreto - El usuario define los valores específicos que pueden ocurrir y la probabilidad de cada uno. Un ejemplo podría ser el resultado de una demanda: 20% Probabilidad de veredicto positivo, 30% de veredicto negativo, 40% de posibilidades de acuerdo, y un 10% de chances de anulación del juicio.

Durante una simulación de Monte Carlo, los valores se toman de muestras al azar provenientes de las distribuciones de probabilidad de entrada. Cada conjunto de muestras se denomina iteración, y el resultado proveniente de dicha muestra se registra. La simulación de Monte Carlo hace esto cientos o miles de veces, y el resultado es una distribución de probabilidad de los posibles resultados. De esta forma, la simulación Monte Carlo ofrece una visión mucho más completa de lo que puede suceder. Este método dice no sólo lo que podría pasar sino además qué tan probable es que suceda.

Por otro lado, la simulación de Monte Carlo proporciona un número de ventajas sobre las técnicas de simulación determinísticas, o también conocidas como estimaciones puntuales. Por mencionar algunas de estas ventajas se exponen (Rodríguez, 2011):

- Resultados probabilísticos: Los resultados muestran no sólo lo que podría pasar, pero ofrecen la probabilidad de cada resultado.
- Los resultados gráficos: Debido a los datos que de una simulación de Monte Carlo son generados, es fácil crear gráficos de diferentes resultados y sus posibilidades de ocurrencia. Esto es importante para la comunicación de los resultados a otros grupos de interés.
- Análisis de sensibilidad: Con sólo unos pocos casos, el análisis determinista hace que sea difícil ver qué variables afectan el resultado de la mayoría. En la simulación de Monte Carlo, es fácil ver cuáles de las entradas tuvieron el mayor efecto en los resultados finales.
- Análisis de escenarios: En los modelos deterministas, es muy difícil de modelar diferentes combinaciones de valores para diferentes entradas para ver los efectos sobre diferentes escenarios. Con el uso de la simulación de Monte Carlo, los analistas pueden ver exactamente qué entradas tuvieron

qué valores en conjunto cuando se produjeron ciertos resultados. Esto es muy valioso para la consecución de un mayor análisis.

- **Correlación de entradas:** En la simulación de Monte Carlo, es posible modelar relaciones de interdependencia entre las variables de entrada. Es importante para la precisión para representar cómo, en realidad, cuando algunos factores suben, otros suben o bajan en consecuencia.

### **Algoritmo de la simulación Monte Carlo**

El algoritmo de Simulación Monte Carlo Crudo o Puro está fundamentado en la generación de números aleatorios por el método de Transformación Inversa, el cual se basa en las distribuciones acumuladas de frecuencias (Palisade, 2013):

- Determinar la(s) variable(s) aleatoria(s) y su(s) distribución(es) acumulada(s)
- Generar un número aleatorio uniforme (0,1).
- Determinar el valor de la V.A. para el número aleatorio generado de acuerdo a las clases que tengamos.
- Calcular media, desviación estándar error y realizar el histograma.
- Analizar resultados para distintos tamaños de muestra.

Otra opción para trabajar con Monte Carlo, cuando la variable aleatoria no es directamente el resultado de la simulación o tenemos relaciones entre variables es la siguiente (Palisade, 2013):

- Diseñar el modelo lógico de decisión
- Especificar distribuciones de probabilidad para las variables aleatorias relevantes.
- Incluir posibles dependencias entre variables.
- Muestrear valores de las variables aleatorias.

- Calcular el resultado del modelo según los valores del muestreo (iteración) y registrar el resultado
- Repetir el proceso hasta tener una muestra estadísticamente representativa
- Obtener la distribución de frecuencias del resultado de las iteraciones
- Calcular media, varianza, etc.
- Analizar los resultados

Las principales características a tener en cuenta para la implementación o utilización del algoritmo son (Palisade, 2013):

- El sistema debe ser descrito por una o más funciones de distribución de probabilidad
- Generador de números aleatorios: como se generan los números aleatorios es importante para evitar que se produzca correlación entre los valores muestrales.
- Iterar tantas veces como muestras sean necesarias
- Establecer límites y reglas de muestreo para las funciones de densidad de probabilidad: conocemos que valores pueden adoptar las variables.
- Definir Scoring: Cuando un valor aleatorio tiene o no sentido para el modelo a simular.
- Estimación error: Con qué error trabajamos, cuánto error podemos aceptar para que una corrida sea válida.
- Técnicas de reducción de varianza.
- Paralelización y vectorización: En aplicaciones con muchas variables se estudia trabajar con varios procesadores paralelos para realizar la simulación.

Aquí termina el tercer capítulo de la presente investigación, donde se explica y detalla el algoritmo usado por el método de simulación Montecarlo.

Ahora es evidente la multifuncionalidad del método ya que como se describió las aplicaciones son bastas y en diferentes contextos.

## **CAPÍTULO IV.**

# **UN ANALISIS ESTADISTICO APLICANDO EL METODO DE SIMULACION MONTECARLO PARA PREDECIR LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE Y SUS POSIBLES RIESGOS EN LA SALUD EN LA ZMVT**

### **4.1 INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se describen las variables crecimiento poblacional, densidad poblacional, mancha urbana, contaminantes y enfermedades; se buscan las relaciones entre las mismas para justificar el planteamiento del modelo. Se realizan las simulaciones mediante números pseudo aleatorios conforme a la definición del método de simulación Montecarlo para cada una de las variables.

Se ajustan distribuciones a las variables resultantes para conocer el comportamiento de las mismas como parte del algoritmo de simulación Montecarlo.

El objetivo de este capítulo es aplicar el modelo propuesto y con la información resultante tratar de probar las hipótesis planteadas.

### **4.2 VARIABLES.**

Las variables que se van analizar en este estudio son la población ya que se considera que el crecimiento de esta incrementa el nivel de contaminación en la zona. Es por ello que se correlacionara el crecimiento poblacional con respecto al tiempo.

Una vez conocida el crecimiento poblacional población, se pretenderá correlacionar el número de enfermedades que son latentes en la contaminación atmosférica, correlacionándolas con el debido al crecimiento poblacional, la densidad de población que hay en estos municipios. Y generando esta relación de



variables un modelo que permita simular el comportamiento de la contaminación ambiental, y sus posibles riesgos en enfermedades considerándolas desde el año 2000 al año 2010 y proyectándolas a 2020.

#### **4.2.1 CRECIMIENTO POBLACIONAL.**

Una de las principales variables que conformarán el modelo a plantear para describir el número de enfermos esperados por causas de la contaminación del aire es la población. Se considerara el crecimiento de la población como una variable de estudio, ya que sería de esperar que “A mayor población dentro del municipio, mayor será el número de enfermos causados por los contaminantes”.

Cada uno de los cuatro municipios objeto de estudio, Metepec, San Mateo Atenco, Toluca y Zinacantepec se estudiaron manera individual, ya que cada uno presenta características evolutivas diferentes e independientes. Sin embargo al plantear el modelo final, se toma como base el comportamiento de los cuatro municipios en conjunto.

La metodología usada para la simulación del crecimiento de la población es la siguiente:

- A. Se obtuvo la información acerca del número de habitantes para cada uno de los municipios objeto de estudio de la página web del INEGI. Para después sumar estas poblaciones y trabajar solo con una dato. La información obtenida tiene periodicidad quinquenal a partir de 1990.
- B. La simulación se hace para los años 2015 y 2020, usando como elemento variante la “Tasa de crecimiento intercensal”, ya que se cuenta con 5 elementos (para cada uno de los municipios analizados) dentro de la base de información y así se puede observar mejor su comportamiento.

Sobre estas tasas de crecimiento se usa el siguiente fórmula y algoritmo en la hoja de cálculo, como se muestra en la fórmula 4.1.

$$\begin{aligned} \text{Valor actual}_y & & (4.1) \\ &= \text{Valor del periodo anterior}_x \\ &* \text{Tasa de Crecimiento Intercensal} \end{aligned}$$

donde:

Los subíndices:

X= 2010 cuando Y= 2015.

X=2015 cuando Y=2020.

Tasa de Crecimiento Intercensal.-Tasa observada de crecimiento quinquenal entre los años 1990 y 2010 (entre 10% y 20%)

$$\text{Tasa de Crecimiento Intercensal} = 1 + \text{ALEATORIO.ENTRE}(10,20)/100 \quad (4.2)$$

En general para el conjunto de los municipios de Metepec, San Mateo Atenco, Toluca y Zinacantepec se muestra en la tabla siguiente.

**Tabla 4.1**

**Tasa de Crecimiento Intercensal en la ZMVT**

AÑO	1990	1995	2000	2005	2010
POBLACION TOTAL	751,420	901,123	992,279	1,100,940	1,252,106
TASA DE CRECIMIENTO INTERCENSAL		1.19	1.10	1.10	1.13

**Fuente:** Elaboración propia basada en INEGI.

Se puede apreciar en la tabla anterior que las variaciones de la tasa de crecimiento oscilan entre el 10% y el 20%. Que dentro del contexto de interés, se traduce en una variación entre 108,000 y 901,000 habitantes.

Se prueba que la variable anteriormente descrita, “Población”, tiene un crecimiento a través del tiempo, es necesario ajustar o calcular la ecuación regresiva a los datos con los que se cuenta, que en particular para esta variable son cinco asociados a los años 1990,1995, 2000, 2005 y 2010.

El análisis de regresión nos ayuda a estudiar la relación existente entre dos o más variables (Valdez y Alfaro, 2002), pudiendo ser esta relación, lineal (recta) o no lineal (exponencial, logarítmica, cuadrática, etc.)

A pesar de que teóricamente, el crecimiento poblacional tiene un comportamiento exponencial, para estos datos se considera el ajuste lineal como mejor opción, esto es, el estimador  $R^2$  obtiene un mayor valor con el ajuste lineal que con el ajuste exponencial, como se muestra en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.2**

**Coefficiente de determinación de las regresiones propuestas de acuerdo a la Tasa de Crecimiento Intercensal en la ZMVT**

<b>MODELO</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Lineal	0.9925
Exponencial	0.9869

**Fuente:** Elaboración propia

Por lo anterior y por convicción de buscar siempre el modelo más sencillo que describa de forma correcta los datos se elige el siguiente modelo:

$$y = 6E - 16e^{0.0244x} \quad (4.3)$$

donde:

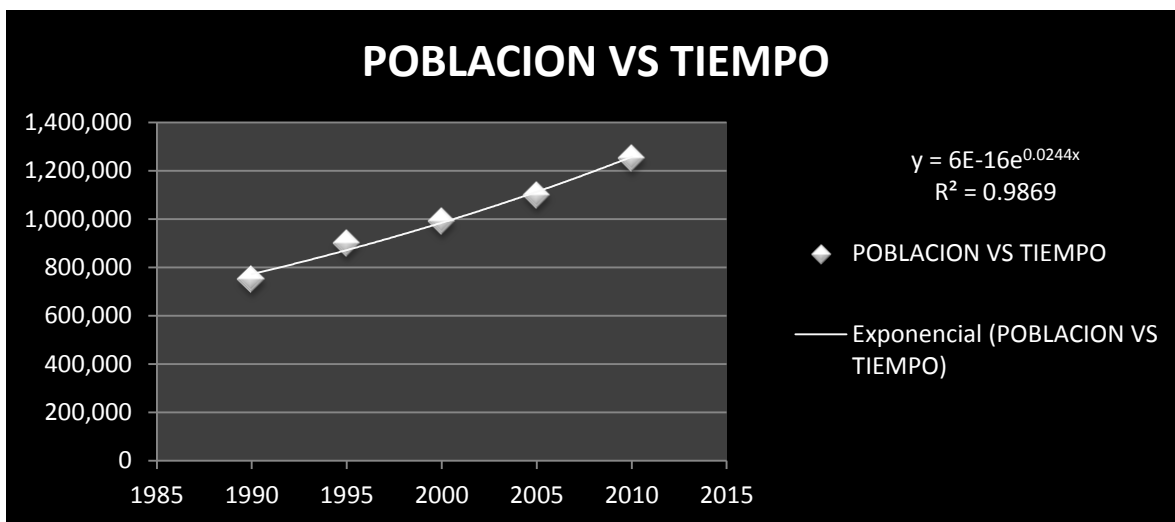
y – representa la variable de respuesta o dependiente que en este caso es la Población.

x– variable independiente que en este caso es el tiempo medido en años.

En la siguiente figura se muestra el gráfico, que describe el grado de ajuste del modelo, es igual muy cercano a 1, lo que quiere decir que el ajuste es muy apropiado con la tendencia de los datos.

**Figura 2.1**

**Grafica de Regresión de la tendencia de Crecimiento de la Población que ha presentado los municipios analizados de la ZMVT de 1990-2010.**



Fuente: Elaboración propia.

La recta regresiva para esta variable, la pendiente es positiva, lo que quiere decir que conforme el tiempo avance, también lo hará la población.

Para las simulaciones de los años entre 2011 y 2020 se respetan las condiciones anteriores, esto es, la tasa de crecimiento quinquenal oscila entre 10% y 20%, pero se calcula la tasa de crecimiento anual y se observa lo siguiente:

Tasa de crecimiento anual.- Tasa observada de crecimiento anual entre los años 1990 y 2010 (entre 2% y 4%), y utilizando la ecuación 4.2 se tiene:

$$Tasa\ de\ Crecimiento\ Anual = 1 + ALEATORIO.ENTRE(20,40)/1000 \quad (4.4)$$

De acuerdo con nuestras condiciones dadas, la población de los cuatro municipios analizados para el año 2020 llegara a ser de 1, 700,544 habitantes.

#### **4.2.2 MANCHA URBANA.**

Dentro del modelo planteado en este trabajo para explicar el impacto de la contaminación del aire en 4 municipios de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, se considera el crecimiento de la mancha urbana como una variable de estudio. La idea fundamental para esta consideración es que: “A mayor área urbana dentro del municipio, mayor será la población afectada por los contaminantes”.

Cada uno de los cuatro municipios objeto de estudio, que en este caso son el de Metepec, San Mateo Atenco, Toluca y Zinacantepec se estudiaron y simularon de manera individual, ya que cada uno presenta características evolutivas diferentes e independientes. Sin embargo el plantear el modelo final, que se mencionara más adelante, se toma como base el comportamiento de los cuatro municipios en conjunto.

La metodología usada para la simulación del crecimiento de la mancha urbana es la siguiente:

- A. Se obtuvo la información acerca de las manchas urbanas del Estado de México para los años 2005 y 2010, en plantillas usadas para trabajar en la plataforma “Quantum GIS” de libre acceso.<sup>1</sup>.
- B. Dentro de la hoja de cálculo (Excel) de la paquetería de MSO, se obtiene un plano cartesiano para sobreponer a los mapas antes mencionados para cada uno de los municipios, y a continuación se procede a ubicar puntos de referencia que coinciden con los límites de las manchas urbanas y los territoriales del municipio. Esto se hace para los años 2005 y 2010.
- C. Se grafican los puntos anteriores y es en este momento cuando se pueden apreciar los cambios en el crecimiento urbano que sucedieron del año 2005 al 2010. Estos cambios son los que describen la evolución y ayudan a proponer la simulación correcta.

---

<sup>1</sup> Información proporcionada por la Quim. Alejandra López Tinoco; Jefa del Departamento de Monitoreo Atmosférico.

D. La simulación se hace para los años 2015 y 2020, por lo que se usan los puntos de referencia del año 2010. Se diferencia entre dos tipos de referencias: los puntos inflexibles que corresponden a los límites territoriales entre municipios, y los puntos flexibles que son aquellos dentro del territorio municipal y que pueden presentar modificaciones sin alterar los límites territoriales;

Sobre estos puntos se usa el siguiente algoritmo en la hoja de cálculo:

$$\text{Valor actual}_y = \text{Valor del año anterior}_x * (1 + \text{Ritmo de crecimiento}) \quad (4.5)$$

donde:

X= 2010 cuando Y= 2015.

X=2015 cuando Y=2020.

Se consideró un ritmo de crecimiento entre e 0% y 2%, que fue la tasa observada de crecimiento quinquenal entre 2005 y 2010. Por lo tanto se consideró una tasa de crecimiento apoyada en la siguiente fórmula utilizada en Excel de MSO.

$$\text{Ritmo de crecimiento} = \text{ALEATORIO.ENTRE}(0,100)/5000 \quad (4.6)$$

E. Se hacen los cálculos del área dentro de los límites graficados usando la regla del trapecio compuesta, apoyándose en técnicas de análisis numérico; usada para encontrar áreas bajo curvas por integración numérica bajo el siguiente algoritmo:

$$\text{Área} = (b - a) \frac{f(x_0) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i) + f(x_n)}{2n} \quad (4.7)$$

F. Con información obtenida en el portal de internet del gobierno del Estado de México se obtienen los datos oficiales de la superficie municipal en kilómetros cuadrados (km<sup>2</sup>), con el fin de poder transformar las áreas obtenidas en hoja de cálculo a datos reales.

En este punto ya se tiene la gráfica donde podemos observar el crecimiento de la mancha urbana del año 2005 al 2010, y también podemos observar la simulación para los años 2015 y 2020. Así como también las áreas que corresponden a cada momento del tiempo.

En el Anexo II se puede ver un gráfico de esta metodología.

En general para los municipios de Metepec, San Mateo Atenco, Toluca y Zinacantepec tenemos que:

**Tabla 4.4.**

**Crecimiento de la Mancha Urbana entre 2005 y 2010 para determinar el porcentaje que ha tenido los municipios analizados.**

SUPERFICIE TOTAL		SUPERFICIE URBANA	
		2005	2010
179.99	UNIDADES DE EXCEL	68.95	72.14
987.24	Km <sup>2</sup>	378.19	395.70
100%	% del total	38.31%	40.08%

**Fuente:** Elaboración propia.

Se puede observar en la tabla anterior, que el crecimiento porcentual de la mancha urbana a través del tiempo oscila entre 0 y 2%, que representa entre 0 y 17.5 km<sup>2</sup>.

Gráficamente se puede observar esta variación en la siguiente cadena de imágenes:

En la primera, se grafica el total del territorio formado por los municipios de Metepec, San Mateo Atenco, Toluca y Zinacantepec, al mismo tiempo que se grafica el área urbana de estos municipios para los años 2005 y 2010, notando así las primeras diferencias.

Se observa claramente que entre el área urbana del año 2005 (línea color rojo) y el área urbana para el año 2010 (líneas color amarillo) existe variación positiva, esto es, la mancha urbana en estos cinco años aumentó en un 1.77%, pasando de una representatividad del 38.31% al 40.08% respecto del territorio total formado por los cuatro municipios, que en km<sup>2</sup> hablamos de pasar de 379 a 395.

Figura 2.2

Simulación del Crecimiento de la Mancha Urbana basada en la técnica Monte Carlo para determinar variaciones entre 2015 y 2020 para los municipios analizados



**Nota:**

Las líneas blancas representan en este gráfico es el contorno de los municipios de Metepec, San Mateo Atenco, Toluca y Zinacantepec territorialmente.

Las líneas amarillas representan el contorno de la Mancha urbana entre 2005 y 2010 de los municipios analizados.

Las líneas rojas representan el contorno de la Mancha urbana después de 10000 simulaciones en función del crecimiento poblacional proyectado entre los años de 2015 y 2020 de los municipios analizados.

**Fuente:** Elaboración propia.



Como prueba de que la variable anteriormente descrita: “Mancha Urbana”, tiene un crecimiento a través del tiempo, es necesario ajustar o calcular la ecuación regresiva a los datos con los que se cuenta, que en particular para esta variable sólo son dos asociados a los años 2005 y 2010.

**Tabla 4.5.**

**Comportamiento del crecimiento de la mancha urbana para 2005 y 2010.**

<b>MANCHA URBANA</b>			
<b>ÁREA TOTAL</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>2005</b>	<b>2010</b>
987.24	km <sup>2</sup>	378.193	395.7002
100%	% del total	38.31%	40.08%

Fuente: Elaboración propia.

Es claro que si se tienen dos puntos, la forma más sencilla de unirlos es trazando una recta de un punto al otro. Tal es el caso de la mancha urbana, donde se desea conocer si existe o no relación alguna con el tiempo (años), así la ecuación regresiva de esta relación es:

$$y = 3.5014x - 6642.2 \quad (4.8)$$

donde:

y – variable de respuesta o dependiente (mancha urbana)

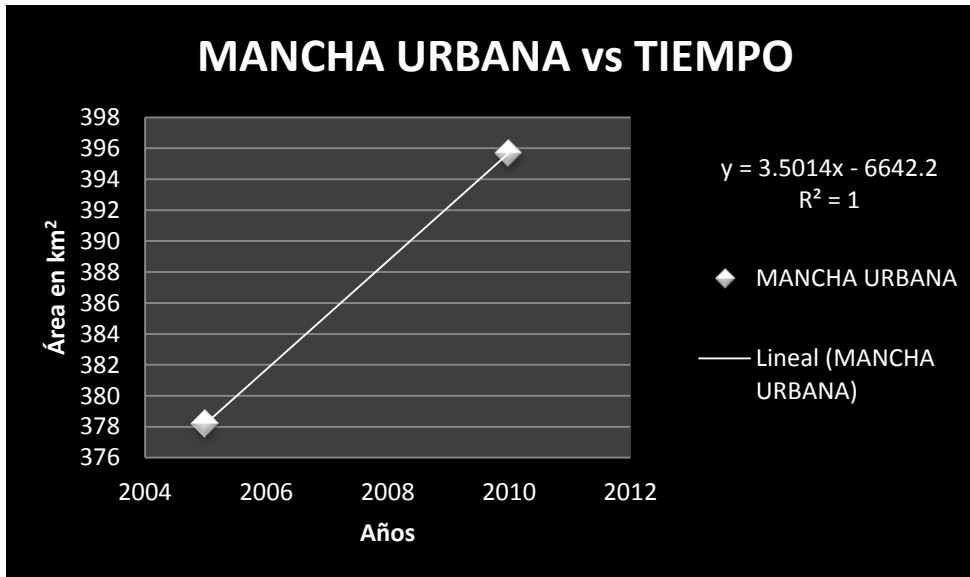
x- variable independiente (tiempo en años)

En el siguiente gráfico se puede apreciar que el Estadístico  $R^2$ , que describe el grado de ajuste de la recta a los datos, es igual a uno, lo que quiere decir que el ajuste es perfecto, como era de esperarse.

Relación y características que gráficamente lucen así:

**Figura 2.3**

**Curva de Regresión para la variable mancha urbana.**



Fuente: Elaboración propia.

Como se desprende de la recta regresiva para esta variable, la pendiente es positiva, lo que quiere decir que conforme el tiempo avance, también lo hará el área urbana.

Basándonos a esta ecuación, de ser necesario, podemos obtener más información, que se ajustara al comportamiento de los datos originales.

Gracias al estudio y análisis de las características evolutivas de la variable es posible simular su comportamiento y, así, proyectar tantos periodos como se requieran para el estudio, en este caso, se simulan del año 2011 al 2020.

Se respeta la tasa de crecimiento no mayor al 2% quinquenal y los límites territoriales, en otras palabras, un municipio no puede crecer más allá de su territorio e invadir otro.

Como se detalló anteriormente, el ritmo de crecimiento quinquenal se encuentra entre 0% y 2%, sin embargo, al momento de realizar la simulación de forma anual el criterio varía, esto es, el ritmo de crecimiento anual oscila entre 0.9% y 1.03%, respetando que de forma quinquenal la variación en la mancha urbana corresponde a un máximo del 2%.

Por lo tanto de forma anual nuestros algoritmos son:

$$\text{Valor actual}_y = \text{Valor del año anterior}_{y-1} * (1 + \text{Ritmo de crecimiento anual}) \quad (4.9)$$

donde:

Y – año entre 2011 y 2020.

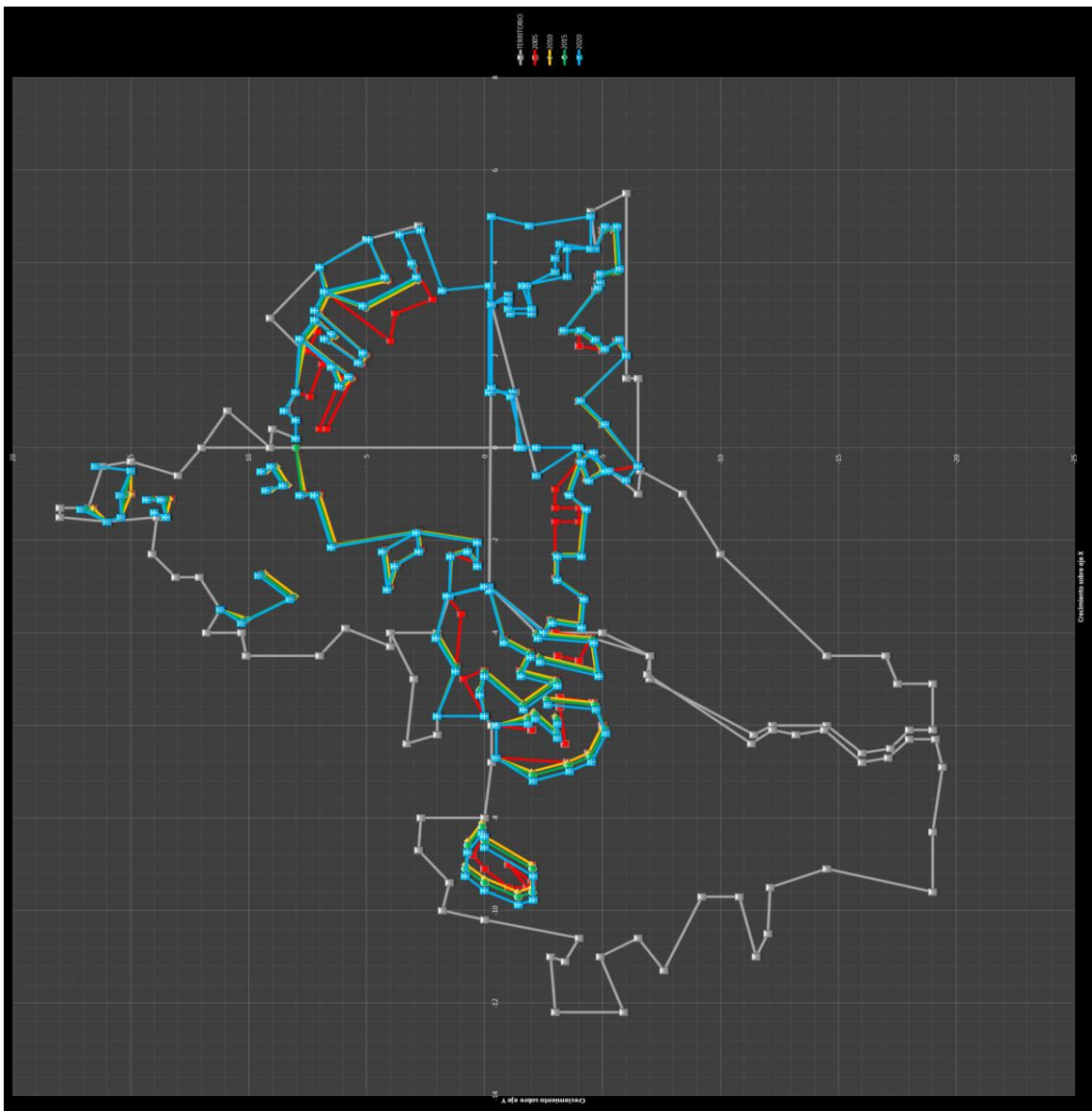
Ritmo de crecimiento anual.- Tasa observada de crecimiento anual entre 1990 y 2010 (entre 0.9% y 1.03%)

$$\text{Ritmo de crecimiento anual} = \text{ALEATORIO.ENTRE}(90,103)/10,000 \quad (4.10)$$

De acuerdo con las simulaciones del indicador, para el año 2020 se llegaría a una ocupación del espacio territorial del 44.16% equivalente a 435.93 km<sup>2</sup>.

Figura 2.4

Mapa con límite territorial y simulación del crecimiento de la mancha urbana.



Fuente: Elaboración propia.

### 4.2.3 DENSIDAD POBLACIONAL.

Continuando con el estudio de las variables que conformarán el modelo a plantear para describir el número de enfermos esperados por causas de la contaminación del aire, llegamos a la densidad poblacional.

Consideramos a la densidad como una variable de estudio ya que sería de esperar que “A mayor concentración poblacional dentro del municipio, mayor será el número de enfermos causados por los contaminantes”.

La metodología usada para la simulación de la densidad poblacional es la siguiente:

- A. Se utiliza la información ya obtenida para las variables “mancha urbana” y “población”, ya que la densidad poblacional cuyas unidades son “habitantes/km<sup>2</sup>” está definida como:

$$Densidad\ Poblacional = \frac{Población\ del\ periodo}{Mancha\ Urbana\ del\ periodo} \quad (4.11)$$

- B. Los datos obtenidos para los años 2005 y 2010, nos sirven de referencia para conocer el comportamiento de la variable de forma quinquenal, dando como resultado la tasa de crecimiento quinquenal” para la densidad, información que solo consta de un elemento ya que la Mancha Urbana solo considera los años 2005 y 2010.

En general para el conjunto de los municipios de Metepec, San Mateo Atenco, Toluca y Zinacantepec tenemos que:

**Tabla 4.6.**

**Comportamiento del densidad poblacional para 2005 y 2010.**

DENSIDAD POBLACIONAL		
AÑO	2005	2010
POBLACION TOTAL	1,100,940	1,252,106
MANCHA URBANA TOTAL (KM <sup>2</sup> )	378.19	395.70
DENSIDAD POBLACIONAL TOTAL (HAB/KM <sup>2</sup> )	2912	3165

Fuente: Elaboración propia.

Las variaciones de la tasa de crecimiento oscilan entre el 0 y el 9%. Que corresponden a una diferencia de máximo 254 hab/km<sup>2</sup>.

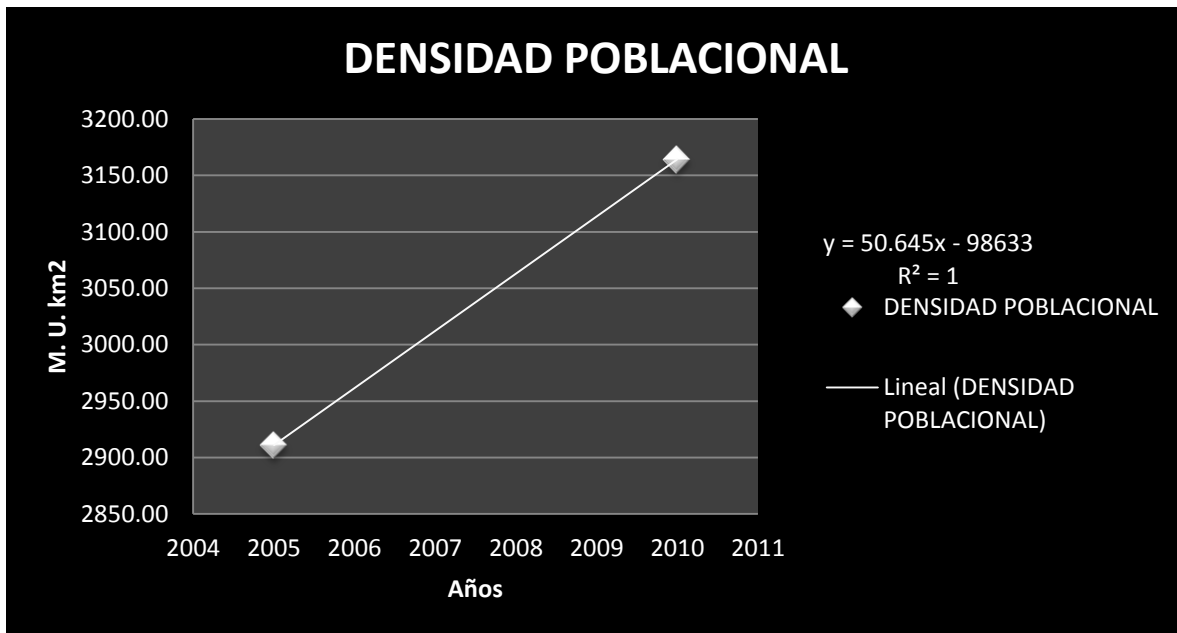
Como prueba de que la variable anteriormente descrita: “Densidad Poblacional”, tiene un crecimiento a través del tiempo, es necesario ajustar o calcular la ecuación regresiva a los datos con los que se cuenta, que en particular para esta variable son dos asociados a los años 2005 y 2010.

Como se sabe, el análisis de regresión nos ayuda a estudiar la relación existente entre dos o más variables (Valdez y Alfaro, 2002), pudiendo ser esta relación, lineal (recta) o no lineal (exponencial, logarítmica, cuadrática, etc.).

En el siguiente gráfico se puede apreciar que el Estadístico  $R^2$ , que describe el grado de ajuste de la recta a los datos, es igual a 1, lo que quiere decir que el ajuste es perfecto:

Figura 2.4

Curva de Regresión para la variable densidad poblacional.



Fuente: Elaboración propia.

Es claro que si se tienen dos puntos, la forma más sencilla de unirlos es trazando una recta de un punto al otro. Tal es el caso de la densidad poblacional, donde se desea conocer si existe o no relación alguna con el tiempo (años), así la ecuación regresiva de esta relación es:

$$y = 50.645x - 98633 \quad (4.12)$$

donde:

y – variable de respuesta o dependiente (Densidad)

x- variable independiente (tiempo en años)

Como se desprende de la recta regresiva para esta variable, la pendiente es positiva, lo que quiere decir que conforme el tiempo avance, también lo hará la densidad. Dato coherente con la lógica del fenómeno.

Gracias a la ecuación (4.12), de ser necesario, podemos obtener más información, que se ajustara al comportamiento de los datos originales.

Para las simulaciones de los años entre 2011 y 2020 se respetan las condiciones anteriores, esto es, la tasa de crecimiento quinquenal oscila entre 0 y 9%, y se observa lo siguiente:

De acuerdo con nuestras condiciones dadas, la densidad para el año 2020 llegaría a los 3873 hab/km<sup>2</sup>, para la suma de los 4 municipios objeto de estudio.

En este caso no es necesario calcular la “Tasa de Crecimiento Anual” antes mencionada para otras variables, ya que la Densidad depende del comportamiento de la Población y de la Mancha Urbana que de manera independiente son simulaciones.

#### **4.2.4 CONTAMINANTES.**

Existen normas internacionales que dan el marco para poder medir los contaminantes y así poder determinar el grado en el que cada uno de ellos es nocivo para la salud de las personas (WHO, 2000).

Las 7 estaciones de monitoreo de la calidad del aire distribuidas en los municipios de Metepec, San Mateo Atenco, Toluca y Zinacantepec, miden los contaminantes del aire en base a estas disposiciones internacionales. En este trabajo de investigación se toma como base el número de días en que el nivel del contaminante supero los límites establecidos, se suman estos valores para las 7 estaciones con lo que cada día este valor puede estar entre 0 y 7.

En esta sección se pretenderá explicar el tratamiento que se le dio a cada uno de los contaminantes asociados causantes de la polución del aire. Estos contaminantes son:

- A. Ozono (O<sub>3</sub>)
- B. Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>)
- C. Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>)
- D. PM<sub>2.5</sub>
- E. PM<sub>10</sub>

De forma general, para el conjunto de los cuatro municipios objeto de estudio perteneciente a la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, se obtuvo la siguiente información (RAMA ZMVT, 2013):



**Tabla 4.6.**

**Información obtenida de contaminantes desde 1994 hasta 2012.**

CONTAMINANTES																				
AÑO	'94	'95	'96	'97	'98	'99	'00	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07	'08	'09	'10	'11	'12	'13
OZONO O3	16	13	139	63			163	67	102	86	39	115	81	18				47	45	19
DIOXIDO DE NITROGENO (NO2)		2	12		1	1	1		2	1	1									
DIOXIDO DE AZUFRE (SO2)		45	188	86	74	131	51	58	84	70	50	273	246	29				61	60	19
PM2.5																		1497	1239	1158
PM10					685	985	756	375	1006	1801	1560	1668	1184	817	939	813	604	1662	1266	1076

Fuente: Elaboración propia.

La falta de información en algunos años y para algunos contaminantes, se debe a dos posibles factores:

- La estación de monitoreo de calidad del aire no mide ese contaminante.
- La estación de monitoreo si mide el contaminante pero no se midió para ese año.

Se puede observar que para el ozono, los datos oscilan entre 13 y 163 reportes de exceder los límites permitidos al año. Mientras que para el Dióxido de nitrógeno solo se tienen 1 o 2 reportes. Para el dióxido de azufre entre 19 y 273, pero los contaminantes que superan a cualquiera son las PM<sub>2.5</sub> y las PM<sub>10</sub> con valores entre 1158 y 1497, y 604 y 1801, respectivamente.

Cada uno de los contaminantes como ya se vio en el capítulo II es originado por diferentes fuentes, por lo que para reducir sus emisiones sería necesario estudiar las fuentes y tomar acciones sobre éstas.

De una forma general, lo primero que suele hacerse para ver si dos variables aleatorias están relacionadas o no (de ahora en adelante se denominarán X e Y, siendo Y la variable dependiente, y X la variable

independiente o regresora), consiste en tomar una muestra aleatoria. Sobre cada individuo de la muestra se analizan las dos características en estudio, de modo que para cada individuo se tenga un par de valores  $(x_i, y_i)$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ).

Seguidamente, se representan dichos valores en unos ejes cartesianos, dando lugar a un diagrama de dispersión o nube de puntos. Así, cada individuo vendrá representado por un punto en el gráfico, de coordenadas  $(x_i, y_i)$ . De esa forma, se podrá obtener una primera idea acerca de la forma y de la dispersión de la nube de puntos.

En primer lugar deberá distinguirse entre dependencia funcional y dependencia estocástica. En el primer caso la relación es perfecta:  $Y = f(x)$ ; es decir, los puntos del diagrama de dispersión correspondiente aparecen sobre la función  $Y = f(x) = a + bx$ .

Sin embargo, suele ocurrir que no existe una dependencia funcional perfecta, sino otra dependencia o relación menos rigurosa o dependencia estocástica. Entonces, la relación entre  $X$  e  $Y$ , se escribiría de la forma  $Y = a + bx + e$ , donde  $e$  es un error (o residual), debido por ejemplo, a no incluir variables en el modelo que sean importantes a la hora de explicar el comportamiento de  $Y$ , y cuyos efectos sean diferentes a los de  $X$ ; errores aleatorios o de medida, o simplemente a que se ha especificado mal el modelo (por ejemplo, en lugar de ser una recta, sea una parábola).

En la dependencia estocástica, se distinguen dos tipos de técnicas:

- (a) Análisis de regresión;
- (b) Análisis de correlación.

El análisis de correlación, tiene como fin dar respuesta a las preguntas:

- ¿Existe dependencia estocástica entre las variables?;
- ¿Cuál es el grado de dicha dependencia?

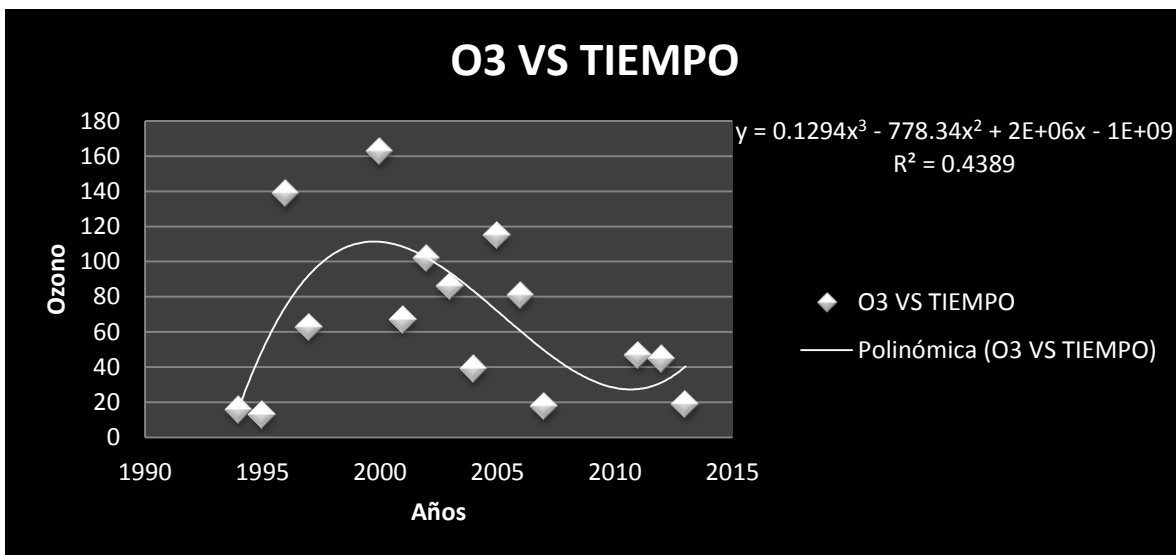
En el análisis de regresión las cuestiones son:

- ¿Cuál es el tipo de dependencia entre las dos variables?;
- ¿Pueden estimarse los valores de  $Y$  a partir de los de  $X$ ? y ¿Con qué precisión?

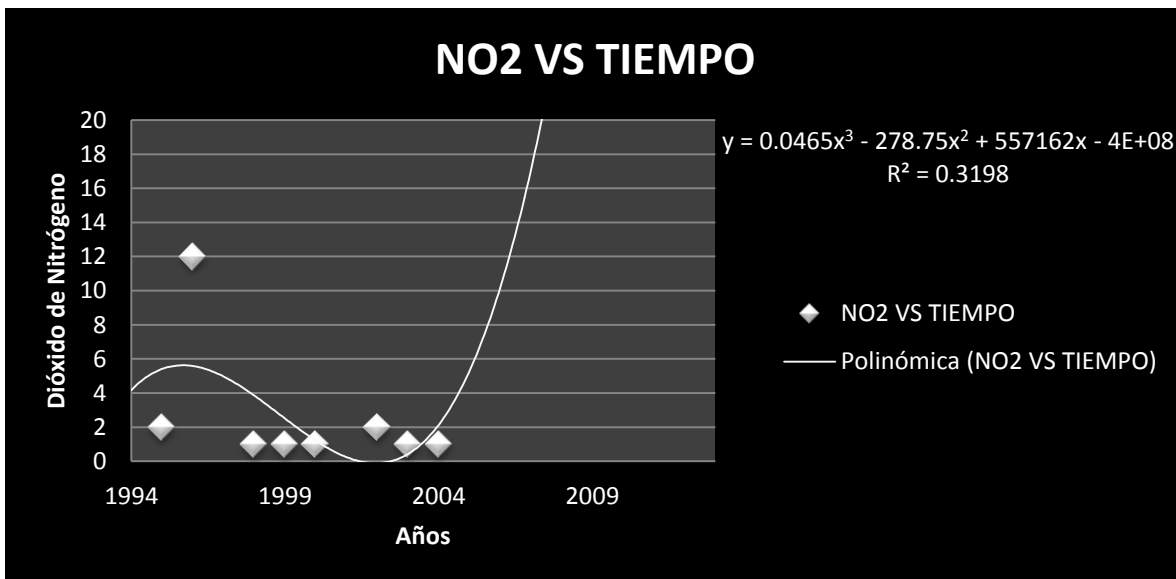
De forma individual se trató de encontrar una relación entre el nivel de contaminantes ( $Y$ ) y el paso del tiempo ( $X$ ), y estas son las gráficas de dicho comportamiento:

Figura 2.5

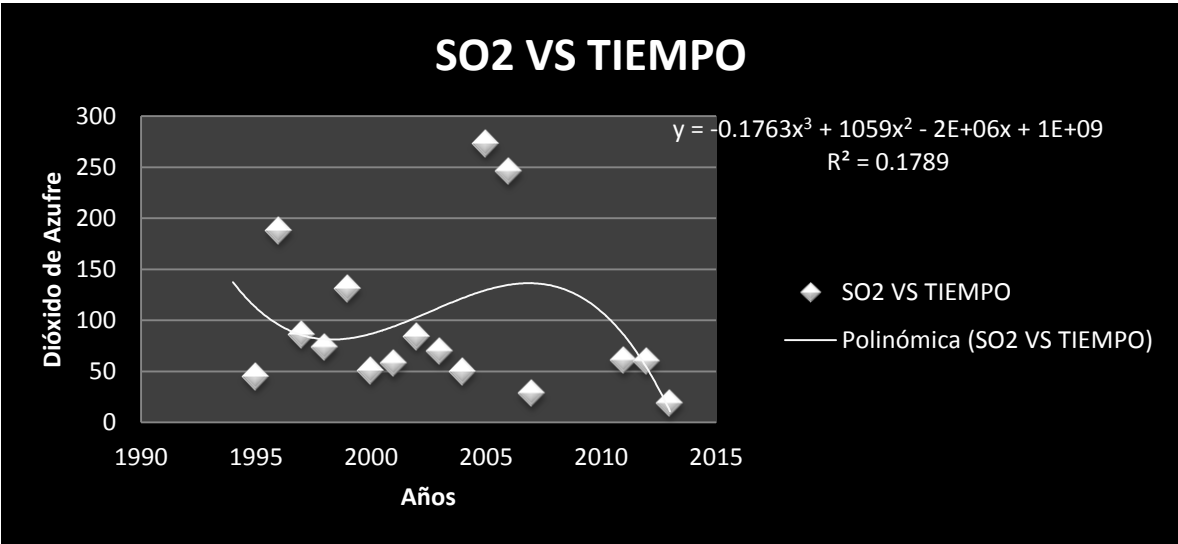
Curva de Regresión para la contaminante.



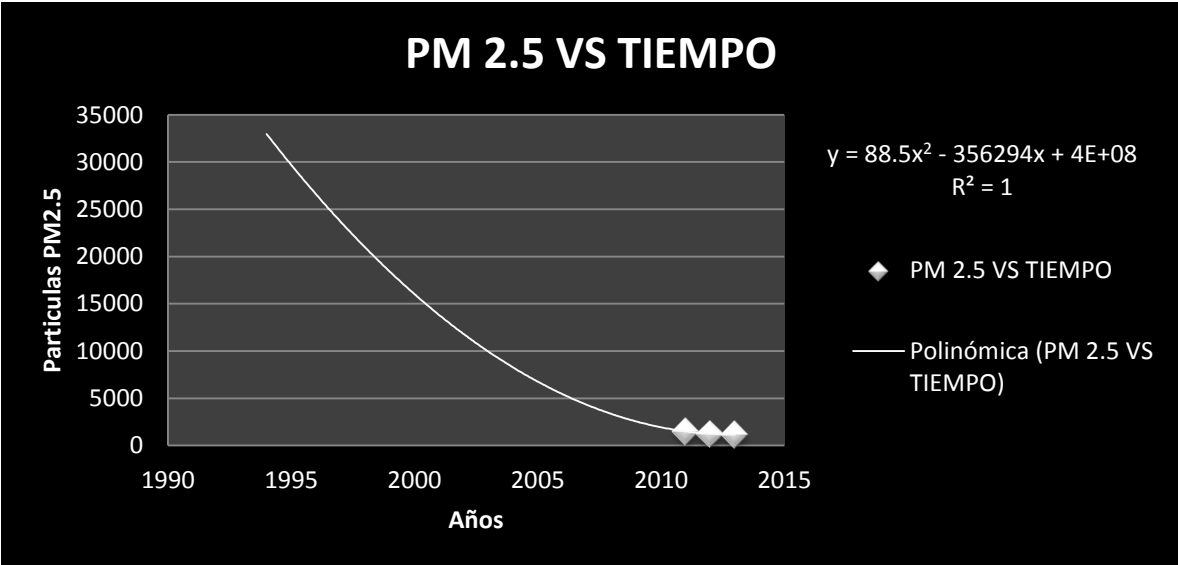
Fuente: Elaboración propia.



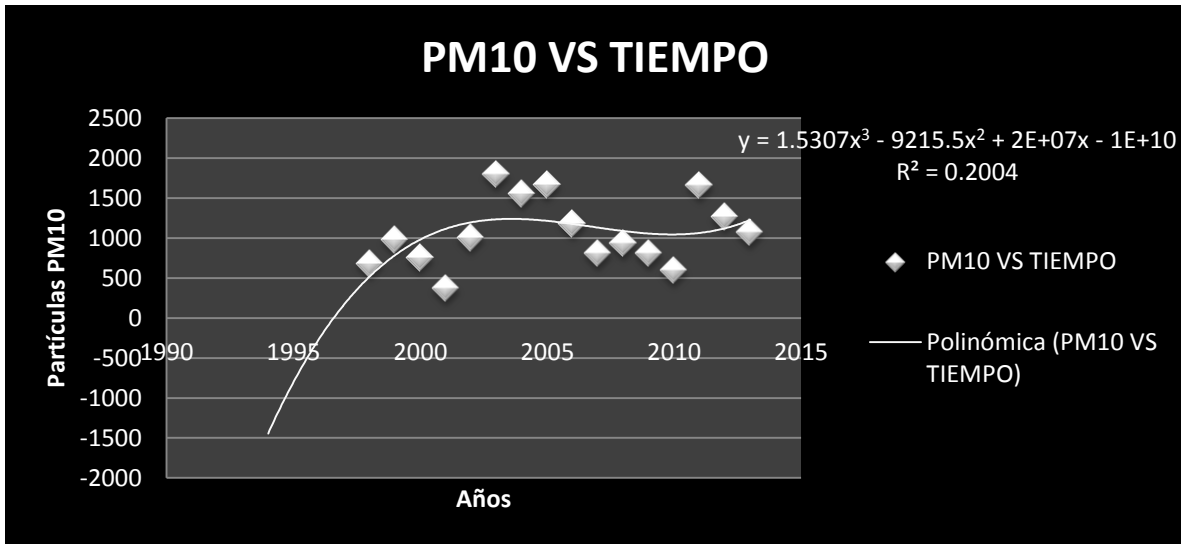
Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

Es fácil obtener una medida  $R^2$  o “coeficiente de determinación” que indique el porcentaje de variación controlada o explicada mediante el modelo. Expresado en tantos por 1, será:

$$R^2 = 1 - \frac{S_e^2}{S_y^2} \quad (4.13)$$

Como puede observarse, a partir de la expresión anterior:  $0 < R^2 < 1$ . Por tanto:

- Si  $R^2 = 1$  no hay residuos: habrá una dependencia funcional. Cuanto más se acerque dicho valor a la unidad, mayor poder explicativo tendrá el modelo de regresión. Cuanto más cercano a 0 esté dicho valor, menor poder explicativo;

- Si  $R^2 = 0$  entonces X no explica en absoluto ninguna de las variaciones de la variable Y, de modo que o bien el modelo es inadecuado, o bien las variables son independientes.

Podemos resumir que el coeficiente de determinación obtenido oscila entre 0.17 y 0.43, con lo que con seguridad concluimos que los modelos planteados no explican el comportamiento del fenómeno estudiado, en este caso el nivel de cada uno de los contaminantes.

Con lo anterior sería necesario hacer uso de técnicas del Análisis de Correlación para definir si existe o no independencia estocásticas y el grado de esta. Para la presente investigación, esta relación no es base para la modelación del fenómeno, por lo que no se realiza el estudio correspondiente.

En general, podemos decir con seguridad que no se puede definir el tipo de dependencia entre el nivel de contaminantes y el tiempo mediante métodos regresivos, así como tampoco se pueden estimar los niveles de contaminación en función del tiempo para los municipios estudiados.

#### **4.2.5 ENFERMEDADES QUE SE GENERAN CON LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL.**

Como se explicó en el capítulo II, la ZMVT ha representado el mayor dinamismo demográfico en las últimas décadas ya que ha aumentado 440 mil habitantes en los últimos 10 años. Gracias al desarrollo económico derivado de las actividades empresariales e industriales que han encontrado en ésta área una fuente de trabajadores, insumos y estabilidad para desarrollarse.

Esto como trajo consigo una serie de consecuencias, tanto positivas como negativas, y en este caso de estudio en particular nos centraremos en las enfermedades como una negativa.

Se considera a las enfermedades como una repercusión que demerita la condición física de las personas para continuar realizando las actividades diarias con normalidad. Resultando en una disminución del ingreso de las personas de la comunidad al tener que realizar gastos no contemplados para la consulta médica y posterior tratamiento.

Dentro de la descripción de los contaminantes presentada en el capítulo II del presente trabajo, se describen los efectos que tienen éstos sobre la salud humana y las enfermedades que pueden desatar. Por cuestiones de similitud, se agruparon en tres grandes grupos:

- a) Enfermedades cardiovasculares
- b) Enfermedades respiratorias
- c) Afecciones al sistema nervioso

Sería importante conocer el comportamiento de estas enfermedades a través del tiempo para los municipios de Metepec, San Mateo Atenco, Toluca y Zinacantepec, esto es, recordaremos el número de registros que tiene el Sistema Nacional de Información de Salud de cada una de ellas para cada municipio:

Como se puede apreciar, las enfermedades cardiovasculares si bien han tenido años en que disminuye el número de reportes respecto al año anterior, en general podemos ver que de tener 262 enfermos en el año 2000 se llegó a 496 para el 2011, esto es, una diferencia de más de 200 personas en sólo 10 años.

Las enfermedades respiratorias tienen un aumento menor ya que la diferencia es sólo de 150 personas, sin embargo se aprecia que el número de enfermos por año es mayor para esta enfermedad que para cualquiera de las otras dos.

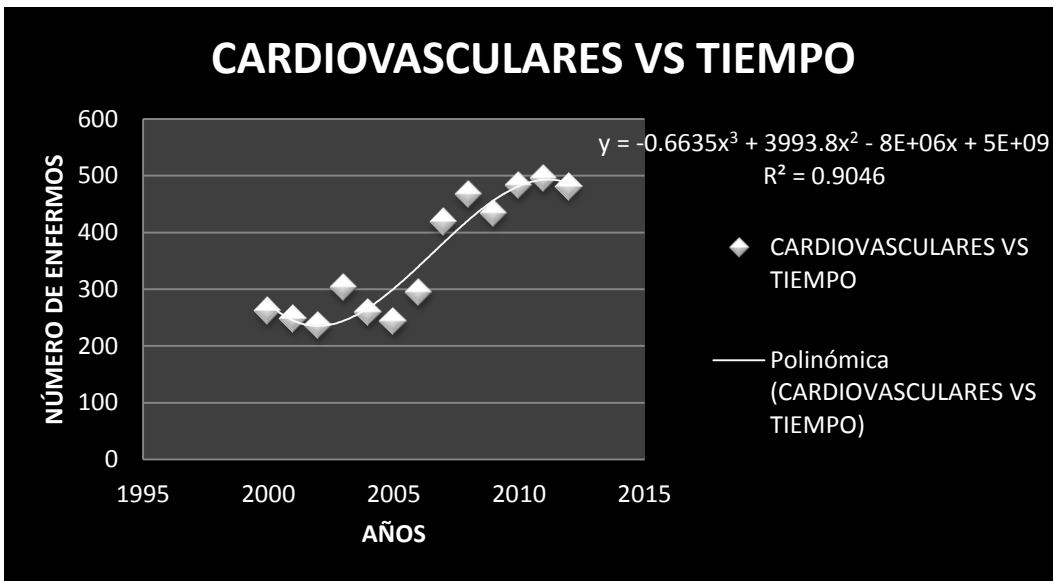
Las afecciones al sistema nervioso representan el mayor número de reportes durante todo el periodo, pero como se explicó anteriormente, en el ámbito de la severidad de la enfermedad son las que tienen un mayor impacto una vez que son adquiridas por las personas.

Esta relación entre las enfermedades y el tiempo es fácilmente explicada gracias a la metodología del análisis de regresión, como se verá a continuación:

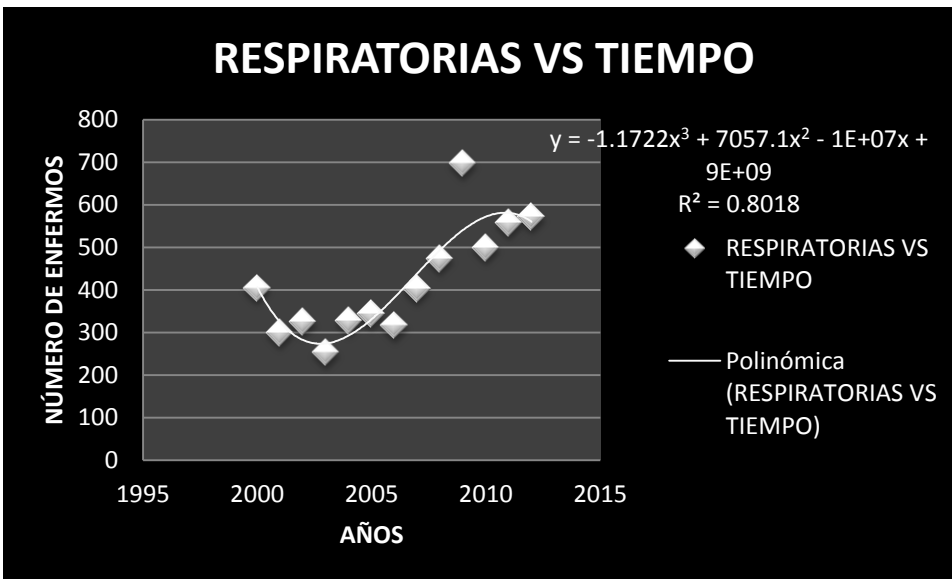


Figura 2.6

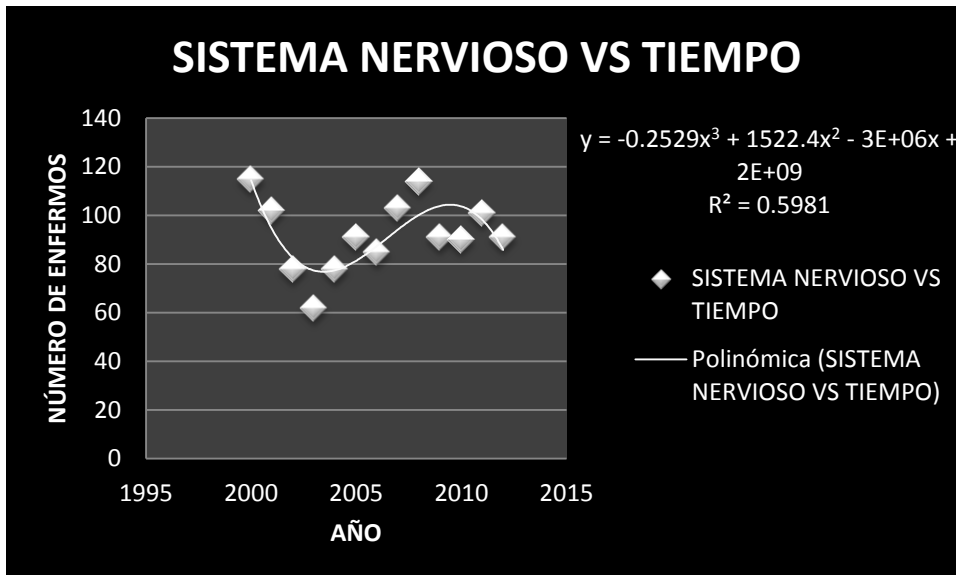
Curva de Regresión para las enfermedades.



FUENTE: Elaboración propia.



FUENTE: Elaboración propia.



FUENTE: Elaboración propia.

Se puede apreciar que la relación que existe entre el número de enfermos y el tiempo es importante, ya que el estadístico  $R^2$  oscila entre 0.6 y 0.9 que es el grado de ajuste del modelo propuesto con el fenómeno observado.

Pero no podemos concluir que es el tiempo la única variable que explica el desarrollo de las enfermedades en cualquier sociedad. Es ésta una de las preguntas que dan origen a la investigación presente ¿Cuál es la relación que existe entre las enfermedades y el nivel de contaminantes? Pregunta que seremos capaces de responder al finalizar el presente trabajo.

## 4.3 DESARROLLO Y APLICACIÓN DEL MODELO

### 4.3.1 MODELO LÓGICO.

Bajo la metodología de simulación Monte Carlo, cuando tenemos relaciones entre variables se recomienda seguir los siguientes pasos:

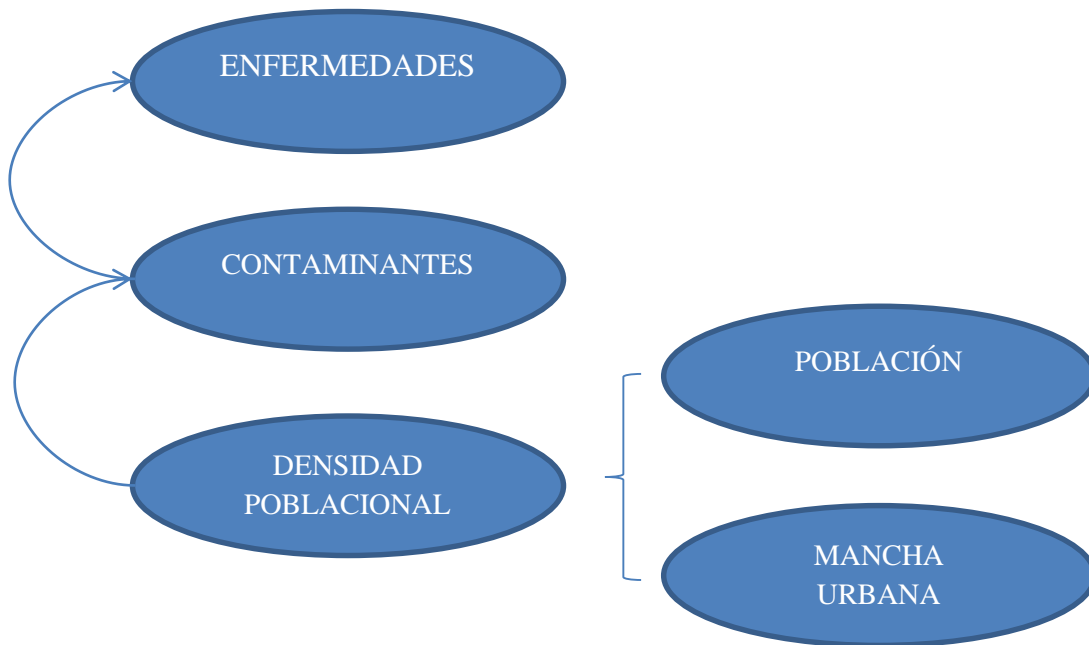
- Especificar distribuciones de probabilidad para las variables aleatorias relevantes.
- Incluir posibles dependencias entre variables.
- Muestrear valores de las variables aleatorias.
- Calcular el resultado del modelo según los valores del muestreo (iteración) y registrar el resultado
- Repetir el proceso hasta tener una muestra estadísticamente representativa
- Obtener la distribución de frecuencias del resultado de las iteraciones
- Calcular media, varianza, etc.
- Analizar los resultados

En nuestro caso el fenómeno a explicar es el número de enfermos que se registran bajo el diagnóstico de padecer enfermedades cardiovasculares, respiratorias o afecciones al sistema nervioso. Y definimos a las variables aleatorias para tratar de explicarlo como el nivel de contaminantes y la densidad de población que incluye a las variables mancha urbana y población.

Las relaciones antes mencionadas se pueden identificar mejor en el siguiente diagrama de flujo del sistema propuesto:

Figura 2.7

Diagrama de flujo del modelo propuesto.



Por lo tanto nuestra función que describe el diagrama anterior es:

$$\text{Número de enfermos} = f(\text{Contaminantes}(f(\text{Densidad Poblacional}(f(\text{Mancha Urbana}, \text{Población})))))) \quad (4.14)$$

Siguiendo con la metodología propuesta, para cada una de las variables anteriores se determina una función de densidad de probabilidades (función característica), además de los parámetros de dichas funciones.

Para la identificación de las distribuciones de cada variable se utiliza el software estadístico “EasyFit Professional” en su Versión 5.3.

Se toma como la mejor distribución aquella bajo el criterio de Kolmogorov-Smirnov, y que pase las pruebas de hipótesis bajo este criterio además del criterio de la prueba de bondad de ajuste Anderson Darling.

### 4.3.2 FUNCIONES DE DENSIDAD DE LAS VARIABLES

#### a) Población

La distribución característica de la población resulta ser “Logística Generalizada” cuyos parámetros propios serían:

$$k=0.01701 \quad \alpha=1.2006E+5 \quad \beta=9.9621E+5$$

#### b) Mancha Urbana

La distribución característica de la mancha urbana resulta ser “Johnson SB” cuyos parámetros propios serían:

$$\alpha=-4.4347E-4 \quad \beta=0.64543 \\ \gamma=75.161 \quad \delta=335.27$$

#### c) Densidad Poblacional

La distribución característica de la densidad poblacional resulta ser “Johnson SB” cuyos parámetros propios serían:

$$\alpha=1.0198E-9 \quad \beta=0.64646 \\ \gamma=343.98 \quad \delta=2864.8$$

#### d) Contaminantes

Se define para cada uno de los contaminantes estudiados:

##### 1- Ozono

La distribución característica del ozono resulta ser “Wakeby” cuyos parámetros propios serían:

$$\alpha=87.768 \quad \beta=0.37008 \quad \gamma=0 \\ \delta=0 \quad \epsilon=3.4733$$

## 2- Dióxido de Nitrógeno

La distribución característica del dióxido de nitrógeno resulta ser “Weibull” cuyos parámetros propios serían:

$$\alpha=2.0333 \quad \beta=1.5416$$

## 3- Dióxido de Azufre

La distribución característica del dióxido de azufre resulta ser “Burr” cuyos parámetros propios serían:

$$k=0.55541 \quad \alpha=3.359 \quad \beta=53.015$$

## 4- PM<sub>2.5</sub>

La distribución característica de las partículas PM<sub>2.5</sub> resulta ser “Johnson SB” cuyos parámetros propios serían:

$$\alpha=0 \quad \beta=0.64646 \\ \gamma=1507.3 \quad \delta=968.09$$

## 5- PM<sub>10</sub>

La distribución característica de las partículas PM<sub>10</sub> resulta ser “Johnson SB” cuyos parámetros propios serían:

$$\alpha=26283.0 \quad \beta=53.385 \quad \gamma=893.54 \\ \delta=-0.51054 \quad \epsilon=0$$

## e) Enfermedades

Se define para cada uno de las enfermedades estudiadas:

### 1- Cardiovasculares

La distribución característica de las partículas  $PM_{10}$  resulta ser "Wakeby" cuyos parámetros propios serían:

$$\begin{aligned} \mu &= 279.68 & \sigma &= 0.6949 & \alpha &= 0 \\ \beta &= 0 & \gamma &= 191.45 & & \end{aligned}$$

### 2- Respiratorias

La distribución característica de las partículas  $PM_{10}$  resulta ser "Gamma de 3 parámetros" cuyos parámetros propios serían:

$$\mu = 1.5957 \quad \sigma = 111.12 \quad \alpha = 244.14$$

### 3- Sistema Nervioso

La distribución característica de las partículas  $PM_{10}$  resulta ser "Gamma de 3 parámetros" cuyos parámetros propios serían:

$$\mu = 158.67 \quad \sigma = 1.1582 \quad \alpha = -91.452$$

**NOTA: las gráficas y pruebas estadísticas propias de cada uno de los ajustes se encuentran en la sección de Anexos III.**

Las posibles dependencias entre variables, se dan por la relación directa que existe entre ellas. No implica que una variable sea consecuencia de la otra, sino que el comportamiento de una afecta positiva o negativamente a la otra.

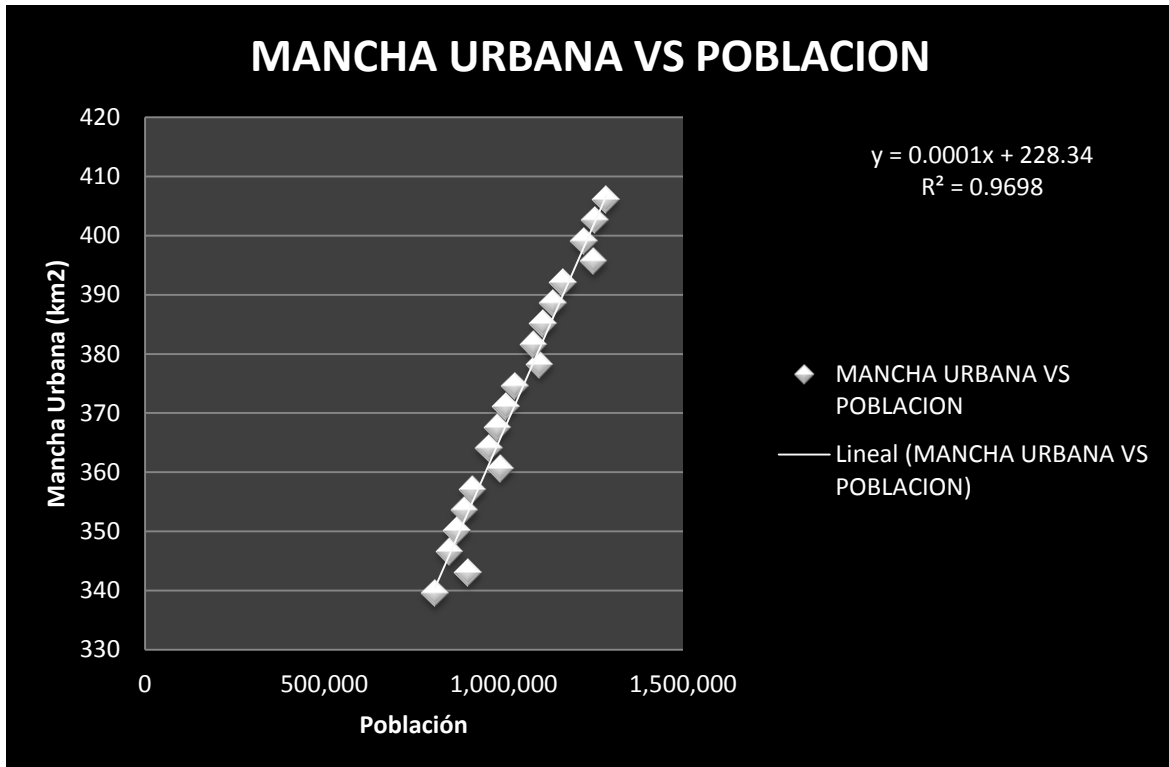
Esto los podemos identificar con mayor facilidad a través del uso del análisis de regresión o de correlación en su caso.

### 4.3.3 RELACIONES DE DEPENDENCIA ENTRE LAS VARIABLES

#### 5) Mancha urbana vs población

Figura 2.7

Curva de regresión entre la mancha urbana y la población.



FUENTE: Elaboración propia

Existe una relación directa positiva entre las variables, esto es, a medida que incrementa el número de pobladores, aumentará de igual forma el área de la mancha urbana.

#### 5) Contaminantes vs densidad poblacional

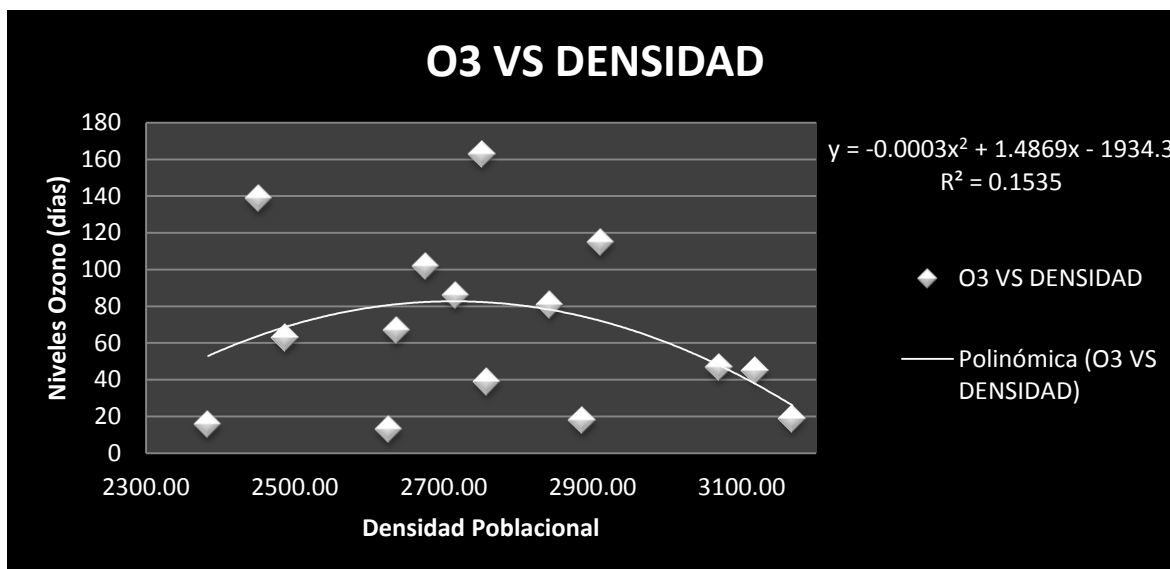
Se analiza la relación entre cada contaminante con la densidad poblacional, esto se hace para identificar aquellos contaminantes que de forma directa varían en función de la densidad y aquellos que además de la densidad dependen de otras variables que no se consideran en esta investigación.



a) Ozono vs densidad poblacional

Figura 2.8

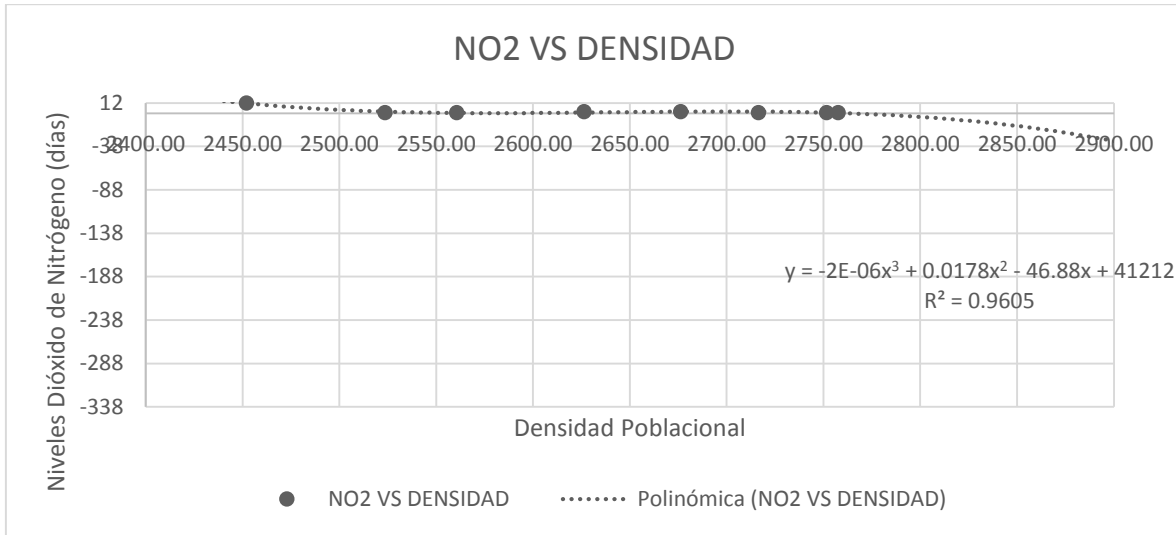
Curvas de regresión entre contaminantes y densidad



FUENTE: Elaboración propia

Este es un ejemplo evidente de la diferencia entre el análisis de regresión y el análisis de correlación. No existe una relación evidente entre las variables, sin embargo lo único que podemos decir con seguridad es que el Ozono de forma individual sólo es explicado en un 15% por la variable densidad.

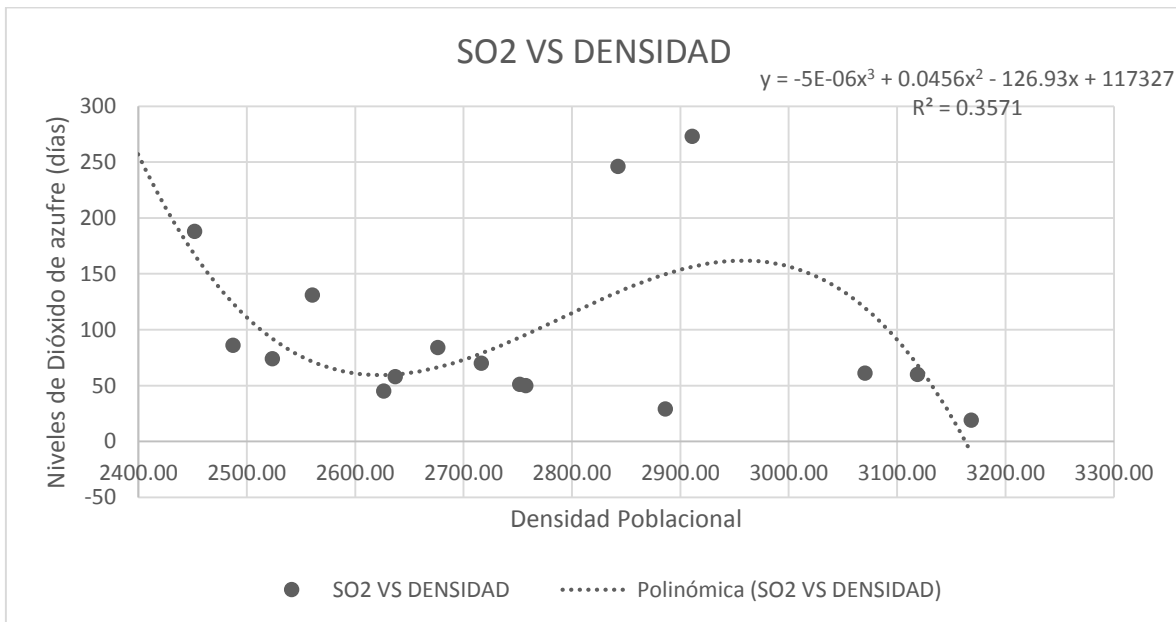
b) Dióxido de nitrógeno vs densidad poblacional



FUENTE: Elaboración propia

En este caso se aprecia una relación evidente, lo cual se confirma con el estadístico  $R^2$  cuyo valor es muy cercano a 1.

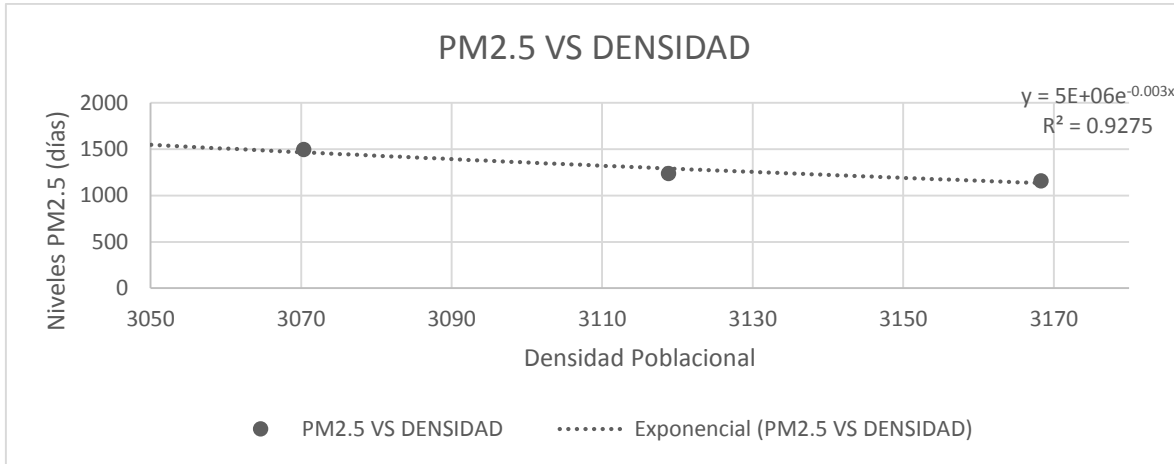
c) Dióxido de azufre vs densidad poblacional



FUENTE: Elaboración propia

Similar al caso del ozono, con la diferencia de que la densidad explica un 35% los niveles mostrados del Dióxido de Azufre presentados en el periodo de estudio.

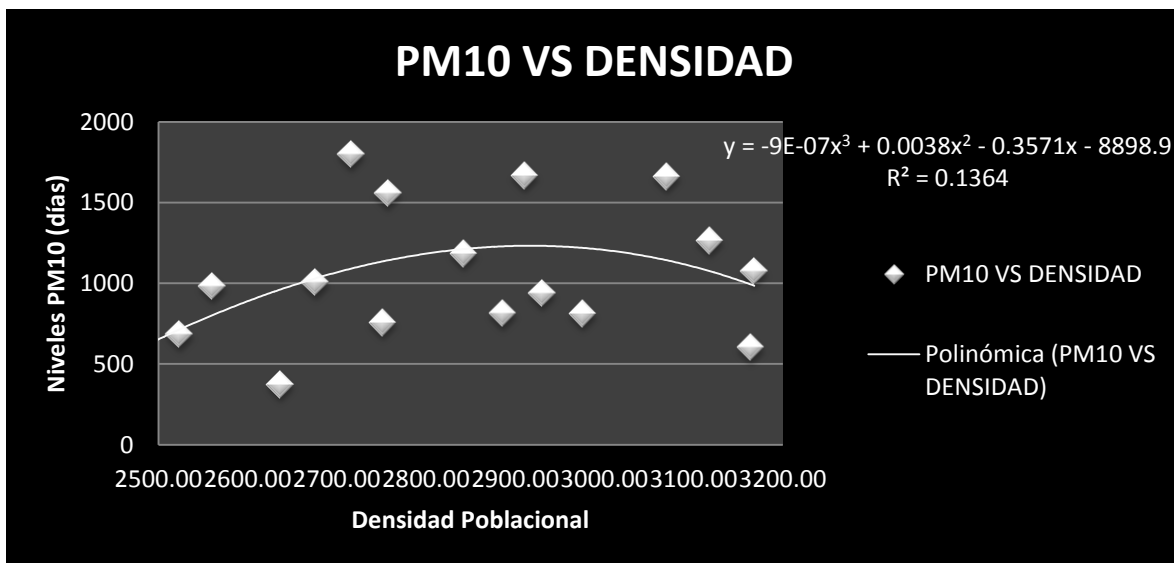
d) PM<sub>2.5</sub> vs densidad poblacional



FUENTE: Elaboración propia

En este caso es fácil encontrar una relación entre las variables ya que sólo se cuenta con tres datos para las partículas PM<sub>2.5</sub>, aun así se nota que el ajuste es casi ideal.

e) PM<sub>10</sub> vs densidad poblacional



FUENTE: Elaboración propia

Este caso como algunos anteriores, donde al realizar un análisis de regresión se concluye que no es posible explicar a la variable dependiente (contaminante) sólo usando la variable independiente (densidad poblacional), sería necesario agregar otro tipo de variables como podrían ser el número de empresas en el área, estadísticas del comportamiento del aire, etc.

#### 5) Enfermedades vs contaminantes

Se analiza la relación entre cada enfermedad con cada contaminante estudiado, esto se hace para identificar aquellas enfermedades que de forma directa varían en función de los contaminantes y aquellas que además de los contaminantes dependen de otras variables que no se consideran en esta investigación.

En las siguientes relaciones, se hace notar que existen variables o fenómenos que no es posible explicar y representar al 100% en la presente investigación, debido a las limitaciones propias de la misma.

El acceso a la información, métodos para recabar información e incluso el acceso a software especializado para la manipulación de dicha información son algunos ejemplos de las limitaciones mencionadas.

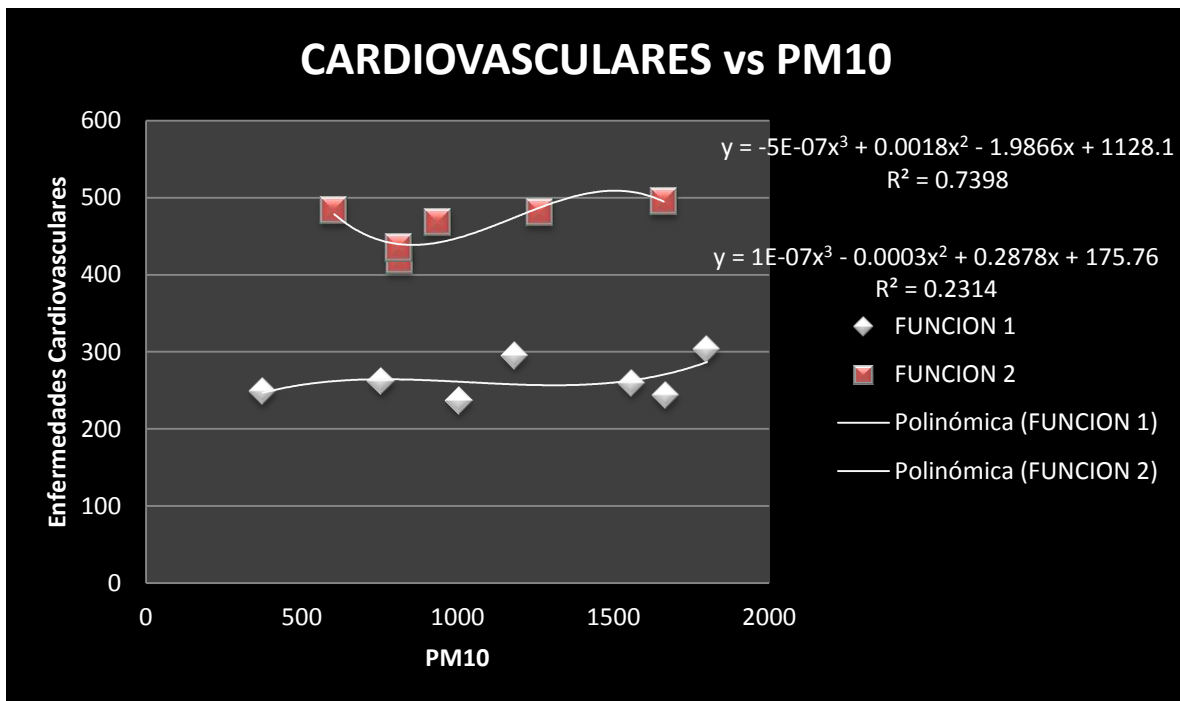
Como se explicó con anterioridad, se agruparon las enfermedades en tres grandes clases que son cardiovasculares, respiratorias y afecciones al sistema nervioso. En este contexto, se estudia la relación solo entre las enfermedades y los contaminantes que se sabe tienen una relación de causalidad según la organización mundial de la salud.

A) Cardiovasculares.

a) Cardiovasculares vs PM<sub>10</sub>

Figura 2.9

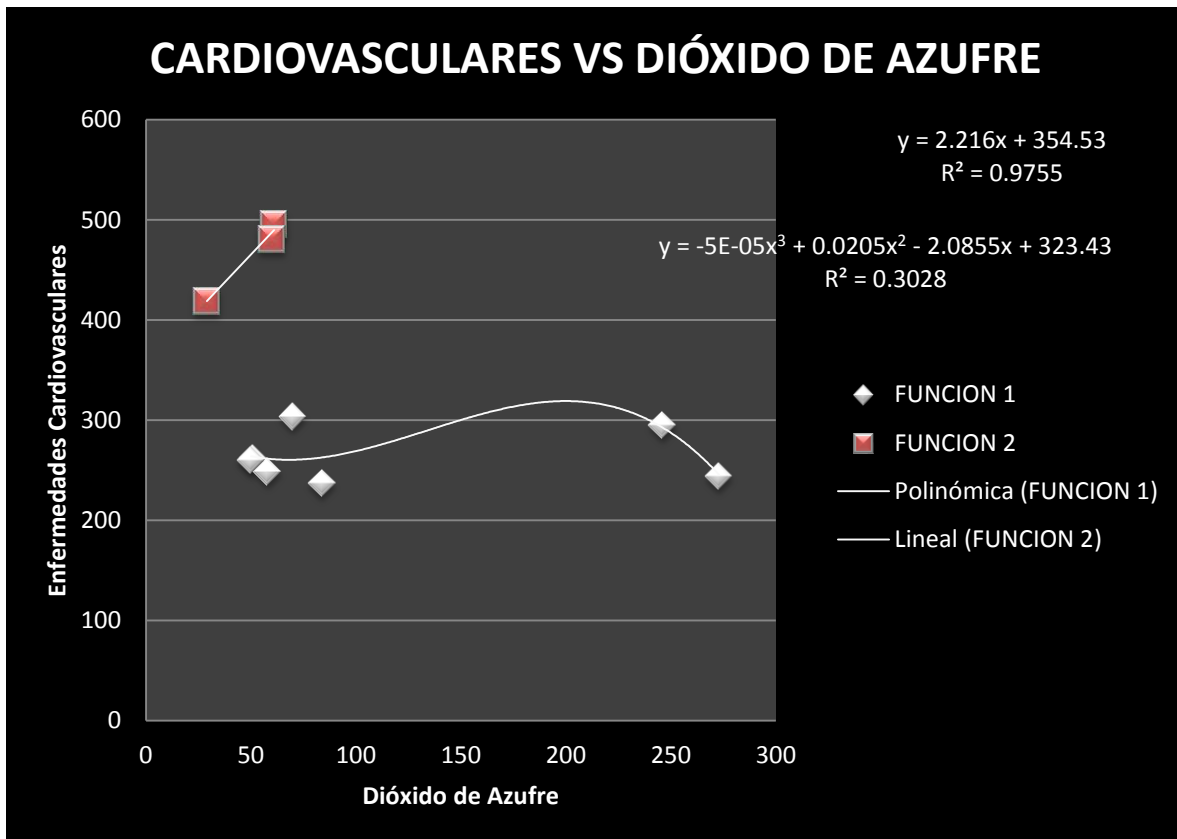
Curvas de regresión entre enfermedades y contaminantes



FUENTE: Elaboración propia

El comportamiento anterior se puede definir o explicar cómo una mezcla de funciones, esto es, para dar sentido al fenómeno observado, es necesario separar en dos clases a la variable dependiente (Enfermedades Cardiovasculares), y el resultado final dependerá de dos funciones en este caso, cada una con pesos 54% la función 1 y 46% la función 2.

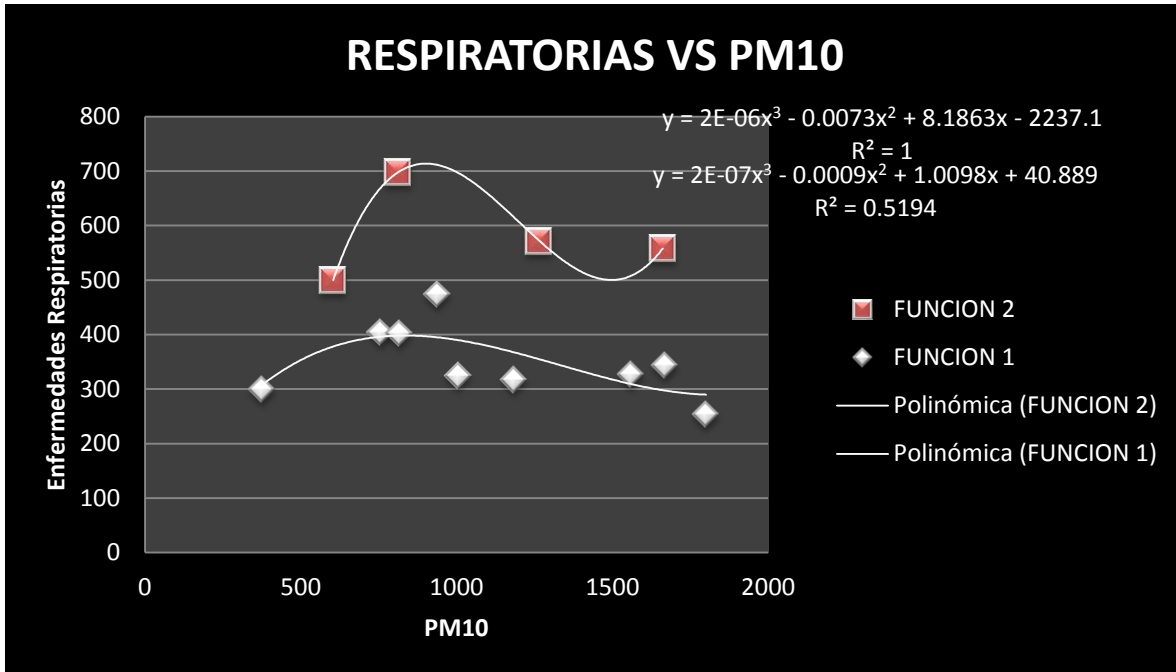
b) Cardiovasculares vs Dióxido de Azufre



FUENTE: Elaboración propia

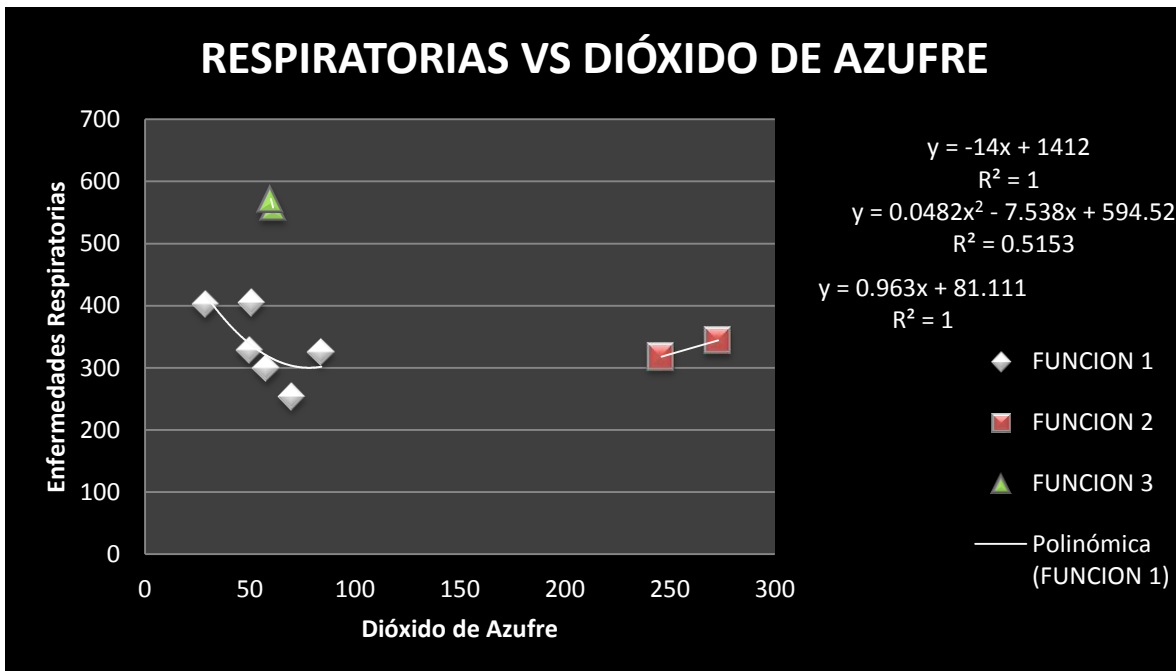
B) Respiratorias

a) Respiratorias vs PM<sub>10</sub>



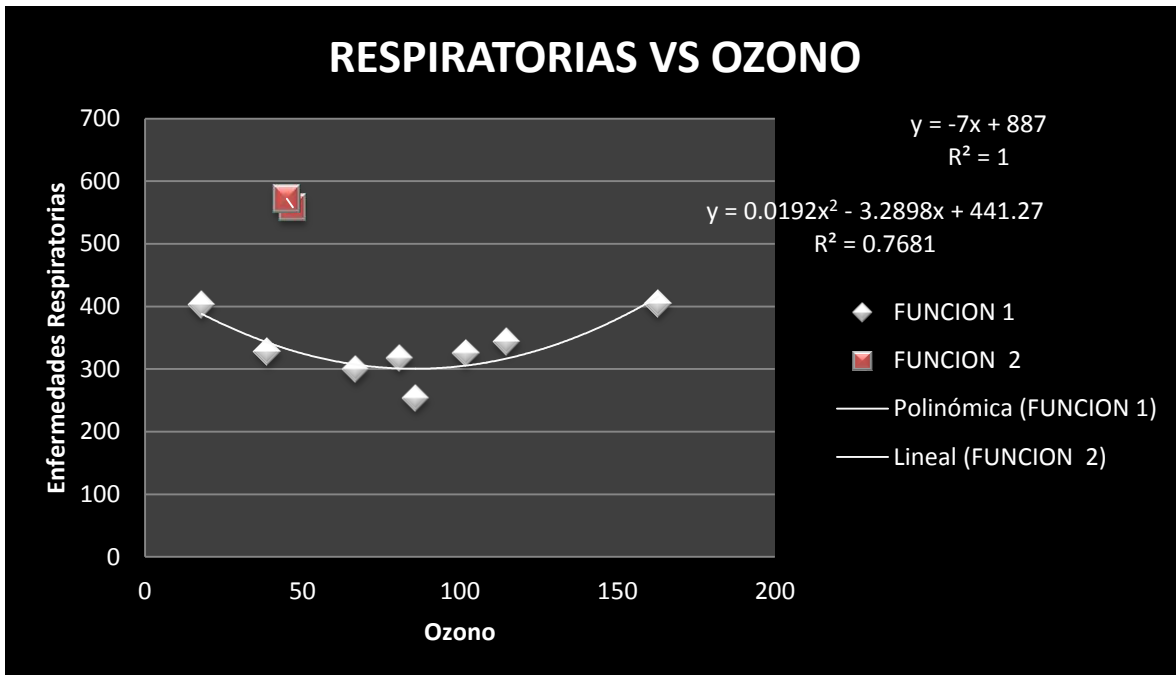
FUENTE: Elaboración propia

b) Respiratorias vs Dióxido de Azufre



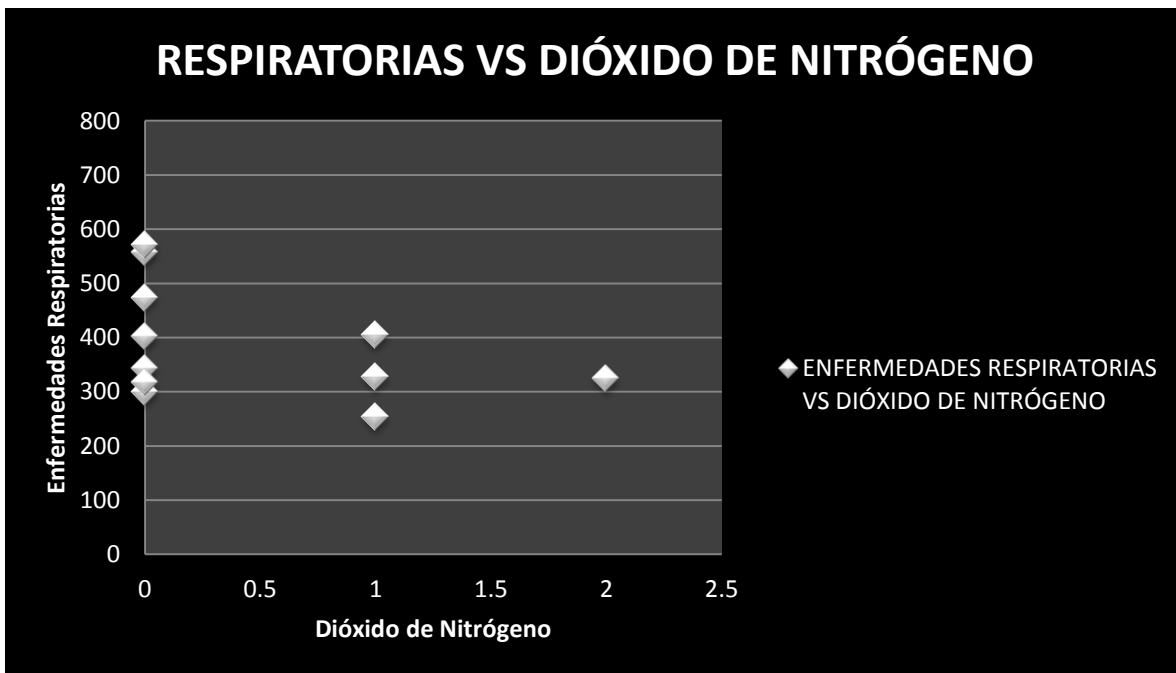
FUENTE: Elaboración propia

c) Respiratorias vs Ozono



FUENTE: Elaboración propia

d) Respiratorias vs Dióxido de Nitrógeno



FUENTE: Elaboración propia

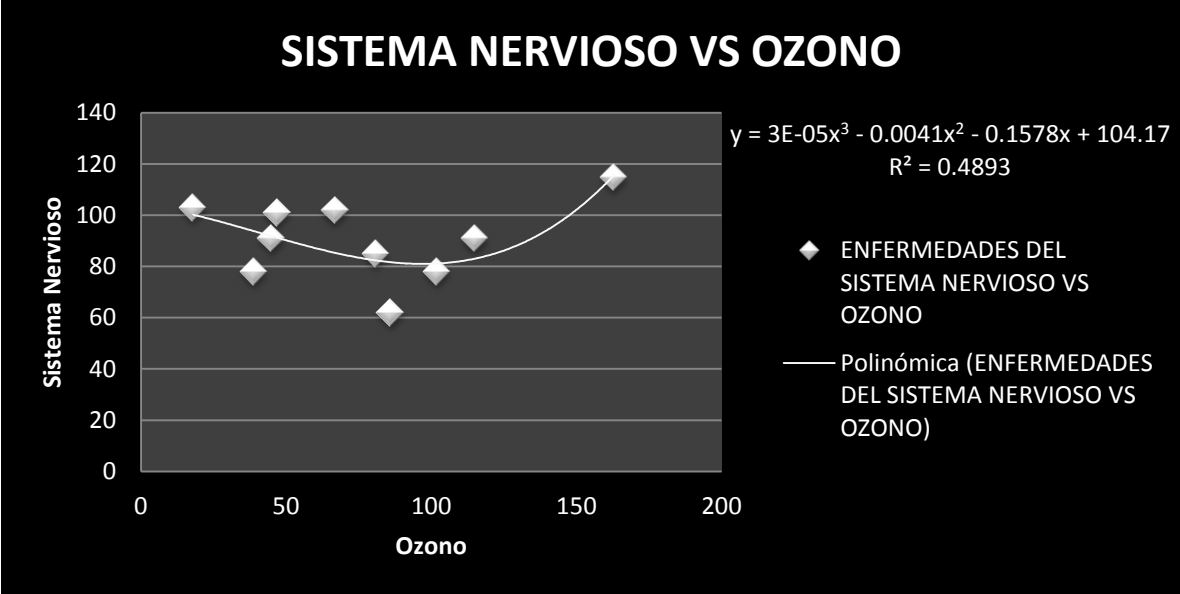
Este caso anterior en particular, presenta una relación puntual, esto es, la variable del contaminante dióxido de nitrógeno puede tomar sólo tres valores (0, 1, 2) por lo que el



número de reportes de enfermedades respiratorias asociados a este contaminante en particular cae en cualquier de estos tres valores, no se tendrán datos en ningún otro valor.

A) Sistema Nervioso

a) Sistema nervioso vs Ozono



FUENTE: Elaboración propia

En resumen, podemos apreciar la posible falta de variables para terminar de explicar las relaciones existentes entre las enfermedades y cada uno de los contaminantes que las originan; sin embargo, es posible hacer evidente esta relación al separar por intervalos el número de reportes de enfermedades y el número de días que se superaron los niveles de cada contaminantes en los municipios objeto de estudio.

#### 4.3.4 DESARROLLO DEL MODELO

El desarrollo del modelo se dividió en dos secciones, siendo la primera la descripción de la aplicación de números pseudo aleatorios para la simulación de cada variable, y la segunda parte que describe la aplicación del método para las relaciones entre las variables (modelo propuesto), siguiendo el algoritmo del método de Montecarlo propuesto por Palisade en 2013.

##### 4.3.4.1 APLICACIÓN SOBRE VARIABLES

a) Población.

Se simula la población total de los cuatro municipios y en específico se aplica el número pseudo aleatorio sobre la tasa de crecimiento poblacional que resulta de:

$$Tasa\ de\ crecimiento = \frac{Población\ Actual - Población\ Anterior}{Población\ Anterior} \quad (4.15)$$

La cual con los datos obtenidos oscila entre 2% y 4% , por lo cual el número pseudo aleatorio se ajusta de la siguiente manera:

$$r_i = ALEATORIO.ENTRE(20,40)/1000 \quad (4.16)$$

Por lo tanto la población simulada está dada por la siguiente ecuación:

$$Población_x = Población_{x-1} * (1 + r_i) \quad (4.17)$$

b) Mancha Urbana.

Se simula la mancha urbana total de los cuatro municipios y en específico se aplica el número pseudo aleatorio sobre el porcentaje del área urbana respecto de la superficie total:

$$Porcentaje\ de\ mancha\ urbana = \frac{Superficie\ Urbana}{Superficie\ Total} \quad (4.18)$$

La cual con los datos obtenidos oscila entre .9% y 1.1%, por lo cual el número pseudo aleatorio se ajusta de la siguiente manera:

$$r_i = ALEATORIO.ENTRE(90,111)/10000 \quad (4.19)$$

Por lo tanto la mancha urbana simulada está dada por la siguiente ecuación:

$$\text{Área Urbana}_x = \text{Área Urbana}_{x-1} * \text{Porcentaje de Área Urbana}_{x-1} \quad (4.20)$$

donde:

$$\text{Porcentaje de Área Urbana}_{x-1} = \text{Porcentaje de Área Urbana}_{x-2} * (1 + r_i) \quad (4.21)$$

c) Densidad Poblacional.

Para esta variable en particular no se realizan simulaciones ya que por definición depende de la población y el área urbana.

$$\text{Densidad Poblacional} = \frac{\text{Simulación de la Población}}{\text{Simulación del Área Urbana}} \quad (4.22)$$

d) Contaminantes.

Al igual que en el caso anterior existe una relación entre cada contaminante y la densidad poblacional, por lo que la aplicación de los números pseudo aleatorios es diferente para cada uno.

1) Ozono

Se simula el nivel de este contaminante total de los cuatro municipios y en específico se aplica el número pseudo aleatorio en relación al valor que tome la densidad poblacional, esto es:

$$\begin{aligned} \text{Nivel de contaminante} = & SI(Y(DENSIDAD > 2,300, DENSIDAD < \\ & 2,500, ALEATORIO( ) < \frac{3}{15}), ALEATORIO.ENTRE(15,140), SI(Y(DENSIDAD > \\ & 2,600, DENSIDAD < 3,000, ALEATORIO( ) > \frac{3}{15}, ALEATORIO( ) < \\ & \frac{12}{15}), ALEATORIO.ENTRE(13,163), SI(Y(DENSIDAD > 3,000, ALEATORIO( ) > \\ & \frac{12}{15}), ALEATORIO.ENTRE(19,47), 0))) \end{aligned} \quad (4.23)$$

1) Dióxido de Nitrógeno

Se simula el nivel de este contaminante total de los cuatro municipios y en específico se aplica el número pseudo aleatorio en relación al valor que tome la densidad poblacional, esto es:

$$\begin{aligned} \text{Nivel de contaminante} = & SI(Y(DENSIDAD > 2,400, DENSIDAD < \\ & 2,500, ALEATORIO(\ ) < \frac{7}{8}), ALEATORIO.ENTRE(10,12), SI(Y(DENSIDAD > \\ & 2,500, ALEATORIO(\ ) > \frac{7}{8}), ALEATORIO.ENTRE(0,2), 0)) \end{aligned} \quad (4.24)$$

### 3) Dióxido de Azufre

Se simula el nivel de este contaminante total de los cuatro municipios y en específico se aplica el número pseudo aleatorio en relación al valor que tome la densidad poblacional, esto es:

$$\begin{aligned} \text{Nivel de contaminante} = & SI(Y(DENSIDAD > 2,400, DENSIDAD < \\ & 2,800, ALEATORIO(\ ) < \frac{10}{16}), ALEATORIO.ENTRE(45,200), SI(Y(DENSIDAD > \\ & 2,800, DENSIDAD < 2,950, ALEATORIO(\ ) > \frac{10}{16}, ALEATORIO(\ ) < \\ & \frac{13}{16}), ALEATORIO.ENTRE(29,273), SI(Y(DENSIDAD > 2.950, ALEATORIO(\ ) > \\ & \frac{13}{16}), ALEATORIO.ENTRE(19,61), 0)) \end{aligned} \quad (4.25)$$

### 4) PM<sub>2.5</sub>

Se simula el nivel de este contaminante total de los cuatro municipios y en específico se aplica el número pseudo aleatorio en relación al valor que tome la densidad poblacional, esto es:

$$\begin{aligned} \text{Nivel de contaminante} = & SI(Y(DENSIDAD > 3,050, DENSIDAD < \\ & 3,090, ALEATORIO(\ ) < \frac{1}{3}), ALEATORIO.ENTRE(1400,1600), SI(Y(DENSIDAD > \\ & 3,090, DENSIDAD < 3,150, ALEATORIO(\ ) > \frac{1}{3}, ALEATORIO(\ ) < \\ & \frac{2}{3}), ALEATORIO.ENTRE(1200,1600), SI(Y(DENSIDAD > 3,150, ALEATORIO(\ ) > \\ & \frac{2}{3}), ALEATORIO.ENTRE(1000,1200), 0)) \end{aligned} \quad (4.26)$$

### 5) PM<sub>10</sub>

Se simula el nivel de este contaminante total de los cuatro municipios y en específico se aplica el número pseudo aleatorio en relación al valor que tome la densidad poblacional, esto es:

$$\begin{aligned} \text{Nivel de contaminante} = & SI(Y(DENSIDAD > 2,500, DENSIDAD < \\ & 3,200, ALEATORIO(\ ) < \frac{9}{16}), ALEATORIO.ENTRE(0,1000), SI(Y(DENSIDAD > \\ & 2,500, ALEATORIO(\ ) > \frac{9}{16}), ALEATORIO.ENTRE(1000,2000), 0)) \end{aligned} \quad (4.27)$$

e) Enfermedades.

Al igual que en el caso anterior existe una relación entre cada enfermedad y el contaminante que la origina, por lo que la aplicación de los números pseudo aleatorios es diferente para cada una. Como ya se explicó cada una de las tres enfermedades tiene asociados diferentes contaminantes.

### 3) Enfermedades Cardiovasculares.

#### 1.1) PM<sub>10</sub>

Se simula el número total de enfermos registrados de los cuatro municipios y en específico se aplica el número pseudo aleatorio en relación al valor que tome el nivel de dicho contaminante, esto es:

$$\begin{aligned} \text{Número de Enfermos} = & SI(Y(NIVEL DE CONTAMINANTE > \\ & 375, NIVEL DE CONTAMINANTE < 1,801, ALEATORIO(\ ) < \\ & \frac{7}{13}), ALEATORIO.ENTRE(237,304), SI(Y(NIVEL DE CONTAMINANTE > \\ & 604, NIVEL DE CONTAMINANTE < 1,662, ALEATORIO(\ ) > \\ & \frac{7}{13}), ALEATORIO.ENTRE(419,496), 0)) \end{aligned} \quad (4.28)$$

#### 1.2) Dióxido de Azufre

Se simula el número total de enfermos registrados de los cuatro municipios y en específico se aplica el número pseudo aleatorio en relación al valor que tome el nivel de dicho contaminante, esto es:

$$\begin{aligned} \text{Número de Enfermos} = & SI(Y(NIVEL DE CONTAMINANTE > \\ & 50, NIVEL DE CONTAMINANTE < 280, ALEATORIO(\ ) < \end{aligned}$$

$$\left. \frac{6}{9} \right), ALEATORIO.ENTRE(200,305), SI \left( Y \left( NIVEL DE CONTAMINANTE > 28, NIVEL DE CONTAMINANTE < 62, ALEATORIO( ) > \frac{6}{9} \right), ALEATORIO.ENTRE(400,500), 0 \right) \quad (4.29)$$

### 3) Enfermedades Respiratorias.

#### 2.1) PM<sub>10</sub>

Se simula el número total de enfermos registrados de los cuatro municipios y en específico se aplica el número pseudo aleatorio en relación al valor que tome el nivel de dicho contaminante, esto es:

$$\begin{aligned} \text{Número de Enfermos} = & SI \left( Y \left( NIVEL DE CONTAMINANTE > 375, NIVEL DE CONTAMINANTE < 1,801, ALEATORIO( ) < \frac{10}{13} \right), ALEATORIO.ENTRE(254,500), SI \left( Y \left( NIVEL DE CONTAMINANTE > 813, NIVEL DE CONTAMINANTE < 1,662, ALEATORIO( ) > \frac{10}{13} \right), ALEATORIO.ENTRE(500,700), 0 \right) \right) \quad (4.30) \end{aligned}$$

#### 2.2) Dióxido de Azufre

Se simula el número total de enfermos registrados de los cuatro municipios y en específico se aplica el número pseudo aleatorio en relación al valor que tome el nivel de dicho contaminante, esto es:

$$\begin{aligned} \text{Número de Enfermos} = & SI \left( Y \left( NIVEL DE CONTAMINANTE > 29, NIVEL DE CONTAMINANTE < 273, ALEATORIO( ) < \frac{8}{10} \right), ALEATORIO.ENTRE(254,400), SI \left( Y \left( NIVEL DE CONTAMINANTE > 0, NIVEL DE CONTAMINANTE < 100, ALEATORIO( ) > \frac{8}{10} \right), ALEATORIO.ENTRE(500,600), 0 \right) \right) \quad (4.31) \end{aligned}$$

#### 2.3) Ozono

Se simula el número total de enfermos registrados de los cuatro municipios y en específico se aplica el número pseudo aleatorio en relación al valor que tome el nivel de dicho contaminante, esto es:

$$\begin{aligned} \text{Número de Enfermos} = & SI(Y(NIVEL DE CONTAMINANTE > \\ & 18, NIVEL DE CONTAMINANTE < 163, ALEATORIO( ) < \\ & \frac{8}{10}), ALEATORIO.ENTRE(200,400), SI(Y(NIVEL DE CONTAMINANTE > \\ & 0, NIVEL DE CONTAMINANTE < 50, ALEATORIO( ) > \\ & \frac{8}{10}), ALEATORIO.ENTRE(500,600), 0)) \end{aligned} \quad (4.32)$$

#### 2.4) Dióxido de Nitrógeno

Se simula el número total de enfermos registrados de los cuatro municipios y en específico se aplica el número pseudo aleatorio en relación al valor que tome el nivel de dicho contaminante, esto es:

$$\begin{aligned} \text{Número de Enfermos} = & SI(Y(NIVEL DE CONTAMINANTE = 0, ALEATORIO( ) < \\ & \frac{7}{11}), ALEATORIO.ENTRE(300,600), SI(Y(NIVEL DE CONTAMINANTE = \\ & 1, ALEATORIO( ) > \frac{7}{11}, ALEATORIO( ) < \\ & \frac{10}{11}), ALEATORIO.ENTRE(200,400), SI(Y(NIVEL DE CONTAMINANTE = \\ & 2, ALEATORIO( ) > \frac{10}{11}), ALEATORIO.ENTRE(300,400), 0)) \end{aligned} \quad (4.33)$$

### 3) Enfermedades Respiratorias.

#### 3.1) Ozono

Se simula el número total de enfermos registrados de los cuatro municipios y en específico se aplica el número pseudo aleatorio en relación al valor que tome el nivel de dicho contaminante, esto es:

$$\begin{aligned} \text{Número de Enfermos} = & SI(Y(NIVEL DE CONTAMINANTE > \\ & 18, NIVEL DE CONTAMINANTE < 115, ALEATORIO( ) < \\ & \frac{9}{10}), ALEATORIO.ENTRE(80,120), SI(Y(NIVEL DE CONTAMINANTE > \\ & 150, NIVEL DE CONTAMINANTE < 160, ALEATORIO( ) > \\ & \frac{9}{10}), ALEATORIO.ENTRE(100,120), 0)) \end{aligned} \quad (4.34)$$

#### 4.3.4.2 APLICACIÓN DEL MODELO

Como se describió en este capítulo en la descripción del **modelo lógico**, nuestra función objetivo o modelo propuesto es:

$$\begin{aligned} & \text{Número de enfermos} = \\ & f(\text{Contaminantes}(f(\text{Densidad Poblacional}(f(\text{Mancha Urbana}, \text{Población})))))) \quad (4.35) \end{aligned}$$

Las variables población y mancha urbana se simulan de forma independiente ya que no se propone dependencia alguna de otra variable. La densidad poblacional como se definió resulta de las simulaciones independientes anteriormente descritas. Los niveles de contaminantes están en función de la densidad como se plantea con anterioridad. Por último el número de enfermos está en función de los niveles de contaminantes.

Todas estas relaciones entre variables se encuentran justificadas en la sección **4.3.3** por lo que solo resta realizar un número significativo de iteraciones e interpretar los resultados.

El nivel de contaminantes se desagrega por cada uno de los contaminantes explicados en el capítulo II Objeto de Estudio, por lo que hasta este punto se obtienen ocho variables, esto con la finalidad de conocer el comportamiento de cada contaminante.

De forma similar a los contaminantes, las enfermedades asociadas a estos contaminantes, se desagregan por cada uno. Por lo que de aquí se desprenden siete variables más para sumar un total de 15 variables.

El objetivo del presente trabajo, es determinar el número de enfermos reportados por cada enfermedad, por lo que al final de la simulación de las 15 variables, se reagrupa el número de enfermos quedando así solamente tres variables, número de enfermos reportados con problemas cardiovasculares, número de enfermos reportados con problemas respiratorios y número de enfermos reportados con problemas del sistema nervioso.

En el caso de los contaminantes, se calcula la proporción de cada contaminante respecto de su enfermedad asociada, esto para determinar la importancia de cada contaminante en cada enfermedad.



Para este caso en particular se eligen 10,000 como el número de iteraciones suficientes para aproximar el comportamiento observado entre 1994 y 2012, y así poder proyectar el número de enfermos reportados para cada enfermedad hasta el año 2020.

#### 4.4 RESULTADOS

Se presentan los resultados para cada una de las variables:

a) Población

Una de las principales variables que sirven como base para el presente trabajo es la población, ya que de ésta se derivan las consecuencias que pueden o no tener los contaminantes.

Por esto se decide simular y proyectar el comportamiento para el periodo 2011 – 2020, ya que la información que se pudo obtener de la página oficial del INEGI abarca hasta el año 2010.

En la siguiente tabla se presentan las proyecciones poblacionales pertenecientes a los municipios de Metepec, San Mateo Atenco, Toluca y Zinacantepec.

**Tabla 4.7.**

**Proyecciones poblacionales municipios estudiados hasta el año 2020.**

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
<b>POBLACIÓN SIMULADA</b>	1,289,560	1,328,265	1,368,047	1,409,161	1,451,374	1,494,882	1,539,647	1,585,611	1,633,165	1,682,251

FUENTE: Elaboración propia

En la tabla anterior, como primer observación, se distingue un comportamiento creciente, como era de esperarse. Dicho comportamiento pertenece a una función regresiva Exponencial, que coincide con el comportamiento teórico del crecimiento poblacional.

## b) Mancha Urbana

Debido a la poca información que se pudo obtener para iniciar y elaborar el presente trabajo con respecto a la Mancha Urbana, surge la inquietud de conocer la evolución de dicha variable.

Por esto, a continuación se muestra la simulación propia del fenómeno.

**Tabla 4.8**

**Proyecciones mancha urbana municipios estudiados hasta el año 2020.**

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
<b>MANCHA URBANA SIMULADA (km<sup>2</sup>)</b>	400	403	407	411	415	419	423	427	431	436

FUENTE: Elaboración propia

No podemos olvidar que existe una relación estrecha entre la variable Población y la variable Mancha Urbana, incluso ésta relación es directa positiva, esto es, con cada incremento en la población habrá un incremento en la mancha urbana.

Teniendo esto en cuenta, podemos concluir y confirmar esta dependencia, ya que como se observó para la variable anterior, la tendencia sería creciente al igual que para la presente.

Para el año 2020, la proporción de Área Urbana con respecto al territorio conformado por los cuatro municipios llegará al 44%.

### c) Densidad Poblacional

Derivado de la relación directa entre la población y la mancha urbana se desprende la densidad poblacional, que intuitivamente nos indica el número de personas que cohabitan en cada kilómetro cuadrado.

Dentro de la presente investigación tiene un impacto importante por ser considerada como variable influyente para la propagación de enfermedades y, también, por considerar que a mayor número de personas en el mismo espacio mayor será la cantidad de personas que se puedan llegar a enfermar.

A continuación se presentan las proyecciones de ésta variable dentro del periodo de estudio:

**Tabla 4.8**

**Proyecciones densidad poblacional municipios estudiados hasta el año 2020.**

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
<b>DENSIDAD POBLACIONAL SIMULADA (hab/km<sup>2</sup>)</b>	<b>3,228</b>	<b>3,293</b>	<b>3,360</b>	<b>3,427</b>	<b>3,497</b>	<b>3,567</b>	<b>3,638</b>	<b>3,712</b>	<b>3,786</b>	<b>3,862</b>

FUENTE: Elaboración propia

No es coincidencia que el comportamiento pronosticado sea creciente, ya que cada uno de los componentes de la variable presentan una evolución similar.

Tenemos que recordar que los anteriores resultados acumulan la información y el desarrollo particular de los cuatro municipios.

#### d) Contaminantes

El principal objetivo del presente es conocer el número de enfermos registrados de cada padecimiento, número que depende del (los) contaminante (s) asociado (s). Por esto, se requiere conocer la proporción en que cada contaminante afecta a cada enfermedad.

Información que se presenta a continuación:

**Tabla 4.8**

**Distribución porcentual de los contaminantes como origen de las enfermedades.**

<b>ENFERMEDADES / CONTAMINANES</b>	<b>OZONO</b>	<b>DIÓXIDO DE AZUFRE</b>	<b>DIÓXIDO DE NITRÓGENO</b>	<b>PM 10</b>
<b>CARDIOVASCULARES</b>		<b>29%</b>		<b>71%</b>
<b>RESPIRATORIAS</b>	<b>14%</b>	<b>3%</b>	<b>57%</b>	<b>27%</b>
<b>SISTEMA NERVIOSO</b>	<b>100%</b>			

FUENTE: Elaboración propia

No todos los contaminantes tienen repercusión en todas las enfermedades. Recordando esto podemos observar y considerar que el principal contaminante que origina enfermedades cardiovasculares son las partículas PM<sub>10</sub>, y es el segundo detonante de las respiratorias. Al respecto cabe aclarar que las partículas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> mantienen un comportamiento y consecuencias a la salud similares. Por esto y aunado a la poca información que se pudo obtener de las partículas PM<sub>2.5</sub>, se decidió agrupar dichos contaminantes.

El dióxido de nitrógeno es el principal causante de enfermedades respiratorias, mientras que el ozono es el único que origina las afecciones al sistema nervioso.

e) Enfermedades

Siendo esta la motivación de la investigación realizada, y siguiendo el Método descrito en capítulos anteriores, se muestran las proyecciones para el Número de Enfermos por cada una de las tres afecciones:

**Tabla 4.8**

**Proyecciones del número de enfermos en los municipios estudiados hasta el año 2020.**

NÚMERO DE ENFERMOS								
AÑO	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
<b>CARDIOVASCULARES</b>	420	416	421	421	418	416	420	420
<b>RESPIRATORIAS</b>	628	628	629	628	626	628	631	629
<b>SISTEMA NERVIOSO</b>	100	100	99	100	100	99	100	100

FUENTE: Elaboración propia

Es evidente que para las tres enfermedades la tendencia es constante, no crece ni decrece a través del tiempo.

Por lo que se puede inferir que los contaminantes no son el único factor que detonan a éstas enfermedades, esto es, al modelo propuesto se deben de incorporar más variables que abarquen distintos aspectos sociales (económicos, geográficos, climáticos, etc.), con a finalidad de obtener la mayor cantidad de información posible.

Siguiendo con la metodología del método de simulación Montecarlo, se presentan las distribuciones asociadas con cada grupo de enfermedades:

### 1) Cardiovasculares



FUENTE: Elaboración propia

La función de distribución ajustada a ésta variable es Johnson SB, caracterizada por la siguiente expresión:

$$f(x) = \frac{\delta}{\lambda\sqrt{2\pi}z(1-z)} e^{-\frac{1}{2}\left(\gamma + \delta \ln \frac{z}{1-z}\right)^2}$$

$$\text{donde: } z = \frac{x - \xi}{\lambda}$$

Que para el caso particular del ajuste tiene los siguientes parámetros:

$$\gamma = -0.4388 \quad \delta = 0.05806$$

$$\lambda = 4.3261 \quad \xi = 416.12$$

### Estadística descriptiva

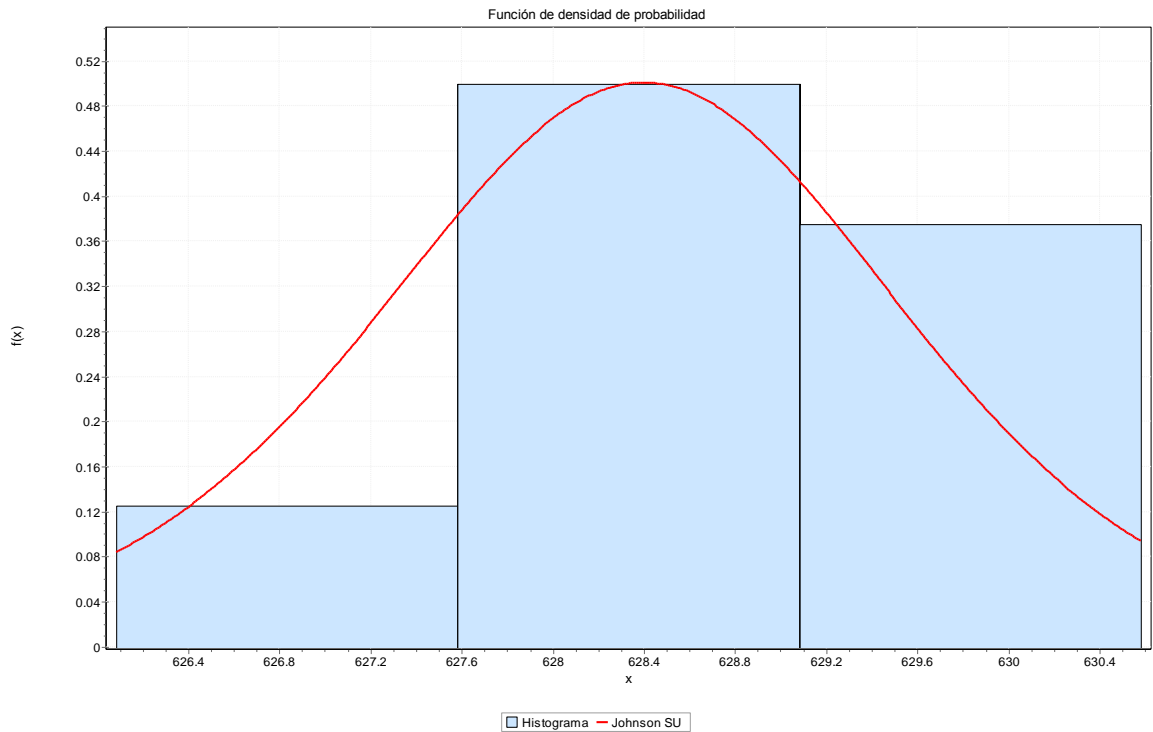
Estadística	Valor	Percentil	Valor
Tamaño de la muestra	10,000	Min	416.06
Rango	4.8828	5%	416.06
Media	419.01	10%	416.06
Varianza	3.7541	25% (Q1)	416.83
Desviación estándar	1.9376	50% (Mediana)	419.88
Coefficiente de variación	0.00462	75% (Q3)	420.57
Error estándar	0.68503	90%	420.95
Asimetría	-0.71705	95%	420.95
Curtosis	-1.4111	Max	420.95

Al ajuste anterior se le aplican las pruebas de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov y Anderson Darling:

<b>Johnson SB</b>					
Kolmogorov-Smirnov					
Tamaño de la muestra	10,000				
Estadística	0.11952				
Valor P	0.99885				
Rango	1				
a	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	0.35831	0.40962	0.45427	0.50654	0.54179
¿Rechazar?	No	No	No	No	No
Anderson-Darling					
Tamaño de la muestra	10,000				
Estadística	0.16708				
Rango	1				
A	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	1.3749	1.9286	2.5018	3.2892	3.9074
¿Rechazar?	No	No	No	No	No



## 2) Respiratorias



FUENTE: Elaboración propia

La función de distribución ajustada a ésta variable es Johnson SU, caracterizada por la siguiente expresión:

$$f(x) = \frac{\delta}{\lambda\sqrt{2\pi}\sqrt{z^2+1}} e^{-\frac{1}{2}(\gamma+\delta \ln(z+\sqrt{z^2+1}))^2}$$

$$\text{donde: } z = \frac{x - \varepsilon}{\lambda}$$

Que para el caso particular del ajuste tiene los siguientes parámetros:

$$\gamma=0.07058 \quad \delta=2.2834$$

$$\lambda=2.7252 \quad \xi=628.47$$

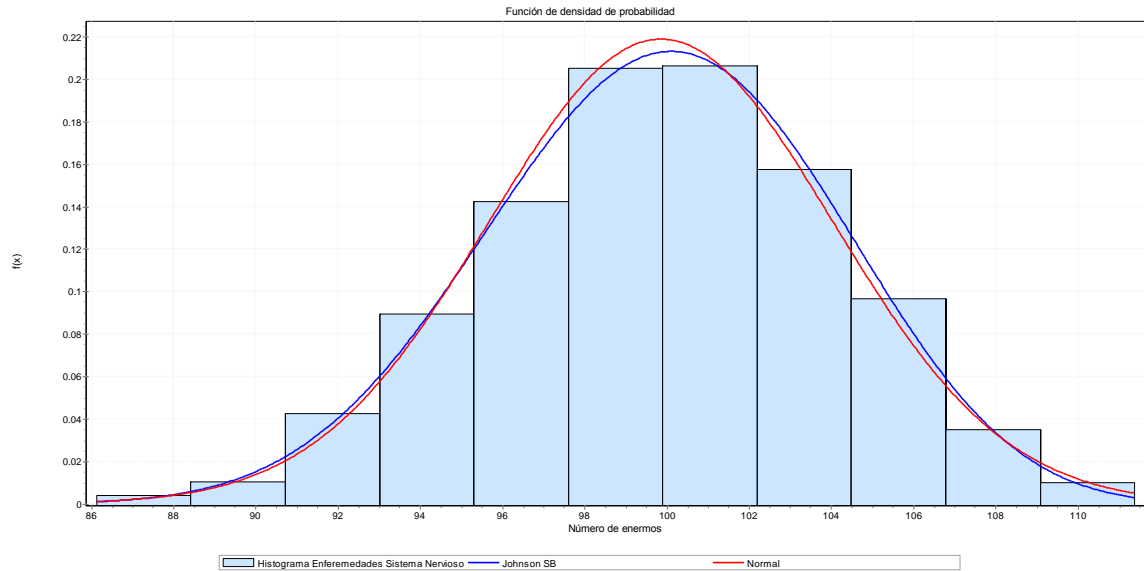
## Estadística descriptiva

Estadística	Valor	Percentil	Valor
Tamaño de la muestra	10,000	Min	626.08
Rango	4.4965	5%	626.08
Media	628.38	10%	626.08
Varianza	1.738	25% (Q1)	627.82
Desviación estándar	1.3183	50% (Mediana)	628.13
Coefficiente de variación	0.0021	75% (Q3)	629.25
Error estándar	0.4661	90%	630.58
Asimetría	-0.04933	95%	630.58
Curtosis	1.0477	Max	630.58

Al ajuste anterior se le aplican las pruebas de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov y Anderson Darling:

<b>Johnson SB</b>					
Kolmogorov-Smirnov					
Tamaño de la muestra	10,000				
Estadística	0.19855				
Valor P	0.85421				
Rango	3				
$\alpha$	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	0.35831	0.40962	0.45427	0.50654	0.54179
¿Rechazar?	No	No	No	No	No
Anderson-Darling					
Tamaño de la muestra	10,000				
Estadística	0.28284				
Rango	5				
$\alpha$	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	1.3749	1.9286	2.5018	3.2892	3.9074
¿Rechazar?	No	No	No	No	No

### 3) Sistema Nervioso



FUENTE: Elaboración propia

La función de distribución ajustada a ésta variable es Johnson SB, caracterizada por la siguiente expresión:

$$f(x) = \frac{\delta}{\lambda\sqrt{2\pi z}(1-z)} e^{-\frac{1}{2}(\gamma + \delta \ln \frac{z}{1-z})^2}$$

$$\text{donde: } z = \frac{x - \varepsilon}{\lambda}$$

Que para el caso particular del ajuste tiene los siguientes parámetros:

$$\gamma = -0.62027 \quad \delta = 2.8857$$

$$\lambda = 50.219 \quad \xi = 72.14$$

Es posible apreciar que la distribución Johnson SB es una transformación de la distribución Normal, sin embargo por el contexto del fenómeno se prefiere la primera distribución.

## Estadística descriptiva

Estadística	Valor	Percentil	Valor
Tamaño de la muestra	1791	Min	86.125
Rango	25.25	5%	92.75
Media	99.862	10%	94.5
Varianza	17.514	25% (Q1)	97
Desviación estándar	4.1849	50% (Mediana)	100
Coefficiente de variación	0.04191	75% (Q3)	102.75
Error estándar	0.09889	90%	105.35
Asimetría	-0.0973	95%	106.67
Curtosis	-0.18701	Max	111.38

Al ajuste anterior se le aplican las pruebas de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov y Anderson Darling:

<b>Johnson SB</b>					
Kolmogorov-Smirnov					
Tamaño de la muestra	10,000				
Estadística	0.01252				
Valor P	0.9383				
Rango	1				
a	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	0.02535	0.0289	0.03209	0.03587	0.03849
¿Rechazar?	No	No	No	No	No
Anderson-Darling					
Tamaño de la muestra	10,000				
Estadística	0.20739				
Rango	1				
a	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	1.3749	1.9286	2.5018	3.2892	3.9074
¿Rechazar?	No	No	No	No	No

## CONCLUSIONES.

En este trabajo se puede decir que los objetivos que se plantearon, comenzando con el objetivo general, se cumple en su totalidad ya que en una primera etapa se pudo conocer el comportamiento y evolución de los contaminantes del aire en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, y posteriormente se pudo pronosticar los siguientes años.

El siguiente objetivo, el cual consistía en conocer los componentes de la contaminación del aire y sus efectos en la salud, además de la situación actual de ésta a nivel mundial, nacional, estatal junto a la normativa que la controla, se cumple de manera total, ya que gracias a la información a la cual se tuvo acceso se pudo conocer los efectos en la salud, y por el otro lado al realizar investigación se pudo conocer los componentes de la contaminación aérea.

El siguiente objetivo particular, que dice: “Dar a conocer y describir la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, su importancia en la economía estatal y la situación de la calidad del aire actual”, se cumple de manera total al poder detallar la ZMVT, dinámica poblacional y económica.

Por último, se planteó describir a los componentes de la contaminación del aire de forma individual al principio y así construir un modelo para simular su comportamiento hasta el año 2020. Objetivo que se cumplió satisfactoriamente ya que se logró construir un modelo que describe de manera parcial la contaminación aérea.

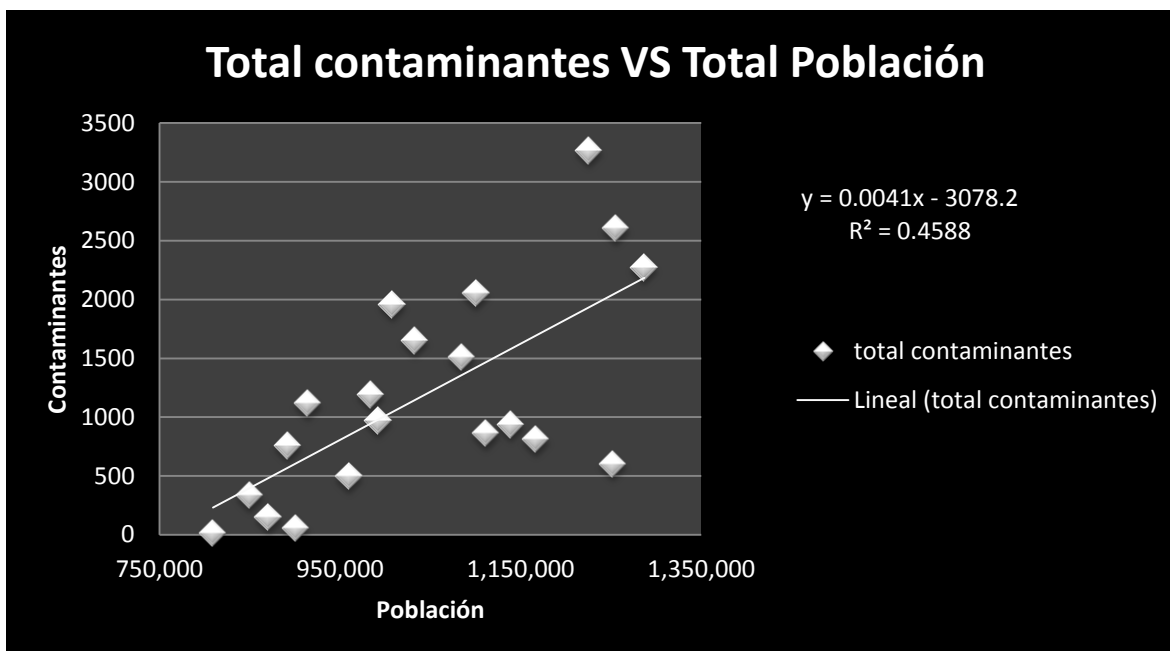
Con respecto a las hipótesis planteadas, se obtienen las siguientes conclusiones. Con la hipótesis en la que se afirma que:

- **Existe una relación directa entre la calidad del aire y el crecimiento poblacional en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.**

Como se muestra en la siguiente gráfica existe una relación directa entre en total de los contaminantes y el crecimiento poblacional, en particular esta relación es lineal positiva, por lo que se cumple la hipótesis propuesta.

**Figura C.1**

**Curva de regresión entre los contaminantes y la población.**



FUENTE: Elaboración propia

Como se ha mencionado anteriormente, existen limitantes al momento de realizar una investigación de esta magnitud, en específico falta agregar variables al modelo, que por falta de acceso a información no se consideraron. Agregando estas variables, es muy probable terminar de explicar la relación propuesta en nuestra primera hipótesis, ya que en el modelo actual, sólo se logra explicar un 45% de la relación.

**Tabla C.1**

**Coefficiente de Correlación.**

	<i>CONTAMINANTES</i>	<i>POBLACION</i>
<i>CONTAMINANTES</i>	1	
<i>POBLACION</i>	0.31149387	1

FUENTE: Elaboración propia

Se puede considerar lógica una dependencia lineal positiva entre estos dos fenómenos, ya que por un lado crece la población y con ello la actividad humana como puede ser el desarrollo industrial, aumento de parque vehicular, mayor desplazamiento entre Estados y/o Municipios, etc. que a su vez repercuten en un aumento en la emisión directa de los contaminantes estudiados y posteriormente su repercusión en la salud de las personas.

La mala calidad del aire tiene diversos efectos en la salud de las personas. Puede provocar: ausentismo laboral y escolar por efectos de la exacerbación de síntomas en asmáticos, enfermedades pulmonares, cardiovasculares y respiratorias, mortalidad prematura y disminución de la función pulmonar.

- En México, la mala calidad del aire ocasiona más del doble de la mortalidad que la causada por las enfermedades diarreicas y el consumo de agua no potable (Stevens, et al. 2008).
- La OMS calculó que en 2004 murieron 1.5 millones de personas por cáncer de pulmón, enfermedades cardiopulmonares e infecciones respiratorias relacionadas con la exposición a la contaminación atmosférica en zonas urbanas.
- Si se redujeran las concentraciones de PM<sub>10</sub> a 20 microgramos por metro cúbico, (que es el valor recomendado por la OMS para proteger la salud de la población), se reduciría en 15% la mortalidad relacionada con la contaminación del aire (OMS, 2006).

Continuando con la segunda hipótesis en la que se afirma que:

- **El número de enfermedades cardiovasculares, de las vías respiratorias y afecciones al sistema nervioso aumentará debido a la mala calidad del aire en los municipios de Toluca, Metepec, San Mateo Atenco y Zinacantepec.**

Como se muestra en la siguiente tabla el número de enfermos promedio simulado por padecimiento es mayor al promedio observado en el periodo 2000-2012, por lo que se cumple la hipótesis propuesta.

**Tabla C.2**

**Comparativo entre datos observados y datos simulados.**

<b>ENFERMEDADES</b>	<b>PROMEDIO DATOS OBSERVADOS</b>	<b>PROMEDIO SIMULADO</b>
<b>CARDIOVASCULARES</b>	<b>356</b>	<b>370</b>
<b>RESPIRATORIAS</b>	<b>421</b>	<b>614</b>
<b>SISTEMA NERVIOSO</b>	<b>92</b>	<b>100</b>

FUENTE: Elaboración propia

Esta hipótesis está ligada a la anterior, probando que existe un crecimiento en la mala calidad del aire, y con el resultado obtenido del crecimiento en el número de enfermos promedio, se concluye que el número de enfermos en los municipios de Metepec, San Mateo Atenco, Toluca y Zinacantepec, aumentará debido a la mala calidad del aire.

Esta conclusión tiene repercusiones en distintos sectores de la sociedad, particularmente en el ramo de los seguros tiene un impacto negativo para las personas y para las aseguradoras, ya que al aumentar el número de enfermos



aumentan las reclamaciones en los seguros de gastos médicos, así mismo, los precios de los seguros aumentan debido a una mayor exposición al riesgo.

Se propone una implementación de programas sociales para cuidar la calidad del aire, así como reformas ambientales para disminuir los impactos de la contaminación en el aire, acciones que el Gobierno ya está llevando a cabo. Por ejemplo, el programa “Hoy no circula” que puede tener dos vertientes, ya que el objetivo es cuidar el medio ambiente pero puede llevar a que la población compre más vehículos con lo que se pierde el objetivo principal. Este programa afecta económicamente al sector más vulnerable de la sociedad.

Por otro lado se están llevando a cabo estudios para la implementación de un seguro de responsabilidad civil ambiental, con las siguientes complicaciones:

Según (Pearce, 5) hay siete condiciones que deben cumplirse para que un riesgo sea asegurable. En caso de que alguna de ellas estuviese ausente, no hay razones para considerar que el riesgo es no asegurable, el problema surge cuando simultáneamente, fallan varias. Estas condiciones son: distribución del riesgo; pérdidas claras, definibles y medibles; información sobre la probabilidad y magnitud del evento; conocimiento de la frecuencia de pérdida; no riesgo moral; no selección adversa y capacidad de hacer valer el contrato.

Los riesgos de daño ambiental no cumplen varias de estas características. Expliquemos lo anterior:

- Dado que una característica del medio ambiente es ser un bien público, la distribución del riesgo entre diversos individuos es imposible, ya que sus riesgos están correlacionados, es decir, si pierde uno, pierden todos.
- La falta de datos e información previa, hacen difícil el cálculo de la probabilidad y magnitud de un evento determinado. Los datos históricos sirven para conocer la distribución probabilística de los eventos, si se pudiese conocer tal distribución, sólo restaría calcular la probabilidad de que ocurra el evento en cuestión, sin embargo, aun si se conociese la

probabilidad de ocurrencia del evento asegurado, la falla en la valuación de su magnitud es otra causa por la que las aseguradoras deciden no ofrecer el servicio.

- La mayoría de las veces, las pérdidas derivadas de este tipo de eventos no son claras ni cuantificables, esto como consecuencia de que no sólo deben incluirse los valores de uso de lo dañado, sino también sus valores de no uso. Aquí es donde el desarrollo y aplicación en México de las técnicas de valoración económica tendrán un impacto importante, ya que contribuirán a la disminución de la incertidumbre, sin embargo, la inclusión de este tipo de técnicas es algo que las aseguradoras no ven con buenos ojos, ya que podrían elevar los montos de indemnización.
- El otro elemento que hace falta en México es una ley de responsabilidad por daño ambiental que obligue a las industrias con riesgo de dañar el medio ambiente a asegurarse. Sin embargo, este tipo de leyes no garantizan que la situación mejore, de hecho, hay varios temas de discusión alrededor de la conveniencia de la promulgación de leyes de responsabilidad ambiental. Estos se analizan con mayor profundidad en un apartado posterior.
- Hay otras dos características que, aunque no se cumplen, son controlables: el riesgo moral y la selección adversa. Las auditorías periódicas son una forma eficaz de disminuir ambos riesgos. Básicamente, ambos dilemas se derivan de la falta de información.
- Finalmente, hay dos tipos de obstáculos que tienen que ver con las características de algunos daños ambientales: varios son paulatinos o difusos. Son paulatinos cuando los daños no se generan rápidamente, sino a través del tiempo. Son difusos cuando los alcances espaciales son amplios y no puede definirse el límite espacial.

Aún con los inconvenientes que implica llevar a la práctica los seguros y las fianzas ambientales, en países europeos y en Estados Unidos de América ya se utilizan ampliamente. Sin embargo, no están libres de inconvenientes; las dificultades permanecen.

## Anexo I

Absorción: introducción o disminución de una sustancia dentro o a través de otra.

Advención: transporte horizontal de una propiedad de la atmósfera (temperatura, humedad, concentración de contaminantes, etc.) por la acción del viento.

Aire: capa delgada de gases que cubre la tierra y está conformado por nitrógeno, oxígeno y otros gases como el dióxido de carbono, vapor de agua y gases inertes.

Atmósfera libre: capa de gases que rodea la tierra que sirve como medio de protección de la radiación que proviene del espacio exterior. Se divide en capas, dependiendo de la altura a las cuales se encuentran, siendo éstas: troposfera, estratosfera, mesosfera y termosfera.

Atmosfera de interiores: conjunto de gases que son propios de una edificación.

Biosfera: conjunto de todas las zonas de nuestro planeta (hidrosfera, litosfera y atmósfera) donde viven los organismos, o seres vivos, los cuales presentan una estructura con determinadas relaciones entre sus componentes. Se considera como un mosaico de ecosistemas.

Calentamiento global: alteración (aumento) de la temperatura del planeta, producto de la intensa actividad humana en los últimos siglos. El incremento de la temperatura puede modificar la composición de los pisos térmicos, alterar las estaciones de lluvia y aumentar el nivel del mar.

Cambio climático: alteraciones de los ciclos climáticos naturales del planeta por efecto de la actividad humana, especialmente las emisiones masivas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera provocadas por las actividades industriales intensivas y la quema masiva de combustibles fósiles.

Capa de Ozono: acumulación de Ozono (O<sub>3</sub>) situada entre 10 y 15 kilómetros de altura, formada por la acción de los rayos solares sobre las moléculas de oxígeno

(O<sub>2</sub>). Esta zona, que en realidad no es una capa, sino un área en que hay mayor presencia de ozono, filtra la mayoría de los rayos ultravioletas que integran el espectro de la luz solar. Hay elementos que descomponen el ozono de la capa, como los clorofluorocarbonos (CFC) usados en refrigeración, aerosoles enlatados y otros procesos, los cuales serían responsables del adelgazamiento de la capa en todo el planeta, fenómeno que es más álgido en el Polo Sur.

Catalizador: cuerpo capaz de producir la transformación catalítica. Tiene como misión disminuir los elementos polucionantes contenidos en los gases de escape de un vehículo mediante la técnica de catálisis.

Caudal de emisión: masa de contaminante transferida a la atmósfera por unidad de tiempo.

Caudal de inmisión: masa de contaminantes transferida al receptor por unidad de tiempo.

Clorofluorocarbonos (CFC): sustancias químicas utilizadas para producir aerosoles, espuma plástica, equipos refrigerantes y chips de computadores. Son la causa principal del adelgazamiento del ozono atmosférico y también contribuyen al efecto invernadero.

Compuestos orgánicos volátiles (COV): compuestos químicos basados en el carbono que se emiten a la atmósfera por fuentes naturales o como consecuencia de actividades humanas (como la utilización de disolventes, pinturas o barnices, el almacenamiento de combustibles de transporte y su utilización en las gasolineras, los gases de escape de los vehículos).

Concentración: corresponde a la proporción de contaminante presente en un medio, generalmente expresada en unidades de masa (como micro o nano gramos), fraccionando a una unidad de masa mayor (como gramos o kilogramos ( $\mu\text{g}/\text{k}$  o  $\text{ng}/\text{g}$ )) o a una de volumen (como centímetros o metros cúbicos ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$  o  $\text{ng}/\text{cc}$ )). En ocasiones, la concentración se expresa directamente en una fracción

(como Partes por millón (ppm)). El nivel de daño que causa un contaminante depende en buena medida de su nivel de concentración.

Concentración de la emisión: concentración de contaminantes del aire en una emisión en sus puntos de descarga.

Concentración máxima admisible: cantidad límite de contaminantes que se pueden arrojar a un río o a la atmósfera sin que se llegue a poner en peligro la salud o existencia del hombre, animales o plantas.

Contaminación: cambio perjudicial en las características químicas, físicas y biológicas de un ambiente o entorno. Afecta o puede afectar la vida de los organismos y en especial la humana.

Contaminación atmosférica: presencia en el ambiente de cualquier sustancia química, objetos, partículas, o microorganismos que alteran la calidad ambiental y la posibilidad de vida. Las causas de la contaminación pueden ser naturales o producidas por el hombre. Se debe principalmente a las fuentes de combustible fósil y la emisión de partículas y gases industriales. El problema de la contaminación atmosférica hace relación a la densidad de partículas o gases y a la capacidad de dispersión de las mismas, teniendo en cuenta la formación de lluvia ácida y sus posibles efectos sobre los ecosistemas.

Contaminante: todo elemento, compuesto, sustancia, derivado químico o biológico, energía, radiación, vibración, ruido, o una combinación de ellos, cuya presencia en el ambiente, en ciertos niveles, concentraciones o períodos de tiempo, pueda constituir un riesgo a la salud de las personas, a la calidad de vida de la población, a la preservación de la naturaleza o a la conservación del patrimonio ambiental.

Difusión: movimiento de un compuesto a través de una mezcla, provocado por la existencia de un gradiente de concentración del compuesto.

Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>): Combustión del carbón que contiene azufre. Es el causante de la lluvia ácida.

Efecto invernadero: mecanismo mediante el cual la presencia de ciertos gases en la atmósfera hace que se produzca un aumento adicional de la temperatura de la Tierra.

Emisión: totalidad de sustancias que escapan a la atmósfera después de abandonar las fuentes de donde proceden y pasan a formar parte del aire adyacente. Ejemplo: gases de escape de automóviles, humo de chimeneas y vapores de industrias. Una vez producida la emisión de los compuestos, estos se distribuyen por toda la atmósfera a través de procesos de difusión. Estos procesos dependen de:

- 1) Factores específicos del contaminante. Ejemplo: temperatura, velocidad de salida.
- 2) Factores meteorológicos: velocidad del viento, humedad.

Estabilidad: se refiere a la propiedad de un sistema de disminuir la magnitud de las perturbaciones en su interior para volver a un estado estacionario. En la atmósfera se refiere en particular a la estratificación de la atmósfera debido al equilibrio hidrostático. En términos simples, cuando el aire frío (más pesado) se ubica por debajo del aire más caliente, se habla de una atmósfera estable, pues los movimientos verticales se encuentran inhibidos. Si ocurre lo contrario, es decir, que el aire frío se ubique sobre el aire caliente, la atmósfera tiende a reducir este desequilibrio trasladando el aire frío hacia abajo y elevando el aire más caliente.

Estratosfera: capa atmosférica que alcanza una altura aproximada de 50 kilómetros. Tiene una escasa concentración de vapor de agua, y la mayor concentración de Dióxido de Carbono de las capas de la atmósfera. En esta franja, la temperatura aumenta con la altura, debido a que el Ozono absorbe las radiaciones ultravioletas e infrarrojas procedentes del sol.

Fuente de Contaminación Atmosférica Móvil: toda aquella fuente que tiene un elemento propulsor propio (motor), es capaz de desplazarse entre distintos puntos pudiendo utilizar las vías públicas y que genera contaminantes.

Fuente Estacionaria o Fuente Fija: toda fuente diseñada para operar en lugar fijo, cuyas emisiones se descargan a través de un ducto o chimenea. Se incluyen aquellas montadas sobre vehículos transportables para facilitar su desplazamiento.

Gases de Efecto Invernadero (GEI): gases que producen el Efecto Invernadero (vapor de agua – H<sub>2</sub>O, dióxido de carbono – CO<sub>2</sub>). Están presentes en la atmósfera, algunos de ellos, en forma natural.

Gases tóxicos: pueden producir, por inhalación, efectos agudos o crónicos o irritantes, e incluso la muerte. Los gases tóxicos pueden, además, ser inflamables, corrosivos o comburentes.

Hidrocarburos: Los hidrocarburos son compuestos orgánicos formados por átomos de carbono e hidrógeno.

Humedad: vapor de agua contenido en la atmósfera. También se usa para describir el total de agua en estado líquido, sólido o como vapor contenido en un volumen específico de aire.

Industria química: Es la industria que procesa la materia prima. Pretende elaborar un producto de buena calidad con costos bajos y trata de hacer el menos daño posible al medio ambiente.

Inmisión: permanencia de los contaminantes, de manera temporal o continua, en la atmósfera, sobretodo en el nivel más cercano al suelo. Es decir, se pueden definir los valores de inmisión como las concentraciones ambientales de los contaminantes.

Inversión térmica: se define como un aumento de la temperatura con la altitud en una capa de la atmósfera. La inversión térmica con relación a contaminantes: es

un fenómeno físico que se produce por la acumulación de contaminantes en las capas inferiores del aire, por efecto de las bajas temperaturas, con lo cual aumenta su densidad y sólo se modifica al incrementarse la temperatura.

Lluvia: precipitación de partículas de agua líquida en forma de gotas de diámetro mayor de 0.5 mm.

Lluvia Ácida: la lluvia ácida se forma cuando la humedad en el aire se combina con los óxidos de nitrógeno y el dióxido de azufre emitidos por fábricas, centrales eléctricas y vehículos que queman carbón o productos derivados del petróleo. En interacción con el vapor de agua, estos gases forman ácido sulfúrico y ácidos nítricos. Finalmente, estas sustancias químicas caen a la tierra acompañando a las precipitaciones, constituyendo la lluvia ácida. Cuando estas sustancias químicas caen sobre la superficie en las diversas formas de precipitación, afectan negativamente a los lagos, los árboles y otras entidades biológicas que están en contacto habitual con las precipitaciones. Estas reacciones se producen sobre las zonas donde se queman combustibles fósiles, como aquellas en que hay centrales termoeléctricas o complejos industriales.

Material Particulado: es una mezcla de partículas líquidas, sólidas o líquidas y sólidas suspendidas en el aire que difieren en tamaño, composición y origen. El tamaño de las partículas suspendidas en la atmósfera varía en más de cuatro órdenes de magnitud, desde unos pocos nanómetros a decenas de micrómetros. Al Material Particulado conviene clasificarlo por sus propiedades aerodinámicas (Diámetro Aerodinámico), dado que éstas son un factor decisivo para el transporte y la remoción de las partículas desde el aire. También, son determinantes para la deposición en el sistema respiratorio y están asociadas con la composición química y las fuentes de esas partículas, cuando se habla del tamaño de una partícula se está hablando de su diámetro aerodinámico.

Monitoreo del aire: sistema de observaciones ambientales sobre los cambios del ambiente natural y de la atmósfera debidos a la actividad del hombre. Sirve como



fuerza fundamental de información uni o multidisciplinaria sobre el estado actual del entorno. En un sentido amplio, este término designa las mediciones repetidas destinadas a seguir la evolución de un parámetro durante un intervalo de tiempo. En un sentido más restrictivo se aplica a la medida regular de niveles de contaminantes respecto de una norma, o para evaluar la eficacia de un sistema de regulación y de control.

Monóxido de carbono (CO): Es peligroso para las personas ya que llega a la hemoglobina de la sangre. Es inodoro y no tiene color. Se diluye fácilmente en el aire.

Normas de Calidad del aire ambiente: calidad del aire ambiente especificada, que posee un estado legal, frecuentemente definida en forma estadística por la fijación de un límite en la concentración de un contaminante del aire respecto de un período promedio especificado.

OMS: siglas de Organización Mundial de la Salud.

Óxido de nitrógeno: Formado por la combinación de oxígeno y nitrógeno. El proceso de formación más habitual de estos compuestos inorgánicos es la combustión a altas temperaturas.

Partes por millón (ppm): unidad de concentración que corresponde al fraccionamiento de una unidad en un millón.

Partículas: polvo emitido por determinadas actividades humanas (partículas primarias) o que se forma en la atmósfera (partículas secundarias) a partir de varios gases, como el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y el amoníaco (NH<sub>3</sub>). Las partículas se distinguen, entre otras características, por su tamaño: partículas gruesas (PM<sub>10</sub>) que miden entre 2,5 y 10 µm de diámetro, mientras que las partículas finas (PM<sub>2.5</sub>) miden menos de 2,5 µm de diámetro.

Polución: contaminación del ambiente por sustancias tóxicas o nocivas, pero no por elementos o agentes infecciosos.

Rango de tolerancia: límite fijado por encima del cual se produce destrucción.

Receptores: son los seres vivos y los materiales que sufren los efectos de las sustancias contaminantes que existen en el aire.

Sedimentación: depósito por gravedad de las partículas gruesas (de diámetro superior a  $50\mu$ ).

Smog: la palabra smog proviene de la unión de las palabras inglesas *smoke* y *fog*. Cuando existen en el aire partículas higroscópicas invisibles en suspensión, de poca densidad, pero en concentración suficiente se pueden formar neblinas y nieblas. Si estas partículas consisten en humos, hollines y otros productos, se forman núcleos de condensación mayor y visible, dando lugar a que esas nieblas se unan con el efecto visible del humo, provocando la aparición del smog, más o menos espeso y de efectos muy negativos para la salud, sobre todo si existe presencia de  $SO_2$ .

Temperatura: medida del movimiento molecular o el grado de calor de una sustancia. Se mide usando una escala arbitraria a partir de cero absoluto, donde las moléculas térmicamente dejan de moverse.

Umbral: concentración mínima de una sustancia dada o condición necesaria para producir un efecto fisiológica o psicológicamente medible. Valor a partir del cual empiezan a ser perceptibles los efectos de un agente.

Valor guía: supone un objetivo a medio o largo plazo, en materia de salud o de protección de los ecosistemas; se inscribe en un proceso de ordenación de la actividad industrial según el cual podrían autorizarse nuevos focos emisores en una zona en la que los valores de emisión no superaran los valores guía.

Valor de alerta: es una concentración de contaminante tal que deben tomarse medidas inmediatas para controlar la situación.

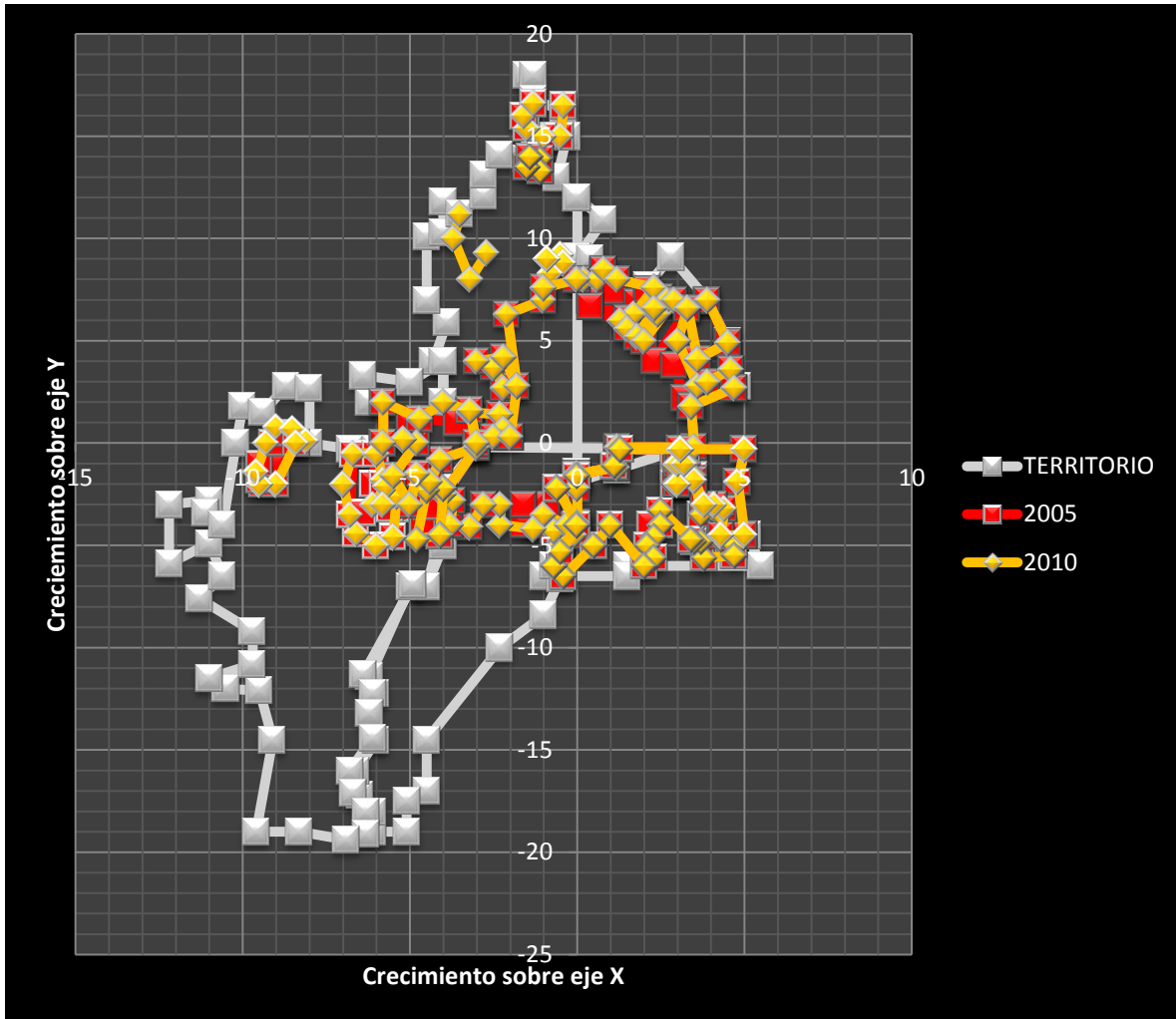
Valor límite: es un valor máximo de concentración de un contaminante, tanto a corto como a largo plazo, que debe ser atacado en todo el territorio de los estados

miembros; en caso de verse superado ese valor, deben analizarse las causas y proponerse y llevarse a cabo las medidas necesarias para evitar que ocurra de nuevo; se establecen valores límite anuales o diarios en función del objeto pasivo (la salud humana o la protección de los ecosistemas).

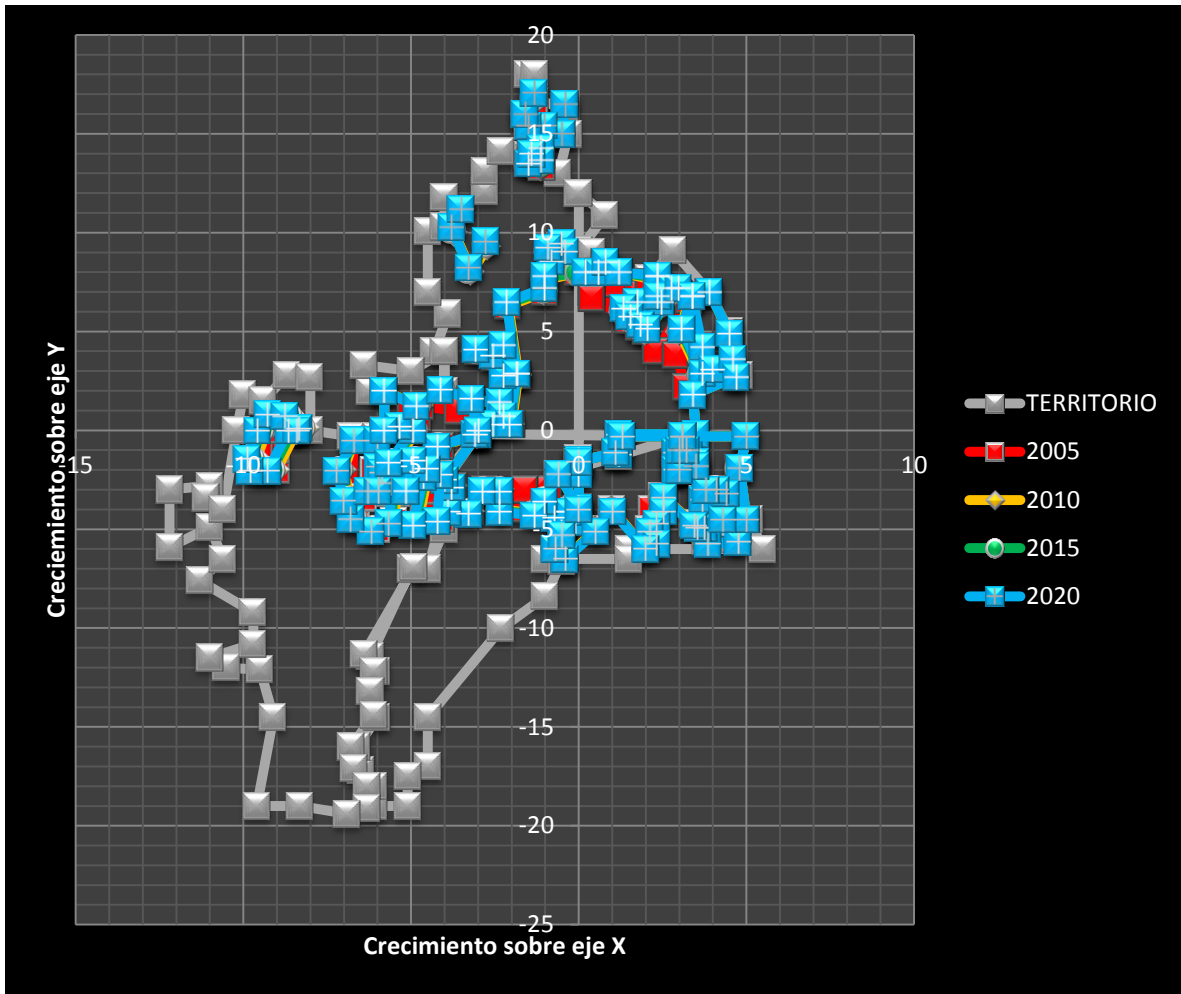
VOC: siglas -en inglés- de compuesto orgánico volátil. Se refiere a todo aquel compuesto orgánico presente en la atmósfera en fase de vapor o como partícula. Pueden ser desde un hidrocarburo simple, hasta algún tipo de compuesto halogenado.

## Anexo II

Mapa Área Urbana para los municipios estudiados, años 2005 y 2010.

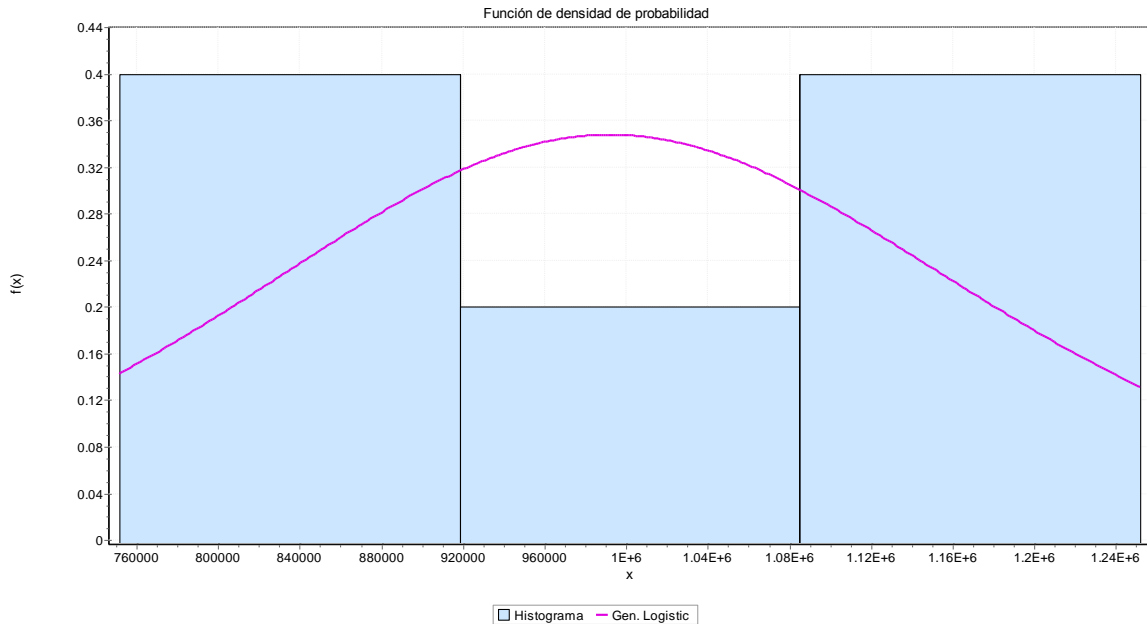


**Mapa Área Urbana para los municipios estudiados, años 2005 y 2010,  
además de las simulaciones para 2015 y 2020.**



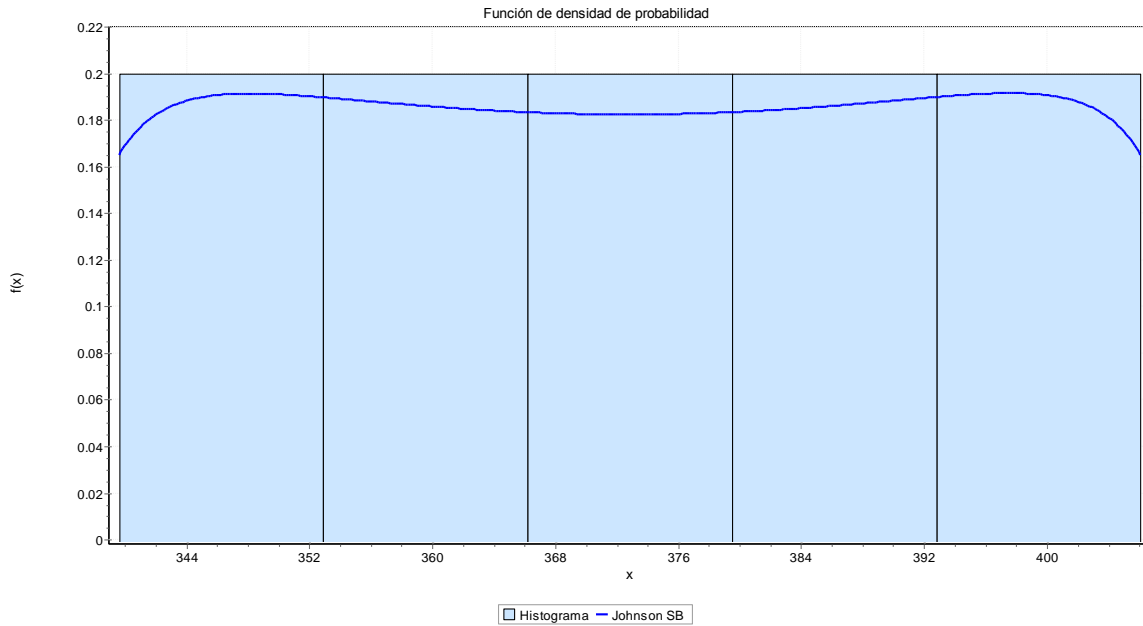
## Anexo III

### a) Población



Gen. Logistic [#24]					
Kolmogorov-Smirnov					
Tamaño de la muestra	5				
Estadística	0.11154				
Valor P	1.0				
Rango	1				
$\alpha$	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	0.44698	0.50945	0.56328	0.62718	0.66853
Rechazar?	No	No	No	No	No
Anderson-Darling					
Tamaño de la muestra	5				
Estadística	0.13333				
Rango	5				
$\alpha$	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	1.3749	1.9286	2.5018	3.2892	3.9074
Rechazar?	No	No	No	No	No

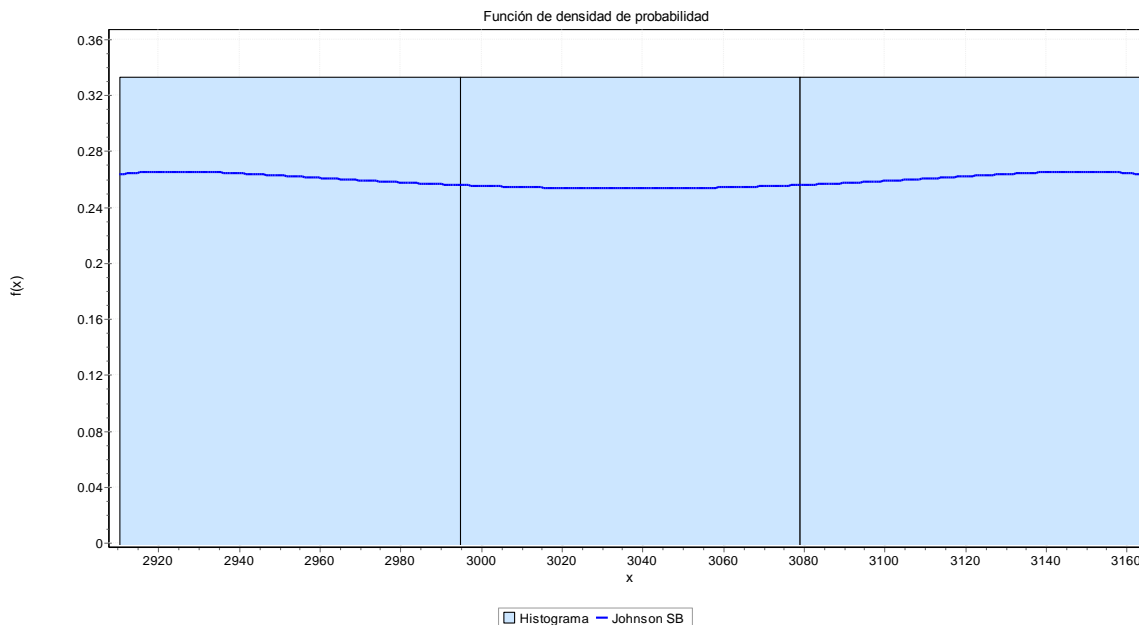
b) Mancha Urbana



<b>Johnson SB [#31]</b>					
<b>Kolmogorov-Smirnov</b>					
Tamaño de la muestra	20				
Estadística	0.0355				
Valor P	1.0				
Rango	1				
$\alpha$	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	0.23156	0.26473	0.29408	0.32866	0.35241
Rechazar?	No	No	No	No	No
<b>Anderson-Darling</b>					
Tamaño de la muestra	20				
Estadística	0.05588				
Rango	1				
$\alpha$	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	1.3749	1.9286	2.5018	3.2892	3.9074
Rechazar?	No	No	No	No	No
<b>Chi-cuadrado</b>					

Grados de libertad Estadística	1				
Valor P	0.00413				
Rango	2				
$\alpha$	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	1.6424	2.7055	3.8415	5.4119	6.6349
Rechazar?	No	No	No	No	No

c) Densidad Poblacional



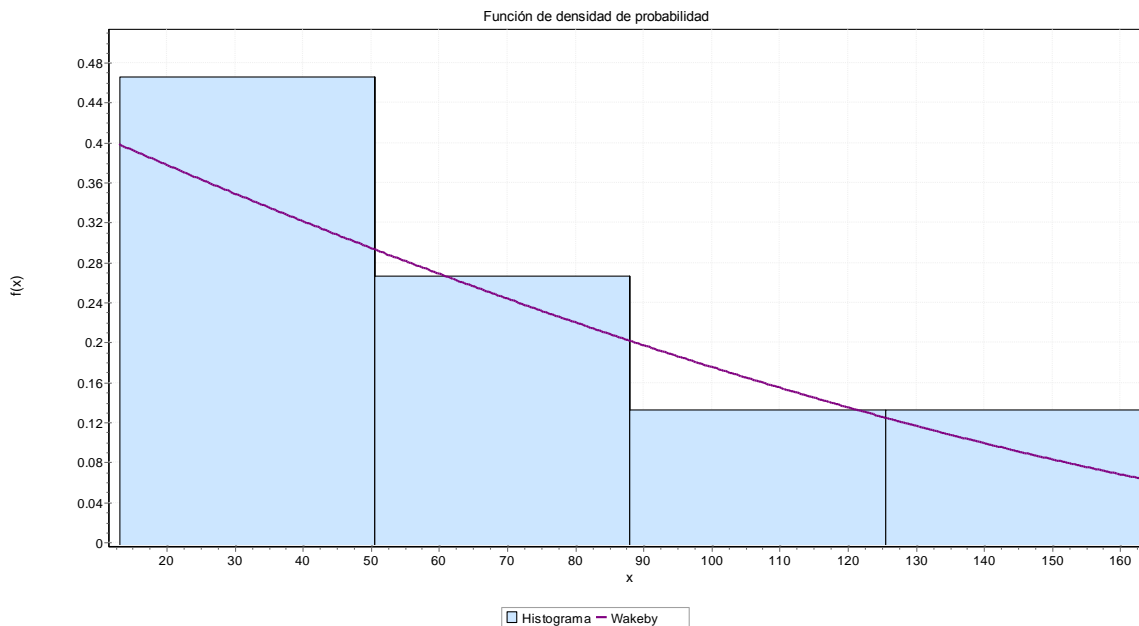
<b>Johnson SB [#31]</b>					
Kolmogorov-Smirnov					
Tamaño de la muestra	6				
Estadística	0.11161				
Valor P	0.99998				
Rango	1				
$\alpha$	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	0.41037	0.46799	0.51926	0.57741	0.61661
Rechazar?	No	No	No	No	No
Anderson-Darling					



Tamaño de la muestra	6				
Estadística	0.13546				
Rango	1				
$\alpha$	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	1.3749	1.9286	2.5018	3.2892	3.9074
Rechazar?	No	No	No	No	No

d) Contaminantes

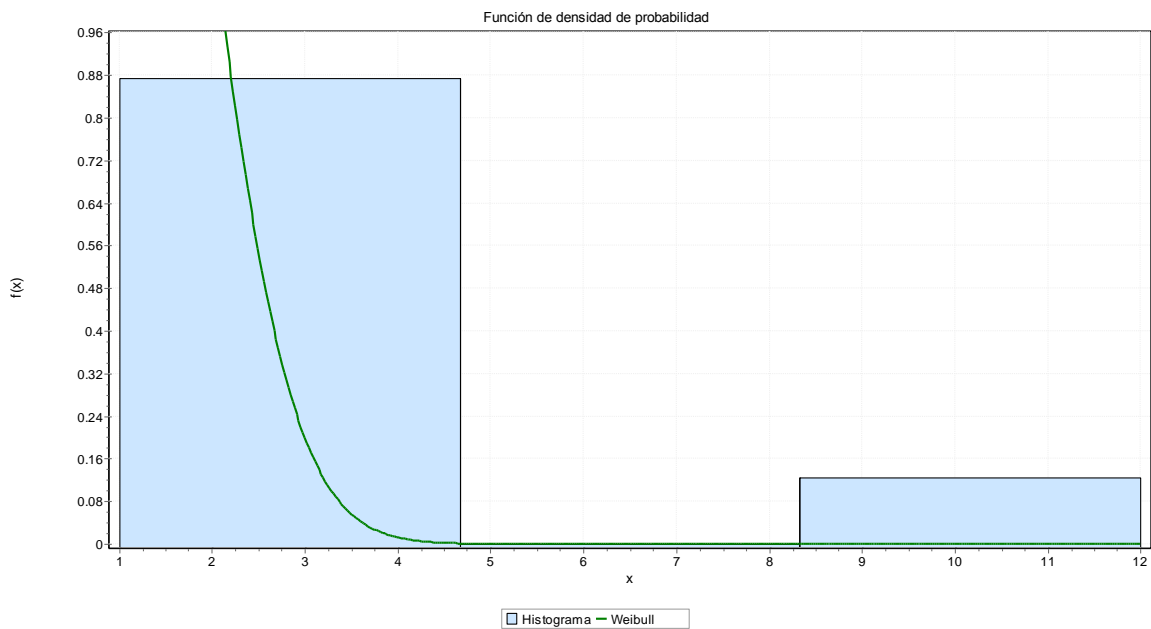
1- Ozono



<b>Wakeby [#62]</b>					
Kolmogorov-Smirnov					
Tamaño de la muestra	15				
Estadística	0.10487				
Valor P	0.99041				
Rango	1				
$\alpha$	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	0.26588	0.30397	0.3376	0.37713	0.4042
Rechazar?	No	No	No	No	No

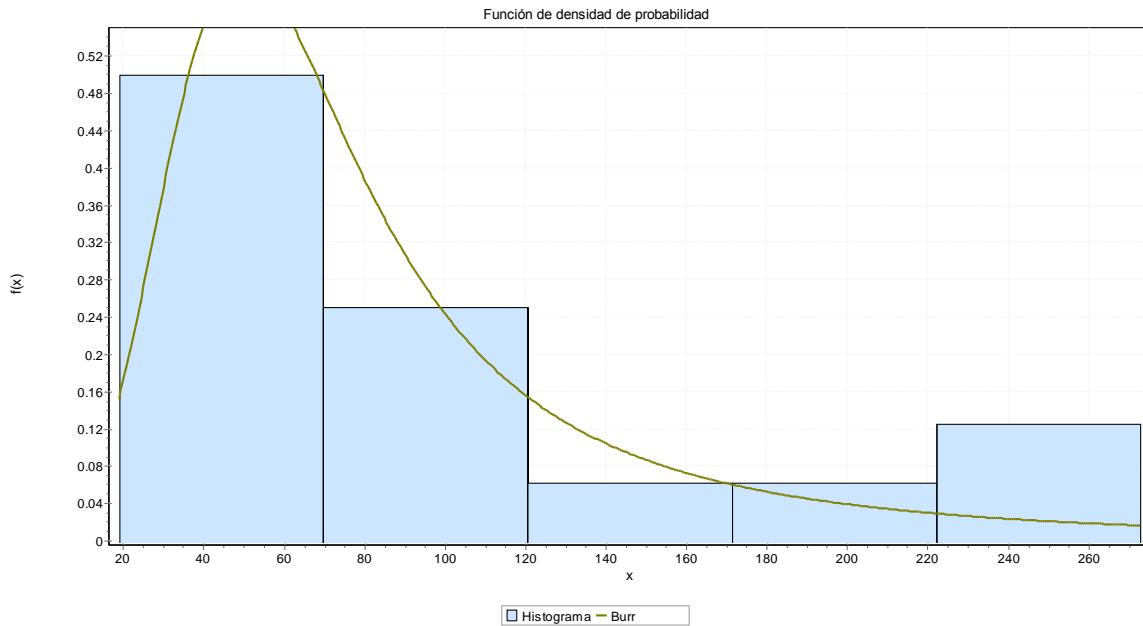
Anderson-Darling					
Tamaño de la muestra	15				
Estadística	0.20744				
Rango	2				
$\alpha$	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	1.3749	1.9286	2.5018	3.2892	3.9074
Rechazar?	No	No	No	No	No
Chi-cuadrado					
Grados de libertad	1				
Estadística	0.22624				
Valor P	0.63433				
Rango	30				
$\alpha$	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	1.6424	2.7055	3.8415	5.4119	6.6349
Rechazar?	No	No	No	No	No

## 2- Dióxido de Nitrógeno



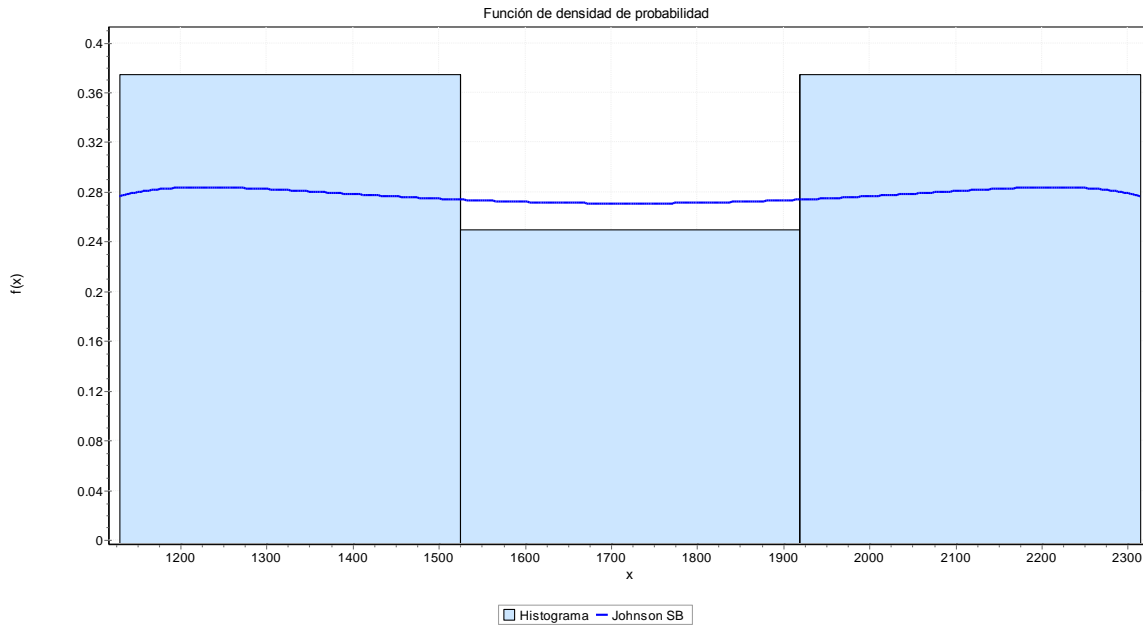
Weibull [#57]					
Kolmogorov-Smirnov					
Tamaño de la muestra	8				
Estadística	0.33951				
Valor P	0.25138				
Rango	1				
$\alpha$	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	0.35831	0.40962	0.45427	0.50654	0.54179
Rechazar?	No	No	No	No	No
Anderson-Darling					
Tamaño de la muestra	8				
Estadística	2.5963				
Rango	30				
$\alpha$	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	1.3749	1.9286	2.5018	3.2892	3.9074
Rechazar?	Sí	Sí	Sí	No	No

### 3- Dióxido de Azufre



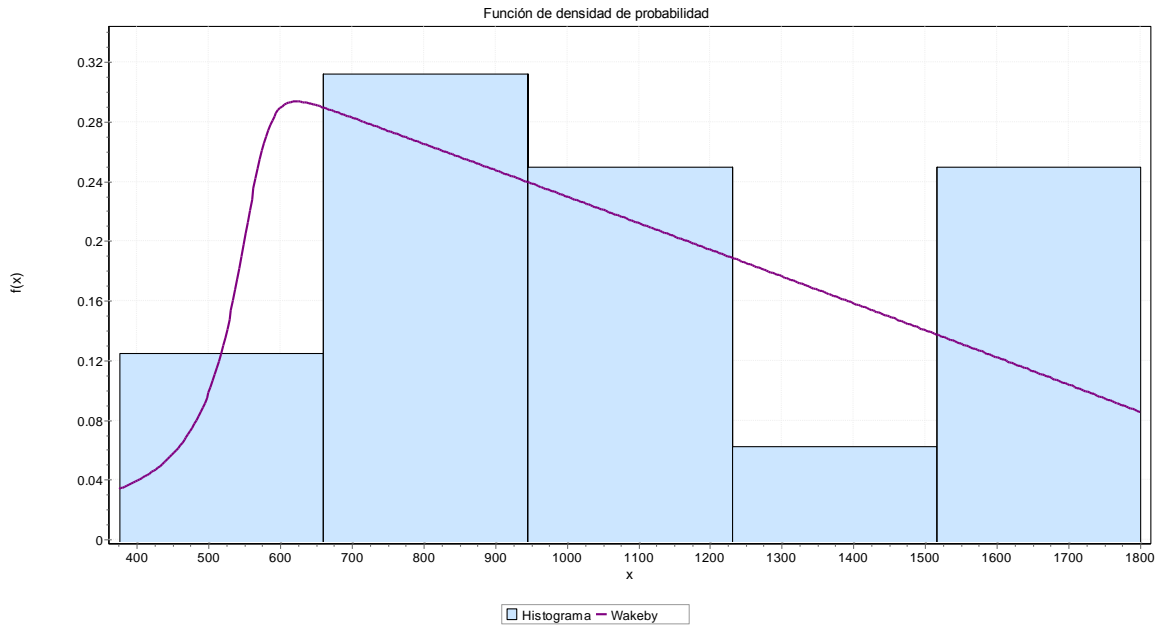
<b>Burr [#2]</b>					
<b>Kolmogorov-Smirnov</b>					
Tamaño de la muestra	16				
Estadística	0.11701				
Valor P	0.96248				
Rango	1				
$\alpha$	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	0.25778	0.29472	0.32733	0.36571	0.39201
Rechazar?	No	No	No	No	No
<b>Anderson-Darling</b>					
Tamaño de la muestra	16				
Estadística	0.27128				
Rango	1				
$\alpha$	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	1.3749	1.9286	2.5018	3.2892	3.9074
Rechazar?	No	No	No	No	No
<b>Chi-cuadrado</b>					
Grados de libertad	1				
Estadística	0.0185				
Valor P	0.8918				
Rango	6				
$\alpha$	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	1.6424	2.7055	3.8415	5.4119	6.6349
Rechazar?	No	No	No	No	No

#### 4- PM<sub>2.5</sub>



<b>Johnson SB [#31]</b>					
<b>Kolmogorov-Smirnov</b>					
Tamaño de la muestra	8				
Estadística	0.08448				
Valor P	1.0				
Rango	1				
$\alpha$	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	0.35831	0.40962	0.45427	0.50654	0.54179
Rechazar?	No	No	No	No	No
<b>Anderson-Darling</b>					
Tamaño de la muestra	8				
Estadística	0.11031				
Rango	1				
$\alpha$	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	1.3749	1.9286	2.5018	3.2892	3.9074
Rechazar?	No	No	No	No	No

## 5- PM<sub>10</sub>

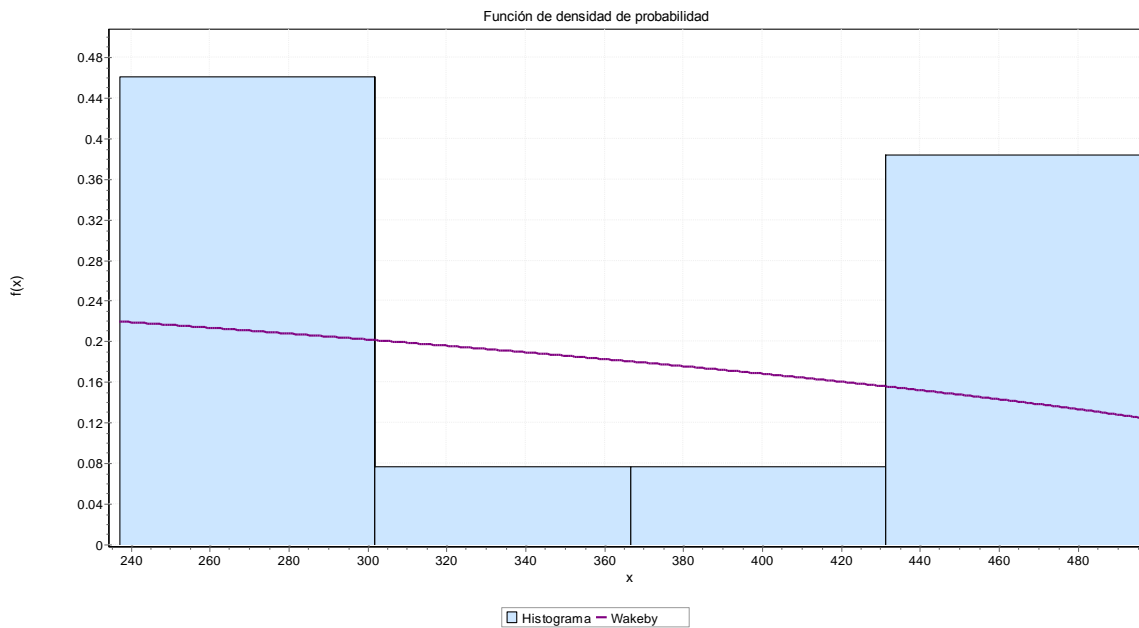


<b>Wakeby [#62]</b>					
<b>Kolmogorov-Smirnov</b>					
Tamaño de la muestra	16				
Estadística	0.0919				
Valor P	0.99728				
Rango	1				
$\alpha$	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	0.25778	0.29472	0.32733	0.36571	0.39201
Rechazar?	No	No	No	No	No
<b>Anderson-Darling</b>					
Tamaño de la muestra	16				
Estadística	0.20349				
Rango	1				
$\alpha$	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	1.3749	1.9286	2.5018	3.2892	3.9074
Rechazar?	No	No	No	No	No
<b>Chi-cuadrado</b>					
Grados de libertad	1				
Estadística	0.00995				
Valor P	0.92054				

Rango	12				
$\alpha$	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	1.6424	2.7055	3.8415	5.4119	6.6349
Rechazar?	No	No	No	No	No

e) Enfermedades

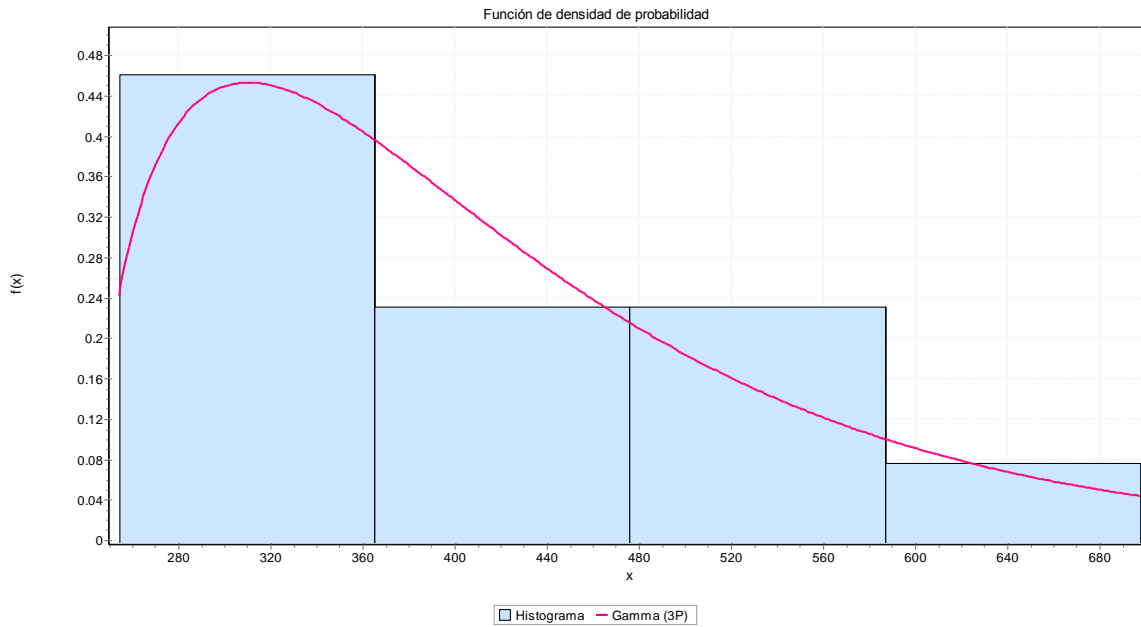
### 1- Cardiovasculares



<b>Wakeby [#61]</b>					
Kolmogorov-Smirnov					
Tamaño de la muestra	13				
Estadística	0.1622				
Valor P	0.83147				
Rango	1				
$\alpha$	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	0.2847	0.32549	0.36143	0.40362	0.43247
Rechazar?	No	No	No	No	No
Anderson-Darling					
Tamaño de la muestra	13				
Estadística	0.65104				

Rango	2				
$\alpha$	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	1.3749	1.9286	2.5018	3.2892	3.9074
Rechazar?	No	No	No	No	No
Chi-cuadrado					
Grados de libertad	1				
Estadística	0.1357				
Valor P	0.71259				
Rango	9				
$\alpha$	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	1.6424	2.7055	3.8415	5.4119	6.6349
Rechazar?	No	No	No	No	No

## 2- Respiratorias

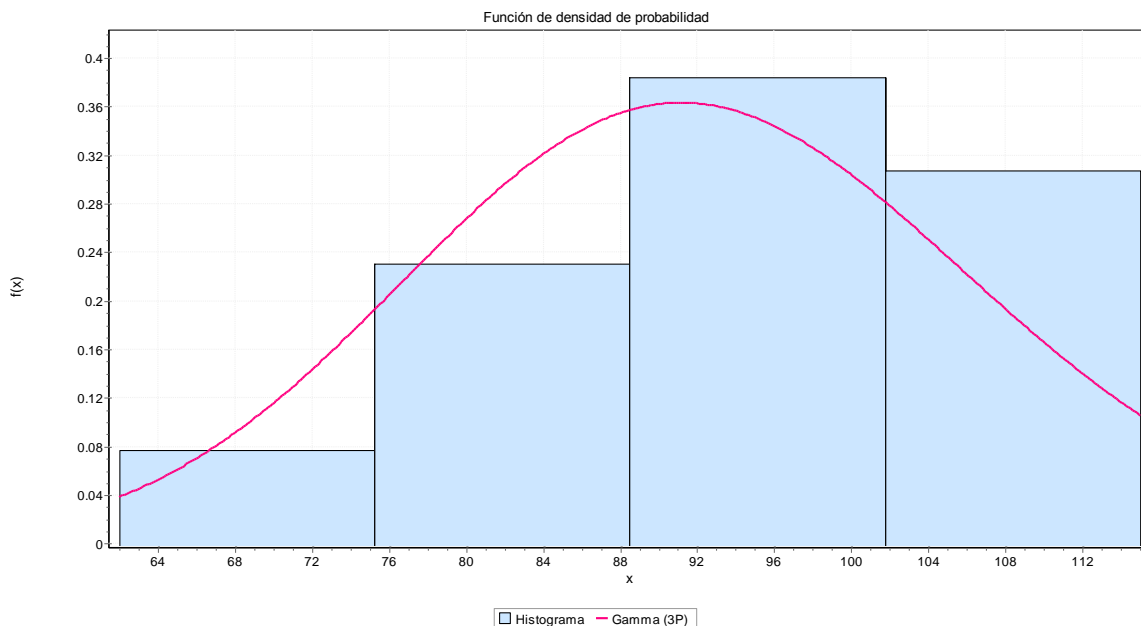


<b>Gamma (3P) [#20]</b>	
Kolmogorov-Smirnov	
Tamaño de la muestra	13
Estadística	0.1116
Valor P	0.99098
Rango	1



$\alpha$	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	0.2847	0.32549	0.36143	0.40362	0.43247
Rechazar?	No	No	No	No	No
Anderson-Darling					
Tamaño de la muestra	13				
Estadística	0.24325				
Rango	5				
$\alpha$	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	1.3749	1.9286	2.5018	3.2892	3.9074
Rechazar?	No	No	No	No	No
Chi-cuadrado					
Grados de libertad	1				
Estadística	0.0223				
Valor P	0.88129				
Rango	5				
$\alpha$	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	1.6424	2.7055	3.8415	5.4119	6.6349
Rechazar?	No	No	No	No	No

### 3- Sistema Nervioso



<b>Gamma (3P) [#20]</b>					
Kolmogorov-Smirnov					
Tamaño de la muestra	13				
Estadística	0.14085				
Valor P	0.92705				
Rango	1				
$\alpha$	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	0.2847	0.32549	0.36143	0.40362	0.43247
Rechazar?	No	No	No	No	No
Anderson-Darling					
Tamaño de la muestra	13				
Estadística	0.29493				
Rango	15				
$\alpha$	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	1.3749	1.9286	2.5018	3.2892	3.9074
Rechazar?	No	No	No	No	No
Chi-cuadrado					
Grados de libertad	1				
Estadística	1.0227				
Valor P	0.31188				
Rango	47				
$\alpha$	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
Valor crítico	1.6424	2.7055	3.8415	5.4119	6.6349
Rechazar?	No	No	No	No	No

## Anexo IV

### a) Pruebas de parámetros y del modelo variable Población.

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.996250203
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.9869
R <sup>2</sup> ajustado	0.993428407
Error típico	19045.55722
Observaciones	5

ANÁLISIS DE  
VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	1.4429E+11 108819974	1.44286E+11	397.77 3023	0.000275 49
Residuos	3	9	362733249.7		
Total	4	1.4537E+11			

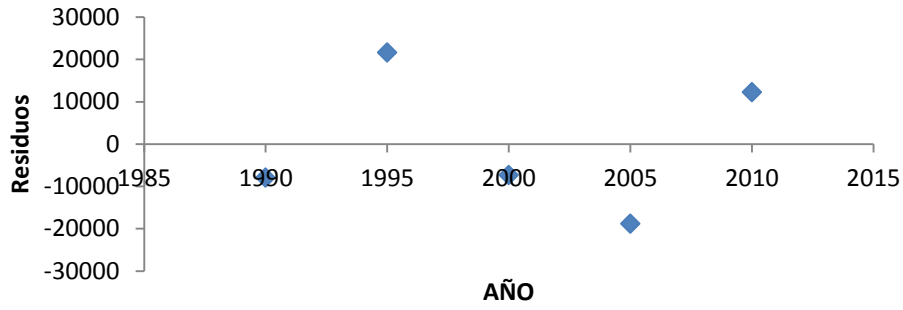
	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	6.00E-16	2409108.66	-19.52920894	0.0002 9331	54714845 .4	39381127. 4	547148 45.4	3938112 7.4
AÑO	0.02440	1204.5468	19.94424787	0.0002 7549	20190.37 45	27857.185 5	20190.3 745	27857.1 855

Análisis de los  
residuales

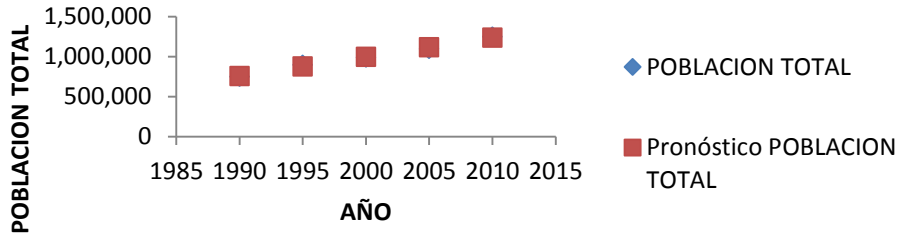
Resultados de datos de  
probabilidad

<i>Observación</i>	<i>Pronóstico POBLACION TOTAL</i>	<i>Residuos</i>	<i>Residuos estándares</i>	<i>Percentil</i>	<i>POBLACION N TOTAL</i>
1	759335.8	-7915.8	-0.479921822	10	751420
2	879454.7	21668.3	1.313713082	30	901123
3	999573.6	-7294.6	-0.442259497	50	992279
4	1119692.5	-18752.5	-1.136932965	70	1100940
5	1239811.4	12294.6	0.745401202	90	1252106

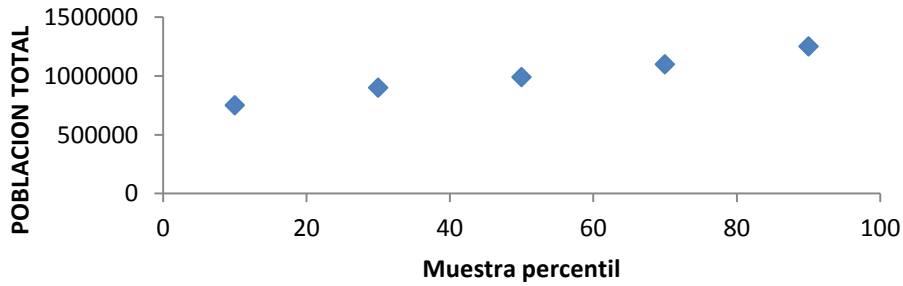
### Población Gráfico de los residuales



### Población Curva de regresión ajustada



### Gráfico de probabilidad normal



b) Pruebas de parámetros y del modelo variable Mancha Urbana.

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.99999923
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.99999845
R <sup>2</sup> ajustado	0.99999836
Error típico	0.02649752
Observaciones	20

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	8157.5974	8157.5974	6.6	1161854
Residuos	18	0.01263813	0.00070212		
Total	19	8157.61004			

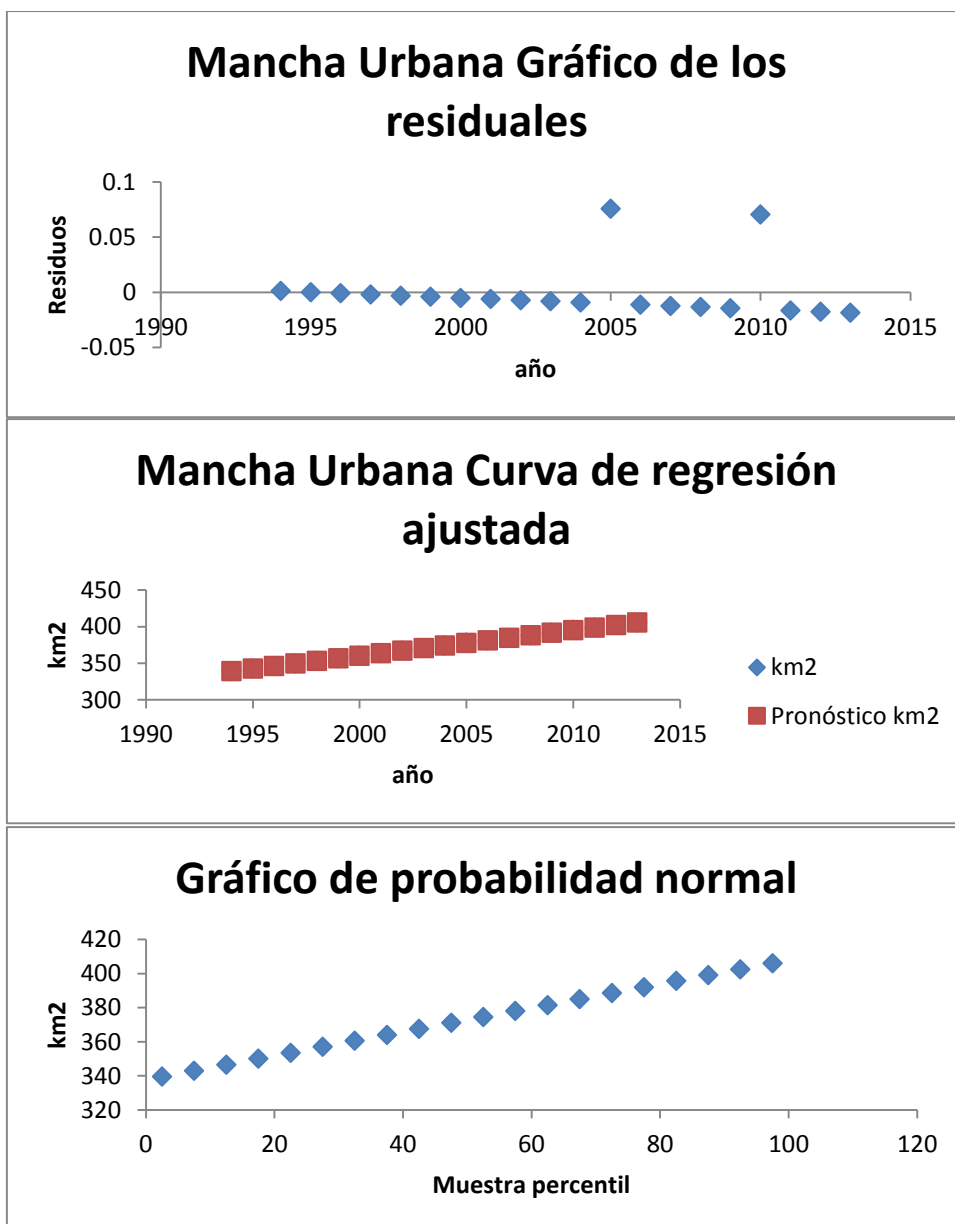
	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	-6644.26868	2.0586644	-3227.46567	2.5481E-53	6648.5937	6639.94	6648.593	6639.943
año	3.50243683	0.00102753	3408.59892	9.5358E-54	3.5002780	3.50459	3.500278	3.504595

Análisis de los residuales

Resultados de datos de probabilidad

<i>Observación</i>	<i>Pronóstico km2</i>	<i>Residuos</i>	<i>Residuos estándares</i>	<i>Percentil</i>	<i>km2</i>
1	339.590363	0.00123693	0.04795999	2.5	339.591
2	343.0928	0.00020009	0.00775836	7.5	343.093
3	346.595237	-0.00083674	-0.03244327	12.5	346.594
4	350.097674	-0.00187357	-0.0726449	17.5	350.095
5	353.60011	-0.0029104	-0.11284653	22.5	353.597
6	357.102547	-0.00394723	-0.15304816	27.5	357.098
7	360.604984	-0.00498407	-0.19324979	32.5	360.6
8	364.107421	-0.0060209	-0.23345142	37.5	364.101
9	367.609858	-0.00705773	-0.27365305	42.5	367.602
10	371.112295	-0.00809456	-0.31385468	47.5	371.104
11	374.614731	-0.00913139	-0.35405631	52.5	374.605
12	378.117168	0.07587053	2.94176811	57.5	378.193

						381.608
13	381.619605	-0.01120506	-0.43445957	62.5	4	385.109
14	385.122042	-0.01224189	-0.4746612	67.5	8	388.611
15	388.624479	-0.01327872	-0.51486283	72.5	2	392.112
16	392.126916	-0.01431555	-0.55506446	77.5	6	395.700
17	395.629352	0.0708684	2.74781773	82.5	221	399.115
18	399.131789	-0.01638922	-0.63546772	87.5	4	402.616
19	402.634226	-0.01742605	-0.67566935	92.5	8	406.118
20	406.136663	-0.01846288	-0.71587098	97.5	2	



c) Pruebas de parámetros y del modelo variable Densidad.

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	1
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	1
R <sup>2</sup> ajustado	65535
Error típico	0
Observaciones	2

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	32061.7549	32061.7549	#iNU M!	#iNU M!
Residuos	0	0	65535		
Total	1	32061.7549			

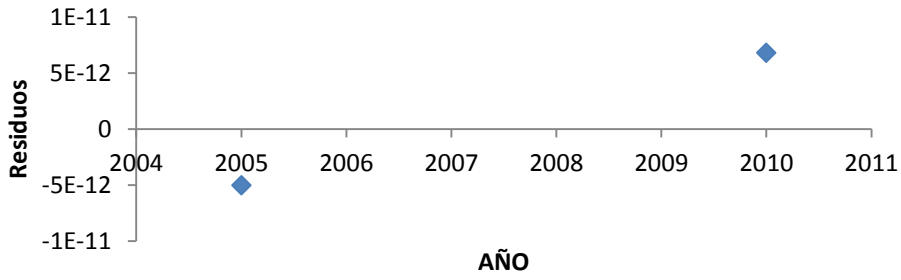
	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	-98632.6542	0	65535	#iNU M!	98632.6542	-98632.6542	98632.6542	-98632.6542
AÑO	50.6452405	0	65535	#iNU M!	50.6452405	50.6452405	50.6452405	50.6452405

Análisis de los residuales

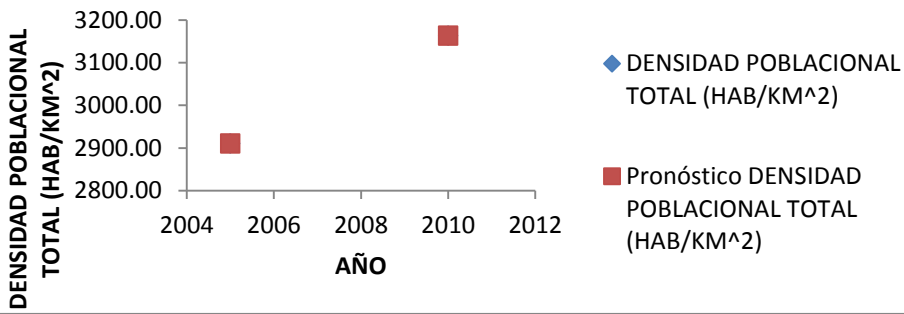
Resultados de datos de probabilidad

Observación	Pronóstico DENSIDAD POBLACIONAL TOTAL (HAB/KM <sup>2</sup> )	Residuos	Residuos estándares	Percentil	DENSIDAD POBLACIONAL TOTAL (HAB/KM <sup>2</sup> )
1	2911.05305	5.0022E-12	0.5913636	25	2911.05305
2	3164.27926	6.8212E-12	0.806405	75	3164.27926

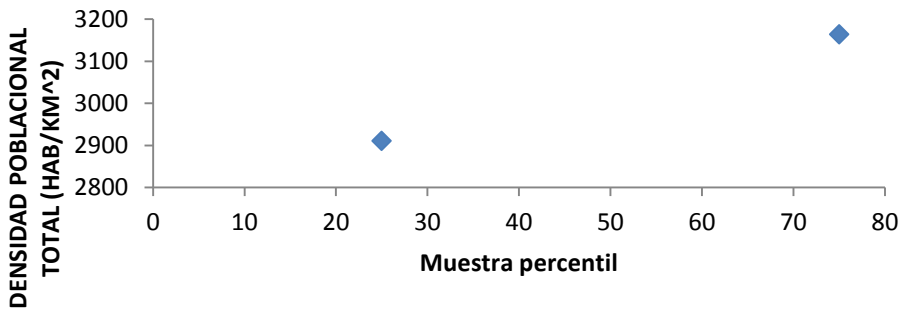
### Densidad Gráfico de los residuales



### Densidad Curva de regresión ajustada



### Gráfico de probabilidad normal





d) Pruebas de parámetros y del modelo variable Contaminantes.

1-Ozono:

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.21065817
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.04437687
R <sup>2</sup> ajustado	-0.02913261
Error típico	47.2629477
Observaciones	15

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	1348.51237	1348.51237	0.60368 909	0.4510812 3
Residuos	13	29039.221	2233.78623		
Total	14	30387.7333			

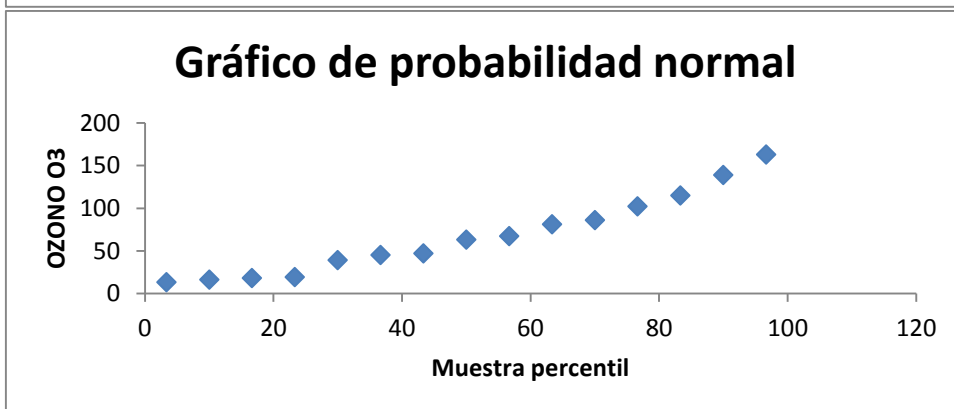
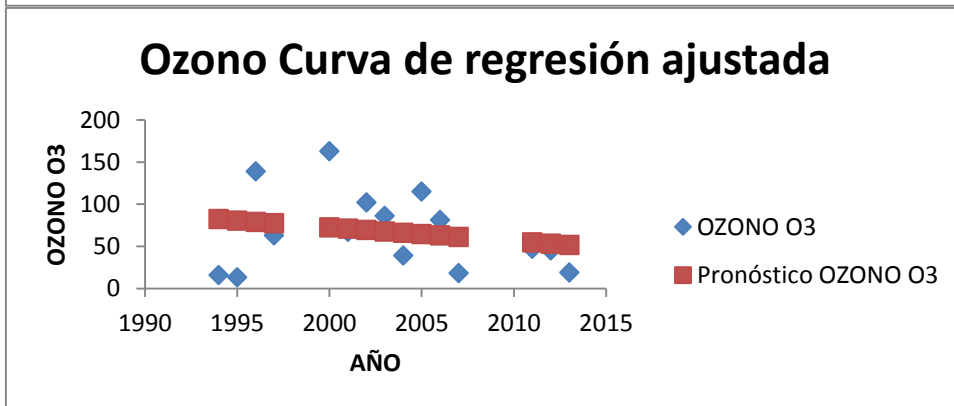
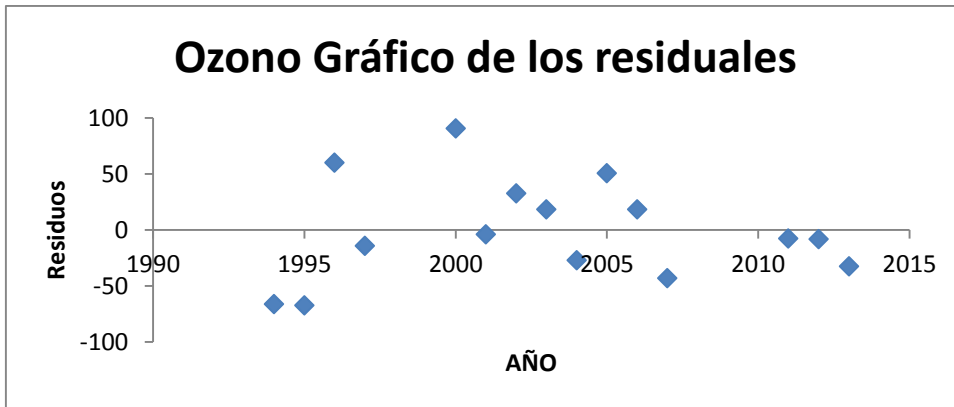
	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	3296.52621	4155.87328	0.79322106	0.44188 661	5681.6921 7	12274.7 446	5681.692 17	12274.74 46
AÑO	-1.61202467	2.0747464	-0.77697432	0.45108 123	6.0942417 7	2.87019 243	6.094241 77	2.870192 43

Análisis de los residuales

Resultados de datos de probabilidad

<i>Observación</i>	<i>Pronóstico OZONO O3</i>	<i>Residuos</i>	<i>Residuos estándares</i>	<i>Percentil</i>	<i>OZONO O3</i>
				3.3333333	
1	82.1490236	-66.1490236	-1.45242921	3	13
2	80.536999	-67.536999	-1.48290489	10	16
				16.6666666	
3	78.9249743	60.0750257	1.31906289	7	18
				23.3333333	
4	77.3129496	-14.3129496	-0.31426838	3	19
				30	39
5	72.4768756	90.5231244	1.98760954	36.6666666	
				7	45
6	70.864851	-3.86485098	-0.08486025	43.3333333	
				3	47
7	69.2528263	32.7471737	0.71902727	50	63
				56.6666666	
8	67.6408016	18.3591984	0.40311156	7	67
				63.3333333	
9	66.028777	-27.028777	-0.59346885	3	81
10	64.4167523	50.5832477	1.11065262		

11	62.8047276	18.1952724	0.39951225	70	86
				76.666666	
12	61.192703	-43.192703	-0.94837898	7	102
				83.333333	
13	54.7446043	-7.74460432	-0.1700477	3	115
14	53.1325797	-8.13257965	-0.17856645	90	139
				96.666666	
15	51.520555	-32.520555	-0.71405142	7	163



## 2-Dióxido de Nitrógeno:

### Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.48557616
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.23578421
R <sup>2</sup> ajustado	0.10841491
Error típico	3.60218646
Observaciones	8

### ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	Valor crítico de F	
				F	F
Regresión	1	24.020516	24.0205161	1.8511	0.22253
Residuos	6	77.854483	12.9757473	8556	548
Total	7	101.875			

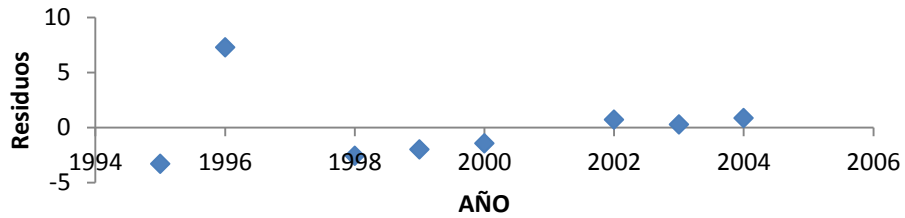
	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Prueba bilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	1142.8511	838.04338	1.36371353	0.2216	907.767	3193.46939	907.76	3193.46
AÑO	-0.57021997	0.4190997	-1.3605828	0.2225	1.59572	0.45528028	1.5957	0.45528

### Análisis de los residuales

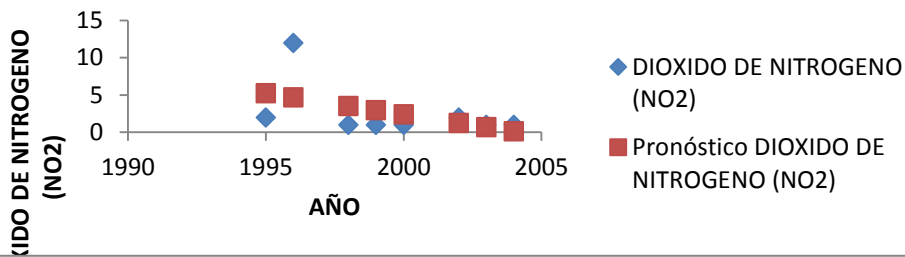
### Resultados de datos de probabilidad

Observación	Pronóstico DIOXIDO DE NITROGENO (NO2)	Residuos	Residuos estándares	Percentil	DIOXIDO DE NITROGENO (NO2)
1	5.26226734	3.2622673	-0.97819796	6.25	1
2	4.69204738	7.3079526	2.1913055	18.75	1
3	3.55160745	2.5516074	-0.76510504	31.25	1
4	2.98138748	1.9813874	-0.59412335	43.75	1
5	2.41116751	1.4111675	-0.42314165	56.25	1
6	1.27072758	0.7292724	0.21867392	68.75	2
7	0.70050761	0.2994923	0.08980344	81.25	2

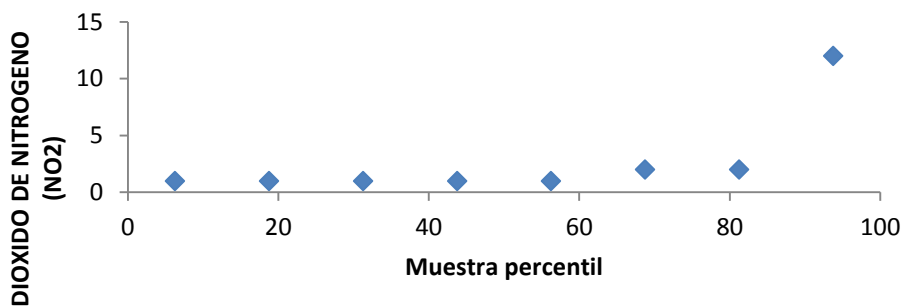
### Dióxido de Nitrógeno Gráfico de los residuales



### Dióxido de Nitrógeno Curva de regresión ajustada



### Gráfico de probabilidad normal



### 3-Dióxido de Azufre:

#### Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.16669426
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.02778698
R <sup>2</sup> ajustado	-0.03702722
Error típico	76.4514401
Observaciones	17

#### ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	2505.7773	2505.77736	0.4287	0.522533
Residuos	15	87672.340	5844.82269		
Total	16	90178.117			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	4605.38975	6894.0660	0.66802229	0.5142	10088.96	19299.7436	10088.9	19299.7
AÑO	-2.25327771	3.4413524	-0.65476517	0.5225	9.588346	5.08179135	9.58834	5.08179

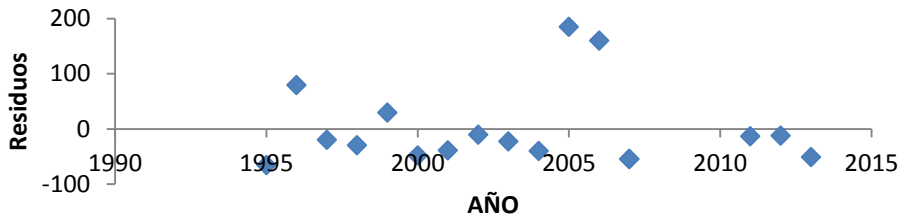
#### Análisis de los residuales

#### Resultados de datos de probabilidad

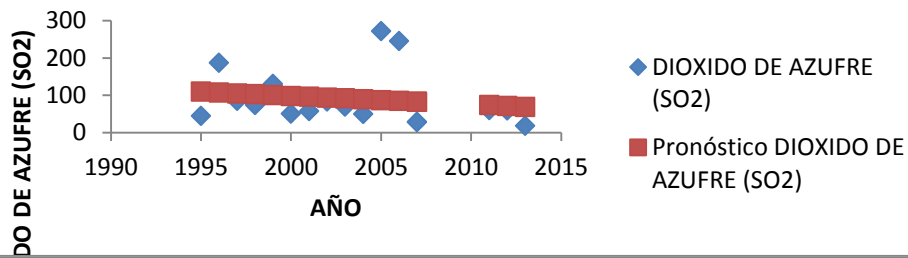
<i>Observación</i>	<i>Pronóstico DIOXIDO DE AZUFRE (SO<sub>2</sub>)</i>	<i>Residuos</i>	<i>Residuos estándares</i>	<i>DIOXIDO DE AZUFRE (SO<sub>2</sub>) Percentil</i>
		65.100715		2.941176
1	110.100715	1	-0.87945668	47
		80.152562		8.823529
2	107.847437	6	1.08279466	41
		19.594159		14.70588
3	105.59416	7	-0.26470085	24
		29.912395		20.58823
4	103.340882	-29.340882	-0.39637099	53
		29.912395		26.47058
5	101.087604	7	0.40409166	82
		47.834326		32.35294
6	98.8343266	6	-0.64620209	12
		38.581048		38.23529
7	96.5810489	9	-0.52119798	41
		10.327771		44.11764
8	94.3277712	2	-0.13951962	71
				60

			-		
		22.074493			
9	92.0744934	4	-0.2982081	50	61
		-			
		39.821215		55.88235	
10	89.8212157	7	-0.5379516	29	70
		185.43206		61.76470	
11	87.567938	2	2.50503339	59	74
				67.64705	
12	85.3146603	160.68534	2.17072569	88	84
		-			
		54.061382		73.52941	
13	83.0613826	6	-0.73032445	18	86
		-			
		54.061382		79.41176	
14	83.0613826	6	-0.73032445	47	131
		-			
		13.048271		85.29411	
15	74.0482718	8	-0.17627133	76	188
				91.17647	
16	71.794994	-11.794994	-0.15934059	06	246
		-			
		50.541716		97.05882	
17	69.5417163	3	-0.68277668	35	273

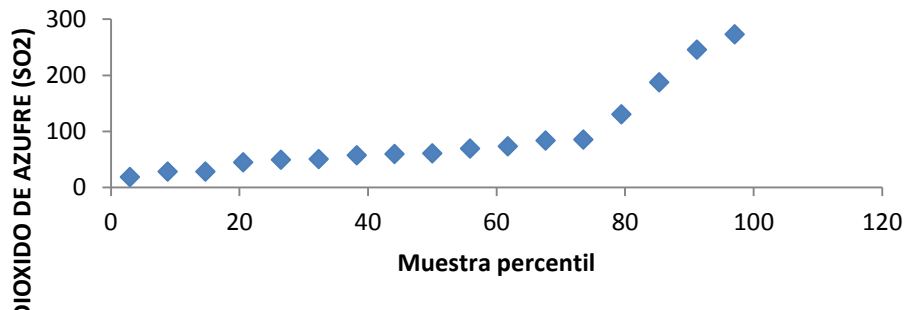
### Dióxido de Azufre Gráfico de los residuales



### Dióxido de Azufre Curva de regresión ajustada



### Gráfico de probabilidad normal



## 4-PM2.5:

### Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.9574437
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.9166985
R <sup>2</sup> ajustado	0.8333971
Error típico	72.259947
Observaciones	3

### ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	57460.5	57460.5	11.004	0.186392
Residuos	1	5221.5	5221.5	5964	75
Total	2	62682			

	Coefficiente	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	342332	102804.152	3.32994332	0.1857	963918.604	1648582.6	963918.604	1648582.6
AÑO	-169.5	51.0954988	-3.31731765	0.1863	818.729869	479.729869	818.729869	479.729869

### Análisis de los residuales

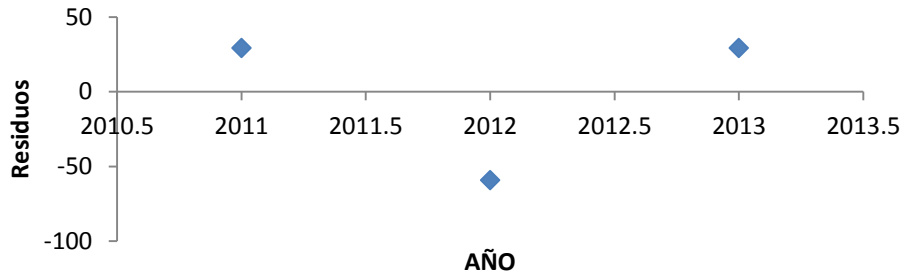
Observación	Pronóstico PM2.5	Residuos	Residuos estándares
1	1467.5	29.5	0.57735027
2	1298	-59	-1.15470054
3	1128.5	29.5	0.57735027

### Resultados de datos de probabilidad

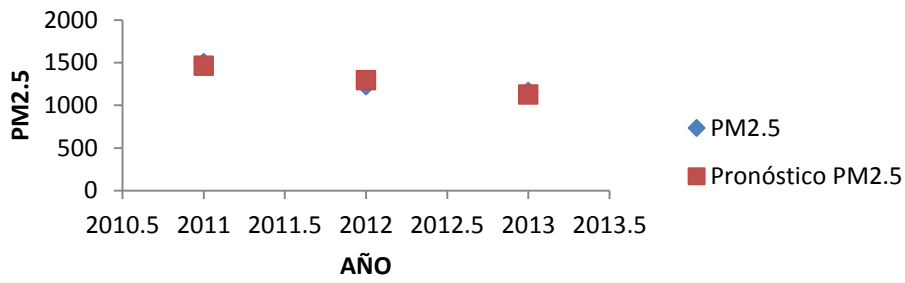
Percentil	PM2.5
16.66666	
67	1158
50	1239
83.33333	
33	1497



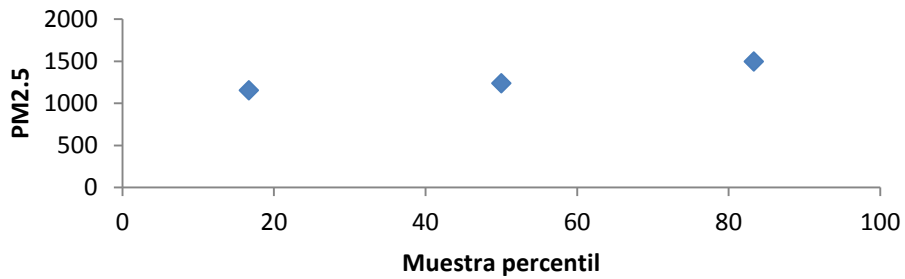
### PM2.5 Gráfico de los residuales



### PM2.5 Curva de regresión ajustada



### Gráfico de probabilidad normal



## 5-PM10:

### Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.2198454
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.048332
	-
	0.0196442
R <sup>2</sup> ajustado	8
	423.55579
Error típico	1
Observaciones	16

### ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	127555.324	127555.324	0.7110 1268	0.413283 07
Residuos	14	2511593.11	179399.508		
Total	15	2639148.44			

	<i>Coefficiente s</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>	
Intercepción	37769.952	9	46067.5355	-0.81988221	0.4260 2216	136574.9 9	61035. 0839	136574. 99	61035.0 839
AÑO	19.369117	6	22.9705379	0.84321568	0.4132 8307	29.89778 63	68.636 0216	29.8977 863	68.6360 216

### Análisis de los residuales

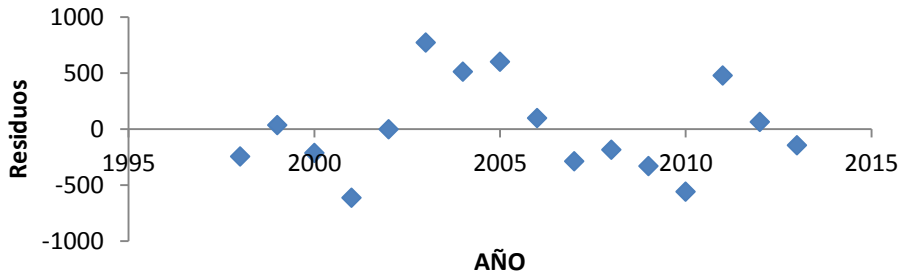
### Resultados de datos de probabilidad

<i>Observación</i>	<i>Pronóstico PM10</i>	<i>Residuos</i>	<i>Residuos estándares</i>	<i>Percentil</i>	<i>PM10</i>
	929.54411	-			
1	8	244.544118	-0.59762425	3.125	375
	948.91323				
2	5	36.0867647	0.08818992	9.375	604
	968.28235	-			
3	3	212.282353	-0.51878198	15.625	685
	987.65147	-			
4	1	612.651471	-1.49721603	21.875	756
	1007.0205	-			
5	9	1.02058824	-0.00249414	28.125	813
	1026.3897				
6	1	774.610294	1.89301586	34.375	817
	1045.7588				
7	2	514.241176	1.256718	40.625	939

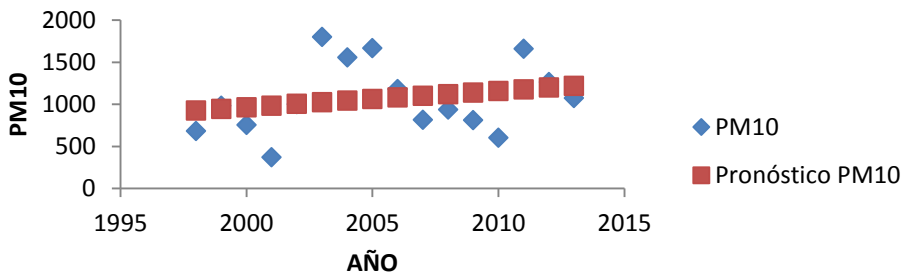
		1065.1279				
8	4	602.872059	1.47331681	46.875	985	
		1084.4970				
9	6	99.5029412	0.24316827	53.125	1006	
		1103.8661	-			
10	8	286.866176	-0.70105216	59.375	1076	
		1123.2352	-			
11	9	184.235294	-0.45023973	65.625	1184	
		1142.6044	-			
12	1	329.604412	-0.80549714	71.875	1266	
		1161.9735	-			
13	3	557.973529	-1.36359244	78.125	1560	
		1181.3426				
14	5	480.657353	1.17464485	84.375	1662	
		1200.7117				
15	6	65.2882353	0.15955335	90.625	1668	
		1220.0808	-			
16	8	144.080882	-0.35210918	96.875	1801	

---

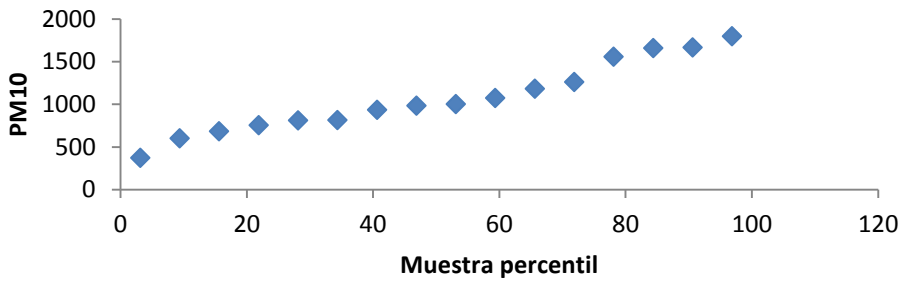
### PM10 Gráfico de los residuales



### PM10 Curva de regresión ajustada



### Gráfico de probabilidad normal



e) Pruebas de parámetros y del modelo variable Enfermedades.

1-Cardiovasculares:

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.90542489
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.81979423
R <sup>2</sup> ajustado	0.80341189
Error típico	47.3733814
Observaciones	13

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	112304.621	112304.621	50.0413315	2.0614E-05
Residuos	11	24686.6099	2244.23726		
Total	12	136991.231			

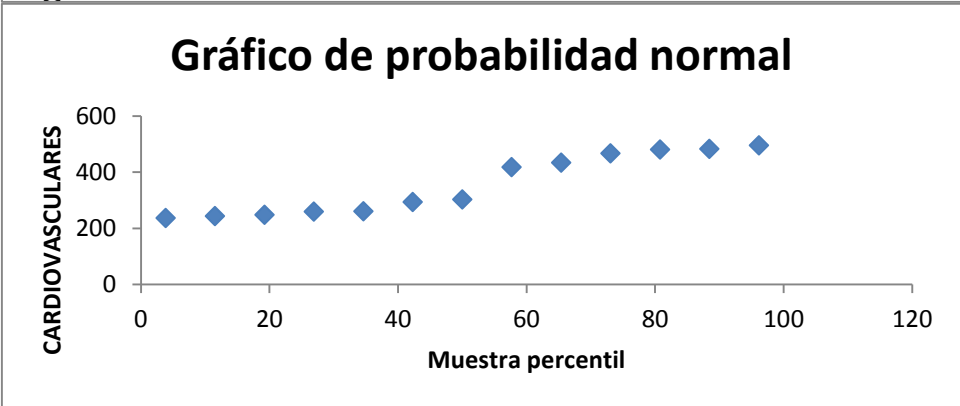
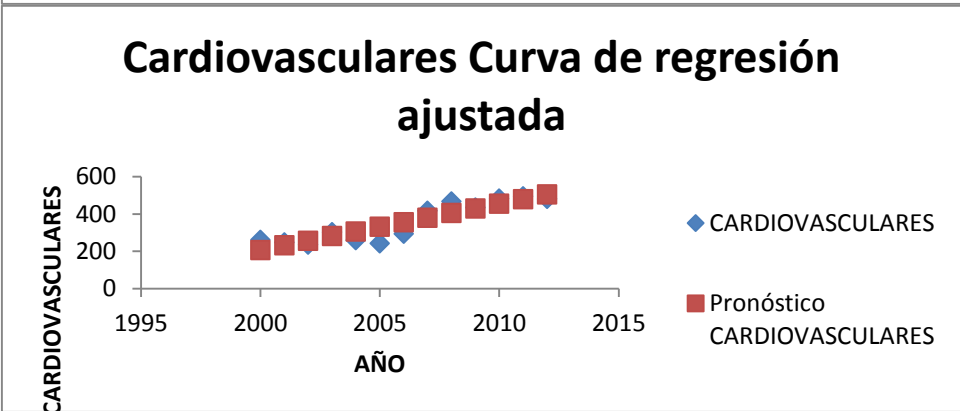
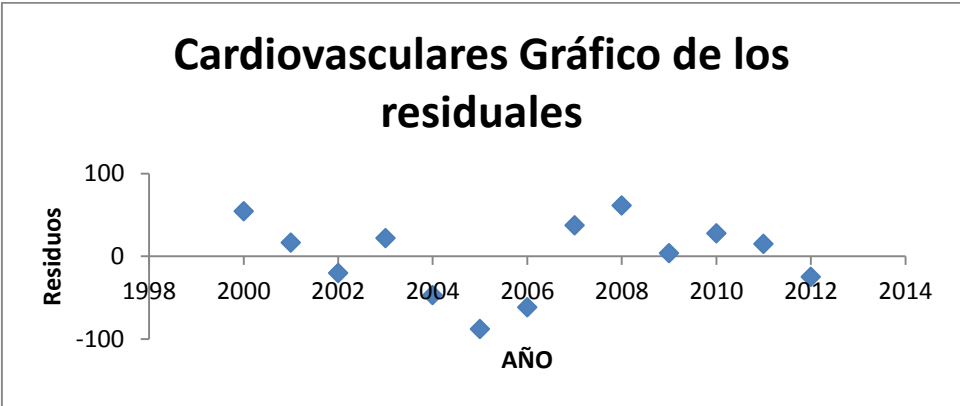
	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	-49473.9011	7044.17886	-7.02337378	2.2015E-05	64978.0342	-33969.768	64978.0342	33969.768
AÑO	24.8406593	3.51154866	7.07398979	2.0614E-05	17.11179	32.5695258	17.1117	32.5695

Análisis de los residuales

Resultados de datos de probabilidad

Observación	Pronóstico CARDIOVASCULARE		Residuos estándares	CARDIOVAS CULARES	
	S	Residuos		Percentil	
1	207.417582	54.5824176	1.20340736	3.846153	85
2	232.258242	16.7417582	0.36911438	11.53846	237
3	257.098901	20.0989011	-0.44313108	19.23076	15
4	281.93956	22.0604396	0.48637815	26.92307	244
5	306.78022	46.7802198	-1.03138819	34.61538	92
6	331.620879	87.6208791	-1.93182376	42.30769	249
7	356.461538	61.4615385	-1.35507497	50	260
8	381.302198	37.6978022	0.83114334	57.69230	69
9	406.142857	61.8571429	1.36379707	65.38461	46
				23	262
				54	295
				77	304
				85	419
				92	435

10	430.983516	4.01648352	0.08855353	73.07692	468
11	455.824176	28.1758242	0.62120726	80.76923	481
12	480.664835	15.3351648	0.33810247	88.46153	484
13	505.505495	24.5054945	-0.54028557	96.15384	496



## 2-Respiratorias:

### Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.76562861
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.58618716
R <sup>2</sup> ajustado	0.54856782
Error típico	87.7876462
Observaciones	13

### ANÁLISIS DE VARIANZA

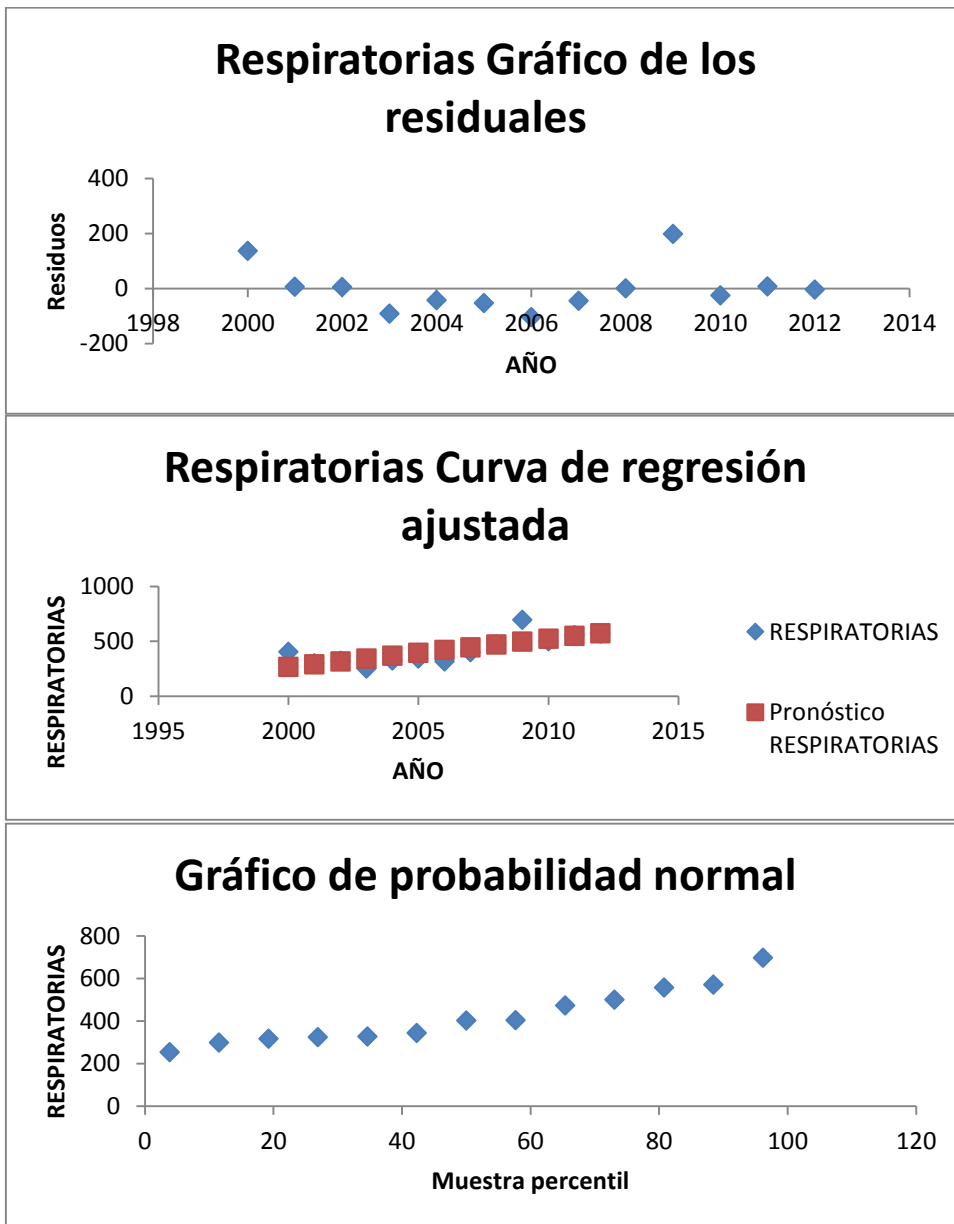
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	120085.852	120085.852	15.5820 658	0.0022828 1
Residuos	11	84773.3791	7706.67083		
Total	12	204859.231			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95.0%</i>	<i>Superior 95.0%</i>
Intercepción	-51106.2857	13053.5728	-3.91511861	0.00241 3	79837.005 7	22375.56 57	79837.0 057	22375.56 57
AÑO	25.6868132	6.50725328	3.94741254	0.00228 281	11.364445 3	40.00918 11	11.3644 453	40.00918 11

### Análisis de los residuales

### Resultados de datos de probabilidad

<i>Observación</i>	<i>Pronóstico RESPIRATORIAS</i>	<i>Residuos</i>	<i>Residuos estándares</i>	<i>Percentil RESPIRAT</i>	<i>ORIAS</i>
				3.8461538	
1	267.340659	137.659341	1.63782147	5	254
2	293.027473	6.97252747	0.08295663	11.538461	300
3	318.714286	6.28571429	0.07478517	5	318
4	344.401099	-90.4010989	-1.07555986	19.230769	325
5	370.087912	-42.0879121	-0.50074689	26.923076	328
6	395.774725	-51.7747253	-0.61599712	34.615384	344
7	421.461538	-103.461538	-1.23094829	42.307692	403
8	447.148352	-44.1483516	-0.52526126	50	405
9	472.835165	1.16483516	0.01385879	57.692307	474
10	498.521978	199.478022	2.37331798	65.384615	500
11	524.208791	-24.2087912	-0.28802752	73.076923	558
12	549.895604	8.1043956	0.09642319	80.769230	572
				88.461538	
				5	





### 3-Sistema Nervioso:

Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.1005851
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.01011736
R <sup>2</sup> ajustado	-0.07987197
Error típico	15.4747708
Observaciones	13

#### ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	26.9230769	26.9230769	0.1124 2845	0.743703 64
Residuos	11	2634.15385	239.468531		
Total	12	2661.07692			

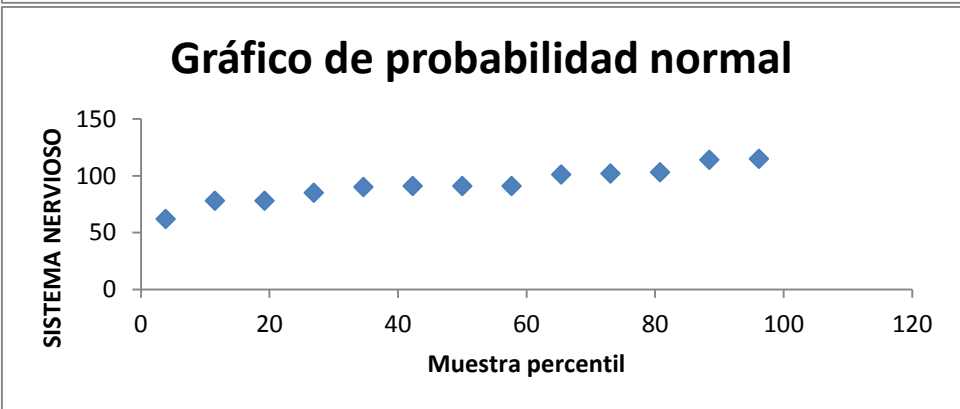
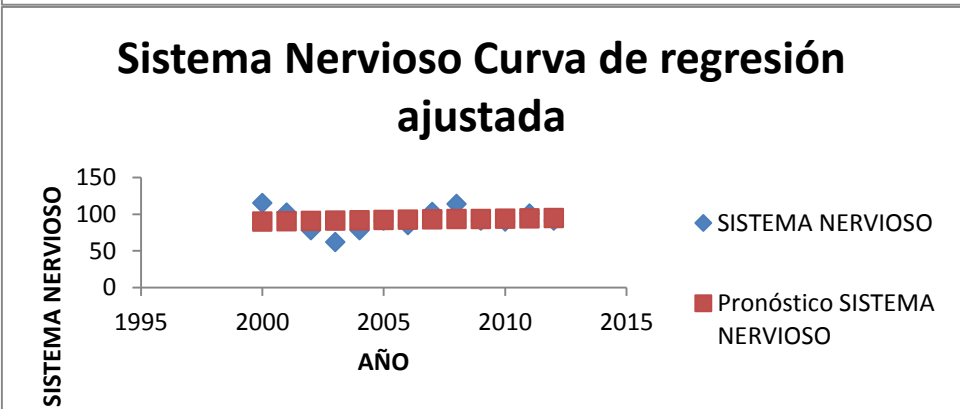
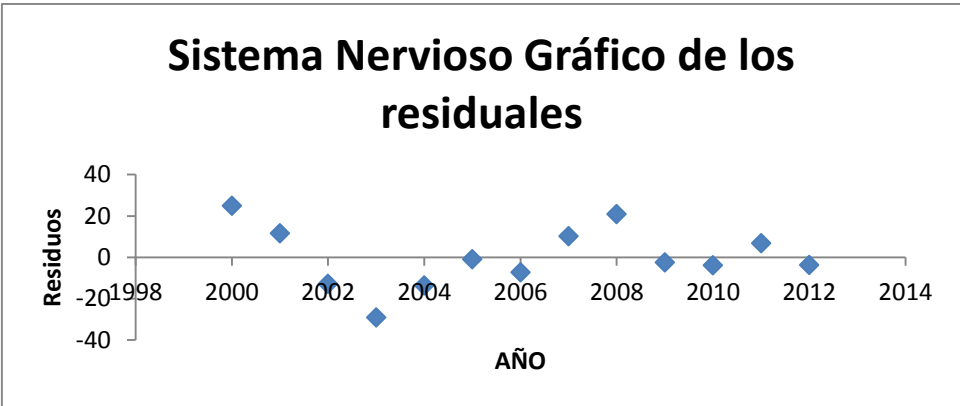
	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	-679.153846	2301.01906	-0.29515351	0.7733 7297	5743.662 65	4385.35495	5743.66 265	4385.35 495
AÑO	0.38461538	1.14706633	0.33530353	0.7437 0364	2.140060 58	2.90929135	2.14006 058	2.90929 135

Análisis de los residuales

Resultados de datos de probabilidad

Observación	Pronóstico SISTEMA NERVIOSO	Residuos	Residuos estándares	Percentil SISTEMA NERVIOSO
				3.846153
1	90.0769231	24.9230769	1.68217709	85
				11.53846
2	90.4615385	11.5384615	0.77878569	15
		-		19.23076
3	90.8461538	12.8461538	-0.86704807	92
		-		26.92307
4	91.2307692	29.2307692	-1.97292374	69
		-		34.61538
5	91.6153846	13.6153846	-0.91896711	46
		-		42.30769
6	92	-1	-0.06749476	23
		-		
7	92.3846154	7.38461538	-0.49842284	50
				57.69230
8	92.7692308	10.2307692	0.69052331	77
				65.38461
9	93.1538462	20.8461538	1.40700614	54
		-		73.07692
10	93.5384615	2.53846154	-0.17133285	31
				102

11	93.9230769	3.92307692	-0.26478713	80.7692308	103
12	94.3076923	6.69230769	0.4516957	88.4615385	114
13	94.6923077	3.69230769	-0.24921142	96.1538462	115



## BIBLIOGRAFÍA

Air quality guidelines for Europe. Copenhagen, World Health Organization Regional Office for Europe, 1987 (WHO Regional Publications, European Series, No. 23).

Air quality guidelines for Europe, 2nd ed. Copenhagen, World Health Organization Regional Office for Europe, 2000 (WHO Regional Publications, European Series, No. 91).

Cantú M. P. "Contaminación Ambiental". Editorial Diana, 1992.

COESPO (2012). "Zona Metropolitana del Valle de Toluca. Aspectos Sociodemográficos". Consejo Estatal de Población.

CONAPO (1998) Escenarios demográficos y urbanos de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, 1990-2010: síntesis. Consejo Nacional de Población.

Dirección General de Información (DGIS, 2000). Base de datos de egresos hospitalarios por morbilidad en Instituciones Públicas, 2000-2012. [En línea]: Sistema Nacional de Información en Salud (SINAIS). [México]. Secretaría de Salud.

GEM (2009) Gaceta del Gobierno del Estado de México, No. 99. Toluca de Lerdo, México, Jueves 19 de noviembre de 2009. Gobierno del Estado de México, México.

GEM (2005), Plan Regional de Desarrollo Urbano del Valle de Toluca, vol. 1, Junio de 2005, México.

INEGI, Censo de Población y Vivienda, 2010.

INEGI, II Conteo de Población y Vivienda, 2005.

INEGI, XII Censo General de Población y Vivienda, 2000.

INEGI, I Censo de Población y Vivienda, 1995.

INEGI, XI Censo General de Población y Vivienda, 1990.

INEGI, X Censo General de Población y Vivienda, 1980.

INEGI, IX Censo General de Población y Vivienda, 1970.

INEGI, VIII Censo General de Población y Vivienda, 1960.

López P.M. "La contaminación del aire". Salud Pública de México, 1982.

Moreno Ana Rosa. "Taller de Capacitación y Orientación". GEO Salud Poza Rica, 2012.

Palisade Monte Carlo Simulation products. Palisade Corporation. 2013

Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. (RAMA ZMVT). Secretaria del Medio Ambiente.

Rico Méndez Favio Gerardo. "Daños a la Salud por contaminación Atmosférica". UAEM, 2001.

Rodríguez Aragón Licesio (2011) "Simulación, Método de Montecarlo". Área de estadística e investigación operativa.

Rodríguez Arranz, Alfredo (2004) 2do diplomado a distancia. El Fenómeno Metropolitano: Estrategias y Alternativas de Gestión. Módulo 1. Delimitación y territorio del fenómeno metropolitano. UNAM.

SEDESOL et al. Delimitación de las Zonas Metropolitanas de México. México. Consejo Nacional de Población, Secretaria de Desarrollo Social, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 2005.

Tapia Carlos Alberto (2000), "Sistemas, Modelos y Simulación". Facultad de Ingeniería. Argentina.

Tarifa Enrique Eduardo (2000), "Teoría de Modelos y Simulación", Facultad de Ingeniería. Argentina.

Urban Agglomerations (2009). United Nations, Population Division. Department of Economic and Social Affairs.

<http://unimeta-simulacion-alejandra-meneses.blogspot.mx/2012/08/metodo-origen-el-de-montecarlo-un-no.html> (2014).

[http://centrodeartigos.com/articulos-utiles/article\\_100105.html](http://centrodeartigos.com/articulos-utiles/article_100105.html) (2014).